



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS**

**L**as autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

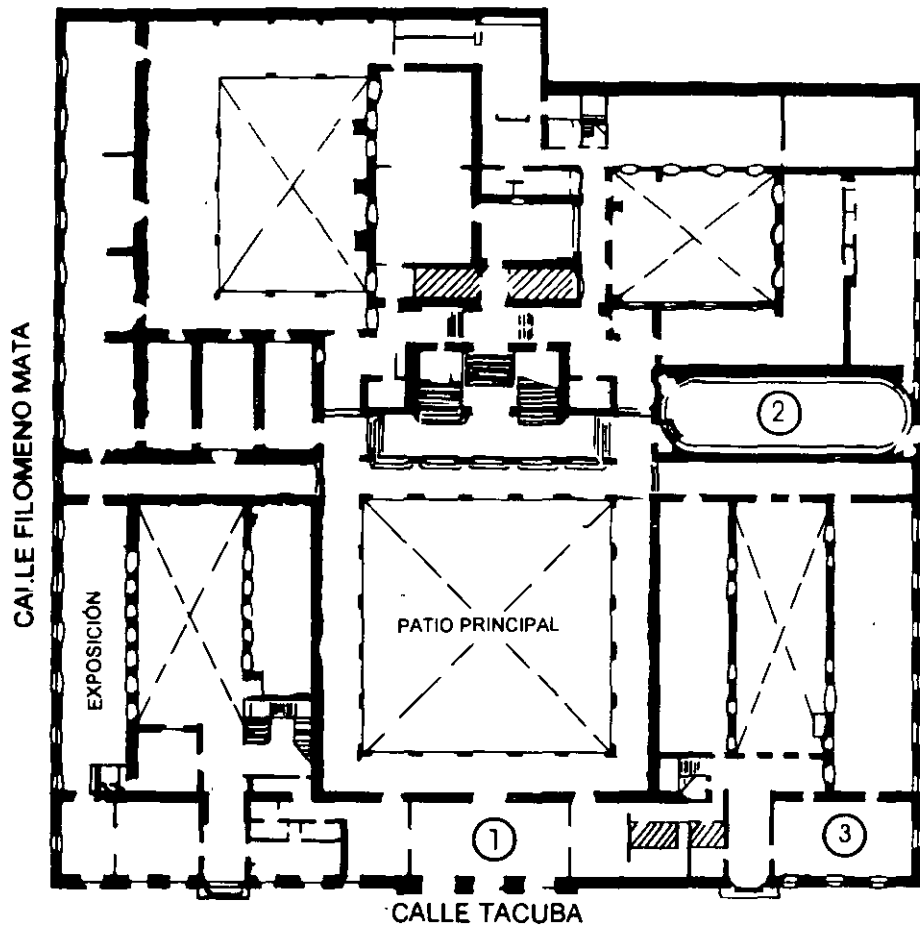
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

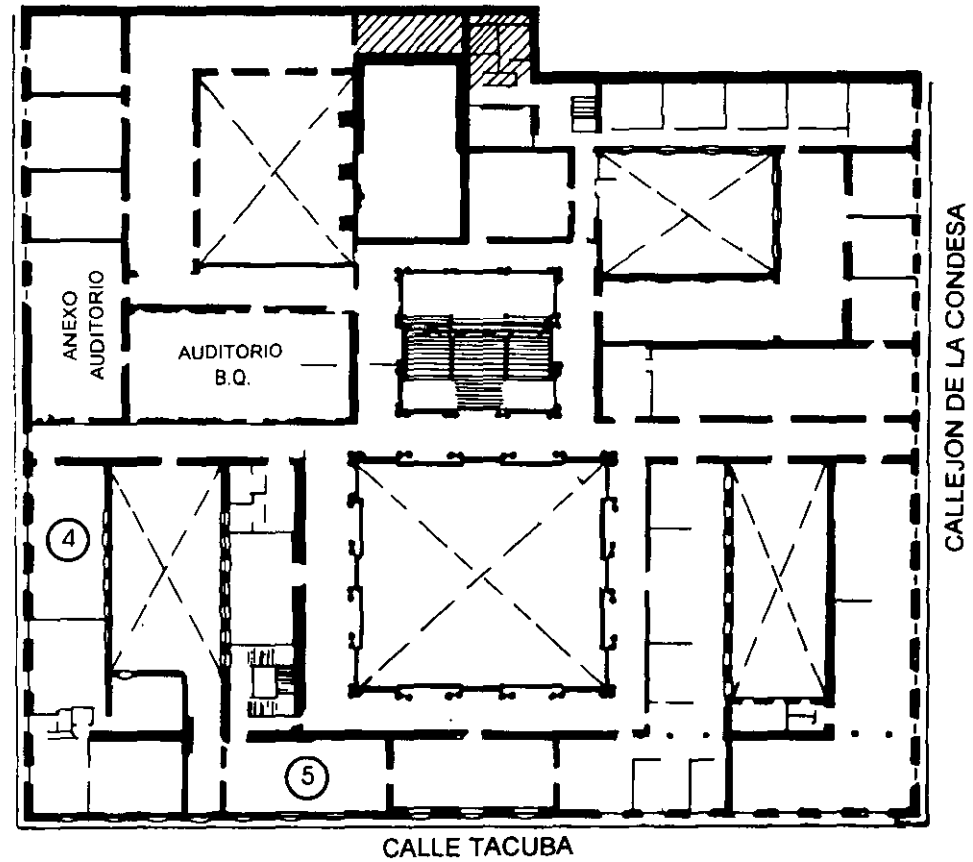
**Atentamente**

**División de Educación Continua.**

# PALACIO DE MINERIA

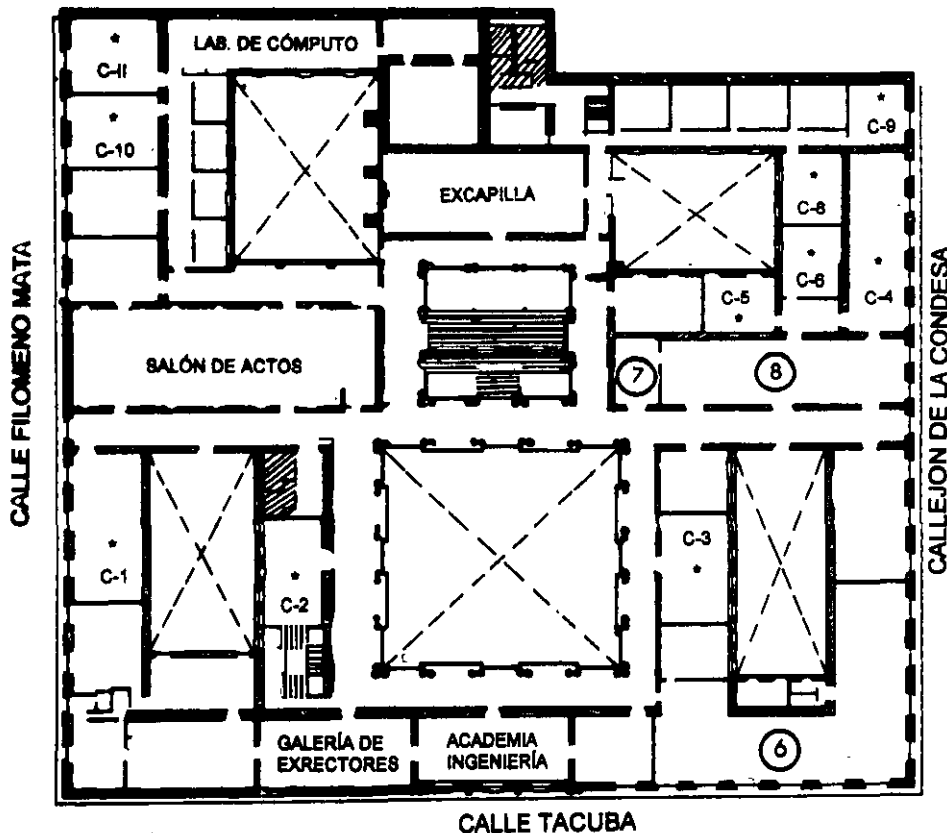


**PLANTA BAJA**



**MEZZANINNE**

# PALACIO DE MINERÍA



## GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

\* AULAS

## 1er. PISO



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.  
CURSOS ABIERTOS

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

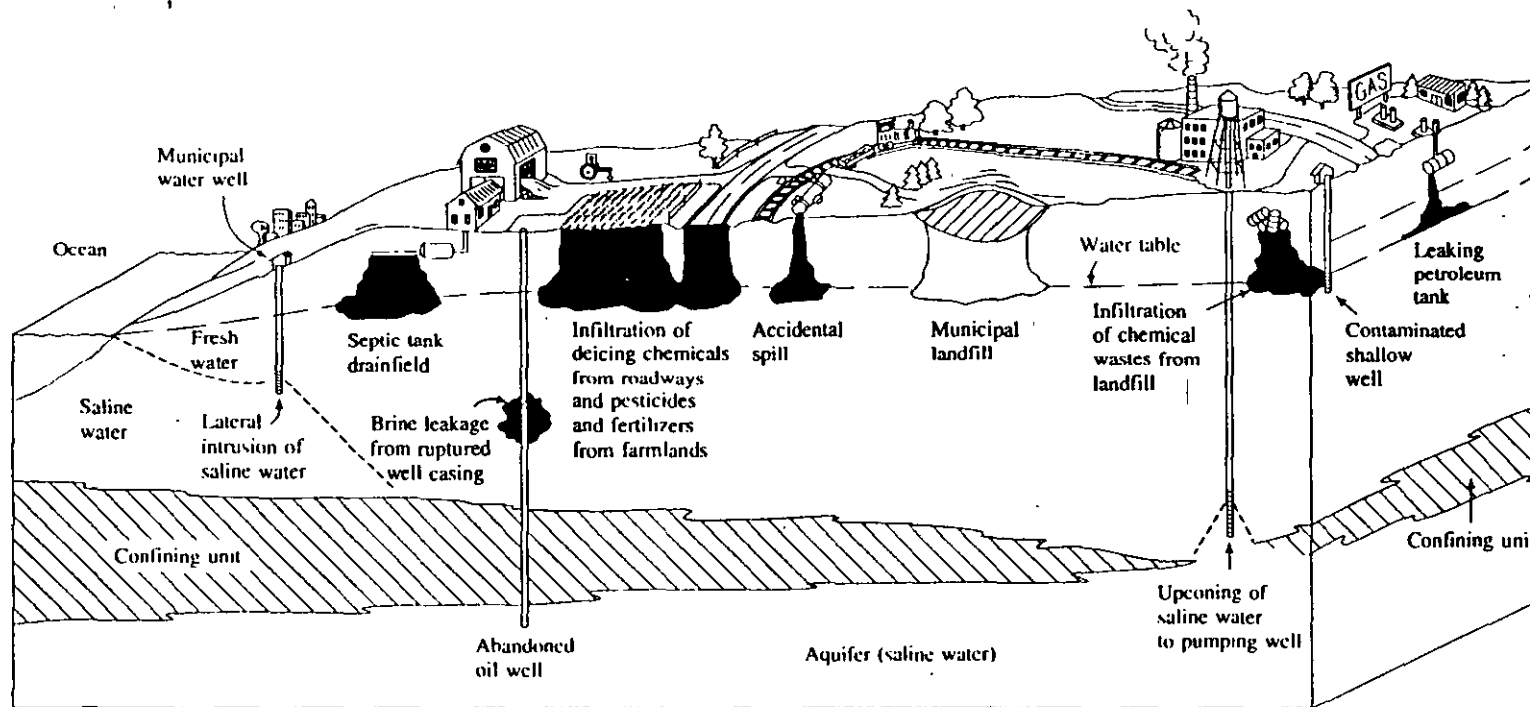
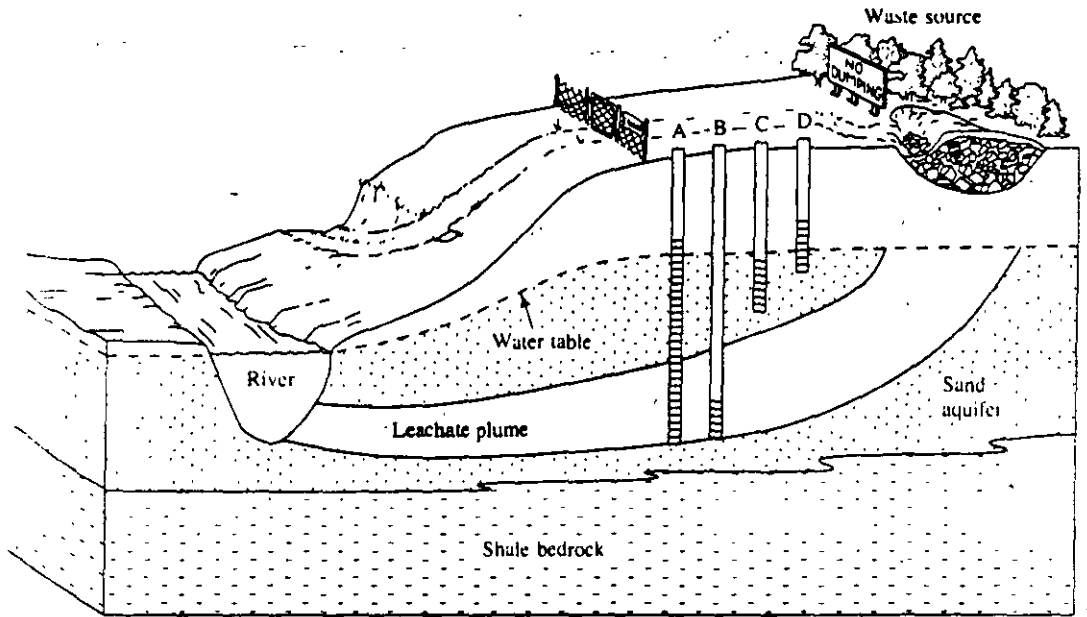
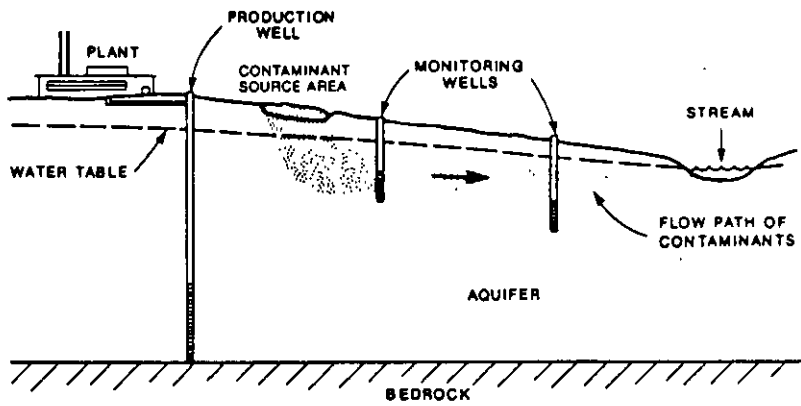


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

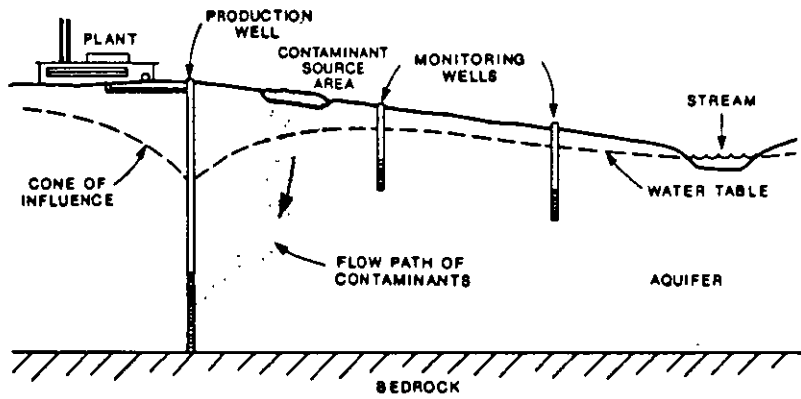
2



**RE 8.7** Effect of monitoring well—screen length on water-quality sampling. Monitoring well A is screened through the thickness of the aquifer. It intersects the plume of leachate but the reported concentration will be less than the actual concentration as water is withdrawn from both contaminated and uncontaminated parts of the aquifer. Piezometer B is also screened to intersect the plume of leachate. Reported concentration will be representative of the leachate. Piezometer C and water table monitoring D don't intersect the plume, indicating that it is deep in the aquifer.



A. IF NO PUMPING OCCURS



B. IF PUMPING OCCURS

Figure 3-46. Locating monitoring wells to map contaminants in an area affected by pumping w

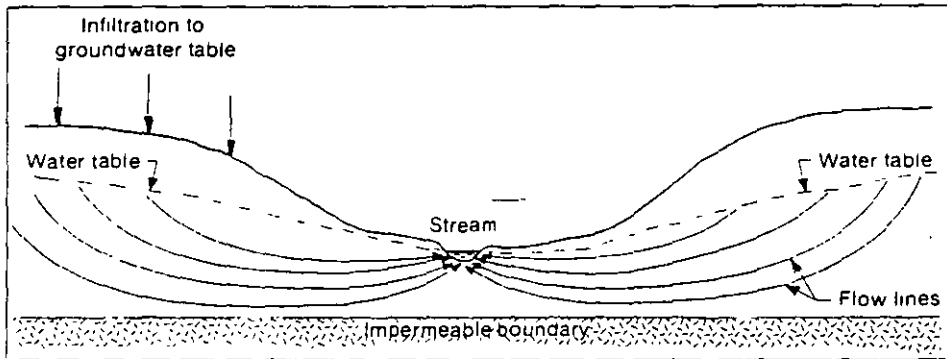


Figure 5.17a. Cross section through a stream valley showing flow lines in the groundwater system.

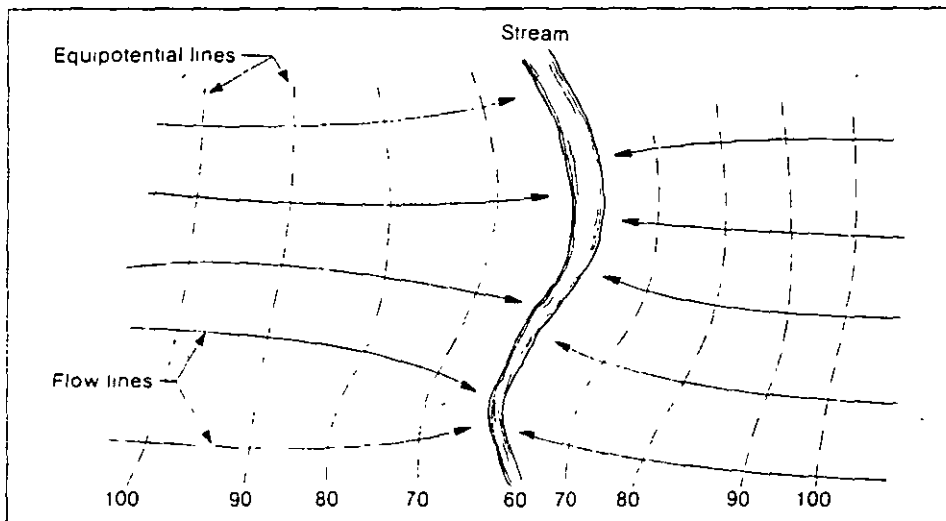
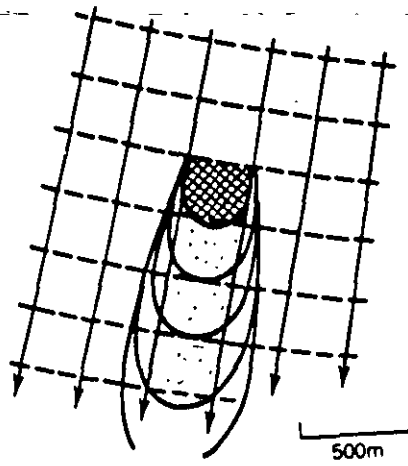
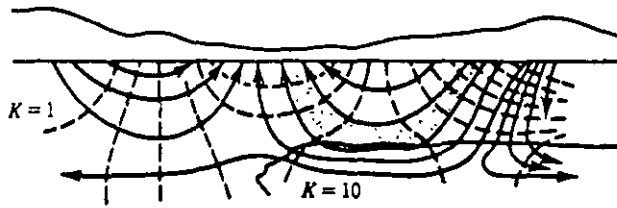
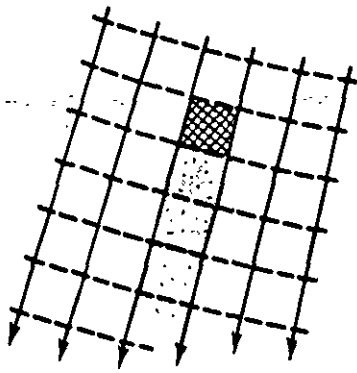
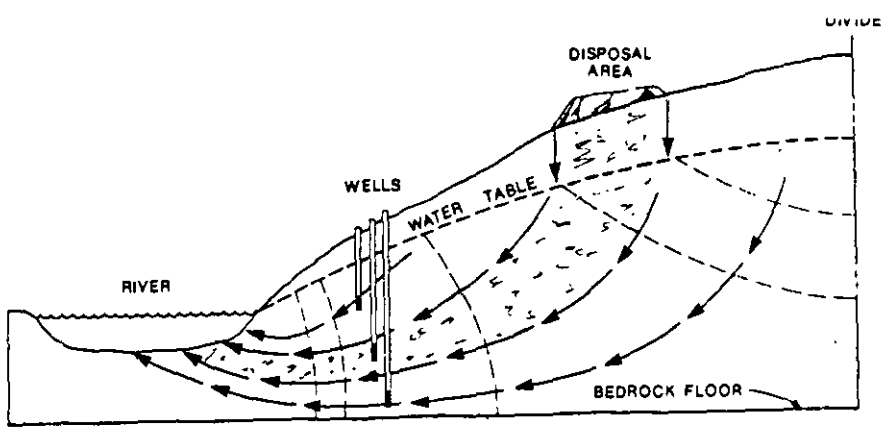
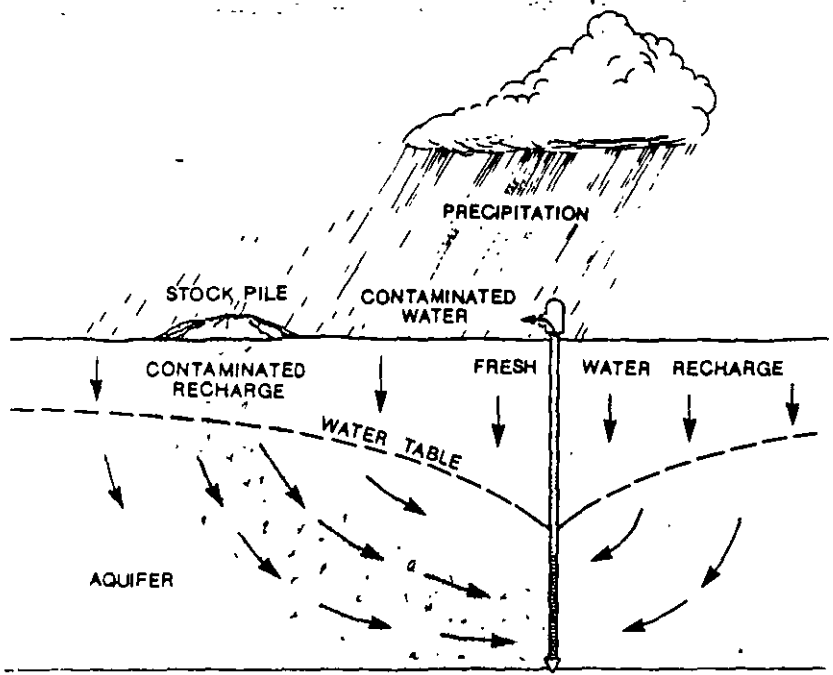


Figure 5.17b. Looking down on the stream valley from above with the water table exposed. The dotted lines represent points of equal groundwater elevation.







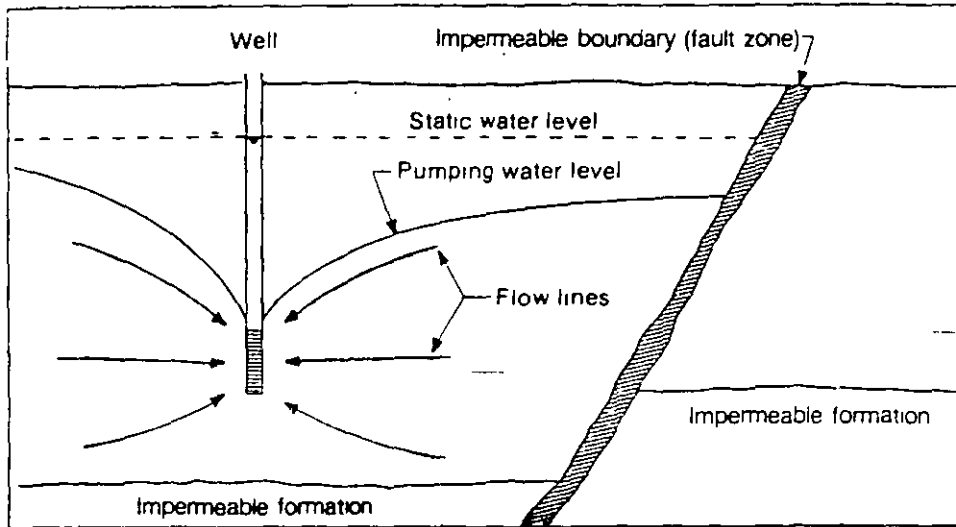


Figure 5.18a. Cross section near a pumping well showing the flow lines followed by water moving toward the well.

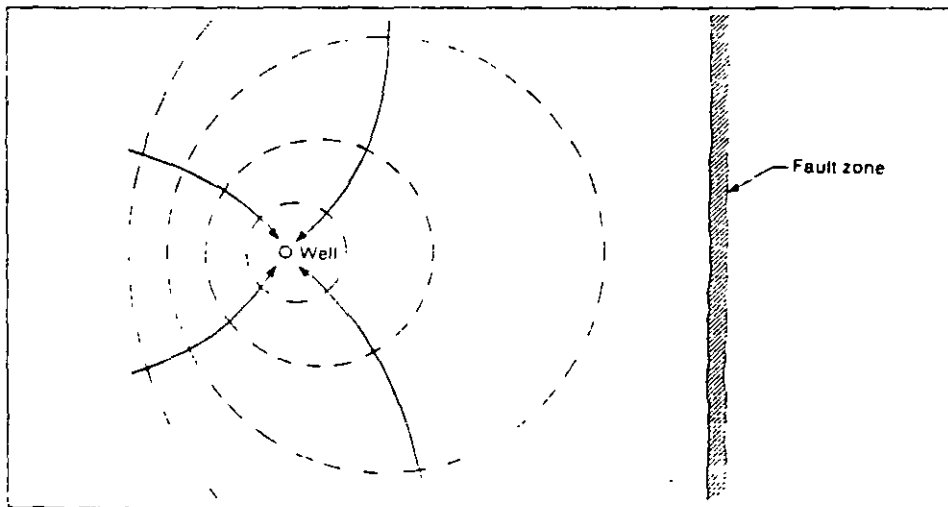
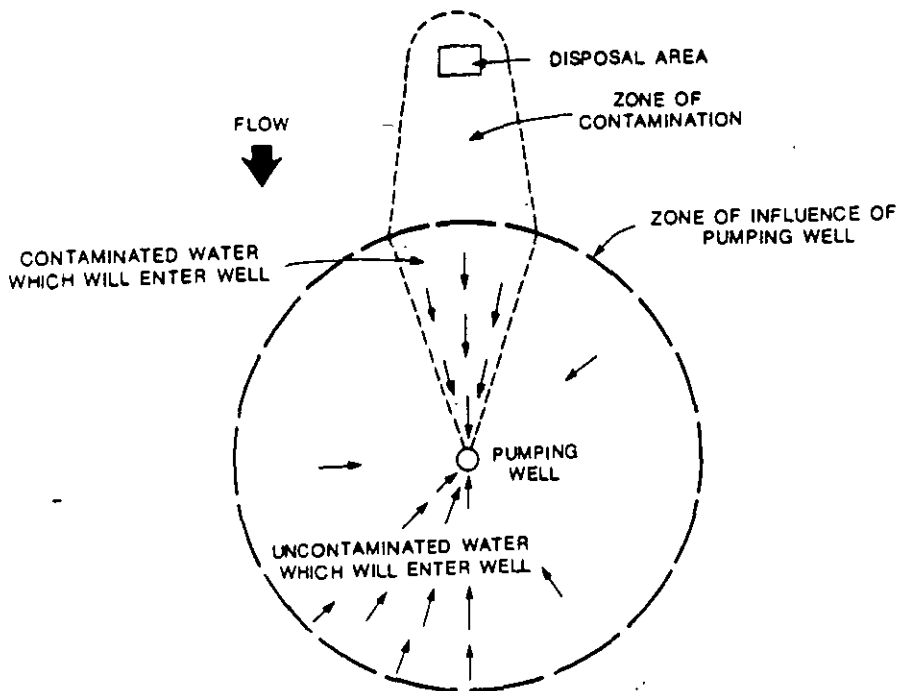
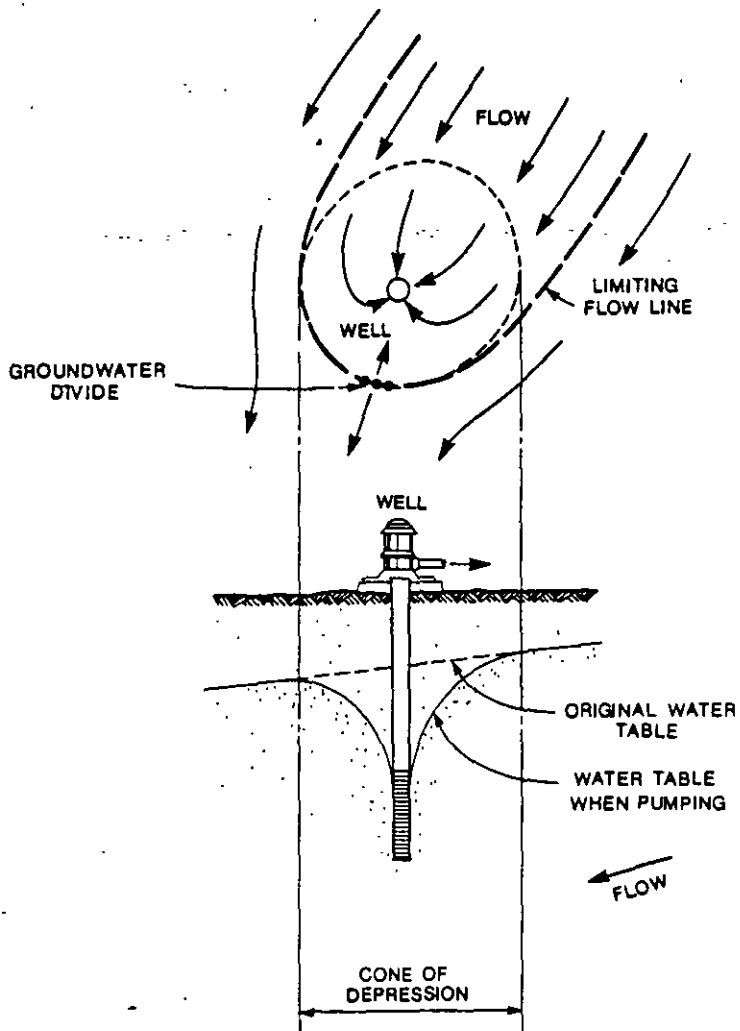
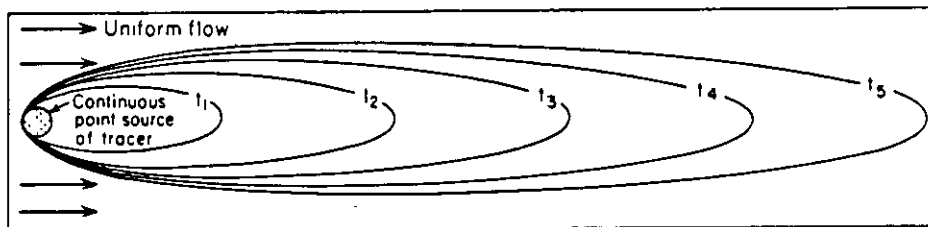
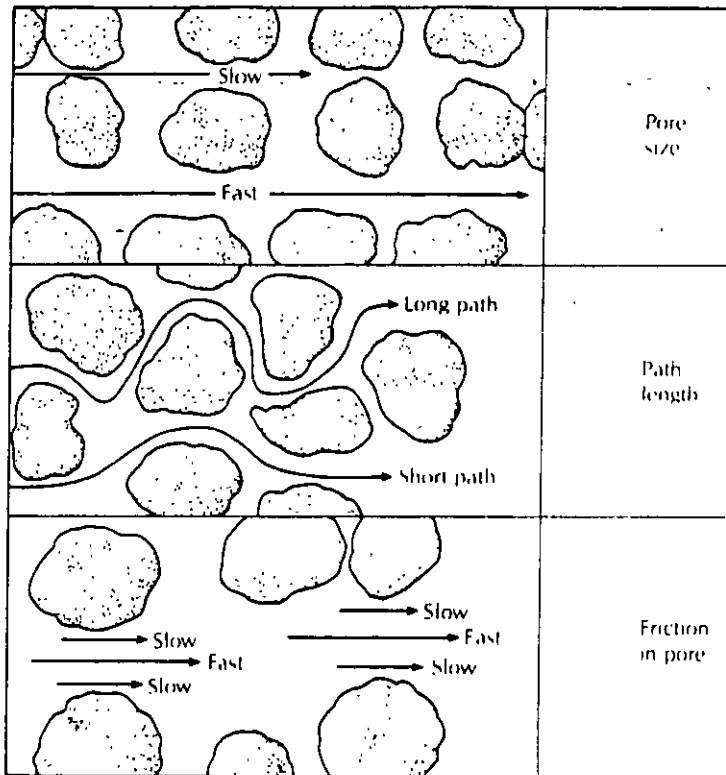
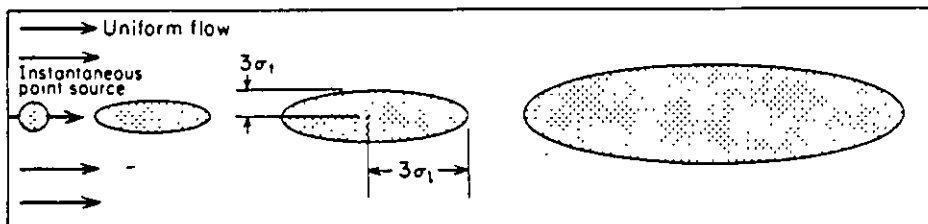


Figure 5.18b. Map of the potentiometric surface during long-term pumping shows that the impermeable boundary causes greater drawdown in the direction of the fault.



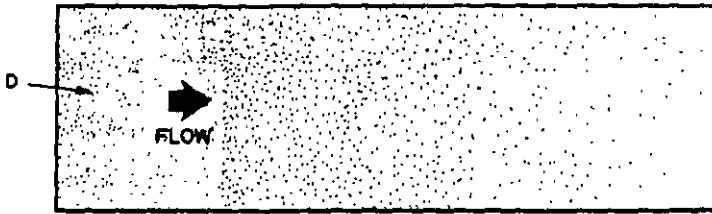


(a)

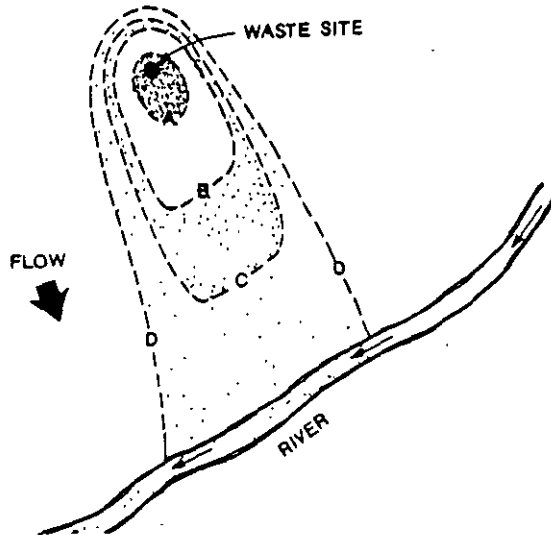
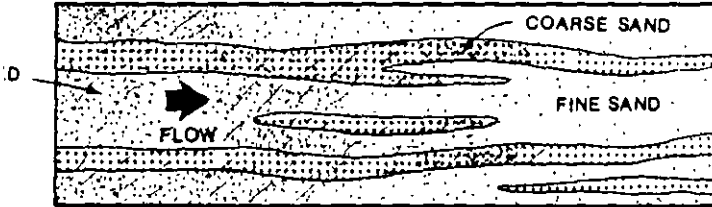


(b)

**Figure 9.5** Spreading of a tracer in a two-dimensional uniform flow field in an isotropic sand. (a) Continuous tracer feed with step-function initial condition; (b) instantaneous point source.



A) HOMOGENEOUS SAND LAYER



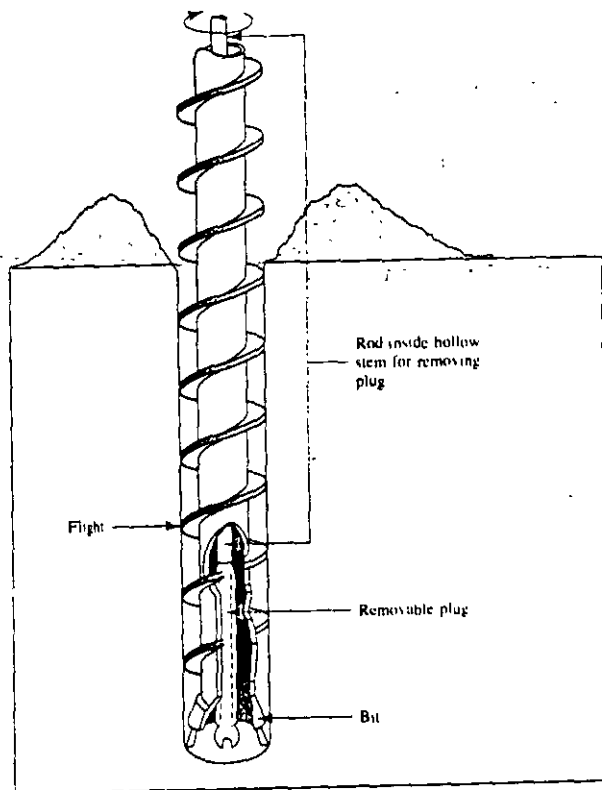


FIGURE 8.9 Hollow-stem auger drill rod and bit. Source: M. L. Scott et al. *Manual of Ground Water Sampling Procedures*, 1981. National Water Well Association. Used with permission.

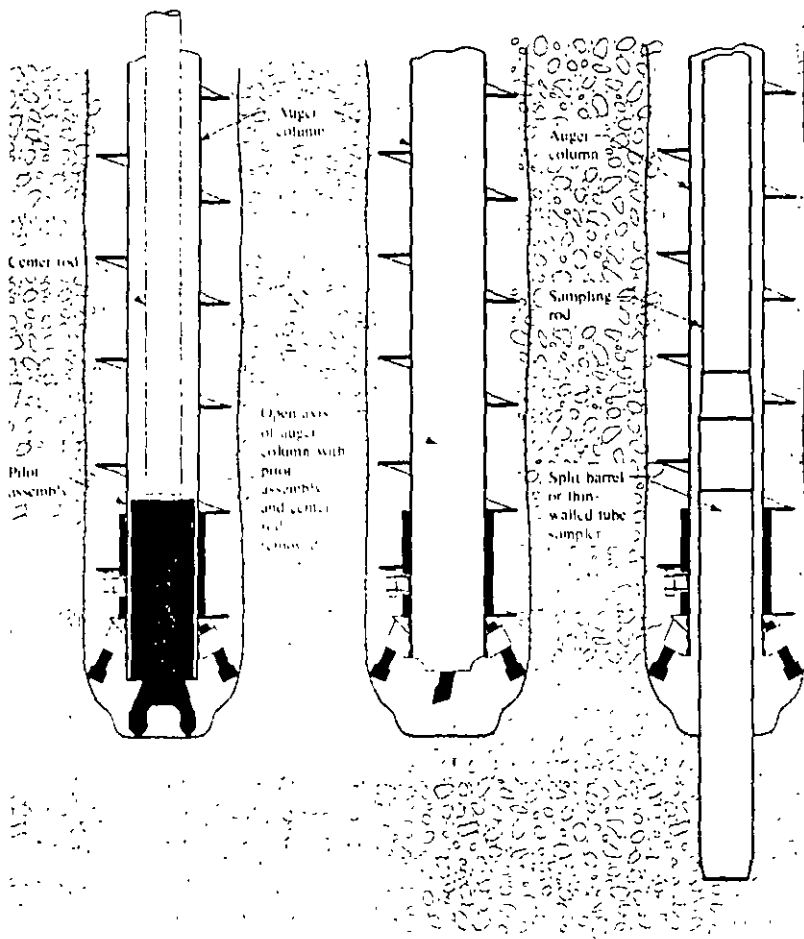


FIGURE 8.13 Sequential steps for the collection of a core sample through a hollow-stem auger. Source: Glen Hackett, *Ground Water Monitoring Review* 7, no. 4 (1987):51-62. Used with permission. Copyright © 1987 Water Well Journal Publishing Co.

# AN EQUATION WHICH RELATES DATA FROM THREE WELLS (X1, Y1, C1, X2, Y2, C2, X3, Y3, C3) WITH $\alpha_4$ AND SOURCE DIMENSION $\gamma$ - By David Edwards

Let  $A1 = \frac{y_1 + \gamma/2}{2\lambda y x_1}$ ,  $A2 = \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda y x_1}$ ,  $A3 = \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda y x_2}$ ,  $A4 = \frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda y x_2}$   
 $A5 = \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda y x_3}$ ,  $A6 = \frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda y x_3}$

$C_0$  = source strength     $v$  = velocity of contaminant  
 $\lambda$  = decay constant  
 $N$  = dispersivity number.  $N = \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}$

- 1)  $C_1 = \frac{C_0}{2} \exp\left\{\frac{x_1}{2\alpha x} [1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]\right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 2)  $C_2 = \frac{C_0}{2} \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x} \cdot x_2\right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 3)  $C_2 = \frac{C_0}{2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$       since  $e^{a \cdot b} = (e^a)^b$
- 4) Likewise,  $C_2 = \frac{C_0}{2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 5) And,  $C_3 = \frac{C_0}{2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} \right]^{x_3} \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 6)  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_0/2}{C_0/2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} \right]^{x_2 - x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 7)  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} ]^{x_2} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} ]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}} = \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} \right]^{x_1 - x_2} \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}$
- 8)  $\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = \ln\left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x}\right\} \right]^{x_1 - x_2} + \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 9)  $\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = (x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x} \right\} + \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 10)  $(x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x} \right\} = \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 11) Similarly,  $(x_1 - x_3) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha/v}]}{2\alpha x} \right\} = \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 12) Dividing,  $\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3} = N = \frac{\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}}$
- 13)  $N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = N \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 14)  $N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) = -\ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + N \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - N \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 15)  $\text{EXP}\left[ N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) \right] = \text{EXP}\left[ -\ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + N \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - N \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} \right]$
- 16)  $\text{EXP}\left[ \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^N - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) \right] = \text{EXP}\left[ \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}^{N-1} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N \right]$
- 17)  $\frac{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^N}{\left(\frac{C_1}{C_3}\right)} = \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}^{N-1} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N} = \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} \left( \frac{C_1 - C_2}{C_1 - C_3} \right)^{N-1} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N}$

AND, VOILA, THE EQUATION:

$$18) \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \left(\frac{C_1}{C_3}\right)^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}} = \frac{\left\{ \text{erf } \frac{y_1 + \gamma/2}{2\lambda y x_1} - \text{erf } \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda y x_1} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}} \left\{ \text{erf } \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda y x_2} - \text{erf } \frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda y x_2} \right\}}{\left\{ \text{erf } \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda y x_3} - \text{erf } \frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda y x_3} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}}$$



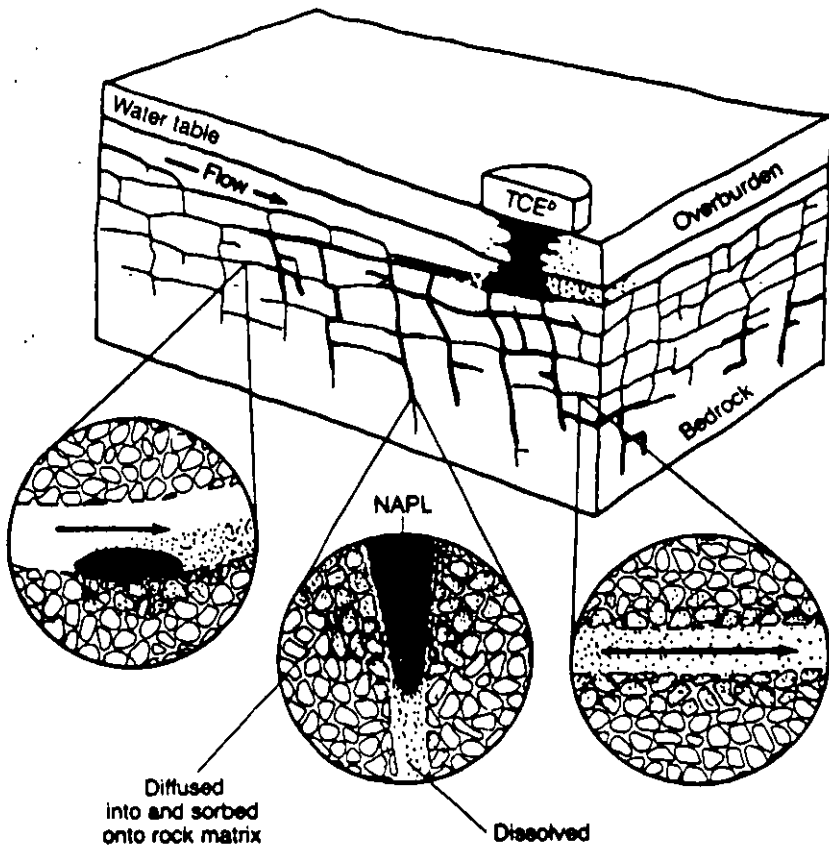


Figure 2.2 Schematic illustration of a DNAPL in a fractured porous medium showing geologic and pore scales. The DNAPL dissolves to create contamination in the fractures and in the low-permeability rock matrix (from Mackay and Cherry, 1989).

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

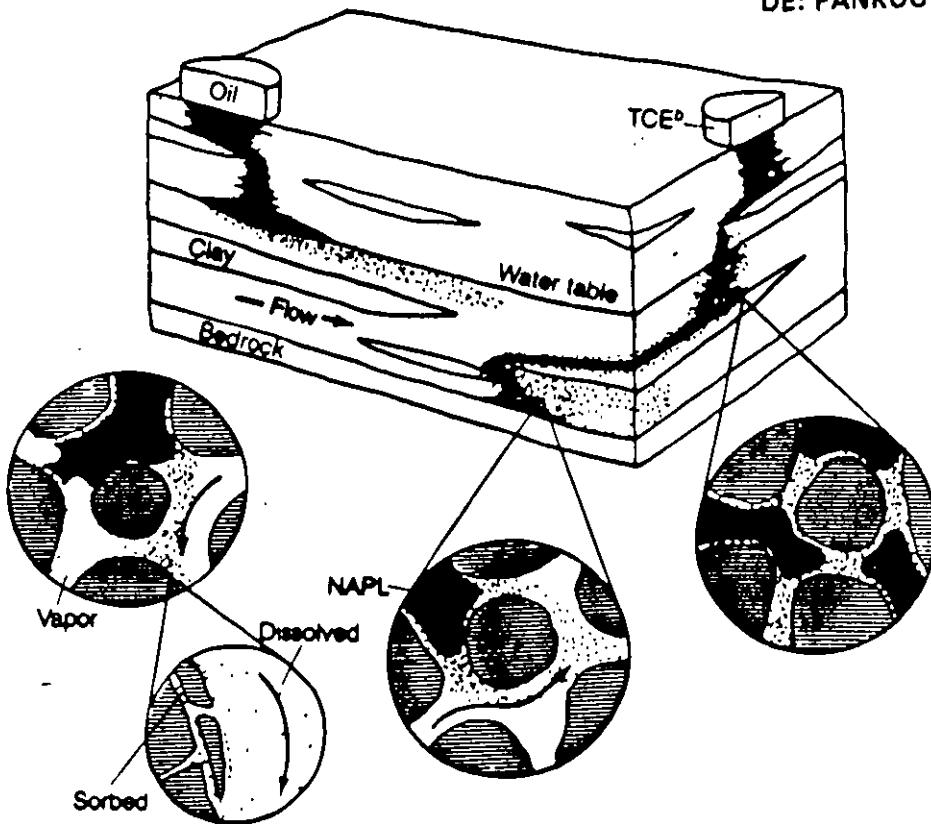


Figure 2.1 Schematic illustration of a DNAPL and a LNAPL in a porous medium, showing geologic and pore scales. A low-permeability clay layer deflects the DNAPL. DNAPL dissolution causes a plume (from Mackay and Cherry, 1989).

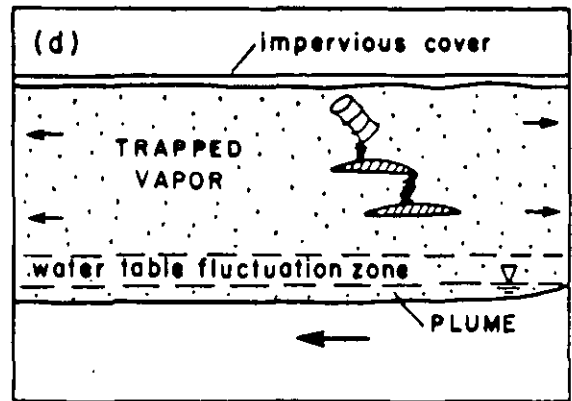
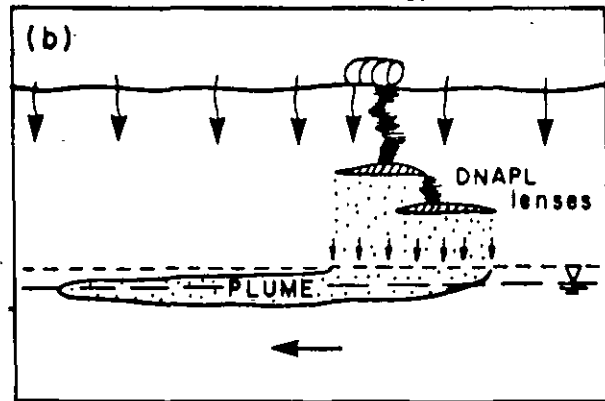
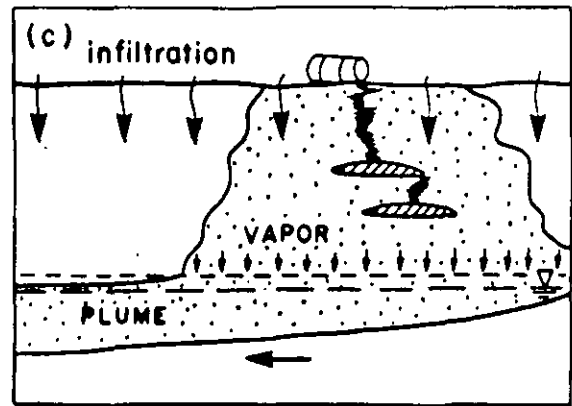
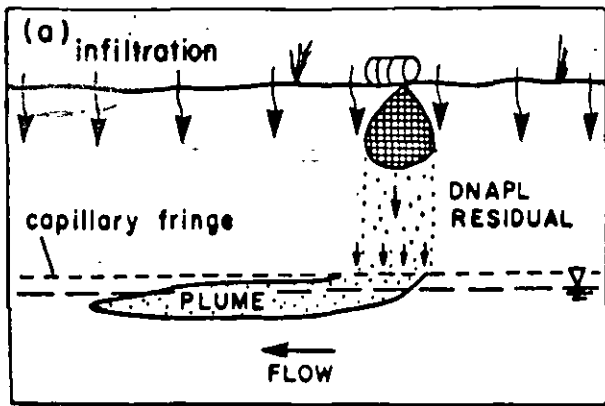
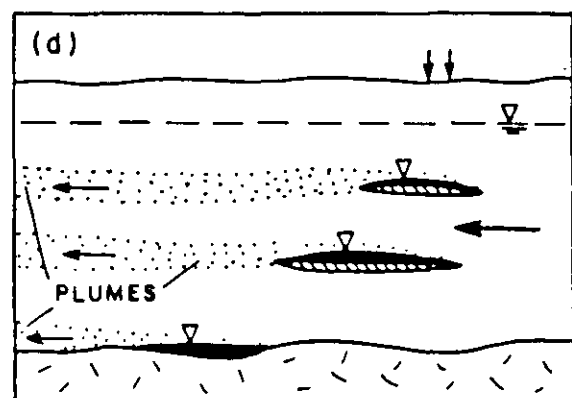
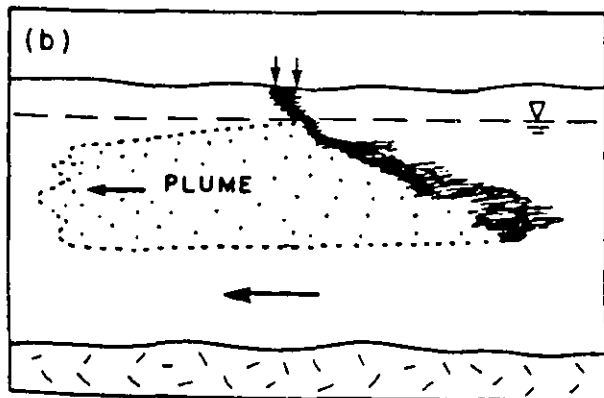
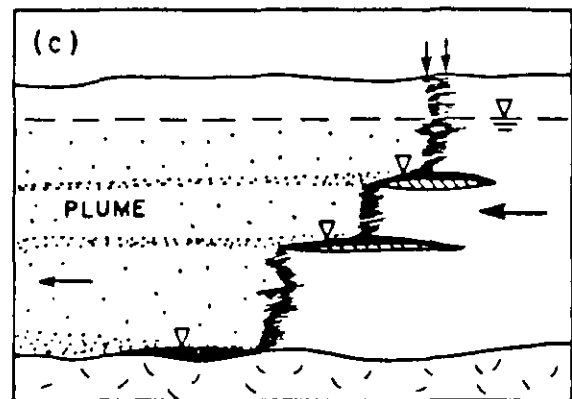
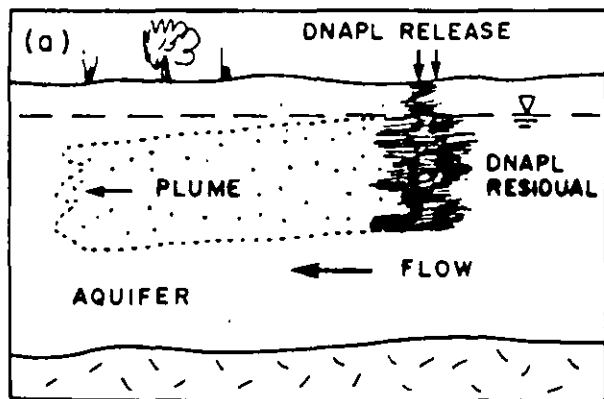
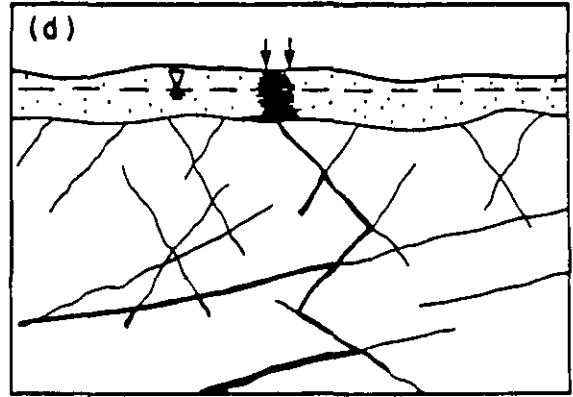
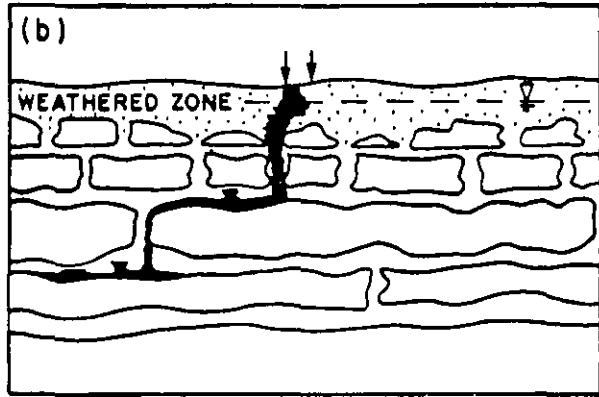
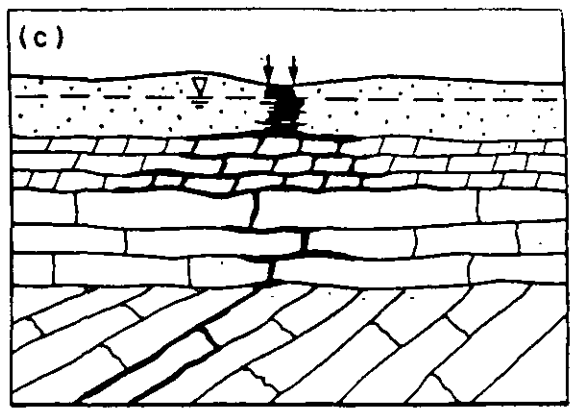
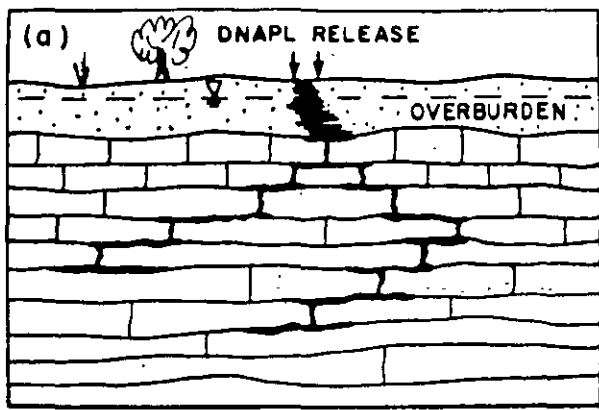


Figure 2.4 Conceptual scenarios for a DNAPL in the vadose zone in granular geologic deposits: a) homogeneous case - no vapor plume; b) heterogeneous case - no vapor plume; c) heterogeneous case - vapor plume; and d) effect of impervious ground cover over vapor-releasing DNAPL source.



DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

Figure 2.5 Conceptual scenarios for a DNAPL in the groundwater zone in granular aquifers: a) partial penetration; b) partial penetration with offset; c) full penetration with offset; and d) same as part c, but at a later stage after DNAPL residual has disappeared due to dissolution in flowing groundwater.



**FRACTURE NETWORK IN A POROUS MEDIUM**

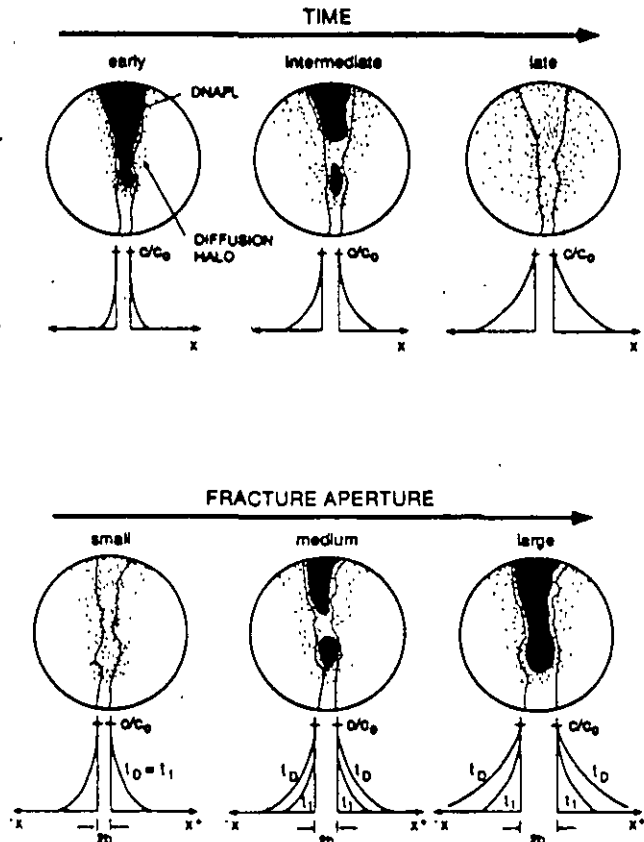
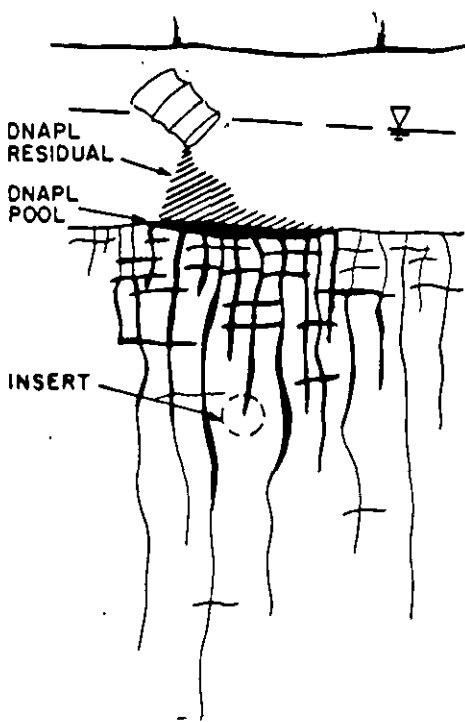


Figure 2.7 Conceptualization of DNAPL persistence and distribution with DNAPL mass loss due to diffusion in water-saturated fractures in a porous medium (such as a fractured clay till or sedimentary rock) as a function of: a) time; and b) fracture size (aperture). Diffusion halos around fractures containing DNAPL become large (more developed) with increases in time, as shown with the concentration vs. distance plots for the three relative time periods in part a. At any particular time  $t_1$ , the DNAPL mass distribution will vary in different size fractures, with DNAPL disappearance occurring most rapidly in the smallest fractures; residual or disconnected DNAPL will be present in medium-sized fractures, and free DNAPL will be present in the largest fractures that are connected to overlying DNAPL pools. DNAPL disappearance times ( $t_D$ ) increase with an increase with fracture aperture.

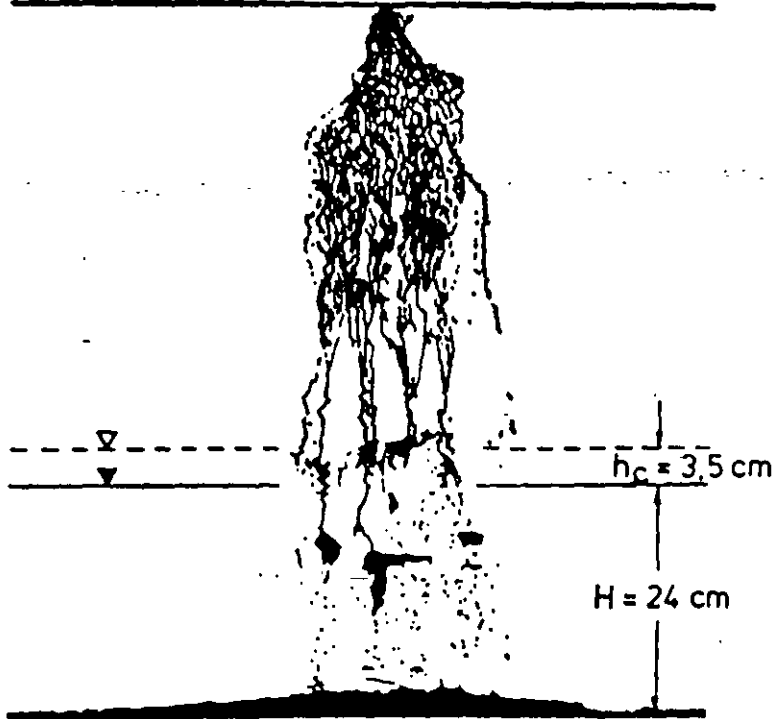


Figure 5.11 Tetrachloroethylene (PCE) release into a rough, unsaturated "fracture" with aperture 0.2 mm. (Reprinted with permission from Schwille (1988a).)

DE: PANKOU Y CHERRY, 1

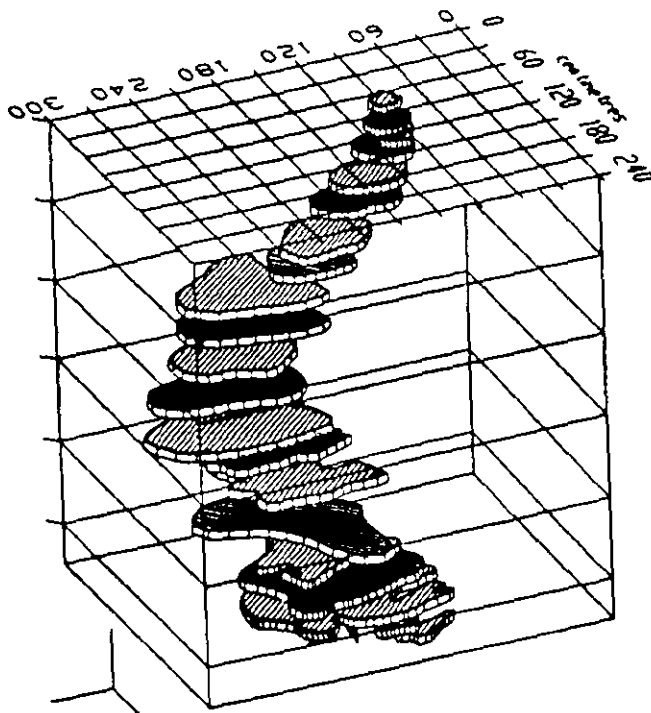


Figure 5.18 "Dnp-like" infiltration of tetrachloroethylene (PCE) into Borden sand. (Reprinted with permission from Poulsen and Kueper (1992).)

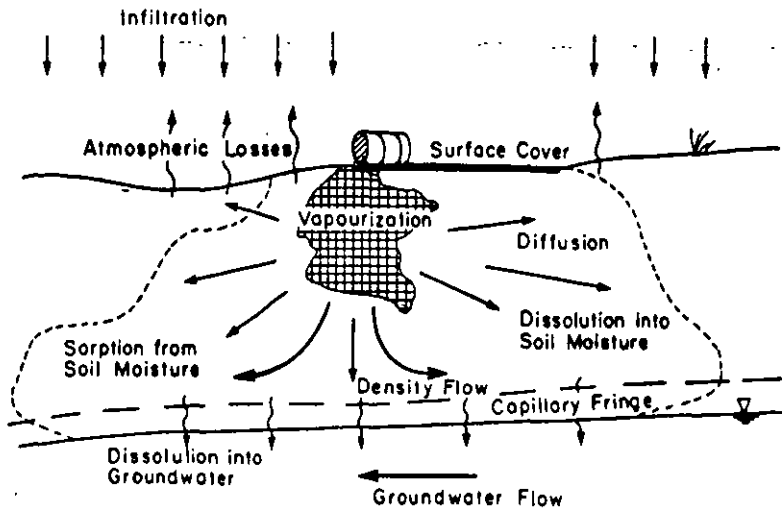


Figure 6.1 Conceptual model of vapor transport processes from a residual DNAPL source in the unsaturated zone. (Reprinted with permission from Mendoza and Frind, 1990a.)

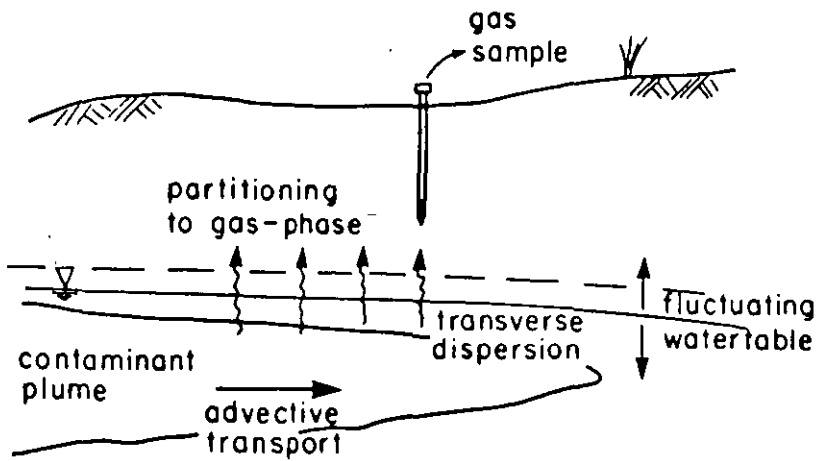


Figure 6.4 Conceptual model for processes involved in groundwater plume detection using soil-gas sampling techniques

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

# DISPERSION

Fórmula que relaciona distancia, tiempo, dispersión, concentración inicial y concentración a diversas distancias.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) + \exp \left( \frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) \right] \quad 1$$

Ecuación de la dispersión hidrodinámica (Fetter, 1988, pag.393).

Donde:

$C_0$  = Concentración inicial

$L$  = Distancia

$T$  = Tiempo

$C$  = Concentración a la distancia  $L$  y el tiempo  $T$

$V_x$  = Velocidad lineal media del agua subterránea

$$V_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad 2$$

$K$  = conductividad hidráulica

$n_e$  = porosidad efectiva

$dh/dl$  = gradiente hidráulico

$D_L$  = Coeficiente de dispersión longitudinal

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \quad 3$$

$D^*$  = Difusión molecular ( $10^{-10}$  --  $10^{-11}$  para materiales finos, y  $10^{-9}$  para grandes, en  $m^2/s$ )

$\alpha_L$  = Dispersividad (unidades de distancia)

$$\alpha_L \approx 0.1L \quad 4$$

entonces:

$$\operatorname{erfc}(x) = 0.02$$

de la tabla (apendice 13, Fetter, 1988):

$$\operatorname{erfc}(1.6) = 0.023652$$

$$\operatorname{erfc}(1.7) = 0.016210$$

$$\text{por lo tanto: } \frac{0.023652 - 0.016210}{10} = 0.0007442 \quad \text{para cada incremento}$$

de 0.01 en el rango de 1.6 a 1.7

$$\text{por lo tanto: } \operatorname{erfc}(1.65) = 0.0199$$

$$\text{por lo tanto: } x = 1.65$$

$$\text{sustituyendo en (6): } 1.65 = \left( \frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right)$$

$$0.046\sqrt{T} = 2000 - 10^{-6} T$$

elevando al cuadrado:

$$0.002T = 4 \times 10^6 - 0.004T + 10^{-12} T^2$$

$$10^{-12} T^2 - 0.006T + 4 \times 10^6 = 0$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{0.006^2 - 4 \times 10^{-12} \times 4 \times 10^6}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{3.6 \times 10^{-5} - 1.6 \times 10^{-5}}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm 0.0045}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T_1 = \frac{5.3 \times 10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$T_2 = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{10^{-12}}$$

$$T_1 = 5.3 \times 10^9 \text{ seg}$$

$$T_2 = 7.5 \times 10^8 \text{ seg}$$

$$T_1 = 170 \text{ años}$$

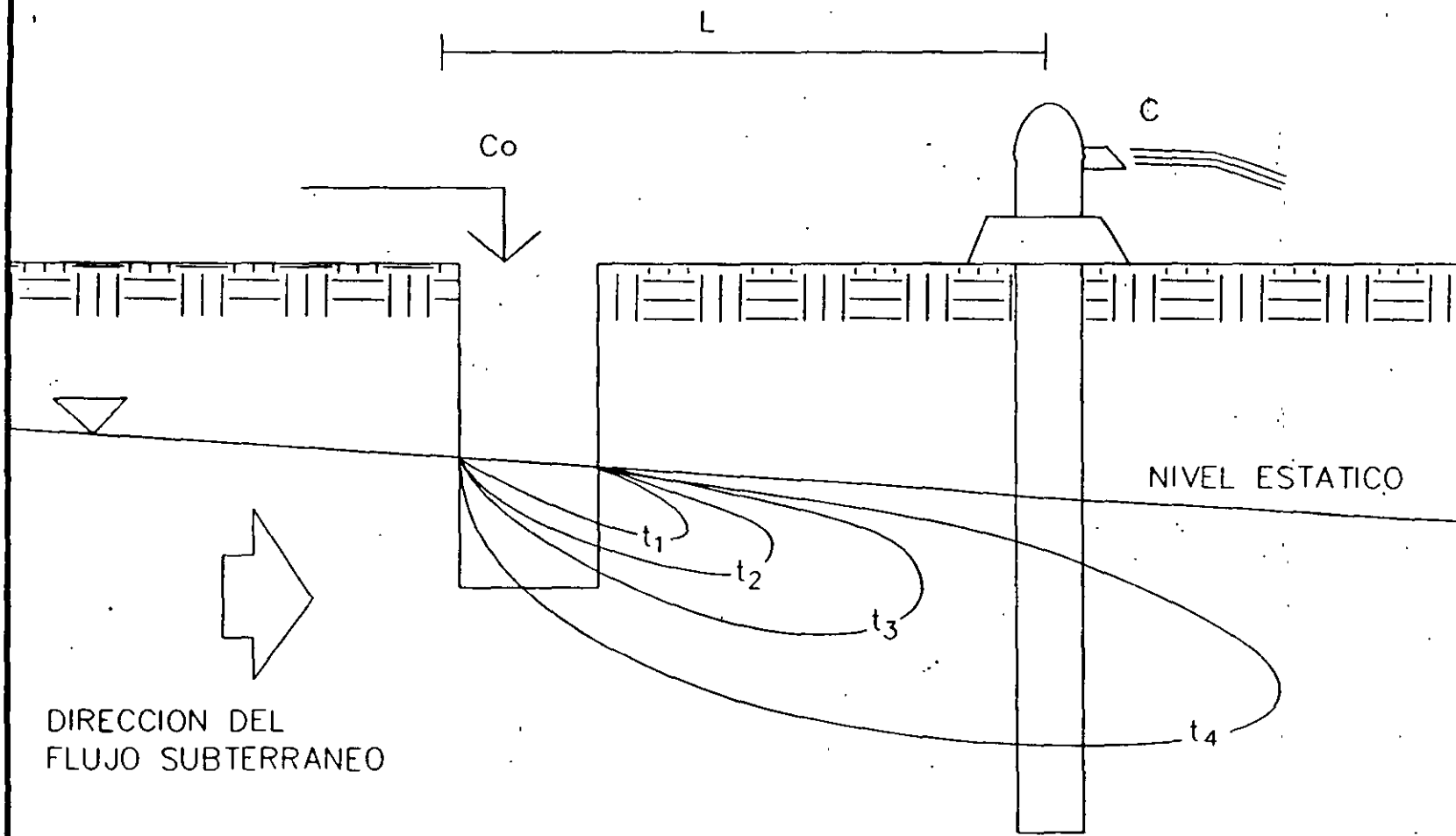
$$T_2 = 24 \text{ años}$$

El valor de tiempo real obtenido de la deducción de la ecuación cuadrática anterior es de 24 años.

APPENDIX 13 Values of the error of  $x$  [ $\text{erf}(x)$ ] and the complementary error function of  $x$  [ $\text{erfc}(x)$ ]. Note that  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ .

$x$	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112463	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	1.999978	0.000022
$\infty$	1.00000	0.00000





DIRECCION DEL  
FLUJO SUBTERRANEO

FIGURA 8.2

**CONTAMINACION DE ACUIFEROS**  
**POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES**

**MODULO 2**

**TABLA 2.2.- VALORES DE VULNERABILIDAD  
DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO**

<b>RANGO EN METROS</b>	<b>VALOR</b>
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1

**PESO ESPECIFICO : 5**

**TABLA 2.3.- RECARGA NETA**

<b>RANGO EN mm</b>	<b>VALOR</b>
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9

**PESO ESPECIFICO : 4**

TABLA 2.4.- TIPO DE ROCA

TIPO	RANGO	VALOR TÍPICO
LUTITA	1-3	2
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	2-5	3
ROCAS IGENAS Y METAMORFICAS INTEMPERIZADAS	3-5	4
SECUENCIAS DE CAPAS DE ARENISCA CALIZA Y LUTITA	4-6	5
TILITA	5-9	6
ARENISCA	4-9	6
CALIZA	4-9	6
ARENA Y GRAVA	4-9	8
BASALTO	2-10	9
CALIZA CASTICA	9-10	10

PESO ESPECIFICO: 3

TABLA 2.5.- TIPO DE SUELO

TIPO	VALOR
CAPA DELGADA O AUSENTE	10
GRAVA	10
ARENA	9
CARBON	8
AGREGADO DE ARCILLAS	7
MEZCLA ARENOSA	6
MEZCLA	5
MEZCLA LIMOSA	4
MEZCLA ARCILLOSA	3
ABONO	2
ARCILLA	1

PESO ESPECIFICO : 2

TABLA 2.6.- PENDIENTE DEL TERRENO  
(ANGULO DE INCLINACION EN %)

RANGO	VALOR
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1

PESO ESPECIFICO : 1

TABLA 2.7.- ZONA VADOSA

TIPO	RANGO	VALOR TIPICO
CAPA CONFINANTE	1	1
LIMO O ARCILLA	2-6	3
LUTITA	2-5	3
CALIZA	2-7	6
ARENISCA		6
HORIZONTES DE CALIZA, ARENISCA Y LUTITA	4-8	6
ARENA Y GRAVA CON ALTO CONTENIDO DE LIMO Y ARCILLA	4-8	6
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	4-8	4
ARENA Y GRAVA	6-9	8
BASALTO	2-10	9
CALIZA CARSTICA	8-10	10

PESO ESPECIFICO: 5

TABLA 2.8.- PERMEABILIDAD EN VARIOS TIPOS DE ROCA  
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA  
(m/s)

RANGO	VALOR
$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	1
$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	4
$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	6
$5 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$	8
$9 \times 10^{-4} +$	10

PESO ESPECIFICO : 3

TABLA 2.9.- CALCULO DE VOLNERABILIDAD

FACTOR	BASALTOS AL PIE DE LA SIERRA DEL CHICHINAUTZIN	ACUIFERO AL CENTRO DE LA ZONA METROPOLITANA
NIVEL ESTATICO	5	5
RECARGA NETA	36	4
TIPO DE ROCA	27	6
TIPO DE SUELO	20	2
PENDIENTE DEL TERRENO	1	10
ZONA VADOSA	45	5
PERMEABILIDAD	30	3
SUMA	164	35
CLASIFICACION	ALTAMENTE VULNERABLE	REDUCIDA VULNERABILIDAD

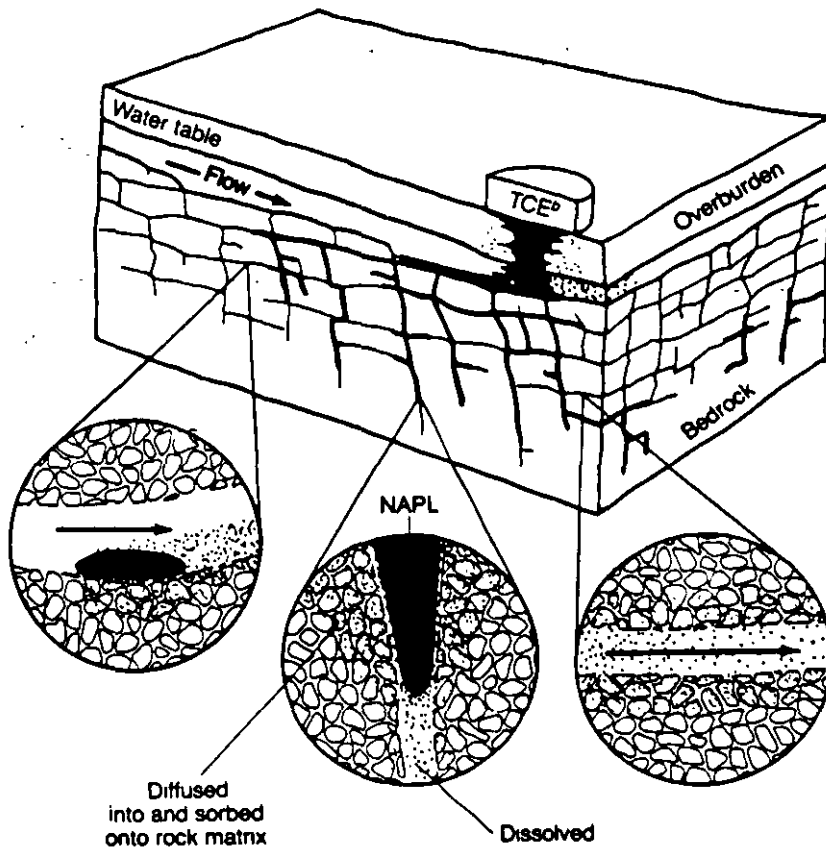


Figure 2.2 Schematic illustration of a DNAPL in a fractured porous medium showing geologic and pore scales. The DNAPL dissolves to create contamination in the fractures and in the low-permeability rock matrix (from Mackay and Cherry, 1989)

DE: PANKOU Y CHERRY, 1

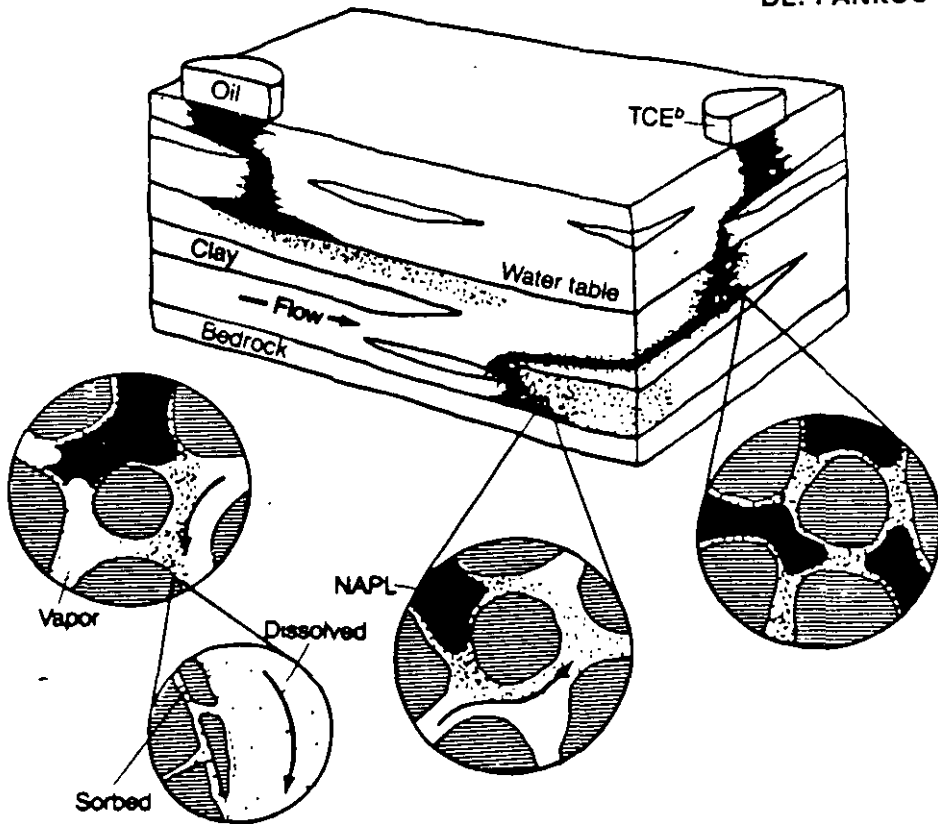


Figure 2.1 Schematic illustration of a DNAPL and a LNAPL in a porous medium, showing geologic and pore scales. A low-permeability clay layer deflects the DNAPL. DNAPL dissolution causes a plume (from Mackay and Cherry, 1989).

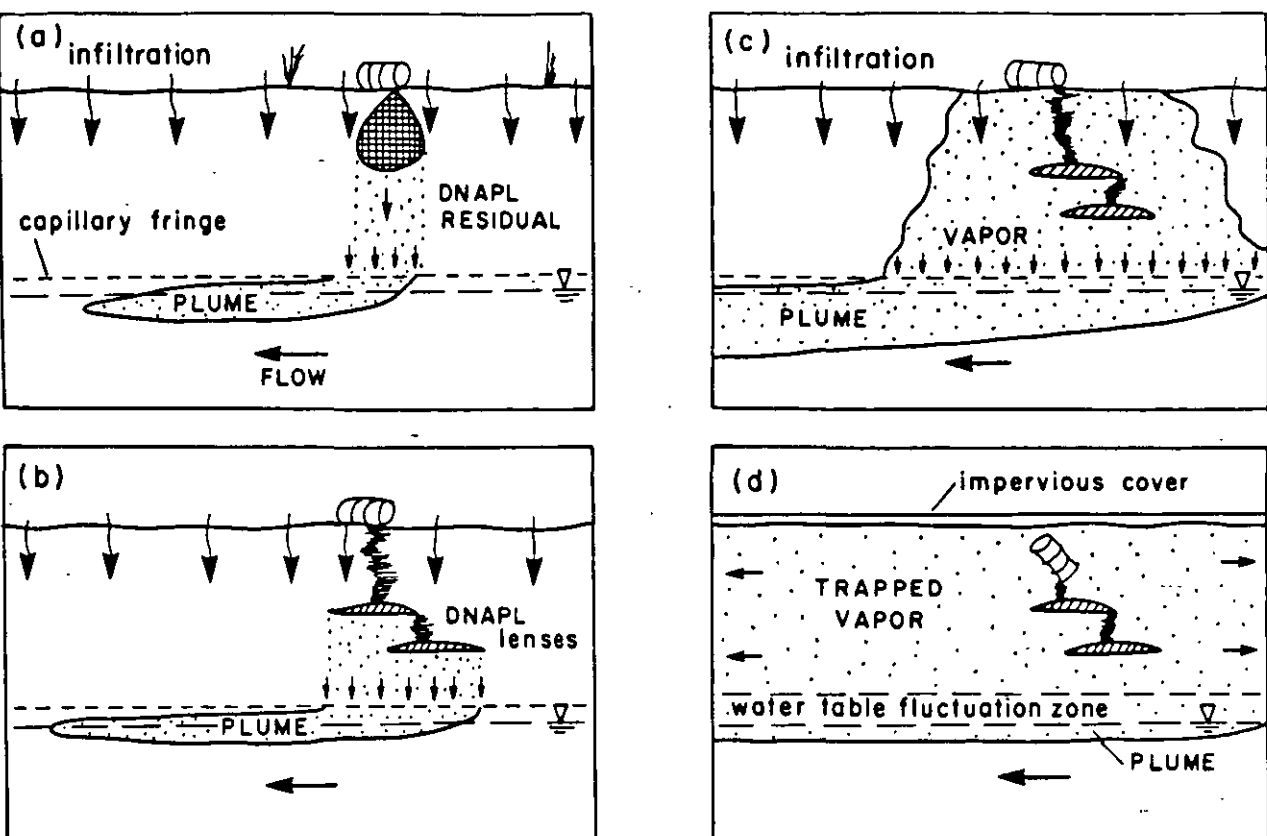
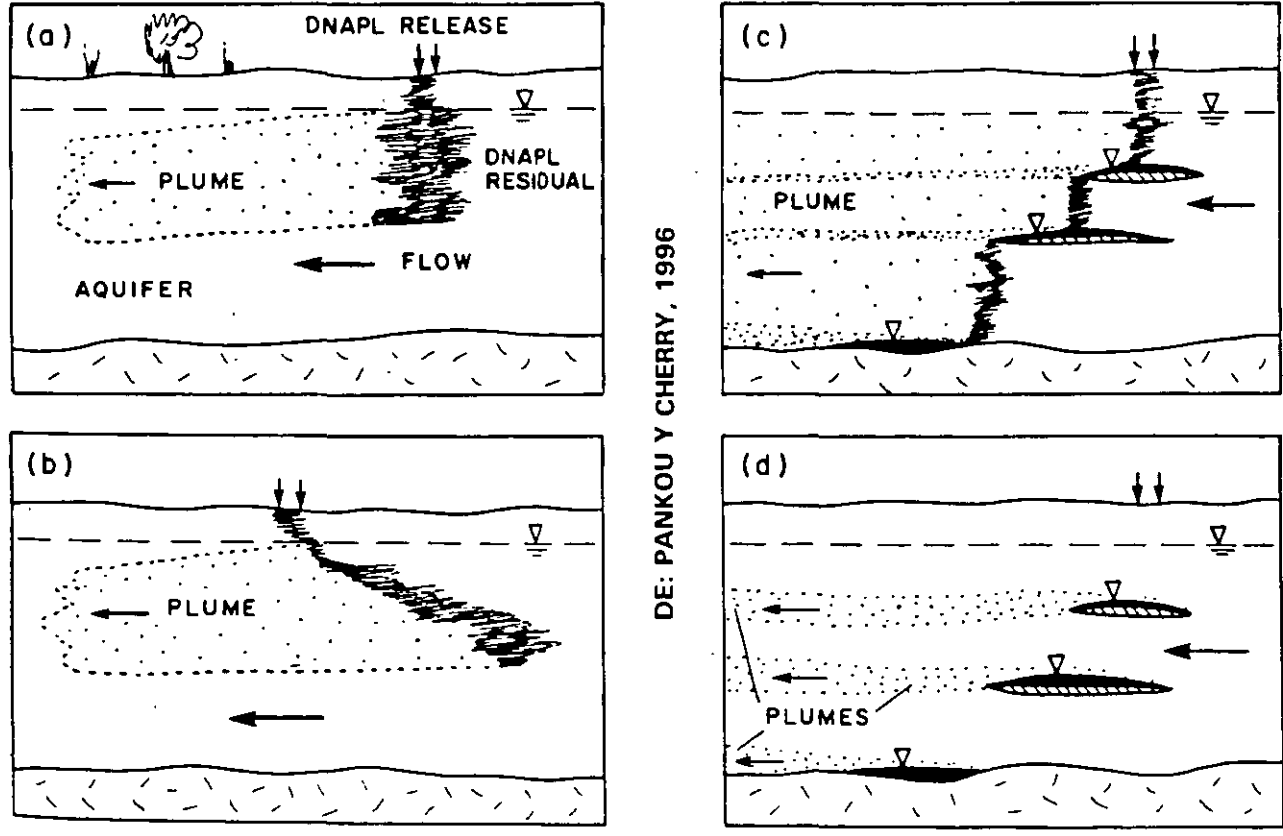


Figure 2.4 Conceptual scenarios for a DNAPL in the vadose zone in granular geologic deposits: a) homogeneous case - no vapor plume; b) heterogeneous case - no vapor plume; c) heterogeneous case - vapor plume; and d) effect of impervious ground cover over vapor-releasing DNAPL source.



DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

Figure 2.5 Conceptual scenarios for a DNAPL in the groundwater zone in granular aquifers: a) partial penetration; b) partial penetration with offset; c) full penetration with offset; and d) same as part c, but at a later stage after DNAPL residual has disappeared due to dissolution in flowing groundwater.

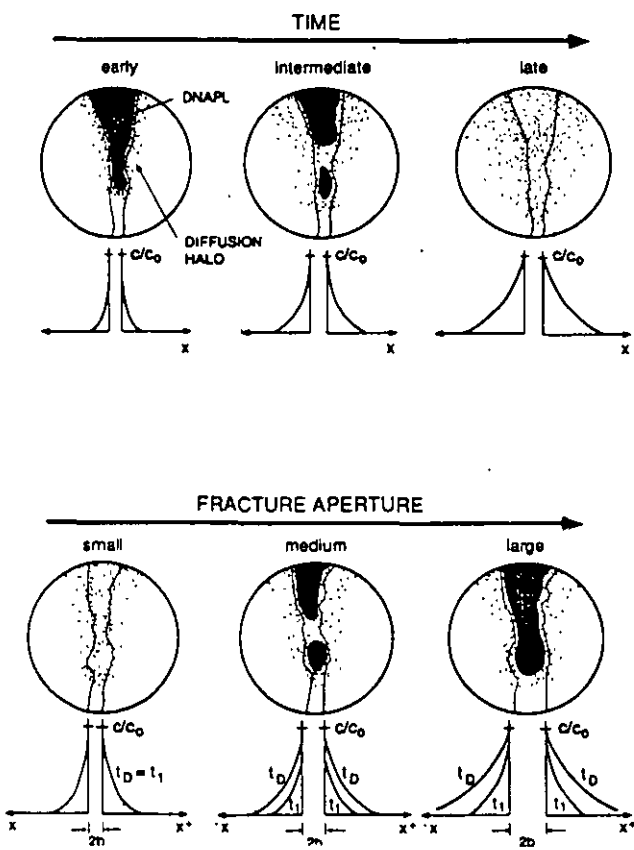
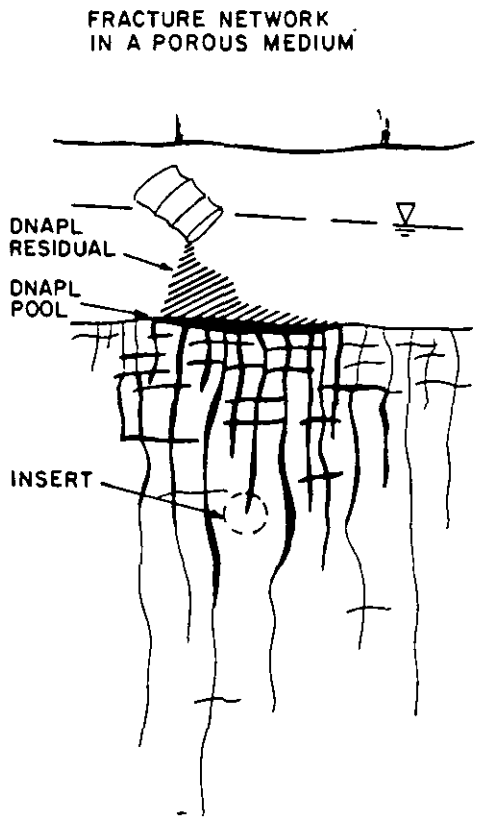
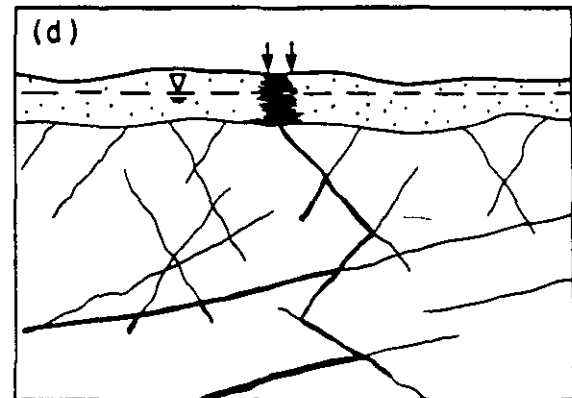
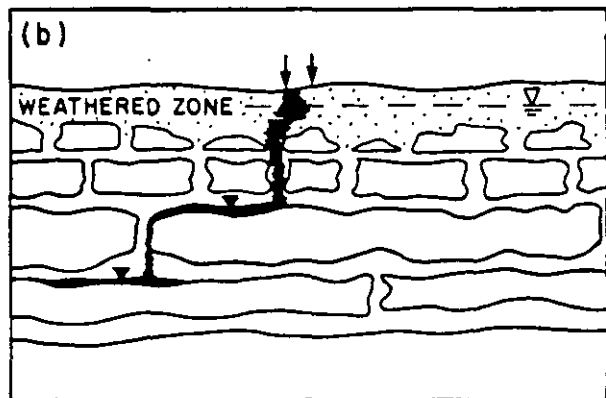
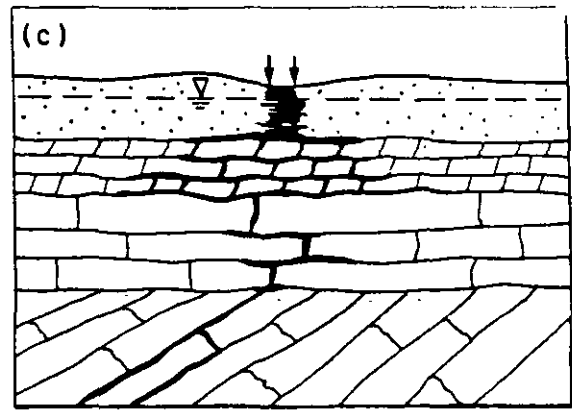
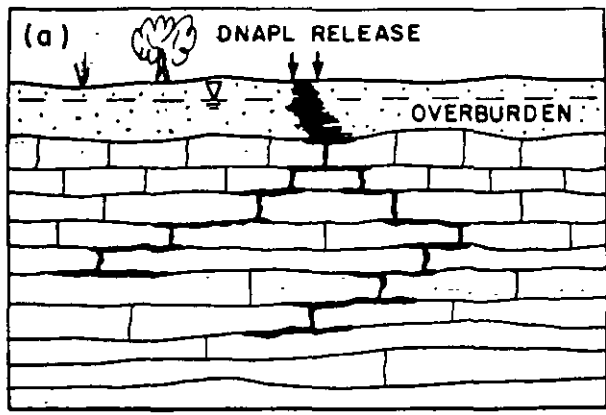


Figure 2.7 Conceptualization of DNAPL persistence and distribution with DNAPL mass loss due to diffusion in water-saturated fractures in a porous medium (such as a fractured clay till or sedimentary rock) as a function of: a) time; and b) fracture size (aperture). Diffusion halos around fractures containing DNAPL become large (more developed) with increases in time, as shown with the concentration vs. distance plots for the three relative time periods in part a. At any particular time  $t_1$ , the DNAPL mass distribution will vary in different size fractures, with DNAPL disappearance occurring most rapidly in the smallest fractures, residual or disconnected DNAPL will be present in medium-sized fractures, and free DNAPL will be present in the largest fractures that are connected to overlying DNAPL pools. DNAPL disappearance times ( $t_D$ ) increase with an increase with fracture aperture.



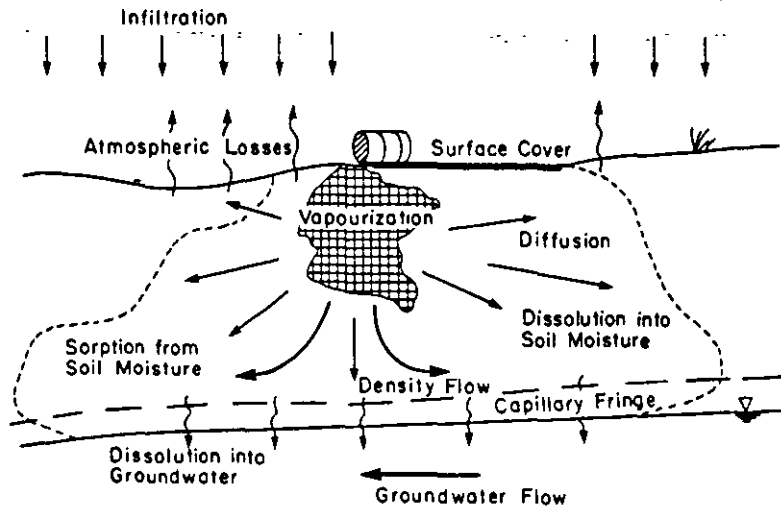


Figure 6.1 Conceptual model of vapor transport processes from a residual DNAPL source in the unsaturated zone. (Reprinted with permission from Mendoza and Frind, 1990a.)

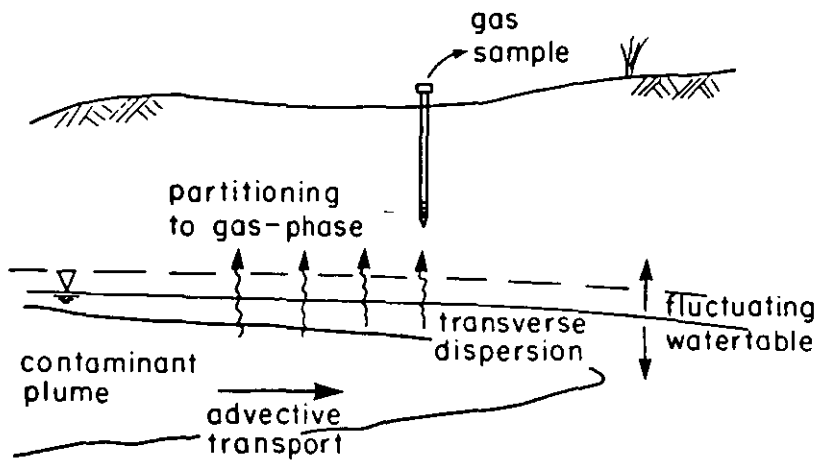


Figure 6.4 Conceptual model for processes involved in groundwater plume detection using soil-gas sampling techniques

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

# DISPERSION

Fórmula que relaciona distancia, tiempo, dispersión, concentración inicial y concentración a diversas distancias.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) + \exp \left( \frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) \right] \quad 1$$

Ecuación de la dispersión hidrodinámica (Fetter, 1988, pag.393).

Donde:

$C_0$  = Concentración inicial

$L$  = Distancia

$T$  = Tiempo

$C$  = Concentración a la distancia  $L$  y el tiempo  $T$

$V_x$  = Velocidad lineal media del agua subterránea

$$V_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad 2$$

$K$  = conductividad hidráulica

$n_e$  = porosidad efectiva

$dh/dl$  = gradiente hidráulico

$D_L$  = Coeficiente de dispersión longitudinal

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \quad 3$$

$D^*$  = Difusión molecular ( $10^{-10}$  --  $10^{-11}$  para materiales finos, y  $10^{-9}$  para grandes, en  $m/s^2$ )

$\alpha_L$  = Dispersividad (unidades de distancia)

$$\alpha_L \approx 0.1L \quad 4$$

Ejemplo. Determinar el tiempo en que el frente de la pluma de un contaminante con un valor de 5 mg/l llega a un pozo de explotación localizado a una distancia de 2000 metros del pozo de recarga. Se seleccionó al parámetro  $\text{NO}_3$  por ser el que presenta mayor concentración en el agua de recarga. Se marcó como 5 mg/l el frente de la pluma contaminante debido a que corresponde al criterio para agua potable.

Por lo tanto los valores iniciales son:

$$C_0 = 515 \text{ mg/l (NO}_3\text{)}$$

$$C = 5 \text{ mg/l (NO}_3\text{)}$$

$$L = 2000 \text{ m}$$

$$T = \text{incognita}$$

$$K = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$dh/dl = 0.01$$

$$n_e = 0.23$$

$$D^* = 10^{-9} \text{ m/s}^2$$

sustituyendo los valores en la fórmula (2)

$$V_x = \frac{2.2 \times 10^{-5}}{0.23} \times 0.01 = 9.6 \times 10^{-7} = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\alpha_L = 0.1(2000) = 200 \text{ m}, \text{ (formula 4)}$$

$$D_L = 200 \times 10^{-6} + 10^{-9} = 2 \times 10^{-4} \text{ m/s}, \text{ (formula 3)}$$

Cuando la dispersividad ( $\alpha_L$ ), longitud (L) o el tiempo (T) son grandes, el segundo término del lado derecho de la expresión general (ecuación 1) tiende a cero. (Freeze and Cherry, 1979, pag. 391).

Por ello y sustituyendo los valores en la ecuación (1) queda:

$$\frac{5}{515} = \frac{1}{2} \left[ \text{erfc} \left( \frac{2000 - 10^{-6} T}{2\sqrt{2 \times 10^{-4} T}} \right) \right]$$

$$0.02 = \text{erfc} \left( \frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right) \quad \text{-----} \quad 5$$

$$\text{si denominamos } X = \left( \frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right) \quad \text{-----} \quad 6$$

entonces:

$$\operatorname{erfc}(x) = 0.02$$

de la tabla (apendice 13, Fetter, 1988):

$$\operatorname{erfc}(1.6) = 0.023652$$

$$\operatorname{erfc}(1.7) = 0.016210$$

$$\text{por lo tanto: } \frac{0.023652 - 0.016210}{10} = 0.0007442 \quad \text{para cada incremento}$$

de 0.01 en el rango de 1.6 a 1.7

$$\text{por lo tanto: } \operatorname{erfc}(1.65) = 0.0199$$

$$\text{por lo tanto: } x = 1.65$$

$$\text{sustituyendo en (6): } 1.65 = \left( \frac{2000 - 10^{-6}T}{0.028\sqrt{T}} \right)$$

$$0.046\sqrt{T} = 2000 - 10^{-6}T$$

elevando al cuadrado:

$$0.002T = 4 \times 10^6 - 0.004T + 10^{-12}T^2$$

$$10^{-12}T^2 - 0.006T + 4 \times 10^6 = 0$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{0.006^2 - 4 \times 10^{-12} \times 4 \times 10^6}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{3.6 \times 10^{-5} - 1.6 \times 10^{-5}}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm 0.0045}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T_1 = \frac{5.3 \times 10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$T_2 = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{10^{-12}}$$

$$T_1 = 5.3 \times 10^9 \text{ seg}$$

$$T_2 = 7.5 \times 10^8 \text{ seg}$$

$$T_1 = 170 \text{ años}$$

$$T_2 = 24 \text{ años}$$

El valor de tiempo real obtenido de la deducción de la ecuación cuadrática anterior es de 24 años.

**EJEMPLO:**

Se busca la distancia L del frente de Concentración C en al tiempo T

Concentración inicial (Co) mg/L:	515
Concentración del frente (C) mg/L:	5
Tiempo (T) años:	10
Tiempo en segundos:	3.15E+08
Conductividad hidráulica (K) m/s:	2.2E-05
Porosidad:	0.23
Gradiente:	0.01
Velocidad linear (Vx) m/s:	9.6E-07

Difusión molecular (D*) m/s <sup>2</sup> :	1.00E-09
Dispersividad (alfa) m:	82 ** Se obtiene de aproximaciones de (alfa) = 0.
Disperción (D <sub>L</sub> ) m/s <sup>2</sup> :(formula 3)	7.84E-05

De formula (1):

$$\frac{2C}{C_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}}\right)$$

Si denominamos

$$X = \frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \quad \text{-----(7)}$$

entonces:

$$\frac{2C}{C_0} = \operatorname{erfc}(X)$$

$\operatorname{erfc}(x) = 0.019417$

x (limite inferior):	1.6	$\operatorname{erfc}(\text{limite inferior}):$	0.023652
x (limite superior):	1.7	$\operatorname{erfc}(\text{limite superior}):$	0.016210
		incremento por 0.001 de unidad:	0.000744
		No. de incrementos:	4.310
		X:	1.66

Sustituyendo X en formula (7):

$$L = X2\sqrt{D_L T} + V_x T$$

Se obtiene que L = 822.83 m

APPENDIX 13 Values of the error of  $x$  [ $\text{erf}(x)$ ] and the complementary error function of  $x$  [ $\text{erfc}(x)$ ]. Note that  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ .

$x$	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112463	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	1.999978	0.000022
$\infty$	1.00000	0.00000

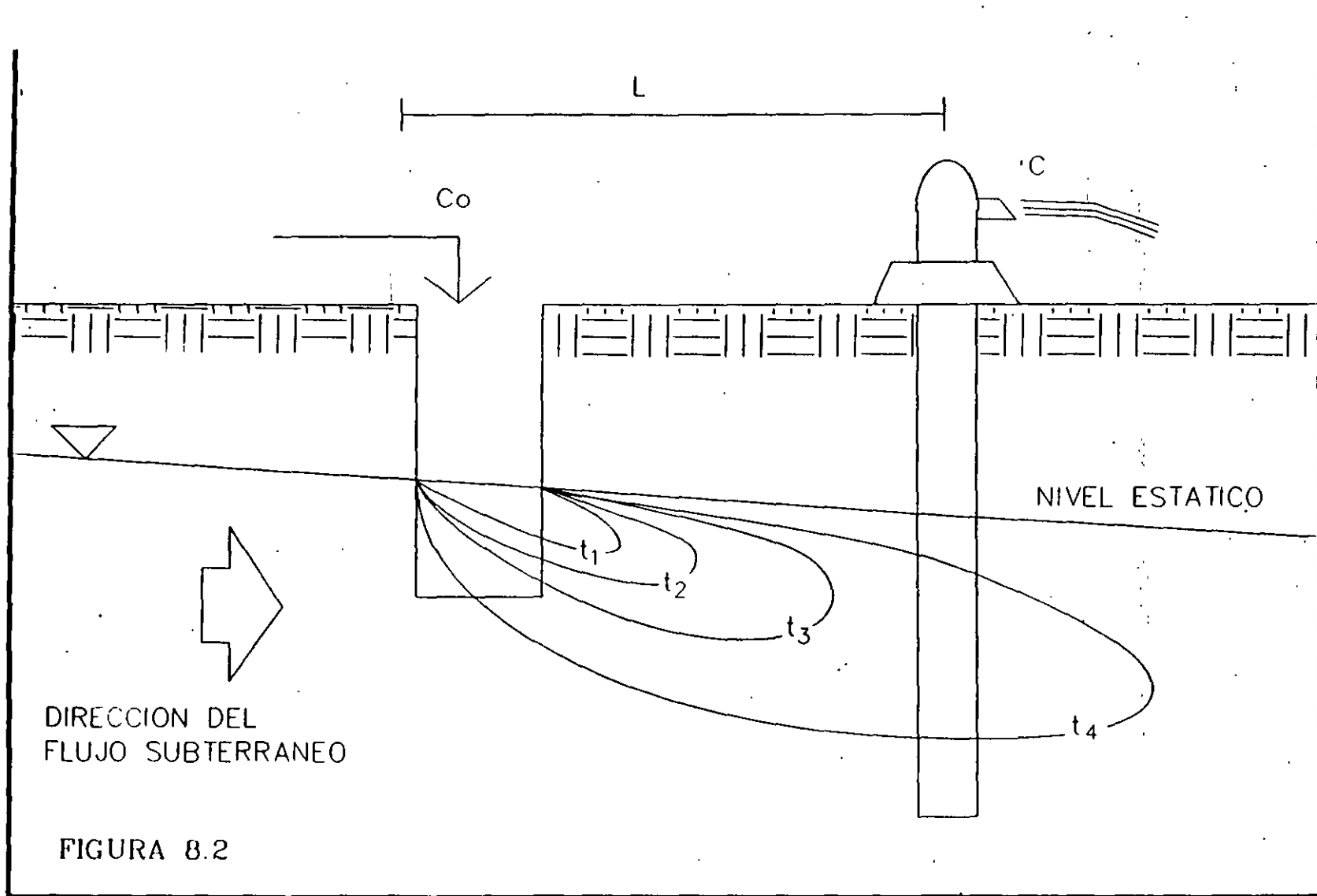


FIGURA 8.2



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

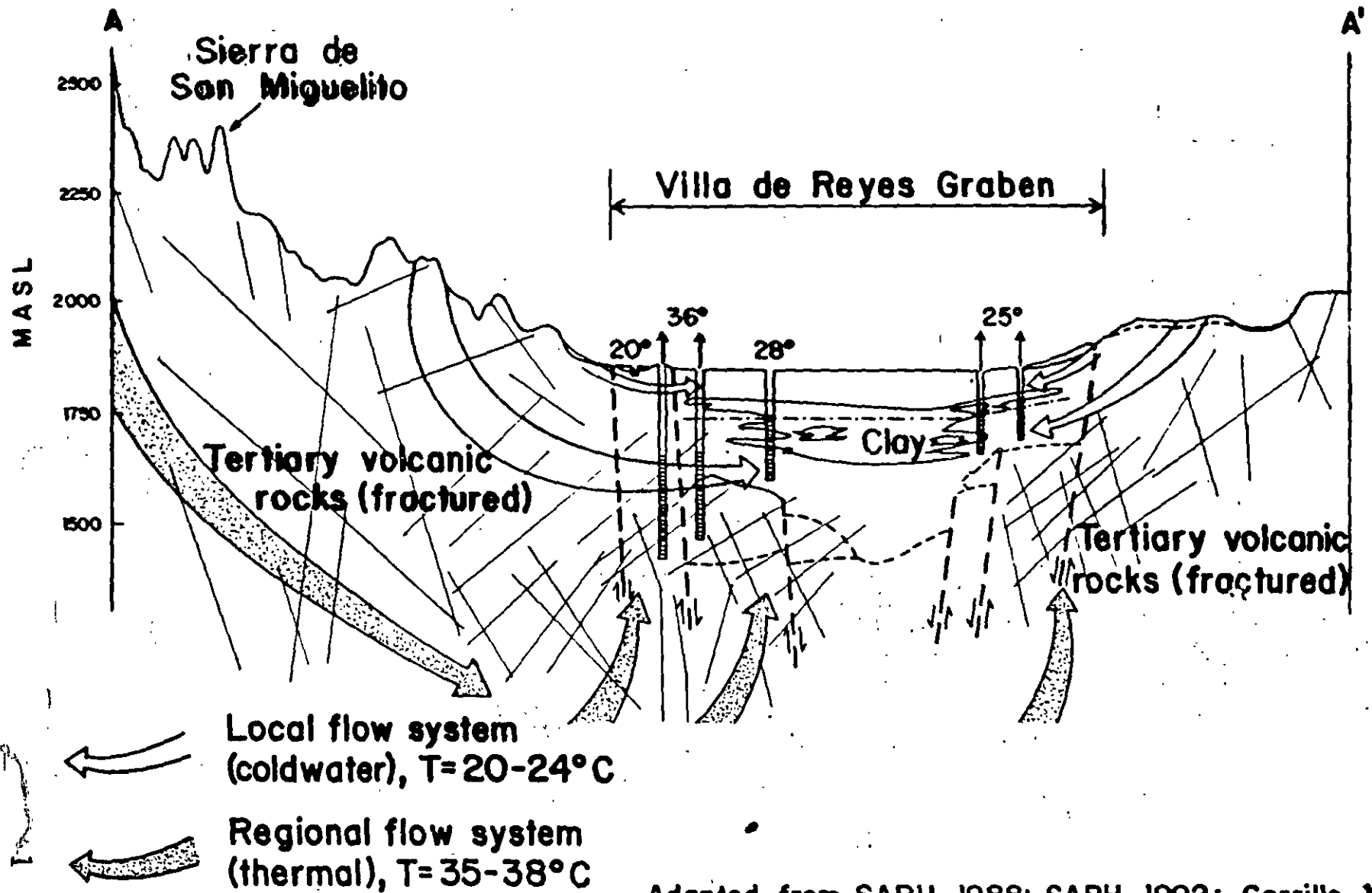
***RADÓN***

**PRESENTADO POR: FIS. ALEJANDRA CORTES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**



# SAN LUIS POTOSI VALLEY

## CONCEPTUAL MODEL OF THE GROUNDWATER FLOW SYSTEM IN SAN LUIS POTOSI, MEXICO



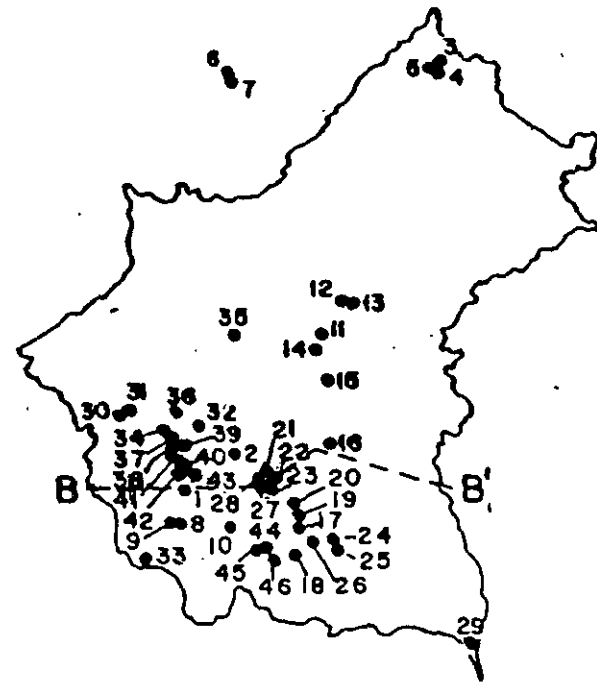
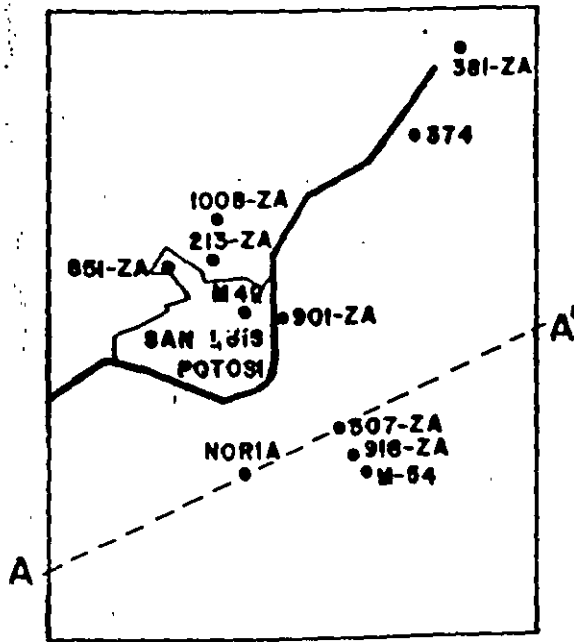
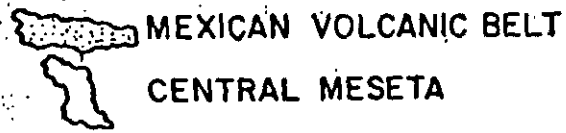
Adapted from SARH. 1988: SARH. 1992: Carrillo 1999

# **RADON-222 IN GROUNDWATER IN TWO VOLCANIC ZONES OF CENTRAL MEXICO**

**CORTES, Alejandra, ESPINOSA, Guillermo, CARDONA, Antonio, Instituto de Geofísica, UNAM, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, - 04510, Mexico, D.F.;**  
**FARVOLDEN, Robert, National Ground Water Association, 6375 Riverside Drive, Dublin, Ohio 43017.**

**Radon-222 values measured in the groundwater of the basin of Mexico and the valley of San Luis Potosi are presented. The study areas are physiographically independent, of volcanic origin and geologically different. Samples are from deep production wells and springs belonging to municipal water supply networks. Concentrations were measured in the field by two methods; i) a scintillator coupled to a photomultiplier tube; and, ii) a passive method using Solid State Nuclear Track Detectors with comparable results. The relatively low concentration of Radon-222 in the basin of Mexico is believed to be related to the composition of the basic rocks. Of the 45 samples analysed ( $300 \text{ Bq/m}^3$  average value), only 15% have values higher than  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . These anomalies correlate with the zone of contact between the volcanic units (basalts, tuffs and ash) and the lacustrine clay deposited in the ancient lakes of the valley. In San Luis Potosi 18 samples had an average concentration of  $4000 \text{ Bq/m}^3$ . These relatively high concentrations are related to the felsic composition of the volcanic rocks in the area. The results agree with interpretations of groundwater flow systems obtained in a concurrent geohydrological study of this region.**

PHYSIOGRAPHIC PROVINCES



## The Geology of Radon



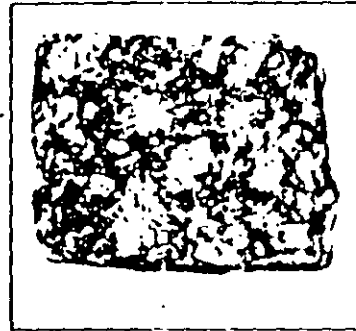
Studies of the geology of radon include research into how uranium and radon sources are distributed in rocks and soils, how radon forms in rocks and soils, and how radon moves. Studying how radon enters buildings from the soil and through the water system is also an important part of the geology of radon.

### Uranium: The source

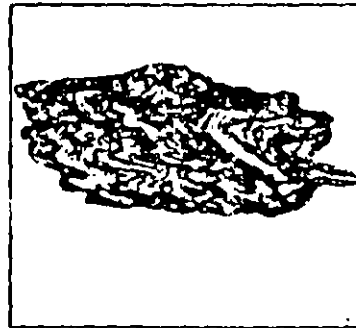
To understand the geology of radon—where it forms, how it forms, how it moves—we have to start with its ultimate source, uranium. All rocks contain some uranium, although most contain just a small amount—between 1 and 3 parts per million (ppm) of uranium. In other words, a million pounds (500 tons) of rocks generally will have 1 to 3 pounds of uranium scattered through it.

Rocks break down mechanically and chemically to form soils at the Earth's surface. It is not surprising, therefore, that most soils also contain small amounts (1 to 3 ppm) of uranium. In general, the uranium content of a soil will be about the same as the uranium content of the rock from which the soil was derived.

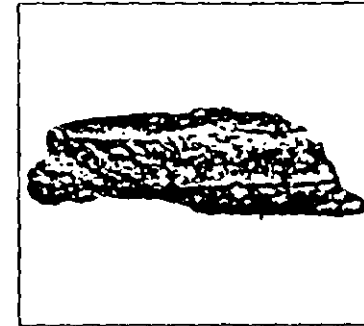
The bright yellow mineral tyuyamunite is one of the most common uranium ore minerals. This specimen, which is less than 3 inches across, came from the Ridenour mine, Arizona, near the Grand Canyon (photograph by Karen Weirich)



Igneous



Metamorphic



Sedimentary

The three major rock types.

Some types of rocks have higher than average uranium contents. These include light-colored volcanic rocks, granites, dark shales, sedimentary rocks that contain phosphate, and metamorphic rocks derived from these rocks. These rocks and their soils may contain as much as 100 ppm uranium. Layers of these rocks underlie various parts of the United States.

The higher the uranium level is in an area, the greater the chances are that houses in the area have high levels of indoor radon. But some houses in areas with lots of uranium in the soil have low levels of indoor radon, and other houses on uranium-poor soils have high levels of indoor radon. Clearly, the amount of radon in a house is affected by factors in addition to the presence of uranium in the underlying soil.

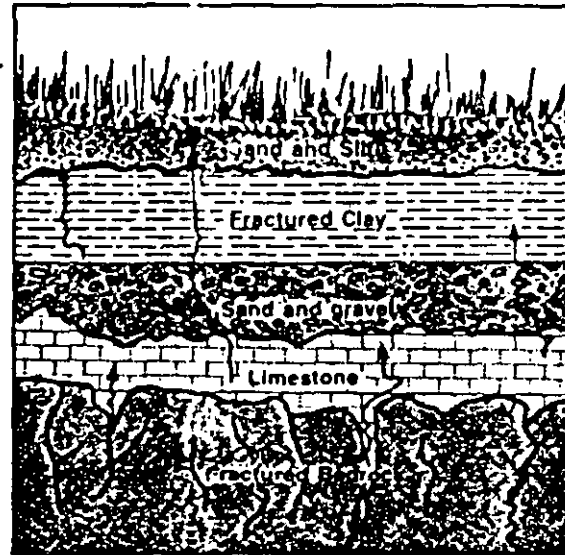
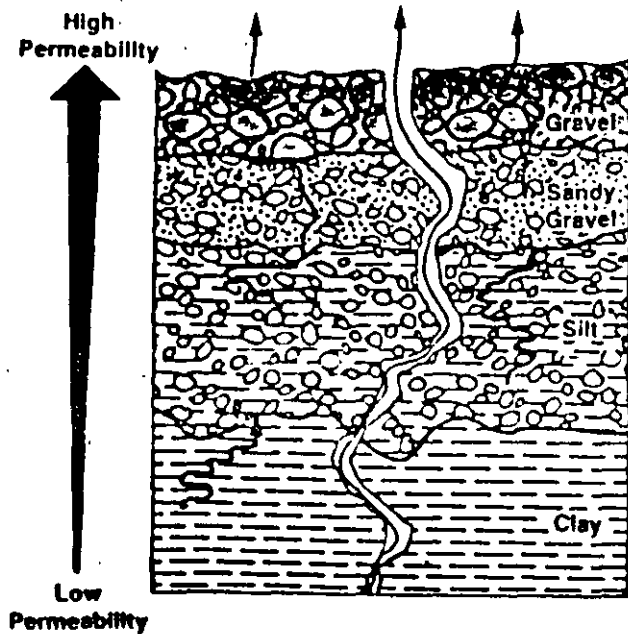
## Radon movement

Because radon is a gas, it has much greater mobility than uranium and radium, which are fixed in the solid matter in rocks and soils. Radon can more easily leave the rocks and soils, by escaping into fractures and openings in rocks and into the pore spaces between grains of soil.

The ease and efficiency with which radon moves in the pore space or fracture affects how much radon enters a house. If radon is able to move easily in the pore space, then it can travel a great distance before it decays, and it is more likely to collect in high concentrations inside a building.

The method and speed of radon's movement through soils is controlled by the amount of water present in the pore space (the soil moisture content), the percentage of pore space in the soil (the porosity) and the "interconnectedness" of the pore spaces that determines the soil's ability to transmit water and air (the permeability).

Radon can move through cracks in rocks and through pore spaces in soils.



Radon moves more readily through permeable soils, such as coarse sand and gravel, than through impermeable soils, such as clays. Fractures in any soil or rock allow radon to move more quickly.

Some radon atoms remain trapped in the soil and decay to form lead, other atoms escape quickly into the air.

Radon in water moves slower than radon in air. The distance that radon moves before most of it decays is less than 1 inch in water-saturated rocks or soils, but it is as much as 6 feet through dry rocks or soils. Because water also tends to flow much more slowly through soil pores and rock fractures than does air, radon travels shorter distances in wet soils than in dry soils before it decays.

For these reasons, homes in areas with drier, highly permeable soils and bedrock, such as hill slopes, mouths and bottoms of canyons, coarse glacial deposits, and fractured or cavernous bedrock, may have high levels of indoor radon. Even if the radon content of the air in the soil or fracture is in the normal range (200-2,000 pCi/L), the permeability of these areas permits radon bearing air to move greater distances before it decays and thus contributes to high indoor radon.

## Radon entry into buildings

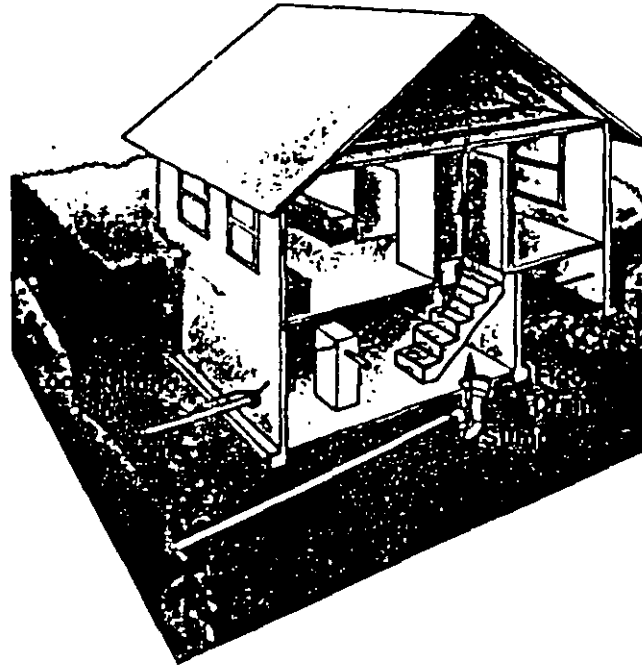
Radon moving through soil pore spaces and rock fractures near the surface of the earth usually escapes into the atmosphere. Where a house is present, however, soil air often flows toward its foundation for three reasons: differences in air pressure between the soil and the house, the presence of openings in the house's foundation, and increases in permeability around the basement (if one is present).

In constructing a house with a basement, a hole is dug, footings are set, and coarse gravel is usually laid down as a base for the basement slab. Then, once the basement walls have been built, the gap between the basement walls and the ground outside is filled with material that often is more permeable than the original ground. This filled gap is called a disturbed zone.

Radon moves into the disturbed zone and the gravel bed underneath from the surrounding soil. The backfill material in the disturbed zone is commonly rocks and soil from the foundation site, which also generate and release radon. The amount of radon in the disturbed zone and gravel bed depends on the amount of uranium present in the rock at the site, the type and permeability of soil surrounding the disturbed zone and underneath the gravel bed, and the soil's moisture content.

The air pressure in the ground around most houses is often greater than the air pressure inside the house. Thus, air tends to move from the disturbed zone and gravel bed into the house through openings in the house's foundation. All house foundations have openings such as cracks, utility entries, seams between foundation walls and slabs, sumps, permeable foundation materials, and uncovered soil in crawl spaces and basements.

Most houses draw less than one percent of their indoor air from the soil; the remainder comes from outdoor air, which is generally quite low in radon. Houses with low indoor air pressures, poorly sealed foundations, and several entry points for soil air, however, may draw as much as 20 percent of their indoor air from the soil. Even if the soil air has only moderate levels of radon, levels inside the house may be very high.



Radon can enter a house through many paths

## REACTORES NUCLEARES

UN REACTOR NUCLEAR CONSTA DE TRES ELEMENTOS PRINCIPALES:

EL COMBUSTIBLE, EL MODERADOR Y EL FLUIDO REFRIGERANTE

EL COMBUSTIBLE NUCLEAR SE OBTIENE A PARTIR DE LA FISIÓN DEL URANIO. EL URANIO SE UTILIZA EN SU FORMA NATURAL CONTENIENDO UN 0.7% DE URANIO-235 O BIEN EN FORMA DE URANIO ENRIQUECIDO, AL QUE ARTIFICIALMENTE SE ELEVA LA CONCENTRACIÓN HASTA UN 3 Ó 4%. EL URANIO NATURAL SE COLOCA EN LOS REACTORES EN FORMA DE URANIO METÁLICO O DE ÓXIDO DE URANIO, DISPUESTO EN BARRAS COMPACTAS O TUBOS CORTOS DE VARIOS CENTÍMETROS DE DIÁMETRO Y LONGITUD.

EL MODERADOR ES EL QUE HACE POSIBLE LA REACCIÓN NUCLEAR. PARA QUE EL CHOQUE DE UN NEUTRON PUEDA PRODUCIR UNA FISIÓN ES PRECISO QUE LA VELOCIDAD DEL NEUTRON SEA DEL ORDEN DE 2 KM/SEG. CUANDO EL NEUTRON SALE DEL NÚCLEO FISIONADO LLEVA UNA VELOCIDAD DE 20,000 KM/SEG. LA FUNCIÓN DEL MODERADOR ES FRENAR NEUTRONES SIN ABSORVERLOS, EL MATERIAL DE LOS MODERADORES ES GENERALMENTE GRAFITO, AGUA PESADA Y ALGUNOS LÍQUIDOS ORGÁNICOS.

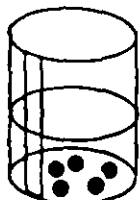
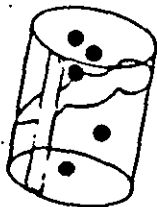
EL FLUIDO REFRIGERANTE TIENE COMO FUNCIÓN EVACUAR EL CALOR PRODUCIDO POR EL COMBUSTIBLE PARA PRODUCIR VAPOR.

## Radon in water

Radon can also enter homes through their water systems. Water in rivers and reservoirs usually contains very little radon, because it escapes into the air; so homes that rely on surface water usually do not have a radon problem from their water. In big cities, water processing in large municipal systems aerates the water, which allows radon to escape, and also delays the use of water until most of the remaining radon has decayed.

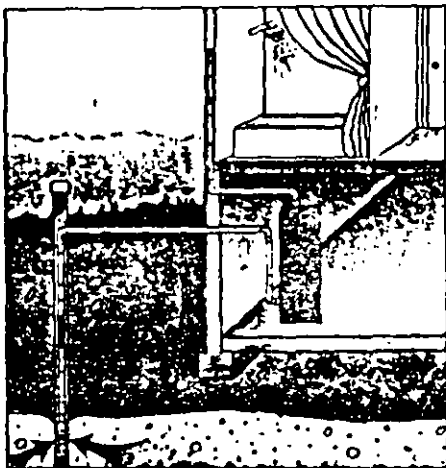
In many areas of the country, however, ground water is used as the main water supply for homes and communities. These small public water works and private domestic wells often have closed systems and short transit times that do not remove radon from the water or permit it to decay. This radon escapes from the water to the indoor air as people take showers, wash clothes or dishes, or otherwise use water. In general, house water with 10,000 pCi/L of radon contributes about 1 pCi/L to the level of radon in the indoor air.

The areas most likely to have problems with radon in ground water are areas that have high levels of uranium in the underlying rocks. For example, granites in various parts of the United States have resulted in high levels of radon in ground water that is supplied to private water supplies.



Radon escapes from water when it is agitated

In areas where the main water supply is from private wells and small public water works, radon in ground water can add 1 pCi/L to the indoor air radon level.



## Radon Potential

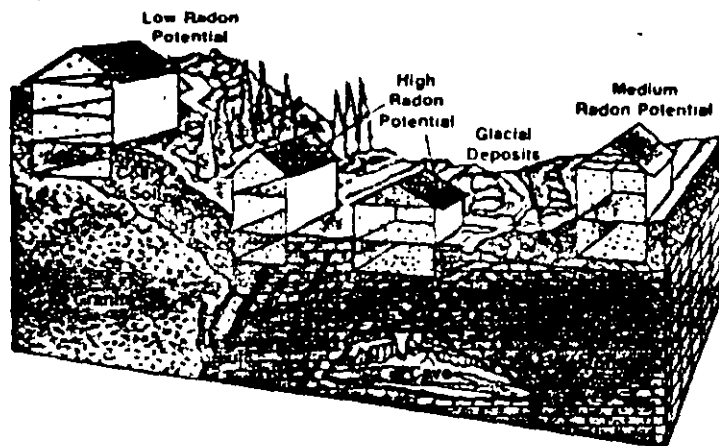


You can get an idea as to how concerned you should be about radon in your house by learning about the geology of the site and its radon potential. If your house is in an area with a high potential for radon, then chances are that your house has an indoor radon problem. However, as we have discussed, the way a house is built can increase the risk—so even in areas of low radon potential, some houses can have unhealthy radon levels.

Scientists evaluate the radon potential of an area and create a radon potential map by using a variety of data. These data include the uranium or radium content of the soils and underlying rocks and the permeability and moisture content of the soils. Usually maps of these factors are not available, and other indirect sources of information about these factors, such as geologic maps, maps of surface radioactivity, and soil maps, are used.

Another type of information that scientists use in determining the radon potential of an area is radon measurements of local soil air. Existing indoor radon data for homes also are useful. These data are the most direct information available about indoor radon potential, even though the houses that have been sampled may not be typical for the area and exact location information for measured houses is seldom available.

Knowing the types of rock and soil at a site helps a geologist determine its radon potential.



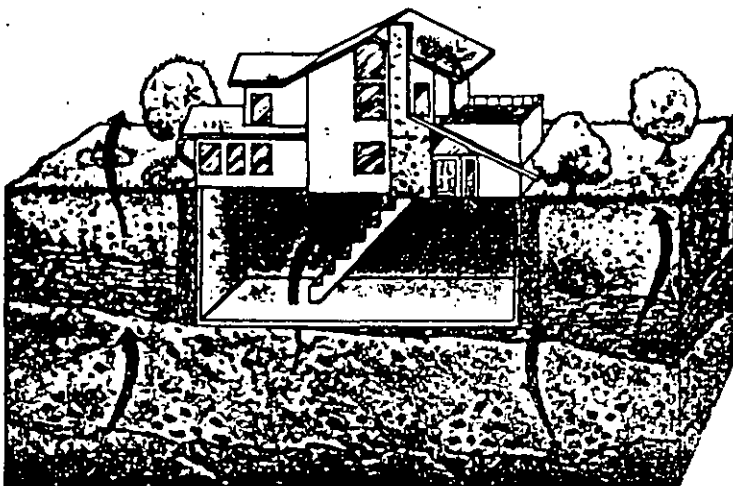


## Preface



High levels of indoor radon are found in every State. We know from medical and environmental studies that radon can be a health risk, primarily as a cause of lung cancer. Radon comes from the soil, rock, and water around us. Because levels of radon vary from place to place, and because houses differ in their vulnerability to radon, it is important that all houses be measured for radon. This booklet presents important geological information about radon; how it forms, the kinds of rocks and soils it comes from, and how it moves through the ground or is carried by water into buildings. Also this booklet explains the way geologists estimate the radon potential of an area, be it a State, a county, or your neighborhood. Finally it tells where you can get more information about radon.

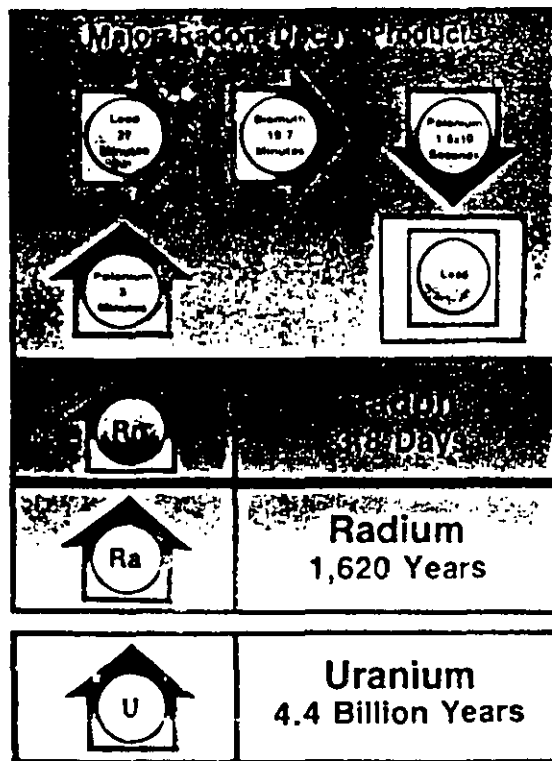
Radon gas, a radioactive product of uranium, can reach high levels in some houses, depending on the local geology and house construction.



## What Is Radon?



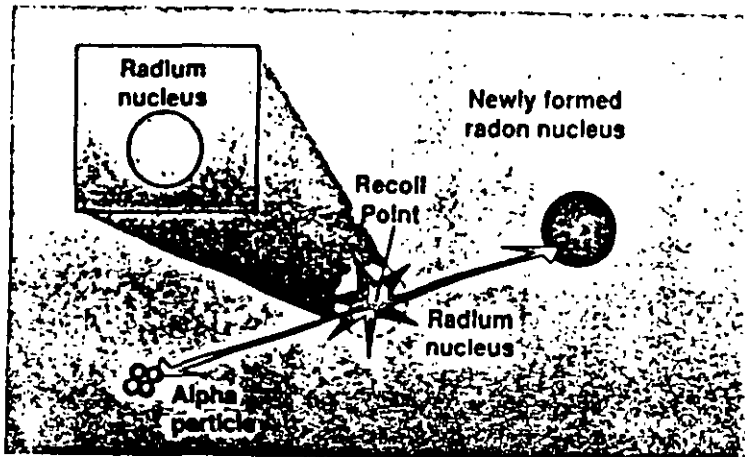
Radon is a gas produced by the radioactive decay of the element radium. Radioactive decay is a natural, spontaneous process in which an atom of one element decays or breaks down to form another element by losing atomic particles (protons, neutrons, or electrons). When solid radium decays to form radon gas, it loses two protons and two neutrons. These two protons and two neutrons are called an alpha particle, which is a type of radiation. The elements that produce radiation are called radioactive. Radon itself is radioactive because it also decays, losing an alpha particle and forming the element polonium.



## Radon formation

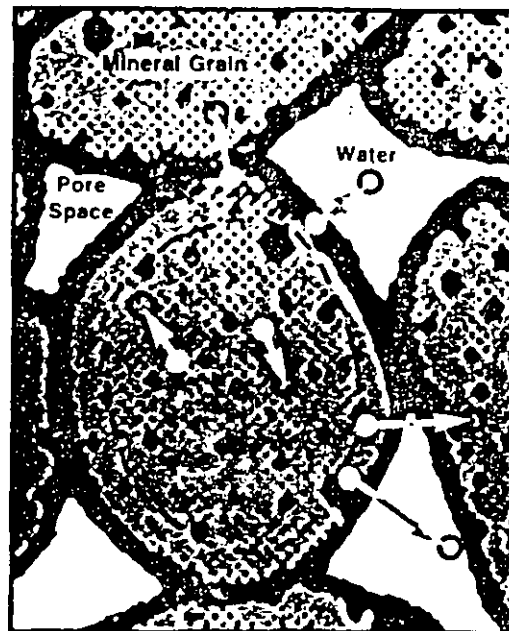
Just as uranium is present in all rocks and soils, so are radon and radium because they are daughter products formed by the radioactive decay of uranium.

Each atom of radium decays by ejecting from its nucleus an alpha particle composed of two neutrons and two protons. As the alpha particle is ejected, the newly formed radon atom recoils in the opposite direction, just as a high-powered rifle recoils when a bullet is fired. Alpha recoil is the most important factor affecting the release of radon from mineral grains.



A radium atom decays to radon by releasing an alpha particle, containing two neutrons and two protons, from its nucleus.

The location of the radium atom in the mineral grain (how close it is to the surface of the grain) and the direction of the recoil of the radon atom (whether it is toward the surface or the interior of the grain) determine whether or not the newly formed radon atom enters the pore space between mineral grains. If a radium atom is deep within a big grain, then regardless of the direction of recoil, it will not free the radon from the grain, and the radon atom will remain embedded in the mineral. Even when a radium atom is near the surface of a grain, the recoil will send the radon



Area within a mineral grain from which radon can potentially escape into pore space

Radium atom before it decays to radon

Newly formed radon atom

Most of the radon produced within a mineral grain remains embedded in the grain, only 10 to 50 percent escapes to enter the pore space. If water is present in the pore space, the radon atom can more easily remain in the pore space, if the pore space is dry, the radon atom may shoot across the pore and embed in another grain where it cannot move.

atom deeper into the mineral if the direction of recoil is toward the grain's core. However, the recoil of some radon atoms near the surface of a grain is directed toward the grain's surface. When this happens, the newly formed radon leaves the mineral and enters the pore space between the grains or the fractures in the rocks.

The recoil of the radon atom is quite strong. Often newly formed radon atoms enter the pore space, cross all the way through the pore space, and become embedded in nearby mineral grains. If water is present in the pore space, however, the moving radon atom slows very quickly and is more likely to stay in the pore space.

For most soils, only 10 to 50 percent of the radon produced actually escapes from the mineral grains and enters the pores. Most soils in the United States contain between 0.33 and 1 pCi of radium per gram of mineral matter and between 200 and 2,000 pCi of radon per liter of soil air.

## **DISTRIBUCION GEOLOGICA DEL RADÓN**

**Su distribución en distintos tipos de acuíferos, ha sido estudiada por Michel, 1987, quien determinó que las mayores concentraciones de radón, en acuíferos compuestos por rocas ígneas y metamórficas, están en función del contenido de Uranio en el acuífero y el patrón de flujo subterráneo. Los niveles más altos se han encontrado, como es de esperarse, en acuíferos compuestos por rocas intrusivas de composición félsica.**

**El Radón contenido en agua subterránea emplazada en rocas metamórficas, varía ampliamente y se ha encontrado que no hay relación aparente, entre su concentración y el grado de metamorfismo. No obstante, en algunos estudios se ha determinado que el alto grado de metamorfismo se relaciona a altas concentraciones de Radón, como lo es en terrenos donde se han desarrollado pegmatitas con mineralización de Uranio, así como también en esquistos y gneiss, que por su mineralogía presentan niveles de Radón más altos que las rocas metasedimentarias.**

## **DISTRIBUCION GEOLOGICA DEL RADON**

**En los acuíferos granulares, compuestos por arenas de cuarzo principalmente, el uranio presente es casi nulo, debido a que esas unidades han pasado por un largo proceso de intemperismo y transporte, lo que propicia que se presente escasa concentración de radón. Sin embargo pueden existir areniscas que alojen yacimientos de uranio de tipo secundario, que ha sido depositado a partir del agua subterránea en un medio reductor.**

**Las arcosas generalmente provienen de sedimentos producto del intemperismo y disgregación de rocas graníticas, los cuales no han sido transportados muy lejos de la roca madre, por lo tanto un intenso intemperismo químico ha alterado los feldespatos a arcillas, que fijan parte del Uranio original. Estos acuíferos contienen concentraciones de Radón que dependerán de la distancia a los ambientes de depósito y procesos por los que hayan pasado los sedimentos que los componen, así como a las características hidráulicas del acuífero, (K y S).**

## **DISTRIBUCION GEOLOGICA DEL RADON**

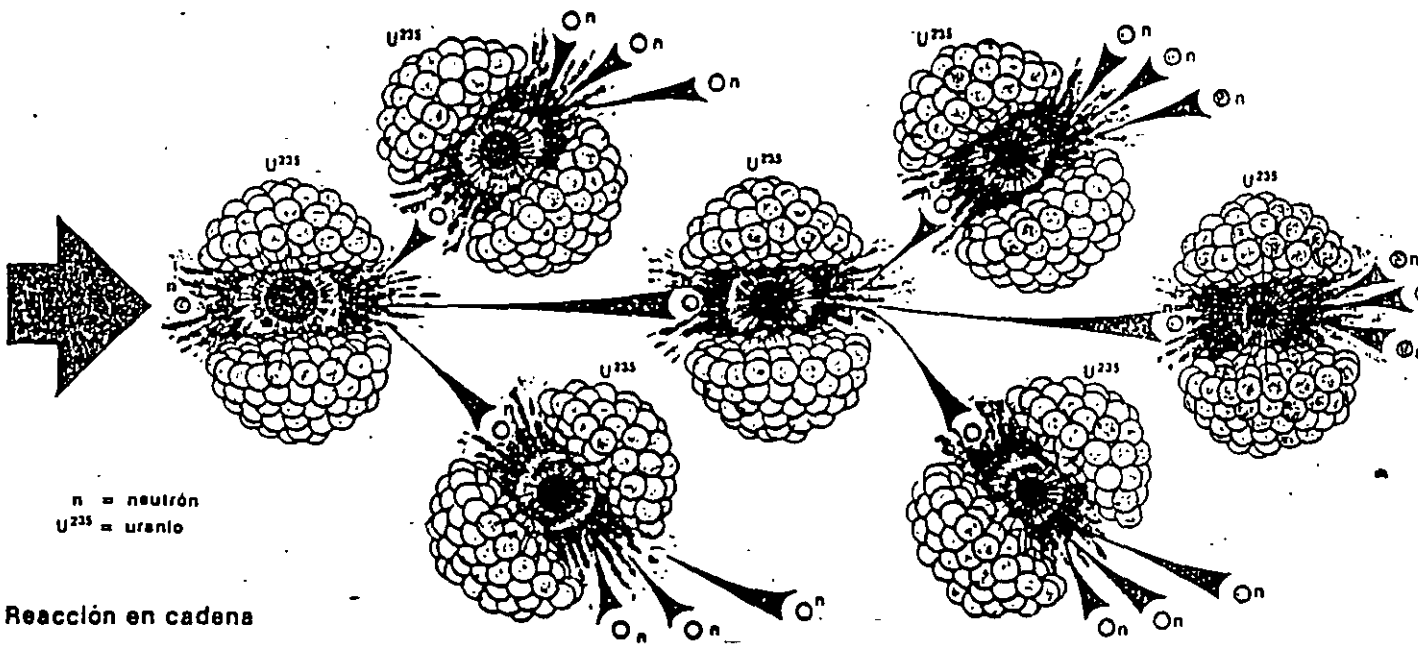
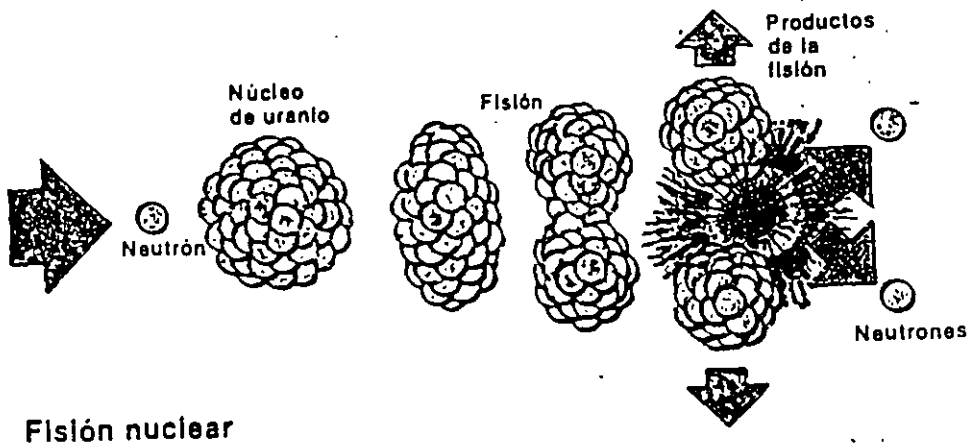
**La distribución geológica del Radón esta directamente relacionada con la geoquímica del Uranio y del Torio. En la fusión parcial y cristalización fraccionada del magma, el Uranio y el Torio se concentran en la fase líquida y se incorporan en los productos más ricos en sílice. Por este motivo, las rocas igneas, (aquellas que se forman por la solidificación de una lava o magma) de composición granítica están fuertemente enriquecidas en Uranio y Torio, en comparación con rocas de composición basáltica y ultramáfica, (Faure, 1986).**

## **GENERALIDADES DEL RADON-222**

**El Radón-222 es un gas inerte radiactivo, que pertenece al grupo de los gases nobles. Tiene el más alto punto de fusión y ebullición, así como temperatura y presión críticas, (Cothorn, 1987). Ocurre naturalmente como parte de la cadena de desintegración del Uranio, de donde se derivan sus tres isótopos naturales.**

**Debido a su vida media y subproducto de decaimiento, el isótopo más importante de analizar es el Radón-222. Es incoloro, inodoro, y químicamente inerte. Debido a sus característica de emisión radiactiva y solubilidad en agua, es utilizado como trazador en el área hidrogeológica.**

m.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)	Elem.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)	Elem.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)	Elem.	AMU	Isotopic Comp. (at.%)
H <sup>1</sup>	1.007825	99.985	Zn <sup>67</sup>	66.927129	4.1	Sn <sup>115</sup>	114.903348	0.36	Dy <sup>164</sup>	163.929171	28.2
H <sup>2</sup>	2.0140	0.015	Zn <sup>68</sup>	67.924846	18.8	Sn <sup>116</sup>	115.901747	14.53	Ho <sup>165</sup>	164.930319	100
He <sup>3</sup>	3.01608	0.00138	Zn <sup>70</sup>	69.925325	0.6	Sn <sup>117</sup>	116.902956	7.68	Er <sup>162</sup>	161.928775	0.14
He <sup>4</sup>	4.00260	99.999862	Ga <sup>69</sup>	68.925580	60.1	Sn <sup>118</sup>	117.901609	24.22	Er <sup>164</sup>	163.929198	1.61
Li <sup>6</sup>	.015121	7.5	Ga <sup>71</sup>	70.924700	39.9	Sn <sup>119</sup>	118.903310	8.58	Er <sup>166</sup>	165.930290	33.6
Li <sup>7</sup>	7.016003	92.5	Ge <sup>70</sup>	69.924250	20.5	Sn <sup>120</sup>	119.902200	32.59	Er <sup>167</sup>	166.932046	22.95
Ba <sup>9</sup>	9.012182	100	Ge <sup>72</sup>	71.922079	27.4	Sn <sup>122</sup>	121.903440	4.63	Er <sup>168</sup>	167.932368	26.8
B <sup>10</sup>	10.012937	19.9	Ge <sup>73</sup>	72.923463	7.8	Sn <sup>124</sup>	123.905274	5.79	Er <sup>170</sup>	169.935461	14.9
B <sup>11</sup>	11.009305	80.1	Ge <sup>74</sup>	73.921177	36.5	Sb <sup>121</sup>	120.903821	57.3	Tm <sup>169</sup>	168.934212	100
C <sup>12</sup>	12.000000	98.90	Ge <sup>76</sup>	75.921401	7.8	Sb <sup>123</sup>	122.904216	42.7	Yb <sup>164</sup>	167.933891	0.13
C <sup>13</sup>	13.003355	1.10	As <sup>75</sup>	74.921591	100	Te <sup>130</sup>	119.904048	0.096	Yb <sup>170</sup>	169.934759	3.05
N <sup>14</sup>	14.003074	99.634	Se <sup>74</sup>	73.922475	0.9	Te <sup>132</sup>	121.903054	2.60	Yb <sup>171</sup>	170.936323	14.3
N <sup>15</sup>	15.000108	0.366	Se <sup>76</sup>	75.919212	9.0	Te <sup>133</sup>	122.904271	0.908	Yb <sup>172</sup>	171.936376	21.7
O <sup>16</sup>	15.994915	99.762	Se <sup>77</sup>	76.919912	7.6	Te <sup>134</sup>	123.902823	4.816	Yb <sup>173</sup>	172.938208	16.12
O <sup>17</sup>	16.999131	0.038	Se <sup>78</sup>	77.917301	23.6	Te <sup>135</sup>	124.904433	7.14	Yb <sup>174</sup>	173.938859	31.8
O <sup>18</sup>	17.999160	0.200	Se <sup>80</sup>	79.916520	49.7	Te <sup>136</sup>	125.903314	18.95	Yb <sup>176</sup>	175.942564	12.7
F <sup>19</sup>	18.998403	100	Se <sup>82</sup>	81.916698	9.2	Te <sup>138</sup>	127.904463	31.69	Lu <sup>175</sup>	174.940770	97.41
Ne <sup>20</sup>	19.992435	90.51	Br <sup>79</sup>	78.918336	50.69	Te <sup>139</sup>	129.906229	33.80	Lu <sup>176</sup>	175.942679	2.59
Ne <sup>21</sup>	20.993843	0.27	Br <sup>81</sup>	80.916289	49.31	I <sup>127</sup>	126.904473	100	Hf <sup>174</sup>	173.940041	0.162
Ne <sup>22</sup>	21.991383	9.22	Kr <sup>78</sup>	77.920397	0.35	Xe <sup>134</sup>	123.905894	0.10	Hf <sup>176</sup>	175.941406	5.206
Ne <sup>23</sup>	22.989767	100	Kr <sup>80</sup>	79.916380	2.25	Xe <sup>136</sup>	125.904281	0.09	Hf <sup>177</sup>	176.943217	18.606
Mg <sup>24</sup>	23.985042	78.99	Kr <sup>82</sup>	81.913482	11.6	Xe <sup>138</sup>	127.903531	1.91	Hf <sup>178</sup>	177.943696	27.297
Mg <sup>25</sup>	24.985837	10.00	Kr <sup>83</sup>	82.914135	11.5	Xe <sup>139</sup>	128.904780	26.4	Hf <sup>179</sup>	178.945812	13.629
Mg <sup>26</sup>	25.982593	11.01	Kr <sup>84</sup>	83.911507	57.0	Xe <sup>140</sup>	129.903509	4.1	Hf <sup>180</sup>	179.946545	35.100
Al <sup>27</sup>	26.98154	100	Kr <sup>86</sup>	85.910616	17.3	Xe <sup>141</sup>	130.905072	21.2	Ta <sup>180</sup>	179.947462	0.012
Si <sup>28</sup>	27.976927	92.23	Rb <sup>85</sup>	84.911794	72.165	Xe <sup>142</sup>	131.904144	26.9	Ta <sup>181</sup>	180.947992	99.988
Si <sup>29</sup>	28.976495	4.67	Rb <sup>87</sup>	86.909187	27.835	Xe <sup>144</sup>	133.905395	10.4	W <sup>180</sup>	179.946701	0.13
Si <sup>30</sup>	29.973770	3.10	Sr <sup>84</sup>	83.913430	0.56	Xe <sup>146</sup>	135.907214	8.9	W <sup>182</sup>	181.948202	26.3
Si <sup>31</sup>	30.973762	100	Sr <sup>86</sup>	85.909267	9.86	Cs <sup>133</sup>	132.905429	100	W <sup>183</sup>	182.950220	14.3
S <sup>32</sup>	31.972070	95.02	Sr <sup>87</sup>	86.908881	7.00	Ba <sup>130</sup>	129.906282	0.106	W <sup>184</sup>	183.950928	30.67
S <sup>33</sup>	32.971456	0.75	Sr <sup>88</sup>	87.905619	82.58	Ba <sup>132</sup>	131.905042	0.101	W <sup>186</sup>	185.954357	28.6
S <sup>34</sup>	33.967866	4.21	Y <sup>89</sup>	88.905849	100	Ba <sup>134</sup>	133.904486	2.417	Re <sup>185</sup>	184.952951	37.40
S <sup>36</sup>	35.967080	0.22	Zr <sup>90</sup>	89.904703	51.45	Ba <sup>135</sup>	134.905665	6.592	Re <sup>187</sup>	186.955744	62.60
Cl <sup>35</sup>	34.968852	75.77	Zr <sup>91</sup>	90.905644	11.22	Ba <sup>136</sup>	135.904553	7.854	Os <sup>184</sup>	183.952488	0.02
Cl <sup>37</sup>	36.965903	24.23	Zr <sup>92</sup>	91.905039	17.15	Ba <sup>137</sup>	136.905812	11.23	Os <sup>186</sup>	185.953830	1.58
Ar <sup>36</sup>	35.967545	0.337	Zr <sup>94</sup>	93.906314	17.38	Ba <sup>138</sup>	137.905232	71.70	Cs <sup>187</sup>	186.955741	1.6
Ar <sup>38</sup>	37.962732	0.063	Zr <sup>96</sup>	95.908275	2.80	La <sup>138</sup>	137.907105	0.09	Os <sup>188</sup>	187.955860	13.3
Ar <sup>39</sup>	39.962384	99.60	Nb <sup>93</sup>	92.906377	100	La <sup>139</sup>	138.906346	99.91	Os <sup>189</sup>	188.958137	16.1
K <sup>39</sup>	38.963707	93.2581	Mo <sup>92</sup>	91.905085	14.84	Ce <sup>136</sup>	135.90740	0.19	Os <sup>190</sup>	189.95836	26.4
K <sup>40</sup>	39.963999	0.0117	Mo <sup>94</sup>	93.906813	9.25	Ce <sup>138</sup>	137.905985	0.25	Os <sup>192</sup>	191.961467	41.0
K <sup>41</sup>	40.961825	6.7302	Mo <sup>95</sup>	94.905840	15.92	Ce <sup>140</sup>	139.905433	88.48	Ir <sup>191</sup>	190.960584	37.3
Ca <sup>40</sup>	39.962591	96.941	Mo <sup>96</sup>	95.904678	16.68	Ce <sup>142</sup>	141.907241	11.08	Ir <sup>193</sup>	192.962917	62.7
Ca <sup>42</sup>	41.958618	0.647	Mo <sup>97</sup>	96.906020	9.55	Pr <sup>141</sup>	140.907647	100	Pr <sup>190</sup>	189.959917	0.01
Ca <sup>43</sup>	42.958766	0.135	Mo <sup>98</sup>	97.905406	24.13	Nd <sup>142</sup>	141.907719	27.13	Pr <sup>192</sup>	191.961019	0.79
Ca <sup>44</sup>	43.955480	2.086	Mo <sup>100</sup>	99.907477	9.63	Nd <sup>143</sup>	142.909810	12.18	Pr <sup>194</sup>	193.962655	32.9
Ca <sup>46</sup>	45.953689	0.004	Tc	-	-	Nd <sup>144</sup>	143.910083	23.80	Pr <sup>195</sup>	194.964766	33.8
Ca <sup>48</sup>	47.952533	0.187	Ru <sup>96</sup>	95.907599	5.52	Nd <sup>145</sup>	144.912570	8.30	Pr <sup>196</sup>	195.964926	25.3
Sc <sup>45</sup>	44.955910	100	Ru <sup>98</sup>	97.905287	18.9	Nd <sup>146</sup>	145.913113	17.19	Pr <sup>198</sup>	197.967869	7.2
Ti <sup>46</sup>	45.952629	8.0	Ru <sup>99</sup>	98.905939	17.7	Nd <sup>148</sup>	147.916889	5.76	Au <sup>197</sup>	196.966543	100
Ti <sup>47</sup>	46.951764	7.3	Ru <sup>100</sup>	99.904219	12.6	Nd <sup>150</sup>	149.920887	5.64	Hg <sup>196</sup>	195.965807	0.34
Ti <sup>48</sup>	47.947947	73.8	Ru <sup>101</sup>	100.905582	7.0	Pm	-	-	Hg <sup>198</sup>	197.966743	10.02
Ti <sup>49</sup>	48.947871	5.5	Ru <sup>102</sup>	101.904348	31.6	Sm <sup>144</sup>	143.911998	3.1	Hg <sup>199</sup>	198.968254	16.84
Ti <sup>50</sup>	49.944792	5.4	Ru <sup>104</sup>	103.90542	18.7	Sm <sup>147</sup>	146.914895	15.0	Hg <sup>200</sup>	199.968300	23.13
V <sup>50</sup>	49.947161	0.250	Rh <sup>103</sup>	102.90555	100	Sm <sup>148</sup>	147.914820	11.3	Hg <sup>201</sup>	200.970277	13.22
V <sup>51</sup>	50.943962	99.750	Pd <sup>102</sup>	101.90564	1.020	Sm <sup>149</sup>	148.917181	13.8	Hg <sup>202</sup>	201.970617	29.80
Cr <sup>50</sup>	49.946046	4.345	Pd <sup>104</sup>	103.90429	11.14	Sm <sup>150</sup>	149.917273	7.4	Hg <sup>204</sup>	203.973167	6.85
Cr <sup>52</sup>	51.940509	83.789	Pd <sup>106</sup>	104.905079	22.33	Sm <sup>152</sup>	151.919729	26.7	Tl <sup>203</sup>	202.972320	29.524
Cr <sup>53</sup>	52.940651	9.501	Pd <sup>108</sup>	105.903478	27.33	Sm <sup>154</sup>	153.922206	22.7	Tl <sup>205</sup>	204.974401	70.476
Cr <sup>54</sup>	53.938882	2.365	Pd <sup>110</sup>	107.903895	26.46	Eu <sup>151</sup>	150.919847	47.8	Pb <sup>204</sup>	203.973020	1.4
Mn <sup>55</sup>	54.938047	100	Pd <sup>112</sup>	109.905167	11.72	Eu <sup>153</sup>	152.921225	52.2	Pb <sup>206</sup>	205.974440	24.1
Fe <sup>54</sup>	53.939612	5.8	Ag <sup>107</sup>	106.905092	51.839	Gd <sup>152</sup>	151.919786	0.20	Pb <sup>207</sup>	206.975872	22.1
Fe <sup>56</sup>	55.934939	91.72	Ag <sup>109</sup>	108.904757	48.161	Gd <sup>154</sup>	153.920861	2.18	Pb <sup>208</sup>	207.976627	52.4
Fe <sup>57</sup>	56.935396	2.2	Cd <sup>106</sup>	105.906461	1.25	Gd <sup>156</sup>	154.922618	14.80	Bi <sup>209</sup>	208.980374	100
Fe <sup>58</sup>	57.933277	0.28	Cd <sup>108</sup>	107.904176	0.89	Gd <sup>158</sup>	155.922118	20.47	Po	-	-
Co <sup>59</sup>	58.933198	100	Cd <sup>110</sup>	109.903005	12.49	Gd <sup>157</sup>	156.923956	15.65	Ar	-	-
Ni <sup>58</sup>	57.935346	68.27	Cd <sup>111</sup>	110.904182	12.80	Gd <sup>158</sup>	157.924099	24.84	Rn	-	-
Ni <sup>60</sup>	59.930788	26.10	Cd <sup>112</sup>	111.902758	24.13	Gd <sup>160</sup>	159.927049	21.86	Fr	-	-
Ni <sup>61</sup>	60.931058	1.13	Cd <sup>113</sup>	112.904400	12.22	Tb <sup>159</sup>	158.925342	100	Ra	-	-
Ni <sup>62</sup>	61.928346	3.59	Cd <sup>114</sup>	113.903357	28.73	Dy <sup>156</sup>	155.925277	0.06	Ac	-	-
Ni <sup>64</sup>	63.927968	0.91	Cd <sup>116</sup>	115.904754	7.49	Dy <sup>158</sup>	157.924403	0.10	Th <sup>232</sup>	232.038064	100
Cu <sup>63</sup>	62.939598	69.17	In <sup>113</sup>	112.904061	4.3	Dy <sup>160</sup>	159.925193	2.34	Pa	-	-
Cu <sup>65</sup>	64.927793	30.83	In <sup>115</sup>	114.903880	95.7	Dy <sup>161</sup>	160.926930	18.9	U <sup>234</sup>	234.040946	0.0055
Zn <sup>64</sup>	63.929145	48.6	Sn <sup>112</sup>	111.904826	0.97	Dy <sup>162</sup>	161.926795	25.5	U <sup>235</sup>	235.043924	0.720
Zn <sup>66</sup>	65.926034	27.9	Sn <sup>114</sup>	113.902784	0.65	Dy <sup>163</sup>	162.928728	24.9	U <sup>238</sup>	238.050784	99.2745





## ENERGIA TERMICA Y CALORIFICA

LA FUENTE MÁS IMPORTANTE EN ESTE TIPO DE ENERGÍA ES EL SOL. LOS HIDROCARBUROS Y EL CARBÓN SON OTRA FUENTE DE ENERGÍA TÉRMICA QUE LIBERAN CALOR AL QUEMARSE, LAS RESERVAS DETECTADAS GARANTIZAN SU DISPONIBILIDAD HASTA LOS PRIMEROS LUSTROS DEL PRÓXIMO SIGLO.

LA MODERNA FUENTE DE ENERGÍA TÉRMICA ES EL NÚCLEO DEL ÁTOMO. A PRINCIPIOS DE ESTE SIGLO ALBERT EINSTEIN POSTULÓ QUE TODO EL UNIVERSO ES ENERGÍA; QUE LA ENERGÍA Y LA MATERIA SON LA MISMA COSA EXPRESANDO LA SIGUIENTE RELACIÓN A ESTE POSTULADO:

$$E = MC^2$$

SE REALIZARON EXPERIMENTOS QUE CULMINARON CON LA FISION O RUPTURA DE NÚCLEOS DE ÁTOMOS DE URANIO-235 LOGRANDO QUE UNA PEQUEÑA PARTE DE MATERIA SE TRANSFORMARA EN ENERGÍA TÉRMICA LOGRANDO CORROBORAR LAS TEORÍAS DE EINSTEIN.

EL ÁTOMO ESTÁ FORMADO POR PROTONES, ELECTRONES Y NEUTRONES. EL NÚMERO DE PROTONES QUE CONTIENE EL NÚCLEO DE UNA ÁTOMO DETERMINA EL NUMERO ATOMICO Y ES IGUAL AL NÚMERO DE ELECTRONES ORBITALES. EL NÚMERO DE PROTONES Y NUETRONES SE CONOCE COMO MASA ATOMICA.

EN LA NATURALEZA EXISTEN 272 ÁTOMOS ESTABLES CON MASAS ATOMICAS DIFERENTES QUE DAN LUGAR A LOS 103 ELEMENTOS.

CADA ELEMENTO ESTÁ FORMADO POR EL MISMO NUMERO ATOMICO PERO PUEDE TENER DIFERENTE MASA ATOMICA, A ESTOS ELEMENTOS SE LES CONOCE CON EL NOMBRE DE ISOTOPOS.

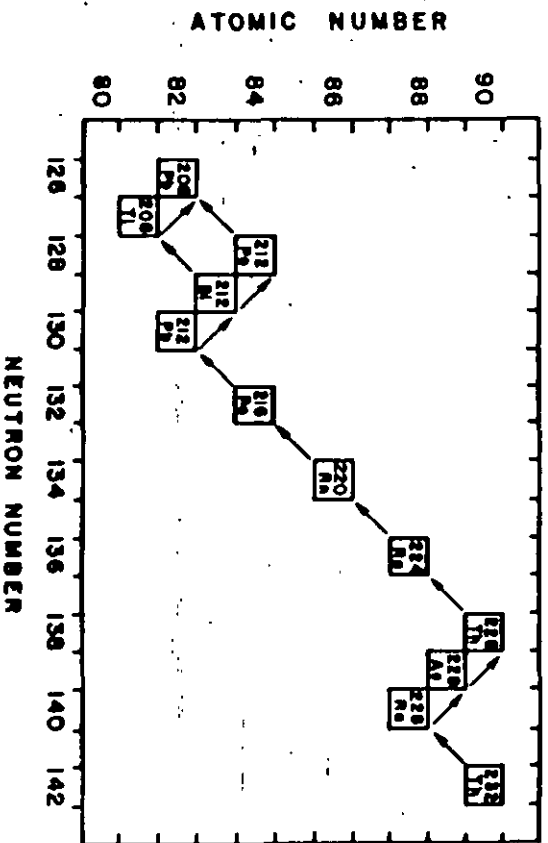
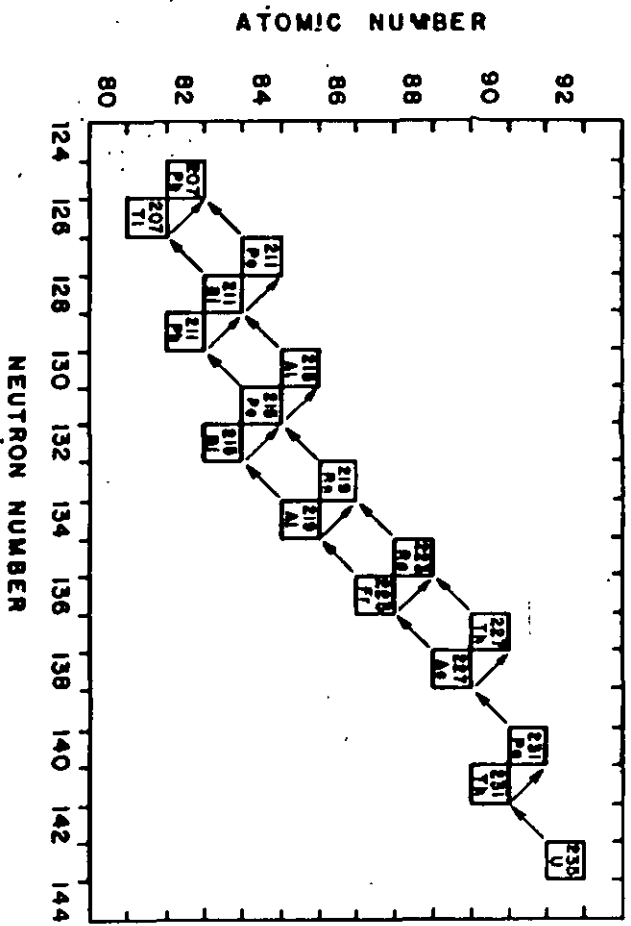
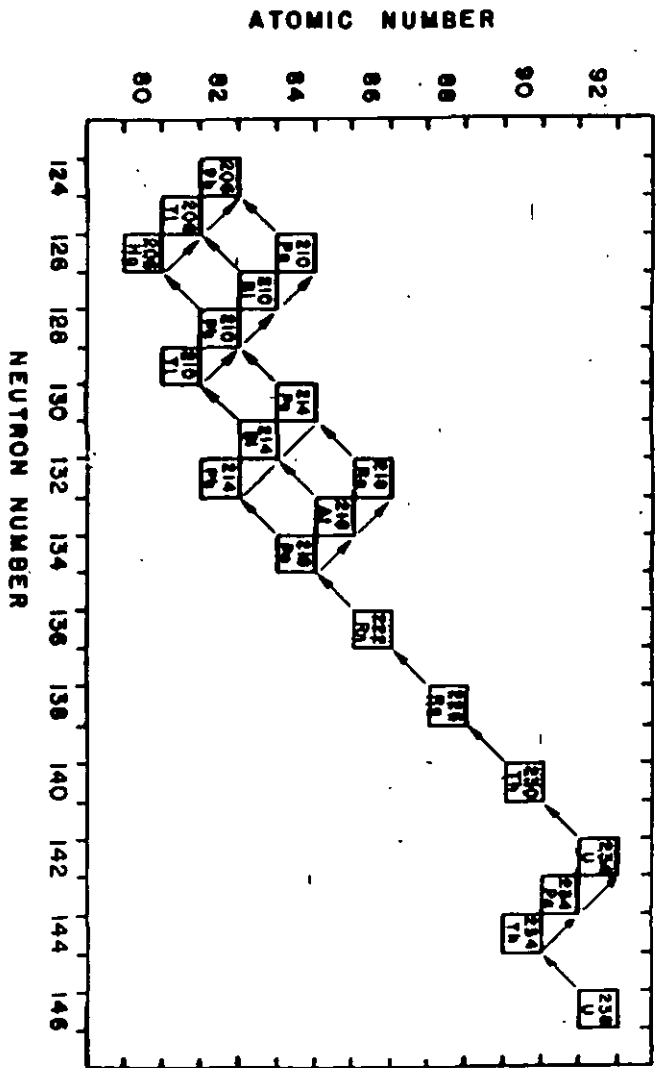
EN LOS EXPERIMENTOS SOBRE RADIOACTIVIDAD EN ELEMENTOS TALES COMO URANIO, POLONIO Y RADIO, LLEVADOS A CABO A FINES DEL SIGLO PASADO POR HENRI BECQUEREL Y LOS CURIE CONDUJERON AL DESCUBRIMIENTO DEL FENÓMENO DE LA TRANSMUTACION DE UN ÁTOMO EN OTRO DIFERENTE A PARTIR DE UNA DESINTEGRACION ESPONTANEA LA CUAL OCURRÍA CON GRAN DESPRENDIMIENTO DE ENERGÍA.

ESTOS EXPERIMENTOS Y LA PROPUESTA DE EINSTEIN CONDUJERON A QUE SI SE LOGRABA DESINTEGRAR A VOLUNTAD LOS ÁTOMOS DE ALGÚN ELEMENTO SE LOGRARÍAN OBTENER CANTIDADES FABULOSAS DE ENERGIA.

EN 1938 SE COMPROBÓ EL FENÓMENO DE FISION NUCLEAR, BOMBARDEANDO CON NUETRONES A NUCLEOS DE URANIO-235. EN ESTA REACCIÓN CADA NÚCLEO SE PARTE EN DOS NÚCLEOS DE MASAS INFERIORES, EMITIENDO RADIACIONES, Y LIBERANDO ENERGÍA QUE SE MANIFIESTA EN FORMA TERMICA Y EMITIENDO DOS O TRES NUEVOS NEUTRONES.

ENRICO FERMI TRATÓ DE MANTENER Y CONTROLAR UNA REACCIÓN NUCLEAR UTILIZANDO LOS NUETRONES PRODUCIDOS EN LA FISION NUCLEAR PARA FISIONAR A SU VEZ OTROS NÚCLEOS DEL MISMO ISÓTOPO PRODUCIENDO CON ÉSTO UNA REACCION EN CADENA.

ESTOS DESCUBRIMIENTOS TUVIERON COMO PRIMERA APLICACIÓN LA MANUFACTURA DE BOMBAS ATOMICAS QUE FUERON UTILIZADAS DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL.



## **MINI-GLOSARIO**

- ROCAS FELSICAS LLAMADAS TAMBIEN ROCAS ACIDAS.**
- ROCAS MAFICAS LLAMADAS TAMBIEN BASICAS**
- EN LA MODALIDAD DE EXTRUSIVAS ESTAN LA RIOLITA COMO ACIDA Y EL BASALTO COMO BASICA.**
- EN LA MODALIDAD DE INTRUSIVAS ESTAN EL GRANITO COMO ACIDO Y EL GABRO COMO BASICA**
- PEGMATITAS SON ROCAS QUE SE ORIGINAN A GRANDES PROFUNDIDADES.**
- ESQUISTOS Y GNEISS SON ROCAS PRODUCTO DE METAMORFISMO REGIONAL, LA DIFERENCA ENTRE ELLAS ES SU FORMACION A DIFERENTES PRESIONES, UNO PUEDE TRANSFORMARSE EN EL OTRO. SON ROCAS FOLIADAS, DE MANERA NATURAL A PARTIR DEL PRIMERO SE FORMA EL SEGUNDO. SU ORIGEN PUEDE SER IGNEO O SEDIMENTARIO.**
- ARENISCAS ESTE TIPO DE ROCAS SEDIMENTARIAS ESTAN DIVIDIDAS EN TRES GRUPOS:**
  - ARENISCA DE CUARZO O CUARCITA, MAYOR CONTENIDO DE CUARZO.**
  - ARCOSAS EN- DONDE EL MAYOR CONTENIDO ES EL FELDESPATO.**
  - ARENISCAS LITICAS O LITARENITA EL MAYOR CONTENIDO ES DE FRAGMENTOS DE ROCAS, (VOLCÁNICAS, METAMORFICAS Y SEDIMENTARIAS).**



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***CALIDAD DEL AGUA***

**PRESENTADO POR: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

Primera edición: 1995

DR. © 1995. Universidad Nacional Autónoma de México

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Circuito Maestro Mario de la Cueva  
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México, D.F.

Impreso y hecho en México

ISBN 968-36-4802-9

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Serie E: Varios, núm. 69

Edición y formación en computadora al cuidado de Isidro Saucedo

# PEMEX: AMBIENTE Y ENERGÍA

## Los retos del futuro



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PETRÓLEOS MEXICANOS

MÉXICO, 1995

Aunque se ha venido haciendo mucho énfasis en el establecimiento de medidas preventivas con el fin de reducir o eliminar la descarga de materiales extraños al medio ambiente, no se puede ignorar la contaminación que ocurrió en el pasado.

Ante la inmensa superficie de zonas afectadas por la actividad humana, surge la necesidad de tomar acciones para controlar la dispersión de contaminantes y buscar su eliminación. En los países más avanzados se han desarrollado tecnologías para remediación y restauración de sitios, sin embargo, dado que cada sitio dañado constituye una problemática específica, se requiere el establecimiento de criterios y gran cantidad de información para decidir cómo controlar y eliminar los contaminantes.

Existen varios términos que comúnmente se usan como sinónimos: *remediación (remediation)*, *limpieza (clean-up)*, *restauración (restoration)*, *recuperación (reclamation)*, sin embargo, es necesario entender el contexto en el que estos se emplean, ya que puede hacerse alguna diferenciación entre ellos.

Se entiende por remediación o limpieza a las acciones que se toman para la reducción o eliminación de los niveles de contaminantes en suelo y subsuelo. Restauración o recuperación es la acción de devolver a un sitio, sus características originales. Es decir, rescatar o mejorar la función y la imagen que el suelo tenía antes de haber sido afectado por los contaminantes.

### *El concepto del suelo*

#### a) Desde el punto de vista científico-tecnológico

El suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la tierra, que ha sido formado mediante una dinámica natural a partir de la corteza terrestre con la influencia de factores genéticos y ambientales, proceso que ha tomado miles de años para tenerlo en su estado comúnmente conocido. Es un medio complejo y dinámico en constante evolución.

El suelo y el subsuelo en su conjunto, porque no pueden ser entidades separadas, tienen diversas funciones como: filtro amortiguador y transformador, productor de alimentos, hábitat biológico y reserva genética, medio físico para la construcción, fuente de materias primas y herencia cultural.

Suelo y subsuelo son el filtro que limpia el agua de lluvia que recarga los acuíferos y que los protege contra la contaminación. El agua de lluvia arrastra un sinúmero de compuestos, durante su recorrido éstos son retenidos en el subsuelo, de aquí que se hable de una capacidad amortiguadora. Algunos compuestos son transformados por la microbiota nativa, antes de llegar a los acuíferos. Para resaltar esta importante función del suelo conviene recordar que los acuíferos constituyen la fuente de suministro de agua de las poblaciones.

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida del hombre y los animales, permite la implantación de las raíces de las plantas y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas.

El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico y reserva genética. Se pueden desarrollar gran cantidad de vegetales y animales que forman parte de la cadena alimentaria y constituyen la riqueza de la biodiversidad, por lo que deben ser protegidos de su posible extinción.

Para la construcción, el suelo es la base física de las edificaciones, sean viviendas, industrias, lugares de recreación, sistemas de transporte o sitios para disposición de residuos. También, es fuente de materias primas como arcillas, arena, grava y minerales.

Finalmente, el suelo alberga una importante herencia cultural, representada por tesoros arqueológicos y paleontológicos, que son una fuente única de información que debe ser mantenida como un testimonio de la historia de la tierra y de la humanidad.

Todo lo anterior lleva a pensar en la necesidad de prevenir daño al suelo y recuperarlo cuando éste es afectado, pero nunca destruirlo, debido a que es un recurso natural difícilmente renovable.

#### b) Desde el punto de vista jurídico-administrativo

El suelo es parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y de su uso, razón por la que su cuidado es corresponsabilidad de todos los mexicanos. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que

la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la Nación [por lo que] se dictarán medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El título IV, capítulo III lleva por nombre *Prevención y Control de Contaminación del Suelo*, consta de 11 artículos, del 134 al 144 inclusive, pero en su redacción existe poca precisión. Menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, siendo que son uno de los tantos ejemplos de contaminación. La LGEEPA parece no considerar otros contaminantes que se derraman como parte de actividades industriales, como los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran residuos peligrosos.

Gran parte de los contaminantes del suelo y el subsuelo se generan en instalaciones que cuentan con tanques de almacenamiento de combustibles, los cuales son utilizados como materias primas. También en cementerios industriales que son zonas restringidas o de difícil acceso. Otros ejemplos de contaminantes son las aguas residuales que son vertidas sobre el suelo sin previo tratamiento, los lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento, la infiltración en canales de aguas residuales a cielo abierto, las fugas de alcantarillados y los agroquímicos.

La LGEEPA es el instrumento fundamental de referencia para realizar las auditorías ambientales, si partimos de la base que la legislación ambiental en materia de suelo es deficiente, las auditorías ambientales que oficialmente se realizan deben ser también deficientes. De ahí surge la necesidad de contar con una ley precisa en los aspectos considerados y clara en su redacción para evitar interpretaciones erróneas.

Otros instrumentos de referencia necesarios para que la ley pueda aplicarse y que no existen son: un Reglamento para la Protección del Medio Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y del Subsuelo y las normas oficiales mexicanas correspondientes.

Como producto de estos vacíos en la legislación, no se le ha dado al suelo su valor como un recurso natural y por lo que no se ha enfatizado la necesidad de limpiar las zonas dañadas.

#### c) Desde el punto de vista político y social

En la vida diaria de nuestro México, el suelo es visto con solamente dos ópticas, como el escenario de actividades agrícolas y forestales o bien como una superficie donde se asientan edificaciones.

Prácticamente todos los problemas de contaminación de suelos son ocasionados por actividades antropogénicas, ya sea por derrames accidentales o irresponsables, durante la descarga de subproductos o bien durante el transporte dentro y fuera de instalaciones industriales o de mantenimiento.

Somos una sociedad sin una cultura ambiental, no hemos sido educados para respetar a nuestro ambiente y esto ha sido la consecuencia de una actitud pasiva, que ha llegado incluso a nuestros gobernantes. En el pasado no se exigió a las industrias corregir los daños ocasionados por el derrame de contaminantes y ahora, la carencia de instrumentos legales y regulatorios en materia de suelo envuelve a todos los aspectos involucrados, en un círculo vicioso del que cada vez es más difícil salir.

Para involucrar a la sociedad, necesita haber pruebas de que hay voluntad política y ética detrás de todas las acciones encaminadas a mejorar el ambiente y la calidad de vida. La sociedad pierde cada vez más credibilidad en los funcionarios públicos, los problemas ambientales se han convertido en un tema de discursos políticos y el ambiente está cada vez más deteriorado. Esto ha venido a causar mayor desinterés de la sociedad, la cual asume un papel pasivo y ya no expresa sus ideas.

#### d) Desde el punto de vista internacional

Aparentemente, hasta la fecha no se ha reportado la migración de contaminantes a los países vecinos, que hayan sido vertidos en nuestro territorio. Debemos estar concientes de que los contaminantes no distinguen fronteras y si las condiciones de un sitio favorecen su migración, estaríamos en graves problemas, de ahí la necesidad de tomar acciones antes de que pase más tiempo. Algo que nos ha evitado más problemas es el hecho de que el petróleo, por sus características, penetra muy lentamente



## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

**SUMARIO:** I. *Introducción.* II. *El concepto de contaminación;* III. *Fuentes de contaminación en instalaciones petroleras.* IV. *Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos.* V. *La auditoría ambiental como parte de la caracterización de un sitio.* VI. *El concepto de remediación.* 1. *Tomando como referencia normas extranjeras.* 2. *Por evaluación de riesgo.* 3. *En función del uso que se dará al suelo.* VII. *Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos.* 1. *Biorremediación.* 2. *Arrastre por aire (Air Stripping).* 3. *Extracción al vacío.* 4. *Solidificación/Estabilización.* 5. *Lavado de suelo.* 6. *Desorción térmica.* 7. *Por arrastre de vapor.* 8. *Incineración.* 9. *Confinamiento.* 10. *Vitrificación.* VIII. *Costos de remediación.* IX. *Criterios para la selección de tecnologías de remediación.* X. *Acciones para la remediación de suelos en México.* 1. *Las empresas de consultoría ambiental.* 2. *Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental.* 3. *El papel de las universidades.* 4. *Educación ambiental para la sociedad.* XI. *Los compromisos de PEMEX.* XII. *Conclusiones.* XIII. *Bibliografía.*

### I. INTRODUCCIÓN

El suelo y el subsuelo son términos que difícilmente pueden emplearse por separado. En un lenguaje coloquial, suelo es la superficie y subsuelo hacia la profundidad, sin existir una referencia para saber que tan profundo es el suelo y desde donde empieza el subsuelo.

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural que desempeña diversas funciones entre las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos y de protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimentaria, además de ser el espacio donde se realizan actividades agrícolas y ganaderas y áreas verdes de generación de oxígeno.

las capas del suelo, más bien se encuentra en la parte superficial. Cuando los derrames han ocurrido en las costas se ha facilitado relativamente su recuperación, dado que el aceite crudo flota en la superficie.

El compromiso que adquirimos recientemente ante la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, es un reto de competitividad ante estas dos grandes potencias en el terreno comercial, pero también ambiental a través de los Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral. Entre los objetivos prioritarios de los Acuerdos de Cooperación Ambiental, quedó establecido: *fortalecer la conservación, la protección y el mejoramiento del ambiente a partir de la cooperación y el apoyo mutuo en políticas ambientales con un alto nivel de protección; esto incluye el establecimiento de las leyes y reglamentos, así como su observancia y cumplimiento.*

El hecho de no contar con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo, nos pone en desventaja, por lo que se hace prioritaria una modificación razonable.

Estados Unidos cuenta con una legislación bien establecida en materia prevención y control de la contaminación de suelo y subsuelo. La ley federal directamente exige la limpieza del sitio contaminado con petróleo, a través del Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA). Otras leyes rigen durante la remediación del sitio, como el Acta Global de Respuesta, Compensación y Responsabilidad (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability, CERCLA) de 1980, mejor conocida como *Superfund* y el Acta de Reautorización a las Mejoras del Superfund (Superfund Amendments Reauthorization Act, SARA) de 1986, así como el Acta de Seguridad de Agua Potable (Safe Drinking Water Act, SDWA) y el Acta de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA). El organismo encargado de que estas leyes se cumplan es la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA).

La EPA tiene varias estrategias para obligar a la limpieza de sitios, una de ellas se refiere a la obligación de reportar derrames o "liberaciones al ambiente", hay enormes multas y hasta encarcelamiento para aquellos que no lo hagan. Cuando un derrame ocurre, a través de la RCRA se obtiene la licencia para aislar el sitio por considerar que en el lugar hay materiales peligrosos, su limpieza se obliga por una resolución que se toma en la corte y los estándares impuestos para la limpieza son sustancialmente más

estrictos y caros. Esto hace más atractivo el limpiar un derrame por voluntad propia en lugar de llevar el asunto a juicio.

Por lo que respecta a Canadá, el gobierno federal ha promulgado varias leyes ambientales de aplicación general, además de que cada provincia tiene sus propios esquemas que regulan la descarga o emisión de sustancias en el ambiente y establecen medidas de protección ambiental y procedimientos de evaluación ambiental. En Canadá ha sido muy fácil la toma de acciones a emergencias ambientales, debido a que como parte de su cultura todos los recursos naturales realmente se protegen de la contaminación. Por ejemplo, la declaración inicial del Acta Canadiense de Protección Ambiental (Canadian Environmental Protection Act, CEPA) de 1988 dice que: *la protección del ambiente es esencial para el bienestar de Canadá, la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es de interés nacional, en parte por aspectos de salud y además porque éstas no pueden ser contenidas dentro de barreras geográficas y es necesario cumplir con las obligaciones internacionales en materia ambiental.*

Por otro lado, los propósitos del Acta Canadiense de Evaluación Ambiental (Canadian Environmental Assessment Act, CEAA, que sustituye a Environmental Review Process Guidelines Order, EARP) de 1992, son *asegurar que los efectos ambientales de proyectos se revisen cuidadosamente antes de que las autoridades responsables inicien su desarrollo*, esto asegura también que *los proyectos que se realicen en Canadá o en sus territorios federales no causen efectos ambientales adversos ni dentro ni fuera de la jurisdicción en la cual los proyectos son llevados a cabo.* Además de la claridad de esta legislación, la participación pública ha sido un factor fundamental para que se tenga un ambiente verdaderamente limpio que incluye: agua, aire y suelo. El Plan Verde para un Ambiente Saludable (Green Plan for a Healthy Environment) ha establecido objetivos muy precisos para trabajar por un ambiente limpio.

Una situación que vale la pena señalar, es el hecho de que en México la limpieza de sitios contaminados se ha venido dando como una condición de inversionistas extranjeros interesados en la compra de empresas mexicanas. Es decir, para que el inversionista extranjero decida comprar o invertir capital en una empresa mexicana, es necesario demostrar que no hay contaminantes en el subsuelo del terreno donde la empresa ha venido realizando sus actividades desde años atrás, si los hay, se debe limpiar el sitio en un tiempo que legalmente se determina al momento de

la transacción. Esta situación ha abierto mercado a todo tipo de tecnologías y consultoras ambientales extranjeras, de las cuales se hablará más adelante.

## II. EL CONCEPTO DE CONTAMINACIÓN

El término contaminación puede definirse como la introducción al ambiente de un compuesto, en cantidad tal que incrementa su concentración natural y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de la materia y energía.

El petróleo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos, sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geológico y geográfico. El petróleo es un producto natural, por lo que la propia naturaleza es capaz de reincorporar una muy pequeña fracción de éste a los ciclos biogeoquímicos, ya que la complejidad química de algunos de sus constituyentes hace que el proceso requiera de varios años.

Cuando la cantidad de petróleo en el ambiente es mayor de la que puede ser reciclada, el petróleo se convierte en un contaminante presentando un impacto negativo, ya que entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias que son consideradas como residuos peligrosos por su efecto dañino a la salud. Ejemplos de éstos son: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, naftaleno, antraceno, fenantreno, cresoles, fenol, ciclopentano, ciclohexano y etileno. Algunos de ellos son cancerígenos como es el caso de benceno, naftaleno, antraceno y fenantreno. Por lo anterior, los derrames de petróleo son considerados residuos peligrosos.

Otros productos, como los bifenilos policlorados son completamente sintéticos y altamente tóxicos, es decir, muy ajenos a la naturaleza, por lo que no pueden ser degradados de manera natural, ni reincorporados a ésta.

Cada sitio tiene sus características particulares y por lo tanto su propia dinámica, esa es la razón por la que cada región puede tener diferente normatividad relacionada con los límites máximos permisibles para los contaminantes.

## III. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN INSTALACIONES PETROLERAS

Como producto de las actividades petroleras los suelos son alterados por la construcción de rutas de acceso, remoción de la cubierta vegetal o edáfica para la instalación de campamentos y actitudes depredatorias sobre recursos bióticos por parte de los que realizan dichas actividades. Las vías de acceso se convierten en vectores de colonización espontánea y de asentamientos irregulares, sin importar los riesgos de fuga y explosión. Esto causa perturbación de los ecosistemas, desaparición de especies vegetales y desplazamiento de especies animales del lugar.

La contaminación de suelos y acuíferos ocasionada por la industria petrolera se presenta durante actividades de extracción, refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización, por lo que todas las empresas de PEMEX están involucradas, Refinación, Exploración y Producción, Gas y Petroquímica Básica, Petroquímica.

En las actividades de extracción se observan derrames y explosiones de hidrocarburos, acumulación de residuos de perforación y lodos aceitosos. En refinación y petroquímica se requieren grandes extensiones para la construcción de tanques de almacenamiento, así como de plantas industriales de transformación, sistemas para la generación y distribución de fluidos, vapores y de enfriamiento de agua. Se observa un consumo indiscriminado de agua, derrames, explosiones y descargas de residuos industriales de alta toxicidad y no biodegradables. Durante el transporte se presentan riesgos por derrame de residuos peligrosos.

Las redes de ductos de distribución están siempre sujetas a riesgos de accidentes de diversa índole como derrames, explosiones, incendios y fuga de gases. El almacenamiento en tanques es una situación similar.

Las tuberías, ductos y tanques de almacenamiento de combustibles, generalmente no se revisan con la frecuencia requerida, por lo que no se toman las medidas preventivas necesarias y los casos se atienden una vez que ocurre la ruptura de éstos. Además, las instalaciones petroleras están a la intemperie y una gran parte se encuentran en zonas costeras, donde la corrosión acaba con todos los elementos metálicos presentes. Otros derrames de hidrocarburos que ocurren accidentalmente y son menos considerados se refieren a las volcaduras de pipas y son parte de las actividades de transporte.

Los sitios de comercialización manejan menores volúmenes de hidrocarburos y derivados (gas doméstico, petróleo diáfano, diésel, gasolinas, grasas, aceites, solventes, resinas), pero generalmente estos lugares no cuentan con dispositivos adecuados para el control de emisiones y derrames al suelo, así como sistemas de recolección.

Algunos problemas de contaminación que han sido producto de descargas de residuos se encuentran en zonas pantanosas, donde el nivel freático sube de manera sorprendente en la temporada de lluvias. En estas zonas se hace muy difícil el acceso aún para realizar actividades de prospección.

Otro foco de contaminación de subsuelo en las industrias de refinación y petroquímica son las instalaciones antiguas que no fueron completamente desmanteladas y se han convertido en cementerios industriales. En estos sitios, la contaminación con hidrocarburos es mínima, los principales contaminantes son compuestos inorgánicos, muchos de ellos tóxicos, que se lavan fácilmente por efecto de las lluvias y así penetran al subsuelo.

#### IV. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELOS Y ACUÍFEROS

Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, ocurren diversos fenómenos naturales que tienden a dirigirlos hacia las aguas subterráneas. Esto hace necesario el entender la forma en que los contaminantes penetran, migran y se dispersan en el subsuelo.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son el tipo de suelo, su permeabilidad, el tamaño de las partículas, su contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen el tamaño y la distribución tridimensional del bulbo o mancha de contaminación en una zona específica.

De acuerdo a su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor que la del agua se denominan ligeros mientras que a los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos. Esta clasificación es importante ya que es lo que determina el comportamiento de los contaminantes en el acuífero. Los

ligeros tienden a formar una capa en forma de "nata" en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, como las gasolinas, los aceites y el petróleo crudo. Los densos por el contrario, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección al flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad, ejemplo de éstos son los bifenilos policlorados.

La combinación de las características del subsuelo, de los contaminantes y las condiciones climatológicas del sitio pueden dar lugar a los diferentes procesos de transporte y distribución de contaminantes. Para entender el transporte y destino de contaminantes en el subsuelo es necesario realizar una buena caracterización del sitio con la cual se conocerán la carga hidráulica y la estratigrafía, así como los coeficientes de adsorción y la permeabilidad del suelo. Con esta información es posible calibrar modelos matemáticos que sean representativos de la distribución tridimensional de los contaminantes en el sitio.

#### V. LA AUDITORÍA AMBIENTAL COMO PARTE DE LA CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO

Por definición, una auditoría ambiental en materia de suelos se refiere a la identificación y evaluación del estado de la contaminación en suelo y subsuelo, incluyendo las aguas subterráneas.

Por otro lado, la caracterización de un sitio del que ya se sabe que ha sido afectado, se refiere a los estudios que permitirán conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador y el comportamiento de los contaminantes en él. Los estudios preliminares de dicha caracterización corresponden a los de una auditoría ambiental.

En los países avanzados, no se practican las auditorías ambientales de esta forma, basta con detectar la presencia de un contaminante en suelo o aguas subterráneas para proceder directa e inmediatamente a la caracterización geohidrológica y química del sitio y de los alrededores. La meta final de estas actividades es proponer alternativas para la limpieza del sitio.

Las etapas básicas de la caracterización de un sitio, que también corresponden a la de una auditoría ambiental en materia de suelo y subsuelo, se describen a continuación:

**Recopilación de la información.** En principio se requiere un plano del terreno donde se encuentran las instalaciones donde se puedan identificar las instalaciones subterráneas (tanques y ductos), los talleres de mantenimiento, las zonas de disposición de desechos e instalaciones antiguas. Estos datos servirán para detectar la fuente de la contaminación, por lo que es de gran utilidad ubicar las instalaciones en un plano que incluya las zonas circundantes para definir sitios que servirán como control. También se deberán recopilar datos hidrogeológicos, relacionados con la profundidad del nivel freático, la dirección del flujo de la corriente subterránea y la conductividad hidráulica, información que servirá para pronosticar la migración de los contaminantes hacia el acuífero. Un plano de ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción permitirán predecir el efecto sobre la población aledaña.

**Reconocimiento del sitio.** En la visita a campo se podrá contrastar toda la información recabada. En el caso de instalaciones petroleras o petroquímicas, se podrán registrar las áreas visiblemente contaminadas así como instalaciones o zonas potencialmente contaminantes.

**Investigación inicial de la contaminación.** La información obtenida servirá como base para definir los puntos donde se deberán perforar los pozos de monitoreo y donde se habrán de tomar muestras de suelo a las diferentes profundidades. Las muestras deberán ser llevadas a un laboratorio químico para la identificación y cuantificación de los contaminantes presentes. En la actualidad ya existen equipos analíticos para realizar pruebas en campo, lo que evita la pérdida de contaminantes de características volátiles. Con la información obtenida será posible realizar un diagnóstico del sitio, en el que se podrán identificar las manchas de contaminación y los gradientes que se forman en función de las características del suelo. Cuando se determinan las características de permeabilidad y porosidad en las muestras de suelo, se pueden correr modelos de migración de los contaminantes que son una herramienta de gran utilidad para el pronóstico y de seguimiento en las actividades de remediación.

Como resultado de la carencia de una legislación clara en materia de suelo y subsuelo en México, el ejercicio de la auditoría ambiental en esta materia se confunde. En los formatos oficiales lo referente a "*Control de la Contaminación del Suelo*" únicamente cuestiona sobre la generación y disposición de residuos sólidos y peligrosos, mientras que las instalaciones subterráneas que merecen mayor investigación dentro de esta materia, se dejan dentro de una sección titulada *Instalaciones*, a la cual se le da menor

importancia. Tampoco se considera que en los tanques subterráneos o sobre tierra pueden albergar combustibles o solventes que son empleados como materias primas, por lo que no corresponden a residuos, aunque pueden tener el mismo grado de peligrosidad.

En instalaciones petroleras en operación se han practicado auditorías ambientales, con el propósito de identificar áreas afectadas. Esto ha dado como resultado un inventario de los residuos generados, la detección de fuentes de contaminación y zonas de alto riesgo actual y potencial. No obstante, hace falta complementar la información sobre el tipo y la concentración de contaminantes presentes, y las características de los suelos afectados, es decir, se requiere una caracterización completa para estimar la extensión de las manchas de contaminación y su posible llegada a las aguas subterráneas.

Durante la realización de las auditorías ambientales es indispensable considerar los terrenos aledaños a las instalaciones petroleras, mismos que en ocasiones han servido como cementerios o como zonas de vertido de desechos petroleros y que por la cercanía de poblaciones representan un alto riesgo para la salud.

## VI. EL CONCEPTO DE REMEDIACIÓN

Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación de un sitio, suelo y subsuelo, se deben plantear alternativas para su limpieza y establecer los niveles de limpieza. Es decir, el límite máximo de contaminantes que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de remediación.

Dado que en México no existen norma oficiales (NOM) que establezcan estos niveles de limpieza, se puede seguir uno de los siguientes caminos: 1) tomando como referencia normas extranjeras, 2) por evaluación de riesgo o 3) en función del uso que se dará al suelo.

La concentración de contaminantes se expresa a través de un parámetro indicador, que corresponde al contaminante que está en mayor proporción o que es el más peligroso. Debido a que tampoco contamos con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes en México, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Los más comunes son los métodos EPA (Environmental Protection Agency) y los ASTM (American Society for Testing

Materials), los cuales son identificados por una clave formada por dos números, el primero es progresivo y el segundo indica el año de publicación que en ciertos casos corresponde a una modificación del procedimiento.

La concentración de los contaminantes se puede evaluar de manera global como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), o bien se elige el más tóxico de sus componentes. En el caso de las gasolinas se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos totales como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) o cada uno de ellos por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Para gasolinas y diésel también se cuantifican los HTP, para el caso del diésel se puede cuantificar alguno de sus hidrocarburos polinucleoaromáticos (HPNA) como naftaleno, antraceno o fenantreno que son también muy tóxicos. Existen varios métodos para cuantificar un mismo parámetro, pero algunos son específicos para muestras de agua y otros para muestras de suelo.

### 1. Tomando como referencia normas extranjeras

El ejemplo clásico es tomar como referencia los estándares establecidos por la EPA en los Estados Unidos. En ese país, no existe un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. En la Tabla 1 se presentan valores que rigen en algunos de los estados. Podrá observarse que para un mismo parámetro indicador, hay una amplia variación de nivel permisible, también se observa que las concentraciones en suelo (mg/kg o ppm, partes por millón) son mayores a las que se piden en agua (ug/l o ppb, partes por billón) debido a que se emplean los estándares para agua potable. Los niveles de limpieza para el benceno va de 0.005 a 50 mg/kg en suelo y de 0.2 a 71 ug/l en agua subterránea, en el caso del tolueno va de 0.3 a 200 mg/kg en suelo y hasta 200,000 ug/l para agua. La concentración permisible de gasolina en suelo medida como HTP es de 50 a 1000 mg/kg y solamente en dos estados, Georgia y New Jersey, se registra el uso de hidrocarburos polinucleoaromáticos como parámetros indicadores de la presencia de diésel o gasolina.

Tabla 1. Límites permisibles de contaminantes en suelos y aguas subterráneas en algunos estados de los Estados Unidos de Norteamérica

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico	
			Suelo (mg/kg)	Agua subterránea (ug/l)	Suelo	Agua subterránea
Alabama	gasolina	benceno		5		EPA 602.624
		tolueno		1000		EPA 602.624
		etilbenceno		700		EPA 602.624
		xilenos		10,000		EPA 602.624
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071 EPA 418.1	
Arizona	gasolina	HTP		1		EPA 418.1
		benceno	0.13	5	EPA 8 020	EPA 502.2
		tolueno	200	1000	EPA 8 020	EPA 502.2
		etilbenceno	68	700	EPA 8020	EPA 502.2
		xilenos	44	10,000	EPA 8020	EPA 502.2
Arkansas	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
		BTEX	0-400		EPA 8020	
California	gasolina	benceno	0.3-1		EPA 8020	
		tolueno	0.3-50		EPA 8020	
		etilbenceno	1-50		EPA 8020	
		xilenos	1-50		EPA 8020	
Delaware	gasolina diésel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
		BTEX	10		EPA 3010 + 8020	

Tabla 1. Continuación.

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)	Método analítico	
Florida	gasolina	benceno	1	EPA 602	
		BTEX	50	EPA 602	
	diésel	naftaleno	100	EPA 610	
Georgia	gasolina	benceno	5-71	EPA 8020	
		tolueno	1000-200,000	EPA 8020	
		etilbenceno	700-28,718	EPA 8020	
		xilenos	10,000	EPA 8020	
		BTEX	20-100	EPA 8020	
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-500	California M	
	diésel	benzopireno	0.03-0.2	EPA 550 EPA 8270	
		antraceno	110,000	EPA 8270	
		criseno	0.3	EPA 8270	
		fluorantreno	370	EPA 8270	
		fluoreno	14,000	EPA 8270	
		pireno	11,000	EPA 8270	
Idaho	gasolina	benceno	5	EPA 8020	
		tolueno	1000	EPA 8020	
		etilbenceno	700	EPA 8020	
		xilenos	10,000	EPA 8020	
		HTP	40-200	EPA 9015	
	diésel	HTP	100-2000	EPA 8015	
	aceite gastado	HTP	100	EPA 418.1	
Kansas	gasolina	benceno	1.4	5	EPA 502.2
		tolueno	1000		EPA 502.2
		etilbenceno	680		EPA 502.2

Tabla 1. Continuación.

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)	Método analítico	
		xilenos	440	EPA 202.2	
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100		
	diésel	naftaleno	143		
Kentucky	gasolina	BTEX(c/u)	1	5	EPA 8240 EPA 8240
Louisiana	gasolina	BTEX	100		EPA 8020
Michigan	gasolina	benceno	24	1	EPA 8020 EPA 8020
		tolueno	16,000	790	EPA 8020 EPA 8020
		etilbenceno	1500	74	EPA 8020 EPA 8020
		xilenos	5600	280	EPA 8020 EPA 8020
Missouri	gasolina	HTP	50-500	5-10	EPA 418.1M EPA 418.1M
Montana	gasolina diésel	HTP	100		
Nebraska	gasolina diésel	benceno	0.005-50	5	EPA 8021 EPA 8021
		BTEX	1-10,000		EPA 8021
Nevada	gasolina diésel	HTP	100		EPA 8015
New Jersey	gasolina	benceno	3-13	0.2	EPA SW 846 EPA SW 846
		tolueno	1000	1000	EPA SW 846 EPA SW 846
		etilbenceno	1000	700	EPA S2 846 EPA SW 846
		xileno	110-1000	40	EPA SW 846 EPA SW 846
		antraceno	10,000	2000	EPA SW 846 EPA SW 846
		naftaleno	230-4200		EPA SW 846 EPA SW 846

HTP: hidrocarburos totales del petróleo; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; M: método modificado.

## 2. Por evaluación de riesgo

Se refiere a los valores deducidos después de una evaluación de los riesgos específicos del lugar de estudio. Las normas oficiales en los estados de Estados Unidos fueron establecidas bajo este criterio.

Los estudios de evaluación de riesgo son el resultado de estudios de análisis de peligrosidad, de exposición y de riesgo. Con el análisis de peligrosidad se determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio, mientras que con el de exposición se evalúan los medios por los cuales un ser humano encuentra los contaminantes que se generan de un sitio. En el análisis de riesgo, los niveles de exposición humana para un compuesto químico y la toxicidad resultante de tal exposición se compara con un valor de toxicidad crítica para ese compuesto. El valor de toxicidad crítica generalmente representa un nivel de exposición aceptable para el compuesto. Si el valor de toxicidad crítica se excede, las acciones de remediación de un sitio son inminentes.

El análisis de riesgo consta de tres principales criterios:

- la aditividad del nivel de peligrosidad para químicos que tienen efectos tóxicos similares (por ejemplo hemólisis de eritrocitos, daño nervioso o daño hepático);
- la aditividad del nivel de peligrosidad para exposición de un mismo compuesto encontrado en varias fuentes (por ejemplo agua, alimentos de origen vegetal y animal);
- los efectos sinérgicos, que se refiere al nivel de peligrosidad de dos o más compuestos que es mayor cuando están juntos en comparación con la suma de los efectos de los mismos compuestos por separado.

Existen siete metodologías para realizar estudios de evaluación de riesgo que se han desarrollado en los Estados Unidos, todas ellas deben incluir variables que claramente representen los niveles de peligrosidad, de exposición y de riesgo para un sitio en particular. En la Tabla 2 se resumen las diferentes metodologías, los criterios que emplean cada una de ellas están marcados con una cruz.

Las metodologías más interesantes son aquellas que consideran situaciones reales, como la presencia de mezclas de contaminantes tal como el petróleo y sus derivados, además de medios múltiples de exposición (suelo, agua, alimentos de origen vegetal y animal). La única que considera estos

dos aspectos es la desarrollada por la EPA (3) en la cual la evaluación de la salud pública involucra el establecimiento de objetivos y la estimación del riesgo para alternativas de remediación, por lo que toma en cuenta los siguientes aspectos:

- la posibilidad de nuevas formas de exposición causadas por la remediación;
- la necesidad de indicadores químicos;
- las concentraciones tóxicas son determinadas en los puntos de exposición;
- las velocidades de liberación de contaminantes;
- el riesgo crónico de compuestos no-carcinógenos;
- el efecto de la remediación sobre la salud a corto plazo;
- la permanencia de contaminantes por el fracaso de una remediación.

Aparentemente en México se han difundido muy poco este tipo de metodologías, por lo que sería muy conveniente profundizar en ellas para entender la forma en que se establecen los límites permisibles, que finalmente para el caso de los Estados Unidos corresponde al inciso anterior (6.2).

Tabla 2. Comparación de las diferentes metodologías para evaluación de riesgo\*

Criterio	1	2	3	4	5	6	7
<i>Peligrosidad</i>							
Valor de toxicidad	X	X	X	X	X	X	
Toxicidad aguda no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica carcinógena	X		X	X	X	X	
Mezclas de contaminantes			X	X	X		X
Factor de peso del cuerpo	X	X	X	X			
Factores farmacocinéticos	X						



Criterio	1	2	3	4	5	6	7
<b>Exposición</b>							
Inhalación de aire	X	X	X			X	X
Inhalación de polvos	X	X	X				
Ingestión de agua	X	X	X			X	
Ingestión de suelo				X	X		
Absorción dérmica							
Consumo de vegetales	X	X					
Consumo de carne	X	X					
Consumo de pescado	X	X	X				
Destino ambiental	X	X	X				X
Factor de vida media			X	X			X
Factores específicos del sitio	X	X	X			X	X
<b>Análisis de riesgo</b>							
Aditividad del efecto de toxicidad	X		X				
Exposición a medios múltiples	X	X	X				
Efectos sinérgicos							

## \*Metodologías:

1. Departamento de Servicios de Salud de California
2. Rosenblatt D.H., Dacre J.C., and Cogley
3. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)
4. Ford K.L. and Gurba P.
5. Stockman S.K. and Dime R.
6. Departamento de Ecología del Estado de Washington
7. Departamento de Servicios de Salud del Estado de California

## 3. En función del uso que se dará al suelo

En esta opción se analizan las propiedades de un suelo en función de algún uso que se le vaya a dar, también se analiza si su contaminación es un riesgo para la salud de los habitantes aledaños a la zona. Lo más común es pensar que el suelo se va a utilizar como medio para el crecimiento de

especies vegetales, aunque no necesariamente como una actividad económica, también se puede usar el suelo como material estructural en una construcción. Este es el criterio que se sigue en Holanda que también tiene alguna base en estudios de evaluación de riesgo. Algunos ejemplos de límites permisibles para contaminantes establecidos por la legislación holandesa se muestran en la Tabla 3, se podrá observar que éstos son más estrictos que los norteamericanos.

Tabla 3. Comparación de la concentración permisible de algunos contaminantes entre Estados Unidos\* y Holanda

Contaminante	Suelo (mg/kg)		Agua subterránea (µg/l)	
	Estados Unidos	Holanda	Estados Unidos	Holanda
Cromo	800	100	50	1
Plomo	500	85	50	15
Benceno	0.1	0.05	5	0.2
Tolueno	50	0.05	1000	0.2

\*Las cifras corresponden a promedios de todos los estados.

## VII. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS

El desarrollo de las tecnologías de remediación a nivel mundial, se inició en los países desarrollados hace más de 10 años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados peligrosos en concentraciones que sobrepasaban los límites permitidos.

Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de países desarrollados establecieron como una actividad prioritaria, la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos. En el caso de los Estados Unidos de Norteamérica, fueron la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía, a través del Superfund, quienes organizaron a las diferentes instituciones de investigación públicas y privadas para el desarrollo de tecnologías tendientes a la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con desechos militares en las localidades que funcionaron como puntos estratégicos durante la II Guerra Mundial. Otros países desarrollados siguieron caminos similares.

Como parte de las acciones que tomó el Superfund con patrocinio de la EPA, en 1990 se realizó un proyecto para evaluar las tecnologías europeas más exitosas e innovadoras donde se tenía un mayor avance. En la primera fase se identificaron 95 tecnologías innovadoras en uso o en investigación y se seleccionaron las más prometedoras, mismas que se estudiaron en la siguiente fase del proyecto, finalmente en la tercera fase, se seleccionaron las más exitosas tecnologías a gran escala que fueron extracción al vacío de un suelo contaminado con hidrocarburos, lavado *in situ* de un suelo contaminado con cadmio, arrastre con vapor *in situ* y otras tecnologías de biolabranza y lavado de suelo.

Las actividades de investigación realizadas en los Estados Unidos dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo fisicoquímico, como la incineración, y la solidificación/estabilización. Posteriormente, surgieron otras innovadoras como la desorción térmica, la extracción con vapor, el lavado de suelo y las de tipo biológico. Otras tecnologías más recientes fueron la vitrificación, la encapsulación y el venteo seguido de condensación.

De manera simultánea al desarrollo de tecnologías de remediación se dio el auge de técnicas para la caracterización y monitoreo hidrogeológicos. De esta forma se desarrollaron diferentes arreglos de piezómetros que permitían conocer de una manera rápida la conductividad hidráulica, así como técnicas de perforación para la toma de muestras inalteradas, sin dejar atrás el desarrollo de modelos matemáticos y de paquetes de cómputo para generar mapas tridimensionales de la distribución de contaminantes.

Existen en el mercado mundial, diversas tecnologías para remediación que ya se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas las tecnologías son aplicables a todos los casos. Para estar seguro de esto se deben realizar estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio y de ser posible pruebas de demostración en campo.

Las tecnologías de remediación pueden aplicarse *in situ* ó *ex situ*, generalmente las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en todo el acuífero. Las tecnologías *ex situ* se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo o bien en la zona no saturada hasta donde la maquinaria pesada permita la extracción del material.

Antes de iniciar un proceso de remediación es muy importante cerrar la fuente de contaminación, para asegurar la efectividad de cualquier estrategia planteada.

A continuación se analiza, de una manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación en sitios contaminados con hidrocarburos del petróleo.

### 1. Biorremediación

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de biorremediación, que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente se aplicaron el composteo y la biolabranza (*land-farming*), así como el uso de reactores con cepas puras de bacterias degradadoras combinado con el bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Posteriormente, se aplicaron otras técnicas innovadoras como la bioestimulación y el biovente. La diferencia entre las diferentes tecnologías de biorremediación se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Funcionamiento de las diferentes tecnologías de biorremediación

Tecnología	Base de funcionamiento
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Bioaugmentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad para degradar contaminantes.
Biovente	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular y se revuelve periódicamente.

En general, las ventajas de las tecnologías de biorremediación son:

- los contaminantes son realmente transformados y algunos completamente biodegradados;
- se utilizan bacterias cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir otras potencialmente peligrosas;
- es una tecnología segura y económica;
- el suelo puede ser reutilizado;
- las bacterias mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan.

Entre las desventajas de la biorremediación están:

- que las bacterias pueden inhibirse por la presencia de tóxicos o altas concentraciones de contaminantes;
- el proceso no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad;
- algunos aditivos como los surfactantes pueden tener efecto adverso en aplicaciones *in situ*;
- requiere largos periodos de tiempo;
- no es aplicable en sitios con muy altas concentraciones de hidrocarburos altamente halogenados, metales y desechos radioactivos.

Para los procesos *ex situ* se prefiere utilizar aditivos con actividad de superficie conocidos comúnmente como surfactantes. Dado que los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua, la función de los surfactantes es favorecer su solubilidad, y hacerlos con ello más susceptibles de ser degradados por los microorganismos. Los surfactantes pueden ser sintéticos o de origen biológico, estos últimos tienen la ventaja de ser biodegradables por los mismos microorganismos del suelo, por lo que son preferidos sobre los primeros.

## 2. Arrastre por aire (air stripping)

Esta tecnología se aplica a contaminantes volátiles presentes en el agua subterránea. El aire se inyecta a profundidad y la recuperación de los contaminantes se realiza en una torre empacada o en un tanque de aeración y requiere acoplarse a otro tipo de proceso para recuperar o destruir los contaminantes retirados del sitio. Esta tecnología es muy empleada por su

efectividad y tiene la ventaja de tener un bajo costo de operación. Las desventajas son:

- uso limitado a compuestos volátiles;
- generación de ruido;
- los contaminantes no se destruyen por lo que requiere acoplarse a otro tipo de tecnología.

## 3. Extracción al vacío

Este tipo de tecnología se aplica solamente para la extracción de compuestos volátiles, por lo que no es una opción recomendable para la remediación de suelos contaminados con petróleo, pero sí es atractiva para manchas superficiales de gasolinas. Sobre la zona afectada se colocan cubiertas que permiten captar los gases extraídos. Este proceso requiere ser acoplado a otro para eliminar los contaminantes o bien recuperarlos y reciclarlos.

## 4. Solidificación/estabilización

Las tecnologías de solidificación y estabilización son empleadas para la inmovilización de contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados, como es el caso de los compuestos inorgánicos.

El origen de las tecnologías de solidificación es muy antiguo, se conocen como mezclas suelo-cemento y se han empleado para mejorar la capacidad de soporte de carga de un terreno. Dada la experiencia de su uso en la construcción de terraplenes y su facilidad de manejo, fueron adaptadas posteriormente a la remediación de suelos. Para que estas tecnologías tengan éxito, se debe asegurar un perfecto mezclado entre el cemento y el suelo y la humedad necesaria para lograr fraguado. No son adecuadas para suelos con alto contenido de grasas y aceites, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con hidrocarburos. La mezcla suelo-cemento, producto de la solidificación, tiene características de resistencia a la compresión que dependen de los aditivos empleados, que no son más que catalizadores del fraguado. Los valores de resistencia alcanzados son los que determinarán la utilidad del material obtenido, que

puede ser como base de un camino, terreno para recreación o cimiento de una pequeña construcción, aunque en términos generales el suelo tratado pierde algunas de sus propiedades originales.

Las tecnologías de estabilización emplean productos químicos inertes que microencapsulan los compuestos contaminantes, dando como resultado un material sólido en forma de pequeñas partículas. El suelo contaminado debe mezclarse perfectamente para lograr que los contaminantes queden retenidos permanentemente. El material resultante puede utilizarse como suelo o mezclarse con tierra no contaminada para permitir el desarrollo de especies vegetales.

Un aspecto importante que debe cuidarse al emplear este tipo de tecnologías es la composición química de los aditivos empleados, los cuales pueden contener compuestos que en concentraciones elevadas representan un riesgo para la salud. Estas tecnologías tienen la facilidad aplicarse en el propio sitio y la ventaja de requerir muy cortos tiempos de tratamiento, aunque solamente se emplean para manchas de contaminación superficiales.

#### 5. Lavado de suelo

Esta tecnología se utiliza solamente para procesos *ex situ*. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos, puede permitirse una recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto los solventes como los hidrocarburos pueden separarse y reciclarse, sin embargo, implica un gasto importante de solventes, un costo de separación de éstos y un alto riesgo de explosión.

#### 6. Desorción térmica

El proceso se realiza *ex situ*, el suelo contaminado se introduce al sistema con ayuda de un tornillo sinfín y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera similar a una destilación. La desorción térmica tiene un menor costo que la incineración, el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante y tiene la ventaja de que el suelo puede ser reutilizado. Sin embargo, no es una alternativa recomendable para suelos contaminados con petróleo, ya que conforme se va aumentando la tempe-

ratura el manejo del material se hace muy difícil y no se logran recuperar los contaminantes.

#### 7. Por arrastre de vapor

Esta tecnología se basa en el mismo principio que la de arrastre con aire, la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desorberse del suelo son los que se recuperan, pueden recuperarse para reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso para que puedan ser destruidos. No es muy recomendable para suelos contaminados con petróleo.

#### 8. Incineración

La incineración es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva para suelos con alta concentración de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándose en dióxido de carbono el cual se descarga a la atmósfera, pero se genera una alta concentración de partículas suspendidas por lo que un buen equipo debe contar con sistemas de control de emisiones para asegurar que se trata de una tecnología limpia.

El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles (generalmente basado en normas extranjeras). Cuando esto ocurre se debe enviar a confinamiento. La operación de un proceso de incineración implica un alto costo, que está influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento.

#### 9. Confinamiento

El confinamiento no es precisamente una opción de remediación, se recomienda cuando se tienen residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acoplado a otros procesos como la incineración. Para esta opción debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el de transporte al sitio de confinamiento. En México aún no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras opciones antes de pensar en el confinamiento.

### 10. Vitrificación

Consiste en introducir dos electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una muy alta carga eléctrica para lograr la vitrificación de los contaminantes. La tecnología solamente opera en la zona no saturada, es aún más costosa que la incineración, por lo que no ha logrado llevarse a una escala mayor, solamente se ha operado a escala de demostración en campo.

De lo anterior se podría resumir que las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo son la biorremediación, algunas técnicas de estabilización y la incineración. Para asegurarse de cual es la idónea para un sitio en particular, es indispensable realizar pruebas preliminares de tratabilidad en el laboratorio, donde deben simularse las condiciones que prevalecen en el campo. Lo más recomendable es realizar pruebas de demostración en campo a escala piloto, sin embargo, ésta tiene un costo alto por lo que muchas compañías prefieren no hacerlo.

## VIII. COSTOS DE REMEDIACION

Un proyecto de remediación abarca tres etapas principales: la caracterización, las pruebas de tratabilidad y la conceptualización del proceso de tratamiento, es decir, el diseño, adecuación y puesta en funcionamiento del mismo.

Hacer un desglose de los gastos de un proyecto de remediación, es algo muy sano, ya que permite entender lo complejo del problema y la urgente necesidad de progreso que tiene México en esta materia.

Para estimar los costos de un proyecto de remediación se deben considerar los siguientes rubros: equipo, trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete. Los gastos generados en cada uno se desglosan a continuación.

### Equipo

Los gastos requeridos corresponden a inversión, operación y desgaste del equipo, con la consecuente necesidad de mantenimiento. El equipo se

necesita en actividades de prospección y monitoreo, así como durante las propias actividades de remediación:

- prospección: perforación de pozos, toma de muestras;
- operación: bombas, compresoras, sistemas de extracción, mezcladoras, movimiento de materiales, reactores, centrífugas, filtros;
- monitoreo: toma de muestras y análisis *in situ*.

### Trabajo de campo

Este incluye lo siguiente:

- reconocimiento del sitio con ayuda de planos de localización;
- perforación de pozos para toma de muestras, para monitoreo o para procesos de extracción-tratamiento-inyección;
- instalación de equipo de proceso o auxiliares;
- movimiento de materiales común en los procesos *ex situ*;
- operación y supervisión en todas las actividades.

### Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio es de dos tipos analítico y de adecuación a las condiciones de campo:

- análisis químicos para conocer el tipo y concentración de los contaminantes;
- análisis fisicoquímicos para conocer las características del suelo;
- pruebas de tratabilidad para evaluar la capacidad y eficiencia de la eliminación de contaminantes.

### Trabajo de gabinete

Es una actividad de tipo administrativo para integrar todas las actividades referentes al proyecto, a ésta corresponden:

- calendarización;
- planeación;
- diseño;

- análisis e interpretación de resultados;
- elaboración de informes.

### IX. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

El suelo es un recurso natural difícilmente renovable, por lo que para eliminar los contaminantes de un sitio afectado, deben buscarse alternativas factibles y económicas que no lleven a la destrucción o confinamiento del suelo a menos que sea el último recurso.

Hay en el mercado diversas tecnologías de remediación y también diversas compañías que ofrecen sus servicios. En aspectos de remediación de suelos y otros servicios para el control de la contaminación no es recomendable adjudicar un contrato únicamente por licitación, ya que se corre el riesgo de un fracaso en el servicio y consecuentemente una pérdida de recursos y de tiempo.

La selección de una tecnología va acompañada de la selección de la compañía que la aplicará. Hay dos caminos principales para realizar esta selección, una es evaluar los antecedentes curriculares de la compañía y la otra evaluar las bases científicas de las tecnologías. Se puede hacer una selección en trabajo de gabinete, o bien probar las tecnologías en campo a escala de demostración. Un ejemplo de ésta opción se ha venido desarrollando para PEMEX-Refinación a través del servicio EOE-7242, en el que participan el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Ingeniería. Los criterios que se han considerado para la evaluación se presentan a continuación.

#### Evaluación en trabajo de gabinete:

- experiencia previa avalada por usuarios y por una autoridad ambiental;
- base científico-tecnológica de los desarrollos;
- estrategia para la evaluación técnica del problema;
- antecedentes curriculares del personal técnico.

#### Evaluación en campo:

- desarrollo de pruebas de tratabilidad en el laboratorio;
- estrategia para las pruebas de demostración en campo;
- capacidad técnica del personal;
- apoyo analítico especializado;
- efectividad en la eliminación de contaminantes;
- tiempo en que se logra la eliminación de contaminantes;
- costo por unidad de volumen tratado;
- impacto ambiental del proceso;
- seguridad ambiental durante y posterior al tratamiento.

A cada uno de los rubros anteriores se le asignó un peso específico con la finalidad de hacer una evaluación objetiva que arrojara cifras y no únicamente estimaciones. A través de la estrategia planteada se ha logrado la evaluación tanto de la eficiencia de la tecnología como del desempeño de la compañía, además de que se han podido probar diferentes tipos de tecnologías. Para la realización de las pruebas en campo se eligió un suelo con altos niveles de contaminación, medida como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), con la idea de que las tecnologías que logren resultados exitosos en los peores casos, puedan hacerlo en suelos menos contaminados. A través de esta evaluación PEMEX-Refinación podrá contar con los elementos técnicos y económicos para asignar contratos con mayores posibilidades de éxito.

### X. ACCIONES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS EN MÉXICO

#### 1. Las empresas de consultoría ambiental

Como se mencionó anteriormente, la remediación de suelos es una práctica que se está dando recientemente en México, para el caso de PEMEX, la institución ya cuenta con listas de prestadores de servicios que han venido realizando trabajos petroleros, dichas compañías cuentan con autorización del Instituto Nacional de Ecología para el transporte y manejo de residuos peligrosos. Esas mismas compañías han encontrado buenas oportunidades de negocio, ofreciendo servicios de remediación, el problema es que sus técnicos no cuentan con los conocimientos necesarios para

realizar dichos servicios. Algunas de ellas se han asociado a través de las llamadas *join ventures* con firmas extranjeras y sus asociados toman participación directa en los proyectos, otras son solamente representantes de firmas extranjeras y aplican las tecnologías como una receta de cocina, pero no pueden dar soluciones a imprevistos porque no tienen el dominio de la tecnología.

Un aspecto que llama la atención, es el hecho de que en una gran proporción, las compañías se presentan como "líderes" en procesos de remediación. En la práctica se ha podido constatar que ese adjetivo es sólo parte de la mercadotecnia y que lo que dicen no siempre es verdad. Aquí es donde debe plantearse una estrategia de selección para no arriesgar con principiantes, dado que el presupuesto para actividades de control ambiental generalmente es limitado, dado que se trata de acciones que no generarán ganancias económicas.

## 2. Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental

Como ya se sabe, en México los aspectos relacionados con el ambiente son competencia directa de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca a partir del presente año. Esta se apoya en el Instituto Nacional de Ecología (INE) para el desarrollo de los instrumentos regulatorios y certificación de actividades para el control del ambiente, y en la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) para los estudios de impacto ambiental y auditorías ambientales. Una situación compleja que se está dando es que estas dos instituciones han establecido ciertas reglas sin que exista un marco jurídico claro. Desafortunadamente es cada vez mayor la cantidad de trabajo que deben atender dichos organismos y menor el presupuesto con el que deben realizarlo, requieren de especialistas que no pueden contratar y no pueden dar opciones de actualización a sus empleados. Lo anterior les ha generado ya una imagen muy politizada reforzada por algunas situaciones poco éticas.

Por lo que respecta a remediación de suelos contaminados, las instituciones citadas no han mostrado un amplio dominio del conocimiento, aunque hay que reconocer que sí se ha logrado mucho. Pero en este caso se deben redoblar esfuerzos ya que suelo y subsuelo no han sido suficientemente abordados. Dichas instituciones deberían apoyarse más en las universidades, sin embargo, el canal de comunicación no se ha dado abiertamente, sólo para algunos casos específicos. Además, el gobierno

federal debería dar un mayor apoyo, sabiendo el compromiso que se tiene a nivel nacional porque ya no es posible descuidar de esa manera nuestros suelos, ni es conveniente la imagen que se da hacia el exterior.

Hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente, y para los cuales sería indispensable trabajar con grupos interdisciplinarios e interinstitucionales, los cuales se citan a continuación:

- la creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de Suelo y Subsuelo que responda a la Legislación Ambiental correspondiente que está en proceso de revisión;
- la preparación de especialistas en evaluación de riesgo en materia de contaminación de suelo y subsuelo, que puedan aportar elementos adecuados a nuestro medio durante la creación de las normas técnicas correspondientes;
- la generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de remediación de suelos, como son, los límites permisibles de contaminantes que se convertirán en los niveles de limpieza para sitios contaminados y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de remediación;
- revisión y adecuación de los formatos oficiales de auditorías ambientales donde se integre en un solo rubro toda aquella información correspondiente a contaminación de suelo y subsuelo incluyendo la existencia de cementerios y zonas fuera de las áreas de proceso (se pueden citar dos ejemplos, la investigación de tanques subterráneos está en el apartado de "Instalaciones" y debe ir en "Contaminación de Suelo"; además, el apartado de "Contaminación del Suelo" debe incluir también el "Subsuelo");
- desarrollo de evaluaciones más objetivas donde se le de un peso específico a los aspectos correspondientes a una auditoría ambiental, para arrojar cifras que puedan interpretarse como "calificaciones", esto elimina la subjetividad, permite homogeneizar los diferentes criterios y ahorra muchas horas de interpretación y redacción (algo que podría servir de ejemplo, es una metodología desarrollada en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, para realizar estudios de impacto ambiental con ayuda de computadora, la cual ya ha sido probada en situaciones reales);

— desarrollo de metodologías objetivas para la evaluación de tecnologías para remediación de sitios contaminados (la desarrollada por el Instituto de Ingeniería, UNAM e Instituto Mexicano del Petróleo para PEMEX-Refinación podría servir de ejemplo y como base para ser enriquecida).

Por otro lado, los organismos gubernamentales deberán trabajar mucho en aclarar su interrelación, referida a los aspectos de contaminación de suelo y subsuelo, entre ellos: la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

### 3. El papel de las universidades

*Preparación de personal capacitado.* A pesar de la importancia de los problemas ambientales y de la necesidad de soluciones adecuadas a nuestro medio, no existen carreras a nivel licenciatura que permitan la formación de profesionales de buen nivel, con una visión muy dirigida al control de la contaminación ambiental, mucho menos en lo que se refiere al recurso suelo. Las áreas técnicas donde las universidades necesitan reforzar la formación de profesionistas con enfoque ambiental de muy alto nivel son: hidrogeología, geociencias, geotécnica, fisicoquímica, química analítica y biotecnología, entre otras.

A nivel posgrado existen más opciones para la preparación de personal más especializado, además los estudiantes cuentan ya con una base de licenciatura. Esto hace más fluida la enseñanza, sin embargo, hay poco personal académico a nivel posgrado con experiencia en control de la contaminación, éste generalmente se encuentra realizando trabajos en campo. Otra opción son los cursos de actualización, en donde se tiene la gran ventaja de contratar profesores por un cierto número de horas, las necesarias para impartir temas muy especializados. A este respecto, las universidades han estado realizando una labor importante.

Otra área que requiere de especialistas es la legislación, las universidades deberán preocuparse por generar "abogados ambientales" que adquieran esta visión durante su formación, no que se formen en el ejercicio de su profesión. Los países desarrollados tienen amplia experiencia en esta materia algunos esquemas podrían servir como base para su adecuación en México.

*Desarrollo, adaptación e innovación de tecnologías.* Esta actividad puede desarrollarse de manera institucional o como apoyo directo a empresas de consultoría. Para que la interacción entre las universidades y las empresas de consultoría ambiental se pueda dar fácilmente, se deben contemplar dos aspectos importantes: 1) que el investigador aborde el problema tratando de cumplir con el objetivo del proyecto por el camino más corto, sin desviarse por la curiosidad científica, y 2) que la empresa acepte que los gastos de investigación son altos, que ésta es necesaria y que toma su tiempo.

Con base en lo anterior y considerando que cualquier nuevo desarrollo podría tomar muchos años de trabajo antes de ser llevados a la práctica, lo más recomendable para nuestro país es recurrir a las tecnologías existentes que ya hayan sido probadas en otros sitios contaminados y realizar los ajustes necesarios, innovación o adaptación, para aplicarla en los sitios a remediar, dado que cada uno tiene sus características particulares.

*Evaluación de proyectos de remediación.* En este caso investigadores universitarios se pueden involucrar como evaluadores de tecnologías o desarrollando elementos necesarios para que PEMEX pueda cumplir mejor su función en el cuidado del ambiente. De esta forma, se tiene la ventaja de contar con una asesoría de muy alto nivel y muy versátil, tanto como sea necesario.

Dado que la llegada de tecnologías de remediación a nuestro país se está dando actualmente y se tiene ya la conciencia de remediar, a todas las empresas de PEMEX les convendría seleccionar las tecnologías adecuadas y a las empresas que se encargarán de llevarlas a la práctica, con otros elementos de mayor peso que los que se tienen en un concurso de licitación, donde el criterio más empleado es el presupuesto más bajo, las compañías que presentan presupuestos económicos, no necesariamente son las que tienen una mejor base tecnológica. Este aspecto es un motivo de amplia discusión.

### 4. Educación ambiental para la sociedad

En términos generales, la sociedad carece de muchos conocimientos que son necesarios para comprender la importancia de su participación en la vida diaria, ya sea como actores principales o bien como afectados por acciones tomadas equivocadamente. Los avances que se han logrado para "educar a la sociedad" en materia de aire podrían servir como ejemplo,



en general, la sociedad actualmente se preocupa un poco más por tener un aire limpio. Mucho se tendrá que trabajar en materia de agua todavía y más aún en materia de suelo, donde no está claro el papel de éste como un "recurso natural".

### XI. LOS COMPROMISOS DE PEMEX

El desarrollo de tecnologías ambientales para el control de la contaminación ya permite en la actualidad atender derrames casi de inmediato, por lo que es posible detener el avance de los contaminantes, además de la posibilidad de recuperar el aceite perdido y retornarlo al proceso. En cambio, los derrames que ocurrieron en el pasado son tan antiguos como la industria petrolera, y por el grado de intemperización que tienen se hace muy difícil su tratamiento.

Como parte del marco jurídico de PEMEX en materia ambiental, el artículo 23 del Reglamento de Trabajos Petroleros indica que PEMEX tiene la obligación de mantener todas sus instalaciones en buen estado sanitario y de conservación. Por otro lado, en el artículo 37 se señala que corresponde al organismo permisionario la responsabilidad por los daños y perjuicios que se ocasionen al tránsito terrestre, al fluvial o al marítimo, al ambiente, la pesca, la agricultura, la ganadería o a terceras personas.

En su informe 93-94, PEMEX establece que como resultado de las contingencias ambientales por accidentes ocurridos durante el bienio y que produjeron impactos al ambiente, se llevaron a cabo trabajos de restauración y reforestación orientados a restituir a sus condiciones originales en 450 hectáreas en donde se emplean técnicas de biorremediación, químicas y físicas.

Lo anterior muestra que PEMEX como empresa está conciente de sus obligaciones y su responsabilidad hacia el ambiente, pero hace falta aún más. En algunos casos todavía impera el maquillaje sobre las verdaderas soluciones, y se han enterrado muchos derrames en lugar de tratarlos. Hace falta estimular más la ética y el respeto al medio ambiente a través de la educación que pueda brindarse a los empleados que realizan directamente las actividades en campo, quienes están muy involucrados.

### XII. CONCLUSIONES

En este documento se ha tratado de enfatizar la función tan importante del suelo como barrera de protección de los acuíferos que son la fuente de suministro de agua a las poblaciones y la imperante necesidad de limpiar los suelos contaminados, con la finalidad de proteger la calidad del agua que utilizarán las generaciones futuras.

La diversidad de los aspectos incluidos son una muestra de lo compleja que es la tarea de remediación de un sitio contaminado, no por los aspectos técnicos, ya que los grandes avances de investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras extranjeras han abierto una amplia gama de posibilidades para abordar los problemas de contaminación de suelos y acuíferos. El problema es que como país, aún no estamos preparados para enfrentar con herramientas propias las acciones de remediación, no tenemos el marco jurídico que sirva como el punto de partida, ni los instrumentos regulatorios auxiliares, sin embargo, tenemos que empezar a actuar. El hecho de que no podamos esperar más tiempo, nos puede llevar a tomar decisiones que tal vez no sean las más adecuadas, pero tendrán que modificarse sobre la marcha, como ha sucedido en numerosas acciones para el control de la contaminación ambiental.

Uno de los aspectos que conviene analizar y discutir ampliamente es el hecho de tomar como nuestros, las regulaciones y los procedimientos que han seguido otros países, específicamente Estados Unidos. Tal vez como punto de partida sí conviene hacerlo, porque no tenemos alguna base, pero tendremos que ir generando lo propio y dejar que se vaya retroalimentado de manera constante al poner en práctica algunas acciones. En varias situaciones hemos tomado como referencia, cualquier valor de las concentraciones permisibles de contaminantes que rigen en Estados Unidos, sin saber cómo fueron establecidas y sin entender por qué para un mismo parámetro indicador existe un amplio intervalo para escoger un valor. Para estar seguros que los valores elegidos fueron los adecuados tendremos que prepararnos para realizar los estudios de evaluación de riesgo aplicables específicamente a los sitios donde están los problemas de contaminación de suelos.

Otro aspecto en el que debemos generar herramientas modernas es en las auditorías ambientales, en la evaluación de tecnologías para remediación y en la selección de compañías de servicios ambientales. Aquí,

necesitamos crear esquemas más objetivos donde se puedan unificar los criterios de los diferentes especialistas y en los que las opiniones se emitan de una forma cuantitativa con base en los aspectos de mayor peso específico. Esto dará una mayor claridad a las evaluaciones y se podrán tener resultados precisos en un menor tiempo.

Finalmente, la complejidad de los trabajos de remediación de suelos contaminados con petróleo que PEMEX tendrá que dar inicio en un corto tiempo, sugiere la integración de grupos interdisciplinarios e interinstitucionales en los que especialistas de alto nivel en aspectos técnicos y legales aporten nuevas ideas para responder con más confianza a éste que es uno de sus grandes retos.

### XIII. BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, S. A., 1995. "Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI", *Terra* 13(1): 3-16.
- BENIDICKSON J., DOERN G.B., OLEWILER N., *Getting the Green Light, Environmental Regulation and Investment in Canada*. C.D. Howe Institute.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1995*, 22a. edición, Ediciones Delma.
- EPA, 1991. *Understanding Bioremediation, A Guide for Citizens*, EPA/540/2-91/002.
- KOSTECKI P.T., CALABRESE, E. J., and HORTON, H. M., 1989. "Review of present risk assessment models for petroleum contaminated soils. Chap. 21", in *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. I, De. Kostecki P.T. and Calabrese E.J., Lewis Publishers, Inc. USA.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1994*, 3a. ed., Ediciones Delma.
- OLIVER T., KOSTECKI P., and CALABRESE E., 1993. *State Summary of Soil and Groundwater Cleanup Standards for Hydrocarbons*, Association for the Environmental Health of Soils, for EPA Office of Underground Storage Tanks.
- PHEIFFER T.H., NUNNO T. J., and WALTERS, J. S., 1990. EPAs Assessment of European Contaminated Soil Treatment Techniques. *Environ. Progress* 9(2): 79-86.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1994. Formato oficial para auditorías ambientales, Subdirección de Auditoría Ambiental.
- RUSSELL D.L., 1992. *Remediation Manual for Petroleum-Contaminated Sites*, Technomic Publishing Co., USA.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, *Tratado de Libre Comercio en América del Norte, Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral*, 1993.
- Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología. 1993-1994. *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente* (Capítulo 7: Suelo y Capítulo 13: Industria Petrolera). México.
- United States Department of Energy, Office of Environmental Restoration and Waste Management, 1993. *Technology Development, A National Program of Demonstration, Testing and Evaluation*.
- United States Environmental Protection Agency, 1993. *Cleaning up the Nation's waste sites: Markets and Technology Trends*.



---

## ORIGINAL CONTRIBUTION

# A SURVEY OF TECHNICAL ASPECTS OF SITE REMEDIATION: SITE REMEDIATION STRATEGY

---

Gregory A. Vogel,\* Alan S. Goldfarb, and George A. Malone

Hazardous Waste Systems, The MITRE Corporation, 7525 Colshire Drive, McLean, VA 22102-3481, U.S.A.

Dennis E. Lundquist

Air Force Center for Environmental Excellence, Brooks Air Force Base, TX, U.S.A.

**ABSTRACT.** MITRE assembled design, cost, and performance information on five frequently applied remedial technologies from more than 100 vendors directly involved in equipment design and construction and whose costs are independent of contractor markup. This document summarizes the practical experience gained by these vendors through thousands of site remediation projects. The Air Force Center for Environmental Excellence/Environmental Services-Office requested this work to obtain an independent, conflict-free source of information for evaluating their contractor's selection of remedial technologies, equipment design, cost estimates, and proposals.

## INTRODUCTION

Site remediation is a fundamental part of the U.S. Environmental Protection Agency's (EPA) Superfund program. The oftentimes cumbersome and time-consuming administrative processes that comprise much of Superfund were developed before extensive experience with site remediation existed. As with the start-up of many new endeavors, Superfund has been questioned and criticized for being slow and ineffective. In response to such criticism, EPA has recently developed several initiatives to streamline and improve the process.

These developments are of vital interest to the U.S. Air Force, which is required to follow the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA or Superfund) requirements during implementation of the Installation Restoration Program (IRP) at their bases. The Air Force has established the goal of remediating the estimated 2,000 contaminated sites at Air Force installations by year 2000. These sites are related to past activities and industrial practices at the installations and include old landfills, fuel spills, and leaks from petroleum storage areas. To support this goal, the Air Force Center for Environmental Excellence (AFCEE) was established at Brooks Air

Force Base, Texas, for planning, designing, and delivering cost-effective solutions to the Air Force's environmental problems and challenges.

AFCEE initiated a study to contact vendors of applied remedial equipment and technologies to independently identify opportunities for expediting the IRP. AFCEE sought information about equipment design, performance, and cost, including the vendors' experience with remediation projects. This series of articles summarizes the information obtained from vendors. Mention of, or reference to, any product, contractor, or supplier does not constitute or grant government approval or recommendation.

This first article describes the approach, or strategy, to site remediation used by the vendors. This strategy was synthesized from many conversations and was not developed by a single vendor, although vendor opinions converged on many aspects. Subsequent articles in the series focus on providing practical technical information for engineers involved in site remediation. Specific technologies that are addressed include air stripping, soil vapor vacuum extraction, stabilization and solidification, and vapor phase thermal oxidation.

## VENDOR PROFILE

Approximately 125 vendors of remedial equipment and related services supplied information for this

project, and detailed interviews were conducted with 35 vendors. All of the vendors contacted were very cordial and willing to supply all the information requested, taking considerable amounts of their time to explain and consider all of the issues and questions raised. In general, most of the vendors are young, small, but rapidly growing companies, a situation characteristic of a new and expanding industry. Many of the companies are less than 5 years old with fewer than 30 employees. All companies except those involved in bioremediation reported rapid growth, some doubling their sales volume every 1, 2, or 3 years. Companies involved in bioremediation have successful experience in many projects but reported a reluctance by customers to commit heavily to this technology. The slow growth is probably due to a "wait and see" attitude adopted by some customers.

The design of most remediation equipment within each technology appears to be fairly standardized, although individual vendors offer unique or additional features. For example, vendors offer packed in tower air strippers in the same diameters and heights, but variations are noted in sump design and packing materials. Many vendors use identical equipment for constructing remedial systems, such as vacuum extraction blowers and groundwater pumps. Of the technologies studied, water-contaminant phase separators exhibit the greatest diversity in design among vendors.

Despite these similarities in design, there is a surprising lack of concurrence among vendors regarding technology application and performance. For example, some vendors state that vacuum extraction is not feasible in clay soils, whereas another vendor states that vacuum extraction in clays is feasible using closely spaced wells and by drawing a very high vacuum. Vendors also disagree on the suitability of using carbon adsorption to treat the exhaust gas from air strippers. Some bioremediation vendors state that adding non-native microbes to contaminated soil is futile because the colonies die almost immediately, whereas other vendors claim successful remediation with non-native microbes. Some air stripper vendors claim that the data used to design air strippers is unreliable, and one vendor stated that it is almost fortuitous that any air stripper performs effectively. One cause of these apparently conflicting assertions is that the unique environmental conditions existing at each site greatly affect technology performance. Additional discussion of these issues appears in this series of articles.

Very few of the vendors interviewed are involved in site characterization activities or the study phase of a clean-up project. Vendors are usu-

ally provided data and specifications by engineering firms or environmental consulting companies, and the equipment is designed to perform under the described conditions. Most vendors do not operate their equipment, nor are they contracted directly for site remediation. Those vendors that do participate in remediation state that they will not design remedial systems to specifications developed by other parties because their experience indicates that the data are often incomplete or inaccurate. Vendors not participating in site remediation report similar problems with occurrences of unreliable site data and design specifications. Most vendors have developed relationships with specific engineering companies and consultants that are known to provide reliable data, and they will avoid doing business with organizations known to be unreliable to avoid blame and liability. As usually small companies with limited resources, most vendors team with larger engineering firms to bid on government work.

#### STRATEGY FOR REMEDIATION

The following four-step strategy for remediation became apparent from analysis of the vendor interviews:

1. Determine whether contamination exists as a result of site activities.
2. If contamination exists, act promptly to protect receptors actually at risk, locate the source(s), and characterize environmental conditions.
3. Remediate the contamination source(s) as soon as possible.
4. Remediate remaining contaminated environmental media to the extent necessary to protect human health and the environment.

This strategy has been used by several vendors to remediate sites that are not on the Superfund National Priorities List. Vendors stated that remediation projects conducted for industrial clients not subject to Superfund requirements proceeded much more rapidly and at lower cost than Superfund projects. Although the strategy does not coincide with the Superfund process, it could be implemented through a variety of existing provisions. The four-step remediation process described by vendors differs from the Superfund process in some respects. This process is presented to stimulate thinking about improving the current Superfund implementation strategy.

The following observations offered by vendors may help to further define the extent of revisions to the Superfund process that could be considered:

- Remedial investigations are not expected to completely define the entire extent of contamination or site characteristics prior to the start of source remediation. The primary goal of pre-remedial investigations is to locate the source of any contamination that may exist. Site characterization is then aggressively pursued to support implementation of appropriate remedial technologies identified through experience at similar sites.
- High quality analytical laboratory results are not necessary for locating sources. Site contaminants and contaminated environmental media need to be identified but not extensively quantified. Because sources are localized areas of high contaminant concentrations, they often may be easily detected by sight, smell, or portable field instruments. The need for sensitive and defensible analytical testing is primarily to validate the success of a remedial technology.
- Remedial actions need to begin as soon as, but not before, sources are located. Additional studies, numerical risk assessments, technology evaluation, and design specifications are often not necessary for source remediation if experienced remediation contractors are used. Such activities cause delays that can make remediation more difficult if site contaminants are in a dynamic state.
- Source remediation does not need to be an extended and costly project. Vendors prefer to begin remediation on a relatively small scale at localized sources, modifying the equipment as necessary to achieve successful results. After successful operation is demonstrated, the remedial system can be expanded or additional modules can be added. By starting on a small scale, costs associated with changing the technical approach or system design can be minimized. Successful source remediation projects are often completed in less than 6 months to 1 year.

The remainder of this article focuses on remedial technology selection and subsequent application to remediate contaminant sources and any residual contamination that may remain after source remediation.

## TECHNOLOGY SELECTION

Vendors use three primary strategies separately or in conjunction to remediate sites. The strategies are: (1) destruction or alteration of contaminants, (2) extraction or separation of contaminants from environmental media, and (3) the in-situ containment of contaminants. Technologies capable of contaminant destruction by altering their chemical

structure are thermal, biological, and chemical treatment methods. These destruction technologies can be applied in-situ to contaminated media extracted from their environment (such as excavated soil or extracted groundwater from a pump and treat system), or to concentrated contaminants derived from extraction or separation technologies. Technologies commonly used for separation and concentration of contaminants from environmental media include soil vapor vacuum extraction and groundwater treatment by one of the following methods: phase separation, carbon adsorption, air stripping, physical treatment, or some combination of these technologies. Careful selection and integration of separation technologies should enhance natural contaminant transport mechanisms to arrive at the most effective treatment scheme. For example, over 100 times more air than water can be moved through soil; therefore, for a volatile contaminant in soil that is relatively insoluble in water, vacuum extraction would be a more efficient separation technology than groundwater extraction and contaminant separation.

Containment technologies include groundwater pumping systems, stabilization, solidification, capping, placement in a secure landfill, and the construction of slurry walls. The goal of containment is primarily to gain additional time before site remediation is undertaken. Some vendors believe that no containment technology is permanently effective, so some type of contaminant destruction or extraction would have to occur after containment if a permanent solution is required. Stabilization technologies are often proposed for remediating sites contaminated by metals or other inorganic species. The mobility of these inorganic species is primarily dependent on the pH of the environmental media, so that altering an acidic pH to basic conditions may be sufficient to prevent migration.

These concepts about site remediation strategies and the technologies associated with them are summarized in Fig. 1. One feature obvious from the figure is that the choice of applied technologies is not extensive once a remedial strategy is developed, contrary to the concept forwarded by EPA that numerous technologies must be screened and evaluated prior to identifying a preferred alternative. This assertion remains true if "innovative" technologies are included in Fig. 1. The following factors further limit the range of applicable technologies:

- Soils high in clay content cause problems for any remedial technology. Their lack of porosity inhibits air flow, which impairs both vacuum extraction and bioremediation. Clays inhibit asphalt-

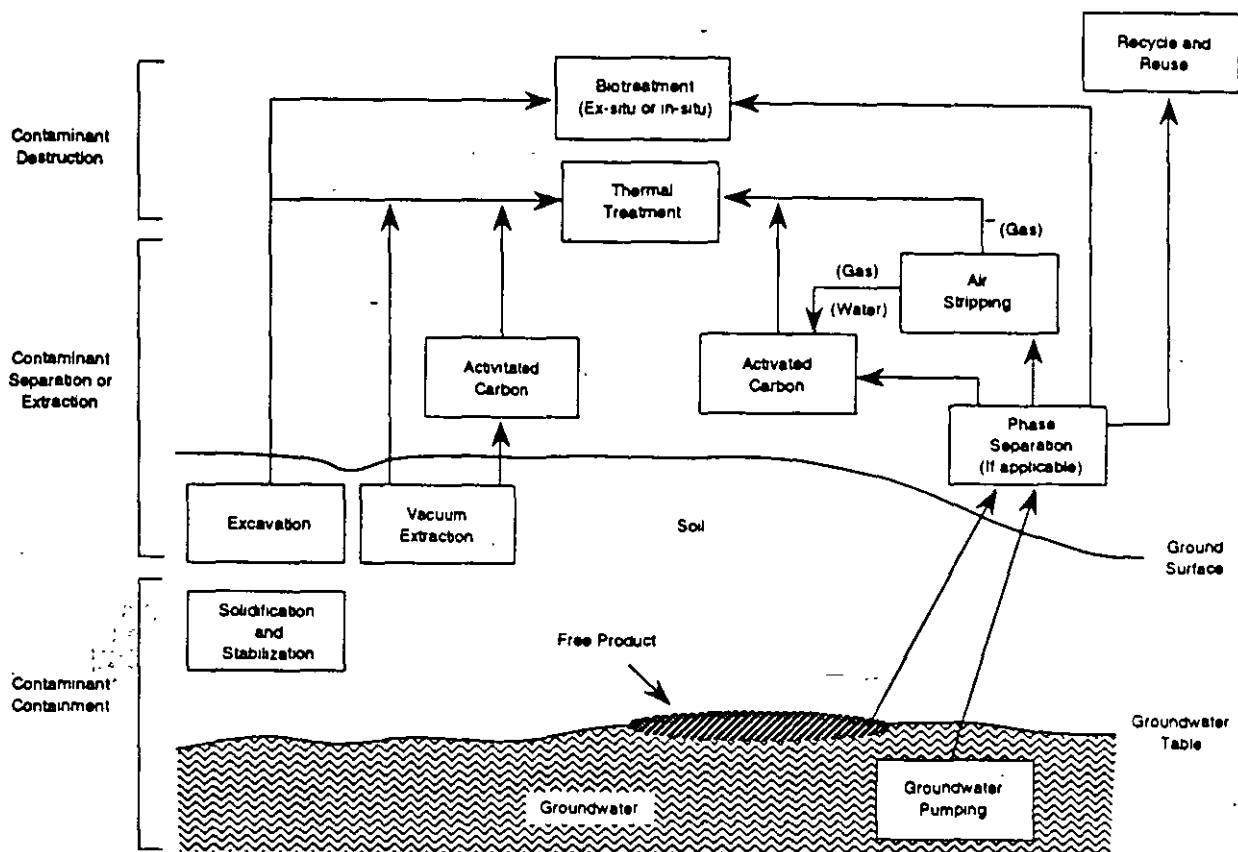


FIGURE 1. Classification of remedial technologies by function.

based soil stabilization technologies. Thermal treatment throughput rates can be reduced up to 90% by the presence of fine clays.

- Remedial systems using activated carbon are relatively costly. To keep project costs reasonable, carbon is generally used to treat environmental media with very low contaminant concentrations (less than 10 ppm) or at very low flow rates (less than one gallon per minute). Carbon is generally used to "polish" air stripper discharge water and to treat effluents from pilot-scale air strippers and vacuum extraction systems. Carbon use in large gas treatment systems is generally avoided due to high cost and impaired performance caused by water vapor in the gas streams.
- Biotreatment performance is difficult to predict and must be determined through on-site pilot-scale testing. Bench scale testing may be indicative of success in the field, but on-site testing is necessary to accurately predict biotreatment results. Even if contaminant biodegradation occurs, the residual contaminant concentration may remain unacceptably high due to the inability of the microbes to contact contaminants adsorbed in the pores of soil particles.
- Air stripping and vacuum extraction are generally effective for volatile organic compounds, but not

for removal of the long chain constituents of fuels and other similar, less volatile contaminants.

Vendors usually combine several technologies at a single site to minimize these limitations. Vacuum extraction integrated with groundwater pumping and air stripping simultaneously remove contaminants from both groundwater and soil. The effluents from the vacuum extraction system and the air stripper can be treated in a single thermal unit to destroy contaminants. An added benefit is that the air flow through the soil stimulates or enhances natural biological activity, and some biodegradation of contaminants occurs. Some vendors inject air into either the saturated or unsaturated zones to facilitate contaminant transport and to promote biological activity. Other combinations of technologies are being explored. However, many vendors stated without explanation that technology selection was often driven more by political than technical considerations.

## TECHNOLOGY IMPLEMENTATION

Questions related to technology implementation include "At what location should remediation start?"

"At what scale should remediation start?" "What is a reasonable schedule for remediation?" "What are reasonable cleanup goals and can they be attained?" Responses to these questions were similar among vendors contacted during this study.

Vendors stated that any free-phase contaminant (free product) encountered during a remedial investigation or remedial action should be promptly removed from the environment. This material can be stored for later treatment, destruction, or product recovery. If no free product is encountered, sampling and analysis results from the remedial investigation are used to estimate contaminant mass and volume in the environment. Vendors recognize the uncertainty associated with these results and attempt to design and construct flexible remedial strategies and systems. However, any site characterization occurring after the presence of contamination is established should be focused to support a proposed remedial strategy and the design of effective and efficient remedial equipment. The concept that remedial technologies should be selected only after site characterization is erroneous, often resulting in incomplete or inappropriate data collection.

The major objective of site remediation is to initially remove the greatest mass of contaminants from sources as rapidly as possible, often beginning with relatively small-scale equipment located at areas of highest contaminant concentrations. Site characterization should continue concurrently to monitor remedial action effectiveness and define the full extent of contamination. For example, a vacuum extraction system may start with five or fewer wells. As additional contaminated areas are located, and as more is learned about system performance, soil borings can be converted to extraction wells and added to the treatment system. With proper design, the capacity of the system can be increased within limits by changing only the blower rather than replacing all associated equipment. Additional modular units can be added to the remedial system if larger capacities are required. Vendors prefer to start remediation on a small scale as soon as possible. If the system performs acceptably, its capacity can be increased to remediate an entire site. If the small-scale system does not perform adequately, another technology or approach to remediation can be tried. This approach to remediation is being recognized by EPA through development of their observational approach and the preparation of Records of Decision that allow latitude in implementing remedial technologies. These pilot-scale remediation projects also serve as effective treatability studies. Except for carbon adsorption and some biotreatment vendors, the vendors contacted during this study indicated that laboratory tests alone are virtually useless because all site condi-

tions cannot be simulated. Pilot-scale projects conducted on-site are the only effective means of obtaining useful design information and verifying remedial technology selection.

Vendors find it advantageous and practicable to have remedial equipment operating within 3 months after the discovery of contamination. Some states require that remedial equipment be operating within 2 weeks after the discovery of free petroleum product in a groundwater well. The objective of rapid response is to minimize the spread of contamination, which also minimizes project scope and cost and protects the environment. Nearly all of the contaminant mass at a site is found as free product or adsorbed to the soil. If free product is present, soil saturated with contaminants must also be present. The contaminant occupies the soil pore space and may comprise as much as 30% of the total soil volume. Thus, remediation must initially focus on free product removal and soil treatment. Typically, less than 3% of contaminant mass is in groundwater, which limits the effectiveness of pump and treat technologies for removing contaminant mass. Vendors believe that the majority of contaminant mass should be remediated within 6 months to 1 year. Requirements for longer remediation periods may be indicative of ineffective technologies and/or impractical clean-up standards. Proposed remedies estimated to require 5 or more years to achieve clean-up goals should be reevaluated to ensure that the contaminant source has been located and that effective remedial technologies have been selected to eliminate the source.

Rapid remedial response can be facilitated because most remedial equipment is relatively standardized in design and size for individual technologies. Most remedial systems can be specified, designed, and even delivered within a few weeks. Vendors view site remediation as an evolving construction process, with the equipment being altered and capacity increased to meet the site conditions encountered and experienced during the initial stages of remediation. This trial-and-error approach based on experience accommodates the high variability in site conditions; for example, soil permeabilities can range from  $10^{-6}$  to 10 cm/s; contaminant concentrations can range from 100% free product to one part per billion; and groundwater pumping rates at wells can range from 1 to 1,000 gallons per minute. Conventional design and construction projects are often not capable of accommodating such large variability. However, vendors stress that the success of the trial-and-error approach to remediation depends largely upon the skill and expertise of the contractor for minimizing error. The information obtained from vendors suggests that, in many cases, equipment design and

installation for site remediation does not have to be a time-consuming and costly process.

Remediation is usually conducted to satisfy a goal established by a regulatory agency. These numerical goals are often established based on the estimated risk to human health. This estimated risk does not consider the mass of contaminants present at a site, which vendors believe to be the driving force for remediation. In addition, the EPA methodology for estimating risk contains so many arbitrary assumptions that nearly any cleanup goal can be justified using assumptions that appear reasonable for a specific site. Whether a cleanup goal is higher or lower than it should be becomes an academic argument when technology capabilities are considered. Each remedial technology, or combination of technologies, can attain some finite level of performance that is extremely dependent on site conditions. If the cleanup requirement is significantly beyond technology capabilities, huge amounts of money would be wasted pursuing an unattainable goal. EPA has recently recognized this problem and has issued treatment-based standards, rather than specific numerical standards, for the Maximum Contaminant Level (MCL) of lead and copper in drinking water. EPA is preparing policy announcements for implementing these new MCLs for site remediation. During one remediation proj-

ect, millions of gallons of contaminated groundwater were remediated to drinking water quality, only to be discharged to a sewer. Vendors unanimously agree that clean-up goals and remedial technology capabilities must be reconciled before a project is initiated.

In summary, remediation is an evolving and, therefore, unconventional construction process, with equipment being altered and capacity increased to meet site conditions experienced during the initial stages of remediation. An advantage of this phased approach is that if the remediation system does not perform adequately, an alternate remediation technology can be tried without having incurred a major investment loss. The success of this trial-and-error approach depends largely upon the skill and expertise of the remediation contractor. Conventional approaches to design and construction projects and the current Superfund administrative process do not generally have the flexibility to adapt to the large variability and uncertainty associated with remediation of uncontrolled hazardous waste sites. Experience with the Superfund program has shown that a significantly revised, rather than a streamlined, program may be necessary to achieve clean-up goals within the near term without imposing a significant burden on the economy.

Open for discussion until 23 June 1994.



# BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

Susana Saval

Coordinación de Bioprocesos Ambientales Instituto de Ingeniería, UNAM  
Apartado Postal 70472, Coyoacán 04510 México, D.F.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de las actividades industriales y del incremento de la población a nivel mundial es la contaminación de suelos. Aunque se ha venido haciendo mucho énfasis en el establecimiento de medidas preventivas con el fin de reducir o eliminar la descarga de materiales extraños al medio ambiente, no se puede ignorar la contaminación que ocurrió en el pasado y a pesar de los esfuerzos actuales, muy probablemente se seguirá teniendo en el futuro.

Debido a que los contaminantes no permanecen estáticos en el sitio donde fueron depositados, sino que tienden a dispersarse en función de las características de los contaminantes y del lugar, es indispensable tomar en consideración todas las variables involucradas con la finalidad de asegurar el éxito de la remediación.

La necesidad de limpiar los suelos dañados por la contaminación ha estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías, entre las cuales, la biorremediación se perfila como una alternativa muy atractiva para ser adaptada a nuestro medio. En este artículo, se pretende dar un panorama general de la biorremediación y los aspectos que deben tomarse en cuenta para llevarla a la práctica.

## FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Antes de entrar propiamente al tema, conviene mencionar que el término contaminación se refiere a la introducción al ambiente de un compuesto en cantidad tal que incrementa su concentración natural y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de la materia y la energía. Desde este punto de vista, únicamente los contaminantes de tipo orgánico tienen la posibilidad de ser reincorporados a los ciclos biogeoquímicos. Todos aquellos compuestos creados

sintéticamente, conocidos como xenobióticos, difícilmente pueden ser reincorporados a los ciclos de transformación de la materia, debido precisamente a que no son de origen natural.

En las zonas urbanas los contaminantes más comunes son materia orgánica en general representada por los grandes volúmenes de basura que son depositadas en rellenos sanitarios o en tiraderos a cielo abierto, pero son sitios que no cuentan con alguna protección para evitar que los lixiviados se dispersen hacia el subsuelo.

Los contaminantes más comunes en las zonas industriales son xenobióticos o bien químicos con cierto grado de toxicidad que son utilizados en actividades de producción o son subproductos de un proceso y materia prima para la fabricación de otros productos. En el caso de algunas zonas agrícolas, también se pueden encontrar muy altas concentraciones de plaguicidas que siguen siendo usados a pesar de los riesgos a la salud que implica su aplicación. Esto permite establecer que los problemas de contaminación en su mayoría ocurren por descuido, negligencia o bien por falta de conciencia y de educación.

Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, ocurren diversos fenómenos naturales que tienden a dirigirlos hacia las aguas subterráneas. Esto hace necesario atender de forma inmediata los derrames que ocurren en el suelo antes de que los contaminantes penetren, migren y lleguen a los acuíferos.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes en el subsuelo está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son: tipo de suelo, permeabilidad, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen la distribución tridimensional y el tamaño del bulbo o pluma de contaminación en una zona específica.

## **BASE DE LAS TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN**

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchos microorganismos ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de biorremediación que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar, como sucede en otros tipos de tratamiento

En las tecnologías de biorremediación se explota al capacidad de aclimatación que los microorganismos han logrado desarrollar bajo las condiciones que imperan en un lugar contaminado. Dichas condiciones pueden llegar a ser adversas para su sobrevivencia, sin embargo, las diferentes poblaciones se adaptan entre si organizando su interacción para actuar de manera conjunta, con lo cual se logra la degradación del compuesto contaminante.

Las tecnologías de biorremediación pueden ser *in situ* para aquellas que se aplican en el sitio contaminado, y *ex situ* si el suelo contaminado se lleva a otro lugar para su tratamiento. Generalmente las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en el acuífero. Las tecnologías *ex situ* se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo.

Existen varias opciones para la biorremediación, su aplicación depende de varios factores como son la profundidad de la contaminación, el tipo de suelo, el tipo y concentración de los contaminantes, la presencia de actividad degradadora, la presencia de aceptores finales de electrones para la respiración microbiana y las condiciones climatológicas que imperan en el lugar. Estas opciones son:

- *bioaumentación*, se usa cuando el contenido de bacterias en el material es muy bajo (menor a  $10^3$  bacterias/g en base seca) o cuando éstas no tienen la capacidad de degradación, básicamente consiste en la adición de bacterias exógenas que pueden ser de marca o se pueden aislar del material y propagarlas en gran escala. Las bacterias de marca tienen la desventaja de ser muy caras y no necesariamente conservan la capacidad degradadora
- *bioestimulación*, consiste en adicionar nutrientes al suelo, especialmente aquellos que son limitantes para la actividad bacteriana y a una concentración tal que favorezca la degradación de los contaminantes; en esta opción se incluye también la adición de compuestos inorgánicos muy oxidados que puedan proporcionar oxígeno por la vía anóxica, como peróxidos, óxidos ó nitratos, cuando el suministro de oxígeno molecular se dificulta.
- *bioventeo*, se refiere al suministro de oxígeno requerido por las bacterias aerobias, para ello se puede inyectar aire, se puede aplicar vacío para que penetre el aire circundante.

Debido a que la base de las tecnologías de biorremediación es la biodegradación de los compuestos contaminantes, es indispensable conocer las características de la población microbiana presente en el suelo de los sitios en estudio y del microambiente que los rodea.

En general existe una baja población de microorganismos en el suelo, se dice que hay de  $10^6$  a  $10^7$  bacterias por gramo de sólidos, los cuales se encuentran adheridos a las partículas de suelo. Se sabe, que diversos los factores gobiernan la actividad microbiana, entre los cuales se pueden citar:

- \* la disponibilidad y tipo de aceptor final de electrones;

- la disponibilidad de nutrientes y micronutrientes;
- disponibilidad y biodegradabilidad del contaminante a degradar, el cual puede ser utilizado como sustrato;
- presencia y concentración de compuestos tóxicos;
- pH, temperatura y disponibilidad de agua, los cuales afectan directamente la actividad de las enzimas encargadas de la degradación;
- competencia entre sustratos.

Todos estos factores son importantes, pero los que deben ser estudiados inicialmente es lo referente al aceptor final de electrones y otros nutrientes y micronutrientes requeridos.

El aceptor final de electrones es el que define la vía metabólica de respiración que utilizan los microorganismos involucrados y debe asegurarse su presencia en las concentraciones requeridas para estimular la actividad degradadora. De acuerdo al aceptor final de electrones, el metabolismo microbiano puede ser aerobio cuando se lleva a cabo en presencia de oxígeno, o bien anaerobio cuando compuestos inorgánicos oxidados como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono actúan en lugar del oxígeno. En términos generales, el metabolismo anaerobio genera menos material celular en comparación con el aerobio, por lo que podría asegurar un menor incremento en la población microbiana y así evitar alteraciones del ecosistema. Sin embargo, el metabolismo anaerobio ocurre a una menor velocidad.

La biorremediación es una de las tantas aplicaciones de la Biotecnología Ambiental, donde el enfoque de los procesos de fermentación tradicionales que se realizan en reactores bajo condiciones controladas, con un medio de cultivo conteniendo todos los nutrientes necesarios, un suministro de oxígeno en cantidades no-limitantes y con cepas microbianas puras, tuvo ser modificado para aplicarlo en el campo, es decir, a la intemperie, con la participación de consorcios microbianos complejos cuyos requerimientos nutricionales generalmente están limitados en el suelo incluyendo al oxígeno y el biorreactor es el propio sitio contaminado o la pila que se construye con el material.

## ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN

Para la aplicación exitosa de tecnologías de biorremediación habrá de vigilar que se realicen cuidadosamente estudios de caracterización con tres enfoques: hidrogeológico, químico y microbiológico, de lo contrario los esfuerzos de limpieza de sitios contaminados serán limitados y la contaminación de los acuíferos, que son nuestra fuente de abastecimiento de agua potable, podría verse agravada.

### Caracterización hidrogeológica

Mediante el uso de instalaciones piezométricas se podrá conocer la conductividad hidráulica con el objeto de alcanzar una distribución homogénea dentro de la zona contaminada. La toma de núcleos de la zona no-saturada, servirá para conocer la estratigrafía y permeabilidad del subsuelo, las mismas muestras servirán para determinar los coeficientes de adsorción. Dicha información permitirá obtener un mapa tridimensional de la distribución de los contaminantes, el cual se podrá actualizar constantemente con un registro piezométrico y químico para confirmar que la reducción del bulbo de contaminación realmente está ocurriendo.

### Caracterización química

A través de determinaciones analíticas se debe conocer el tipo y concentración de contaminantes de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes. Entre estos últimos estarían considerados también, aquellos que podrían servir como aceptores de electrones para la respiración microbiana por vía anóxica.

### Caracterización microbiológica

Para evaluar la posibilidad de aplicar una tecnología de biorremediación es indispensable realizar una caracterización microbiológica. Esto permite identificar el tipo de metabolismo que sigue la población microbiana, y con ello, el aceptor de electrones preferido para la degradación del contaminante de interés.

Es importante hacer énfasis que desde el punto de vista práctico, no es suficiente demostrar biodegradación del contaminante en condiciones de laboratorio. Al desarrollar una tecnología de biorremediación, deben cubrirse tres aspectos fundamentales que son:

1. contar con información bien documentada de la pérdida de contaminantes en el sitio, lo cual requiere hacer un buen seguimiento de los contaminantes en muestras preferentemente inalteradas;
2. realizar ensayos en el laboratorio que demuestren la capacidad de los microorganismos para transformar los contaminantes bajo las condiciones que imperan en el sitio contaminado, esto se logra a través de pruebas de biodegradabilidad; y
3. obtener información que demuestre que la biodegradación puede ocurrir realmente en el campo.

Solamente cubriendo estos tres aspectos se podrá pensar en la biorremediación como una alternativa para la limpieza de un sitio contaminado. Una vez que se obtiene esta información, será

necesario encontrar las condiciones más apropiadas para la lograr la máxima degradación del contaminante, en el menor tiempo posible y a los costos más bajos.

Cabe señalar que las tecnologías de biorremediación que existen en el mercado, generalmente fueron desarrolladas para sitios específicos. Esto significa que para poder aplicarlas en otro lugar habrán de realizarse estudios previos que permitan conocer las características hidrogeológicas, químicas y microbiológicas del nuevo sitio, con el fin de hacer las modificaciones o innovaciones necesarias a través de la experimentación a nivel de laboratorio, antes de proceder a su aplicación en escala de demostración.

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN

Las tecnologías de biorremediación ofrecen diversas ventajas, entre las principales se pueden citar las siguientes:

1. son tecnologías seguras, económicas y más rápidas que algunos tratamientos fisicoquímicos;
2. se utilizan sistemas biológicos cuyo costo es mínimo, más aún si se utiliza la población autóctona;
3. el ecosistema del sitio contaminado prácticamente no se altera, al contrario se recupera;
4. no se generan desechos como producto del tratamiento, ya que los contaminantes son realmente degradados;
5. pueden ser acoplados a otros tipo de tecnología cuando la remoción de los contaminantes no es la máxima deseada;
6. los contaminantes adsorbidos o atrapados en los poros del suelo, también son biodegradados;
7. si la actividad microbiana no es suficiente, puede estimularse por la adición controlada de algunos compuestos requeridos por los microorganismos;
8. cuando los contaminantes orgánicos son empleados como la principal fuente de carbono y energía para los microorganismos, el proceso se realiza con mayor rapidez.

Cuando se trata de una biorremediación *in situ* se tienen ventajas adicionales que son:

9. se eliminan costos de transportación ya que se realiza en el sitio contaminado;
10. al utilizar la población microbiana autóctona se elimina la necesidad de introducir microorganismos potencialmente peligrosos;

A pesar de las enormes ventajas de las técnicas de biorremediación para la limpieza de suelos contaminados, existen casos para los cuales hay limitaciones para que la actividad microbiana ocurra, por lo que la biorremediación no es una opción a elegir. Esto sucede cuando se tienen:

- compuestos orgánicos altamente clorados

- desechos radioactivos
- altas concentraciones de metales pesados
- compuestos tóxicos (cianuros)
- muy altas concentraciones de contaminantes orgánicos

Algunos microorganismos tienen tolerancia a bajas concentraciones de tóxicos, pero esa capacidad se desarrolla a través de técnicas de aclimatación, que se realizan en el laboratorio.

## CONCEPTUALIZACIÓN DE UN PROYECTO DE BIORREMEDIACIÓN

Durante el desarrollo de un proyecto de biorremediación se deben identificar las escalas de operación que son: microcosmos, mesocosmos, pruebas de demostración en campo y tratamiento en gran escala. A nivel de laboratorio, en microcosmos se realizan las determinaciones iniciales utilizando frascos cerrados donde se pueden controlar muchas variables. Las pruebas de biofactibilidad, que tienen como objetivo evaluar la posibilidad de que ocurra una degradación biológica de los contaminantes, se realizan a nivel de mesocosmos también en el laboratorio, comúnmente se emplean frascos grandes o charolas donde se apila el material.

A partir de los resultados que se obtengan en el laboratorio, se plantea el trabajo a escala de demostración la cual se practica ya en campo, para tener las condiciones reales que impera el lugar, así, se dificulta menos el escalamiento. Para la operación en gran escala de cual, técnica de biorremediación se considera que el sitio contaminado o la pila que se construye con el material, se convierte en un biorreactor, por lo que será necesario mantener las condiciones óptimas para la actividad biodegradadora.

Con la finalidad de evitar la dispersión de contaminantes, desde que se trabaja a nivel de escala de demostración es recomendable el uso de cubiertas que eviten el contacto del material contaminado con el suelo y donde se puedan coleccionar los lixiviados generados, los cuales podrán ser tratados en reactores para aguas residuales antes de su descarga final.

La biorremediación no se puede decidir o programar desde un escritorio, es indispensable visitar e investigar la zona, así como la fuente de contaminación del sitio. Para entender el comportamiento del suelo es necesario trabajar con él y conocer su textura, a partir de ahí podrá saberse si se tiene arcilla, limo o arena, así se podrán prever problemas de transferencia de masa, tanto de nutrientes como de oxígeno. Lo relacionado con el suelo se aprende desde el muestreo, es cuando se percibe su heterogeneidad, diversidad, complejidad y compactabilidad. En los suelos contaminados con residuos del petróleo, que son materiales cuya presencia se detectan a simple vista, es cuando se entiende el importante papel que el suelo desempeña en la naturaleza y que realmente se trata de un

recurso natural no renovable, insustituible, capaz de proteger la calidad del agua de los acuíferos, que son la fuente de suministro de agua para las poblaciones.

Cuando se trabaja con suelos contaminados, se busca un sitio control cercano a la zona de donde se pueda conseguir información acerca de las características del suelo antes de ser contaminado. El buscar ese sitio control es también una enseñanza, ya que las características del suelo varían ampliamente de un lado a otro, pero finalmente se consigue. Un ejemplo que reafirma la heterogeneidad del suelo se presenta en la Figura 1, donde se tienen perfiles de humedad y número de bacterias heterótrofas aerobias de un núcleo que se tomó de la superficie a 5.5 m de profundidad en un sitio de canal donde se vierten aguas residuales industriales. La cantidad de bacterias típica encontrada en el núcleo fue entre  $10^5$  y  $10^6$  bacterias por gramo de suelo, excepto a 2.46 m de profundidad donde se encontró un estrato con una humedad muy baja, en la que el contenido de bacterias encontrado fue menor en dos órdenes de magnitud.

La biodegradación de los contaminantes en los suelos generalmente se va registrando a lo largo del tiempo a través de la reducción de los contaminantes, sin embargo, existen otro tipo de herramientas biotecnológicas, como la determinación del consumo de oxígeno y de la producción de bióxido de carbono, que son un importante apoyo para detectar si una mínima reducción de contaminantes responde a una disminución en la actividad de los microorganismos. Curvas típicas obtenidas en el laboratorio para estos dos parámetros se presentan en las Figuras 2 y 3, donde N1, N2 y N3 corresponden a diferentes combinaciones de nutrientes y CTL al control sin nutrientes. Como puede observarse, en ambos casos, el control mostró la actividad microbiana es más rápida, mientras que la combinación de nutrientes N2 y N3 favoreció mejor dicha actividad que la

El seguimiento de la cantidad de bacterias biodegradadoras del contaminante de interés, es también necesario.



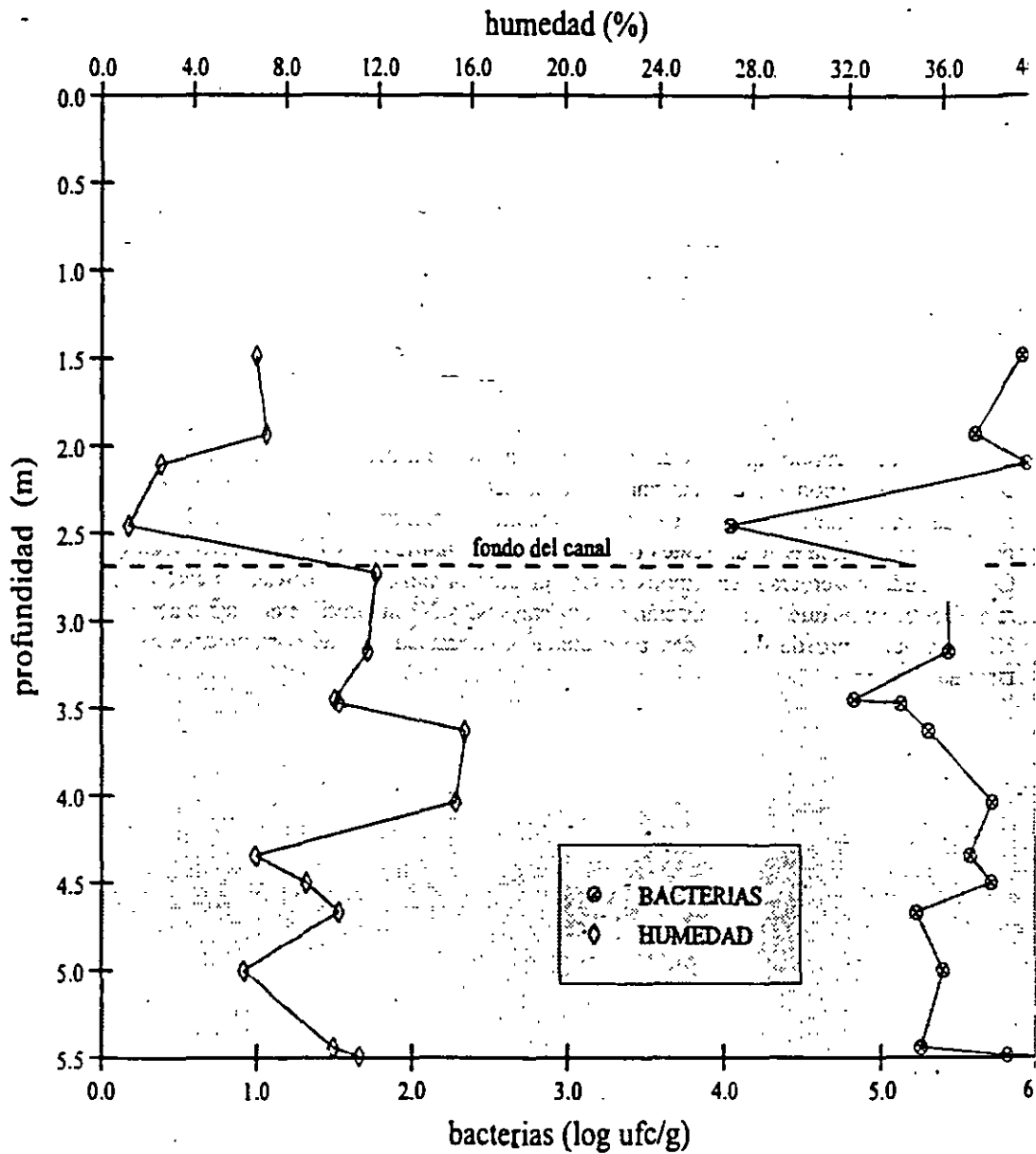


Fig 1. Perfiles de humedad y densidad de bacterias heterótrofas aerobias

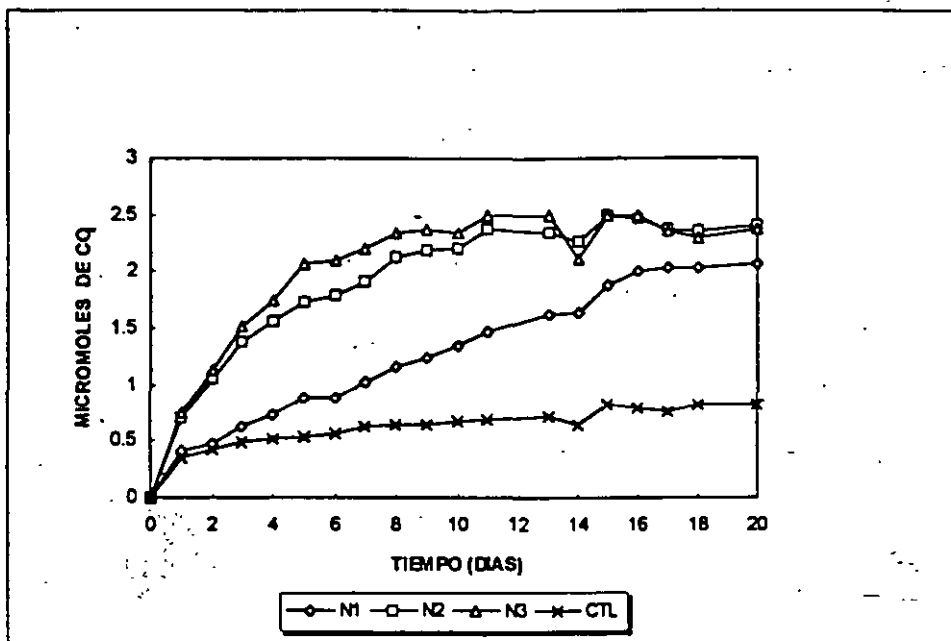


Fig. 2. Producción de CO<sub>2</sub> durante la biodegradación de diesel en suelo.

### CONSIDERACIONES FINALES

En México no existe aún un marco normativo en lo referente a suelos, esa ha sido la principal limitante para iniciar con las acciones de remediación correspondientes en aquellos que están contaminados. La práctica de las auditorías ambientales a las industrias establecidas en México, que ha venido realizando la Procuraduría Federal del Medio Ambiente (PROFEPA) desde 1992, ha permitido detectar problemas de contaminación en suelos y subsuelo, y establecer compromisos para su limpieza. A falta de una normatividad propia, las autoridades ambientales mexicanas han establecido procedimientos y límites de limpieza a partir información extranjera, principalmente de los Estados Unidos, pero sin un criterio objetivo y uniforme para seleccionar la más adecuada a nuestro medio.

Desde el punto de vista tecnológico, la biorremediación, por su simplicidad, economía y seguridad ambiental, puede ser llevada a la práctica en un sinúmero de sitios contaminados en nuestro país, lo que se necesita es voluntad política para la toma de decisiones y la asignación de los recursos. También se requiere de personal técnico especializado para realizar los trabajos de campo.

correspondientes. Sin embargo, no se debe pasar por alto que el principal aspecto que asegura el éxito de la biorremediación, es la integración de grupos de profesionales de alto nivel que incluyan las disciplinas ambientales de hidrogeología, geología, química analítica, microbiología, biotecnología y edafología, quienes de manera conjunta deberán ir tomando decisiones desde que se inicia el proyecto, para que cada una de las acciones que se realice tenga un buen soporte científico-tecnológico.

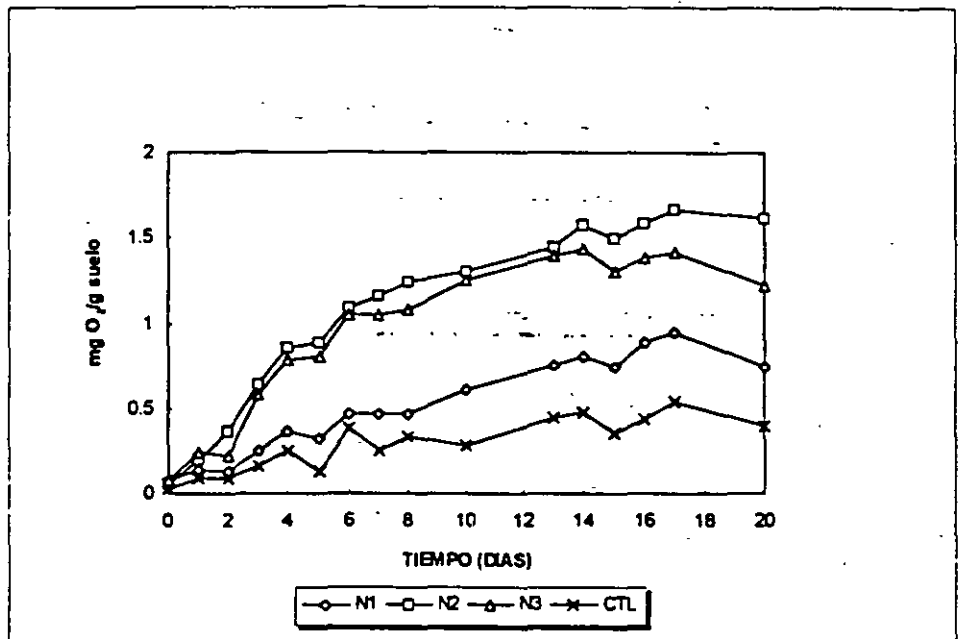


Fig. 3. Consumo de oxígeno durante la biodegradación de diesel en suelo.

## RECONOCIMIENTOS

Los resultados experimentales son parte de lo realizado por Ana Laura Deyta, Adriana Domínguez, Diana García y Norma Pérez, como parte de los proyectos patrocinados por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA IN-301693 y 503594, en colaboración con el Centro de Ecología, UNAM), el Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA, II-6313) y el propio Instituto de Ingeniería (II 5341).

# RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS EN MÉXICO

Susana Saval

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

Apdo. Postal 70-472, 04510 México, D.F., México

e-mail: [ssb@pumas.iingen.unam.mx](mailto:ssb@pumas.iingen.unam.mx)

## Resumen

Los microorganismos tienen una amplia versatilidad bioquímica, ellos juegan un papel importante en el ambiente debido a que reciclan la materia a través de los ciclos biogeoquímicos. Esta capacidad ha sido explotada desde hace varios años gracias a las tecnologías de biorremediación, las cuales se han perfilado a nivel mundial como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con compuestos orgánicos. La más importante ventaja de la biorremediación es que los contaminantes pueden ser realmente transformados y algunos de ellos completamente mineralizados. Comparada con otras tecnologías, la biorremediación es segura y económica, y después del tratamiento los suelos pueden ser reutilizados para el crecimiento de plantas. Un gran número de tecnologías de biorremediación y productos microbianos que han sido aplicados y comercializados exitosamente en países desarrollados, han encontrado obstáculos para ser aplicados en México. Entre las razones más poderosas se pueden citar, que cada sitio contaminado representa un problema específico el cual debe ser abordado con una estrategia *ad hoc*, y que los microorganismos autóctonos que han logrado sobrevivir a las condiciones extremas de contaminación, desempeñan el papel más importante en la biodegradación de los contaminantes. Buscar estrategias para estimular dicha actividad biodegradativa autóctona es uno de los tantos retos, pero al mismo tiempo, grandes oportunidades para el desarrollo de proyectos de investigación para llevar al campo.

**Palabras clave:** biorremediación, contaminación de suelos, biodegradación

## Introducción

Durante las dos últimas décadas se ha hecho evidente el hecho de que la calidad del agua subterránea en países industrializados y en vías de desarrollo se ha deteriorado. Este deterioro está íntimamente relacionado con el crecimiento industrial y con prácticas equivocadas para la disposición final de materiales de desecho de todo tipo. Los derrames incontrolados de combustibles y aceites en talleres, estaciones de servicio y plantas industriales, así como la descarga de aguas residuales industriales en canales a cielo abierto, también han influido de manera importante a la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

A nivel mundial, se han desarrollado una gran diversidad de tecnologías para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados. De acuerdo a su base de funcionamiento se podrían clasificar como: fisicoquímicas, térmicas y biológicas. Dentro de las tecnologías biológicas, la biorremediación ha surgido en los últimos años como una alternativa muy atractiva, debido a que los contaminantes son realmente transformados y algunos completamente mineralizados.

En este trabajo se presenta un análisis de los retos y las oportunidades de las tecnologías de biorremediación de suelos y acuíferos en México.

### **Ventajas tecnológicas de la biorremediación**

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural no renovable que desempeña diversas funciones entre las que destacan: su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos, es decir, una capa de protección de éstos; también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimentaria. Además, el suelo es el espacio donde se realizan actividades agrícolas y ganaderas, que son la base de la alimentación y donde se cultivan áreas verdes que son fuente de regeneración de oxígeno. Como funciones no menos importantes, suelo y subsuelo constituyen el hábitat natural de la biodiversidad y el albergue de la reserva cultural, sin olvidar la función más conocida como la base física para la construcción de edificaciones.

Resulta obvia la necesidad de recuperar un suelo contaminado para devolverlo a sus funciones, ya que si un suelo se pierde, difícilmente podremos hablar de sustentabilidad. Desde este punto de vista, la biorremediación se ubica como una tecnología limpia en la que los contaminantes realmente pueden ser transformados y algunos completamente mineralizados. Además, debido a que se recomienda la utilización de microorganismos cuyo hábitat natural es el suelo, éstos mueren cuando se agotan los nutrientes.

La biorremediación es versátil porque puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. De esta forma, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes, bioincremento cuando se necesita aumentar la proporción de la flora microbiana degradadora del contaminante, o bien, bioventeo cuando se hace necesario el suministro de oxígeno del aire. Además, la biorremediación puede realizarse fuera del sitio cuando la contaminación es superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado el acuífero.

### **Ventajas económicas de la biorremediación**

Una característica importante de la biorremediación es su bajo costo en relación con otras tecnologías de tratamiento. De acuerdo a Alper (1993), el costo de la biorremediación es por lo menos seis veces más económica con respecto a la incineración, y tres veces menor que el confinamiento. Este bajo costo se debe a un menor gasto de energía, a que las

Lo importante en biorremediación es entender que el biorreactor será "construido" en el sitio de tratamiento, si se trata de una biopila o biocelda estará parcialmente confinado, pero cuando se trata de un acuífero el biorreactor no tendrá paredes, tapa y fondo. Tampoco se podrá trabajar en condiciones asépticas, de manera que el concepto tradicional de un biorreactor cambia notablemente.

Cuando los microorganismos han logrado adaptarse a las condiciones del "biorreactor", la biodegradación de los contaminantes ocurrirá en un tiempo que generalmente es largo si se compara con otras técnicas de remediación. Aquí se presenta otro reto, la definición de los parámetros de seguimiento durante el proceso de biorremediación.

Por lo que respecta a los contaminantes, el enfoque tradicional es seguir la reducción de los compuestos químicos más tóxicos, pero su reducción no necesariamente corresponde a la limpieza del lugar. Un ejemplo clásico se tiene cuando un sitio contaminado con gasolinas va a ser biorremediado, los compuestos químicos indicadores son los monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX). El aspecto que surge de inmediato es que la cuantificación de estos compuestos debe hacerse cuidadosamente para evitar resultados falsos, pero también debe hacerse un seguimiento de los hidrocarburos de mayor peso molecular para saber si están siendo degradados. Estos son dos conceptos diferentes, el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo a la limpieza del sitio.

A pesar de que no se cuenta con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la biorremediación, éste existe. De hecho, esa fue la razón por la que un gran número de compañías extranjeras llegaron a México hace algún tiempo, con la finalidad de vender sus tecnologías, sin embargo, los resultados fueron poco exitosos. Las principales causas fueron: bajas eficiencias de reducción de contaminantes, un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos y altos costos de operación. Un factor común para muchas de estas compañías fue la aplicación de productos microbianos vendidos como "polvos mágicos" capaces de destruir todo tipo de contaminantes, además de los "aditivos" que son productos químicos patentados de formulación desconocida los cuales contienen nutrientes y algunos de ellos tensoactivos, los cuales no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación (Saval, 1995).

Un aspecto indispensable que debe tomarse en cuenta en cualquier tipo de tecnologías es que para lograr el éxito en su aplicación es necesario realizar estudios para su adaptación e innovación, que puede llevar incluso a nuevos desarrollos. En el caso de las tecnologías de biorremediación debe tomarse en cuenta que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat, aquí conviene mencionar que en el caso de México, los suelos tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares.

Para aquellos proyectos de biorremediación a escala real, su costo y duración están en función de los niveles de limpieza requeridos, y éstos dependen de cada caso particular. Obviamente las principales figuras que aparecen en estos proyectos con fines comerciales son la industria contaminadora, la empresa de servicios ambientales y las autoridades ambientales. Actualmente, para el sector académico se han abierto las puertas de nuevas áreas de investigación que podrán generar tecnologías *ad-hoc* con un verdadero soporte científico, este esquema permitirá renovar en el corto plazo la relación universidad-industria.

Finalmente, cabe señalar que a pesar de la importancia de los problemas ambientales y de la necesidad de soluciones adecuadas a nuestro medio, no existen carreras a nivel licenciatura que permitan la formación de profesionales de buen nivel, con una visión muy dirigida al control de la contaminación ambiental, mucho menos en lo que se refiere a suelos y acuíferos. Se requiere un enfoque multidisciplinario con una importante participación de áreas como: biotecnología, hidrogeología, geociencias, geotécnica, fisicoquímica y química, entre otras.

### **Actividades del Instituto de Ingeniería**

En los últimos años, el Instituto de Ingeniería ha venido participando en proyectos relacionados con la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos. Todos los proyectos se desarrollan en campo, por lo que se han iniciado con la caracterización geohidrológica, fisicoquímica y microbiológica, con la integración de los resultados se ha logrado proponer estrategias de

### **Consideraciones finales**

La necesidad de enfrentar los difíciles problemas ambientales de México basado en principios de sustentabilidad, conforma un marco de referencia en el cual la biorremediación puede contribuir en forma importante a la limpieza de suelos y acuíferos. Para el sector académico se abre la oportunidad de estudiar problemas de contaminación específicos, con miras a desarrollar propuestas de solución aplicables al caso de México, en el corto y mediano plazo.

### **Bibliografía**

Alper J. 1993. Biotreatment firms rush to marketplace. *Bio/Technology* 11: 973-975.

Kavanaugh M.C. 1995. Remediation of contaminated ground water: a technical and public policy dilemma. *Proceedings of Forum in Mexico on Ground Water Remediation*, December 5-6, Mexico City, Mexico, pp 1-5.

Saval S. 1995. Remediación y Restauración. En *PEMEX: Ambiente y Energía, Los Retos del Futuro* UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp.151-189.

necesidades de nutrientes son bajas y también a que se opera bajo condiciones ambientales. Sin embargo, cabe señalar que la comparación de costos no puede generalizarse, es aplicable para cada caso.

### **Ventajas ambientales de la biorremediación**

Como se mencionó anteriormente, la biorremediación se ubica como una tecnología limpia debido a que los contaminantes pueden ser realmente transformados en compuestos deseablemente inocuos al ambiente, y algunos de ellos pueden ser completamente mineralizados. Además, los microorganismos mueren cuando se agotan los contaminantes que están siendo empleados como sustrato.

Cuando se trata de suelos superficiales y el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la biorremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas.

En el caso de aguas subterráneas, la tecnología más utilizada es la llamada bombeo-tratamiento-recarga que consiste en extraer el agua subterránea, tratarla en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero. A pesar de ser muy empleada existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación por ejemplo: los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa. En otros casos, se hace más difícil el poder alcanzar los niveles de limpieza establecidos, debido a que las bajas concentraciones de contaminantes que los microorganismos utilizan como sustrato no son suficientes para soportar su actividad microbiana, por lo que éstos empiezan a morir. Además de que se hace muy costoso el tratamiento mismo, por el gasto de energía que implica el bombeo (Kavanaugh, 1995).

### **Retos tecnológicos de la biorremediación**

A escala de demostración se ha demostrado que la biorremediación tiene muy poco éxito cuando existen metales pesados en concentraciones tales que inhiban la actividad microbiana, o bien, que las condiciones microambientales sean muy extremas. Debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Por ejemplo, cuando las concentraciones de los contaminantes orgánicos son muy altas, se observan fenómenos de inhibición.

La biorremediación se hace muy difícil cuando el material geológico es netamente arcilloso, porque su baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante cuando la contaminación está en el nivel freático y el tratamiento es *in situ*.



Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agrega arena, o bien, residuos agroindustriales que aumentan la permeabilidad y favorecen la transferencia de masa.

Otro aspecto que es necesario resaltar es la complejidad química de la contaminación en varios de los sitios, además de que en algunos casos, los contaminantes tienen ya un avanzado grado de intemperismo, situación que dificulta cualquier tipo de tratamiento.

Para poder participar en proyectos de biorremediación es necesario involucrarse completamente con el problema, tener acceso al sitio contaminado y realizar una profunda investigación sobre los antecedentes del sitio y de las causas que llevaron al problema de contaminación. Esto permitirá sentar las bases para la completa caracterización del lugar y plantear una estrategia de investigación que conduzca a la solución de un problema real, a través de un desarrollo tecnológico integral para cada caso particular.

En biorremediación no es suficiente trabajar con casos ideales en el laboratorio, es indispensable mantener las condiciones que imperan en el lugar para que el estudio sea representativo del alcance que puede tener en campo. En este sentido, conviene considerar los siguientes aspectos:

- Los microorganismos autóctonos encargados de la degradación de contaminantes son consorcios microbianos con características propias dependiendo de las condiciones microambientales del lugar donde se encuentran.
- Preferentemente se debe estimular o enriquecer la población microbiana autóctona, en lugar de aplicar microorganismos exógenos que muy probablemente mueran por la competencia que se establece en el medio natural.
- Los microorganismos generalmente están adheridos a las partículas de suelo y reciben de éste un aporte de microelementos que permiten su sobrevivencia e incluso su actividad metabólica, por lo que se les debe cultivar en las condiciones más parecidas a su hábitat natural.
- Si se decide por el aislamiento de microorganismos y su propagación masiva, éstos no necesariamente se adaptarán al nuevo microambiente donde se depositen.
- De los contaminantes presentes en el sitio, una gran cantidad de ellos serán utilizados por los microorganismos como sustratos, pero otra parte podría quedar sin ser transformada.
- Las fuentes de nitrógeno y fosfatos preferentemente deben agregarse en concentraciones limitadas para permitir únicamente la actividad degradativa, que no necesariamente va ligada con el incremento de la población microbiana.
- En biorremediación, se debe tener cuidado durante la selección de los compuestos químicos que se adicionen como nutrientes o co-sustratos.
- Se deben adoptar las condiciones microambientales del sitio, aunque no correspondan a las óptimas para el crecimiento y desarrollo.
- Tener un sitio contaminado es por sí mismo un riesgo, someterlo a una biorremediación es otro riesgo adicional, por tanto, la idea de aplicar microorganismos manipulados genéticamente (MMGs) en biorremediación debe esperar hasta que se comprendan claramente los mecanismos de transporte y destino que rigen en un medio natural, y se conozcan los riesgos adicionales que implica su uso.

Solleiro J.L. and Castañon R. 1996. Environmental Biotechnologies in Mexico: potential and constraints for development and diffusion. In *Biotechnology for Sustainable Development*, University of Tennessee, Knoxville, USA, en prensa.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO***

**PRESENTADO POR: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# **CALIDAD DEL AGUA EN MEXICO**

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS**

## **1. INTRODUCCION**

Existen aproximadamente 1'458,000,000 km<sup>3</sup> de agua en la Tierra de los cuales el 93% es salada, el 2% se encuentra congelada en los polos y sólo una pequeña parte está disponible a nuestras necesidades.

La renovación natural del recurso agua se realiza a través del ciclo hidrológico, en el cual del 100% de la precipitación, 28% cae en la tierra y 72% en el mar.

- Del 28 % que cae:

- \* 7% se percola a los acuíferos
- \* 8% va al mar por escurrimientos y el
- \* 13% restante, regresa a la atmósfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) y evapotranspiración (de la cubierta vegetal).

Aparte de las condiciones climáticas, la distribución y abundancia del recurso en el Mundo depende de la geología, orografía, tipo de suelo y cubierta vegetal. El resultado es que la distribución mundial del agua útil es muy desigual. Por si fuese poco, la carencia de infraestructura adecuada para el aprovechamiento del agua acrecenta las diferencias. En efecto, mientras 3 400 millones de personas cuentan con una dotación de apenas 50 L/d (se considera que el requerimiento para las necesidades básicas oscila entre 20 y 50 L) en países desarrollados el consumo puede fácilmente sobrepasar los 400 L/hab.d

## **2. DISPONIBILIDAD**

La disponibilidad del agua tiene que ver no sólo con la cantidad, también es criterio que la calidad sea acorde con el uso que se persigue. En la antigüedad, la calidad del agua se calificaba sólo por su aspecto, sabor y olor. Actualmente los avances científico-técnicos han repercutido en técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de contaminantes, a grado tal, que es posible lograr la calidad "potable" con la depuración de aguas residuales. Sin embargo, tales conocimientos aún no se plasman en una aplicación generalizada de instalaciones industriales o municipales suficientes y eficientes ni tampoco en políticas integrales que busquen:

- La conservación del recurso (agua superficial y subterránea),
- La preservación de su calidad,
- Su uso eficiente (Reuso, ahorro y recirculación del agua).

queda aún mucho por lograr en términos de la calidad tanto en el Tercer Mundo como en los países desarrollados, sin duda, con matices diferentes. En el sentido más amplio, los retos para el próximo siglo abarcan desde el suministro de agua microbiológicamente aceptable hasta el desarrollo de sofisticadas técnicas de control para contaminantes complejos y de daño a largo plazo.

## 2.1 Cantidad y calidad del agua en México

México cuenta 5,125 m<sup>3</sup> de agua renovable/hab.año, cifra que no da mucha información. En cambio, el índice de escasez que considera la disponibilidad en términos de sus usos sitúa al país en un nivel de **disponibilidad comprometida por su distribución temporal y espacial así como por problemas de contaminación**. Este índice refleja sin duda la situación que vivimos. El MAPA 1 muestra la disponibilidad del agua superficial como lo calcula la CNA para las regiones hidrológicas en que se divide al país.

La FIG 1 muestra como se explota el agua subterránea y la superficial para los diversos fines. El empleo de acuíferos representa el 27 % de la extracción total y es muy notorio que el sector que más la emplea es el riego (76 % del total). Normalmente, este tipo de agua es considerado de muy alta calidad y se prefiere preservar para el consumo humano. Sobre todo, cabría cuestionarse que use tanta agua de buena calidad para riego con eficiencias muy bajas (del orden del 50 %).

Las aguas superficiales son por lo general menos duras, tienen mayor concentración de oxígeno (que ayuda a la eliminación de Fe y Mn) y no contienen ácido sulfhídrico. En contrapartida, son fácilmente contaminables, tienen alta actividad biológica, color y turbiedad, sólidos en suspensión y flotantes. Su calidad varía en épocas de avenidas y tienen mayor probabilidad de contener materia orgánica que favorecerá la formación de organoclorados durante la desinfección con cloro.

El agua subterránea, por encontrarse protegida, es de calidad más uniforme, el contenido de color y compuestos orgánicos es bajo y no es corrosiva. Sus desventajas principales son su accesibilidad, el contenido de H<sub>2</sub>S y que generalmente es dura aunque poco corrosiva. En ocasiones puede además contener por disolución del medio en el que está contenida, metales pesados.

Las aguas subterráneas, comparadas con las aguas superficiales contienen sólidos disueltos, cloruros, alcalinidad, dureza y nitratos. Sin embargo, se caracterizan por tener concentraciones menores de color, turbiedad, nitrógeno amoniacal, DBO, coliformes, sólidos coloidales y sólidos suspendidos.

### 3. CONTAMINACION DEL AGUA

#### 3.1 Conceptos generales

El agua tiene una composición precisa ( $H_2O$ ), y por lo tanto es fácil identificar los compuestos ajenos a ella. Sin embargo, la definición de sus contaminantes se dificulta. Es un hecho que el agua rara vez se encuentra en forma pura. En general, se considera como contaminante al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. De esta forma, la definición de contaminación del agua queda íntimamente ligada al uso al cual se le destina.

A pesar de la dificultad en la definición, es claro que el exceso de contaminación en un cuerpo de agua provoca el abatimiento de oxígeno, la muerte y descomposición de la flora y fauna, impide su uso en industrias o ciudades y deteriora el paisaje. El origen de la contaminación son los desechos urbanos e industriales, los drenados de la agricultura y de minas, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas, los efluentes de plantas depuradoras, los lodos de potabilizadoras, la ruptura de drenajes, el lavado de la atmósfera, etc.

Como se puede observar, el problema del agua es complejo: para poder hacer uso de ella se requiere exista tanto en la calidad adecuada como en la cantidad suficiente durante un período determinado y en una época del año definida.

Los usos que se pueden dar al agua son muchos y se clasifican en:

- 1) Consumo humano (bebida, cocina y procesamiento de alimentos)
- 2) Limpieza personal
- 3) Cultivo de peces, mariscos o cualquier otro tipo de vida acuática
- 4) Agricultura
- 5) Industria
- 6) Usos municipales (riego de jardines, lavado de coches, fuentes de ornato, lavado de calles e instalaciones públicas)
- 7) Usos recreativos (natación, veleo, etc.)
- 8) Transporte de desechos

### 3.2 Clasificación de las descargas de contaminantes

Existen tres tipos de descargas de agua de desecho: las puntuales, las dispersas y las accidentales. Las primeras corresponden a las redes de drenaje y es posible localizarlas geográficamente y cuantificarlas y caracterizarlas. Las descargas puntuales se pueden controlar fácilmente ya que es posible conducir las a una planta de tratamiento o zona de reuso.

Las descargas dispersas provienen de diversos puntos y es muy difícil evaluarlas en cuanto a volumen y calidad. Las últimas, las accidentales, son prácticamente imposibles de cuantificar pues como su nombre lo indica ocurren en forma espontánea. Estas contaminan los cuerpos de agua a través de interacciones complejas entre las sustancias aplicadas o depositadas sobre el suelo y el ciclo hidrológico. Son de origen: urbano, agrícola y atmosférico.

Las de origen urbano son generadas por extensas áreas impermeables o semi-impermeables, como calles, coberturas de edificios, estacionamientos y otras, sobre las cuales se depositan residuos contaminantes generados en las ciudades. La principal descarga dispersa de origen urbano es la lluvia.

Las descargas dispersas de origen agrícola llevan implícitos procesos que ocurren entre las sustancias químicas del agua de riego y el suelo como el consumo de sustancias por organismos presentes en el terreno y liberación de metabolitos por parte de estos.

El control es muy difícil y está asociado con políticas adecuadas de cultivo y de dotación de infraestructura a los asentamientos humanos. Es decir, al desarrollo de políticas acordes de uso del agua y del suelo.

Por último, las descargas accidentales, como los derrames de PEMEX, son de control muy difícil, su estudio y estrategias para enfrentarlo deben ser determinadas a partir de estudios de simulación.

### 3.3 Principales contaminantes

Los componentes o impurezas que caracterizan la calidad del agua, pueden estar presentes en alguna de las siguientes tres formas:

Materia suspendida.- corresponde a moléculas suspendidas de diámetro equivalente a 1 - 100 microm

Materia disuelta.- corresponde a moléculas o iones disueltos de diámetro equivalente a  $10^{-5}$  -  $10^{-3}$   $\mu$

Materia coloidal.- corresponde a materia suspendida con características, en algunos casos, similares a la materia disuelta, con diámetro equivalente a  $10^{-3}$  -  $1 \mu$



La TABLA 1 muestra datos típicos de los constituyentes encontrados en el agua residual doméstica; dependiendo de las concentraciones constituyentes, el agua residual se clasifica como de concentración alta, media o baja.

TABLA 1 COMPOSICION TIPICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMESTICO

COMPUESTO	C O N C E N T R A C I O N		
	MINIMA	PROMEDIO	MAXIMO
Sólidos totales, mg/L	350	720	1200
Sólidos disueltos	250	500	850
Fijos	145	300	525
Volátiles	105	200	325
Suspendidos totales	100	220	350
Fijos	20	55	75
Volátiles	80	165	275
Sólidos sedimentables, ml/L	5	10	20
DBO <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /L	110	220	400
DQO, mgO <sub>2</sub> /L	250	500	1000
COT, mgC/L	80	160	290
Nitrógeno total, mgN/L	20	40	85
Orgánico	8	15	35
Amoniacal	12	25	50
Fósforo total	4	8	15
Alcalinidad mgCaCO <sub>3</sub> /L	510	100	200
Grasas, mg/L	20	100	150

Adaptado de Metcalf & Eddy, Inc. 1979.

### 3.4 Características físicas

Entre las propiedades físicas se encuentra el color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, contenido de sólidos y conductividad.

- **Color.** El color verdadero se define como el color producido por sustancias disueltas y se aplica para agua potable. El color aparente está dado por los sólidos en suspensión. El método que se utiliza con mayor frecuencia es el de la escala Pt-Co (platino-cobalto).

La coagulación seguida por sedimentación es el método más apropiado para la remoción del color. La dosificación del coagulante depende de la concentración inicial del color y del pH óptimo (generalmente ácido).

- **Conductividad.** La conductividad representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, sus concentraciones, el estado de oxidación de los mismos, el porcentaje de cada uno y de la temperatura. En general, las soluciones de ácidos, bases y sales son buenos conductores pero, las de compuestos orgánicos lo son escasa o nulamente. La conductividad de electrólitos (no la metálica) es muy dependiente de la temperatura, aproximadamente  $1.9\%/^{\circ}\text{C}$ .

- **Olor.** Es un parámetro que proporciona información sobre el estado del agua y puede provocar rechazo por el consumidor.

- **Sabor.** El sabor al igual que el olor, tiene su origen por la presencia de minerales (metales y sales del suelo) o por productos finales de las reacciones biológicas. Los compuestos inorgánicos producen sabor pero no olor, en cambio, los orgánicos producen ambos, (Ejemplo: el petróleo y los sulfuros producto de la descomposición biológica). El-sabor es un parámetro de agua potable medido por catadores.

- **Sólidos.** Se entiende por sólido todo residuo que queda después de la evaporación a  $103^{\circ}\text{C}$ . Los procesos tradicionales de eliminación de sólidos suspendidos son la desarenación, sedimentación y filtración. Para el caso especial de los sólidos suspendidos orgánicos se emplean procesos secundarios (floculación-coagulación y sistemas biológicos), los que teóricamente eliminan entre el 90 y 95% de los mismos. Los sólidos suspendidos interfieren con la desinfección del efluente, protegiendo en ellos a los organismos patógenos por lo que su correcto control implica un tratamiento terciario (coagulación-floculación después de un biológico o filtración terciaria).

Los sólidos disueltos totales (SDT) en el agua comprenden sustancias inorgánicas (calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica. Los SDT en el agua potable proceden de fuentes naturales, aguas residuales, escorrentías urbanas y desechos industriales. Las concentraciones de los SDT en el agua varían considerablemente en diferentes regiones geológicas, debido a la distinta solubilidad de los minerales.

No se dispone de datos confiables sobre los posibles efectos en la salud de la ingestión de SDT en el agua para consumo humano y no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. Sin embargo,

la presencia de altas concentraciones de los SDT puede causar quejas en los consumidores.

- **Temperatura.** Influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos (sólidos, líquidos o gases, principalmente  $\text{O}_2$ ) y en el desarrollo de la vida. Es importante recordar que en un líquido a mayor temperatura mayor solubilidad de un sólido pero menor la de un gas y esto es el motivo

por el cual la contaminación térmica acaba con la vida aerobia de un cuerpo de agua, al eliminar el oxígeno disuelto del agua. La temperatura del agua residual es generalmente más alta que en la del agua potable, debido a la adición de agua caliente procedente de casas y actividades industriales.

- **Turbiedad.** La turbiedad es el parámetro que mide qué tanto la luz es absorbida o dispersada por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua. La turbiedad no es un análisis cuantitativo de los sólidos suspendidos. En las aguas superficiales se debe en gran parte a la presencia de arcilla y otros minerales. El intervalo en tamaños de la mayor parte de estas partículas es del orden de 0.2 a 5  $\mu$ , es decir, que corresponden a una escala superior a la de los verdaderos coloides. La coagulación de estas suspensiones se realiza con relativa facilidad, una vez que se ha determinado el pH adecuado.

### 3.5 Características químicas

- **Acido sulfhídrico (sulfuro de hidrógeno).** El ácido sulfhídrico es un gas de olor desagradable, a huevos podridos, que se percibe incluso con concentraciones muy bajas, inferiores a 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el aire. Se forma por hidrólisis de sulfuros en el agua. Sin embargo, la concentración del ácido sulfhídrico en el agua para consumo humano se reduce debido a que los sulfuros se oxidan fácilmente en el agua aireada.

La toxicidad aguda del ácido sulfhídrico es considerable para los seres humanos cuando estos lo absorben por inhalación; hay irritación ocular con concentraciones de 15 a 30  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Aunque no se dispone de datos sobre la toxicidad por vía oral, es poco probable que pueda consumirse una dosis perjudicial de ácido sulfhídrico en el agua para consumo humano. Por consiguiente, no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. No obstante, en el agua potable no deben ser detectables el sabor ni el olor de este compuesto.

- **Alcalinidad.** La alcalinidad expresa la capacidad que tiene un agua para mantener su pH a pesar de recibir una solución ácida o alcalina. Corresponde principalmente a los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ , siendo los más comunes los de calcio y magnesio. Cuando el agua contiene boratos, fosfatos o silicatos también son medidas por este método, de ahí que la prueba sea considerada como global. La alcalinidad se determina mediante la titulación con un ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0.02N) y el resultado se expresa como  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ .

- **Carbono orgánico total.** El carbono presente en la materia orgánica se encuentra en varios estados de oxidación que reaccionan de manera diferente a la prueba de DBO o de DQO. En efecto, la DQO y DBO dependen del estado de oxidación de la materia orgánica en cambio el COT evalúa el contenido total de C. La medición se hace por liberación del carbono orgánico y su transformación en  $\text{CO}_2$ . El  $\text{CO}_2$  formado es detectado por infrarrojo. Se puede medir el carbono total (TC) si se incluye el contenido original de  $\text{CO}_2$  en la muestra y sobre la fracción de COT se puede diferenciar la soluble de la no disuelta.

- **Cloro residual.** La cloración del agua de abastecimiento o de agua tratada tiene por objeto destruir o desactivar microorganismos patógenos. Un segundo efecto, importante sobretodo en agua de abastecimiento, es mejorar la calidad global por la reacción del cloro con el nitrógeno amoniacal, fierro, manganeso, sulfuros y algunos compuestos orgánicos. El cloro libre (principalmente HOCl y OCl) así como el combinado (cloraminas) se determina por la formación de un compuesto amarillo con ortotoluidina, el cual se mide a 435 o 490 nm en un espectrofotómetro. Para medir cloro residual en forma aproximada existen dispositivos muy sencillos como los empleados en albercas.

- **Cloruro.** El cloruro presente en el agua para consumo humano procede de fuentes naturales, de las aguas residuales y de los efluentes industriales, de la escorrentía urbana que contiene sales utilizadas para deshelar y de intrusiones salinas. La principal fuente de exposición humana a este compuesto es la sal agregada a las comidas, cuya ingesta es por lo general mucho mayor que la procedente del agua potable.

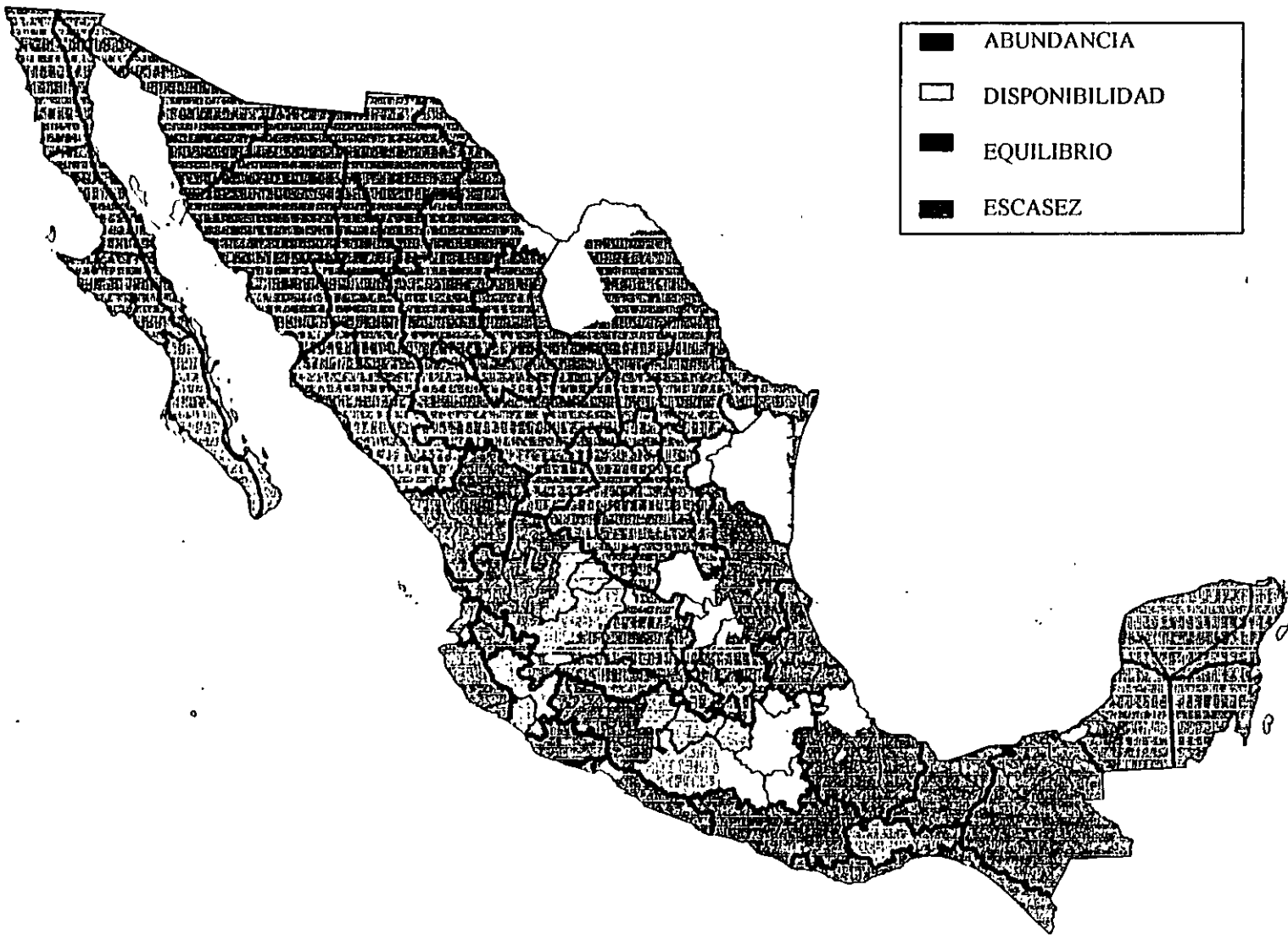
La excesiva concentración de cloruro eleva la tasa de corrosión de los metales del sistema de distribución, en función de la alcalinidad del agua y puede hacer que aumenten las concentraciones de metales en ésta.

No se propone un valor guía basado en sistemas sanitarios para el cloruro presente en agua potable. No obstante, en concentraciones superiores a 250 mg/L pueden alterar el sabor del agua.

- **Demanda biológica de oxígeno (DBO).** La demanda biológica de oxígeno es una medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua a 20°C y en 5 días. Sólo evalúa la demanda ejercida por la fracción carbonada, la de los sulfuros y del ión ferroso y excluye la fracción nitrogenada. La DBO no mide un compuesto en especial sino todos los biodegradables por vía aerobia y se expresa en mgO<sub>2</sub>/L. Un agua de calidad potable tiene una DBO promedio mensual del orden de 0.75 a 1.5 mgO<sub>2</sub>/L, el agua residual doméstica oscila entre 200 a 300 mgO<sub>2</sub>/L y algunos efluentes industriales de 1 a 2 g/L (rastros, ingenios, etc.).

El parámetro de la DBO es importante para el tratamiento de agua residual, los resultados DBO se utilizan para determinar:

- 1) la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente,
- 2) el tamaño de las instalaciones de tratamiento de agua residual y,
- 3) medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.



**MAPA 1 BALANCE HIDRAULICO POR REGION HIDROLOGICA**

- **Demanda química de oxígeno (DQO).** Es una medida de la concentración de sustancias que en un agua pueden ser atacadas por un oxidante fuerte ( $K_2Cr_2O_4$ ) a altas temperaturas ( $\approx 700^\circ C$ ). La DQO no siempre guarda una relación con la DBO, aunque en general es mayor.

- **Dureza.** La dureza del agua es causada por calcio y magnesio disueltos en ella. Generalmente, se expresa por la cantidad equivalente de carbonato cálcico.

La dureza es función del pH y la alcalinidad. Una dureza superior a 200 mg/L puede dar lugar a incrustaciones, en particular en sistemas de calefacción. Las aguas blandas con una dureza inferior a unos 100 mg/L, tienen una baja capacidad de amortiguación y pueden resultar más corrosivas para las tuberías.

No se propone para la dureza un valor guía basado en criterios sanitarios. No obstante, el grado de dureza del agua puede influir en la aceptación de ésta por el consumidor, debido a sus efectos sobre el sabor y la aparición de incrustaciones.

- **Fenoles.** Los fenoles causan problemas de sabor en el agua, especialmente cuando ésta es clorada. Se producen principalmente por operaciones industriales y aparecen en el agua residual proveniente de ellas. En consecuencia, la prueba de fenoles se emplea para definir si un efluente tiene vertidos industriales. Los fenoles pueden ser biológicamente oxidados en concentraciones del orden de 500 mg/L.

- **Fluoruro.** El flúor representa aproximadamente 0.3 g/kg de la corteza terrestre. Sus compuestos inorgánicos se utilizan en la reducción de aluminio y la fabricación y utilización de fertilizantes fosfatados, que contienen hasta un 4% de flúor.

La exposición al fluoruro presente en el agua para consumo humano depende considerablemente de circunstancias naturales. En el agua no tratada, las concentraciones son, por lo común, inferiores a 1.5 mg/L, pero en las zonas ricas en minerales que contienen flúor, las aguas subterráneas pueden contener unos 10 mg/L. Este compuesto se agrega también en ocasiones al agua potable para prevenir la caries dental.

Tras su ingestión en el agua, los fluoruros solubles se absorben fácilmente a través del tracto intestinal. En 1987, el Centro de Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) clasificó los fluoruros inorgánicos en el grupo 3. En 1984 se indicó como valor guía 1.5 mg/L. Las concentraciones superiores a ese valor llevan consigo un riesgo creciente de fluorosis dental y concentraciones muchos mayores provocan fluorosis esquelética. El valor es superior al recomendado para fluoración artificial del abastecimiento de agua.

- **Grasas y aceites.** La grasa animal y los aceites son compuestos (ésteres) de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos.

Son químicamente muy semejantes ya que se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno, en diversas proporciones. Las grasas son uno de los compuestos orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por la acción de las bacterias. Sin embargo, los ácidos minerales y el

% EXTRACCION

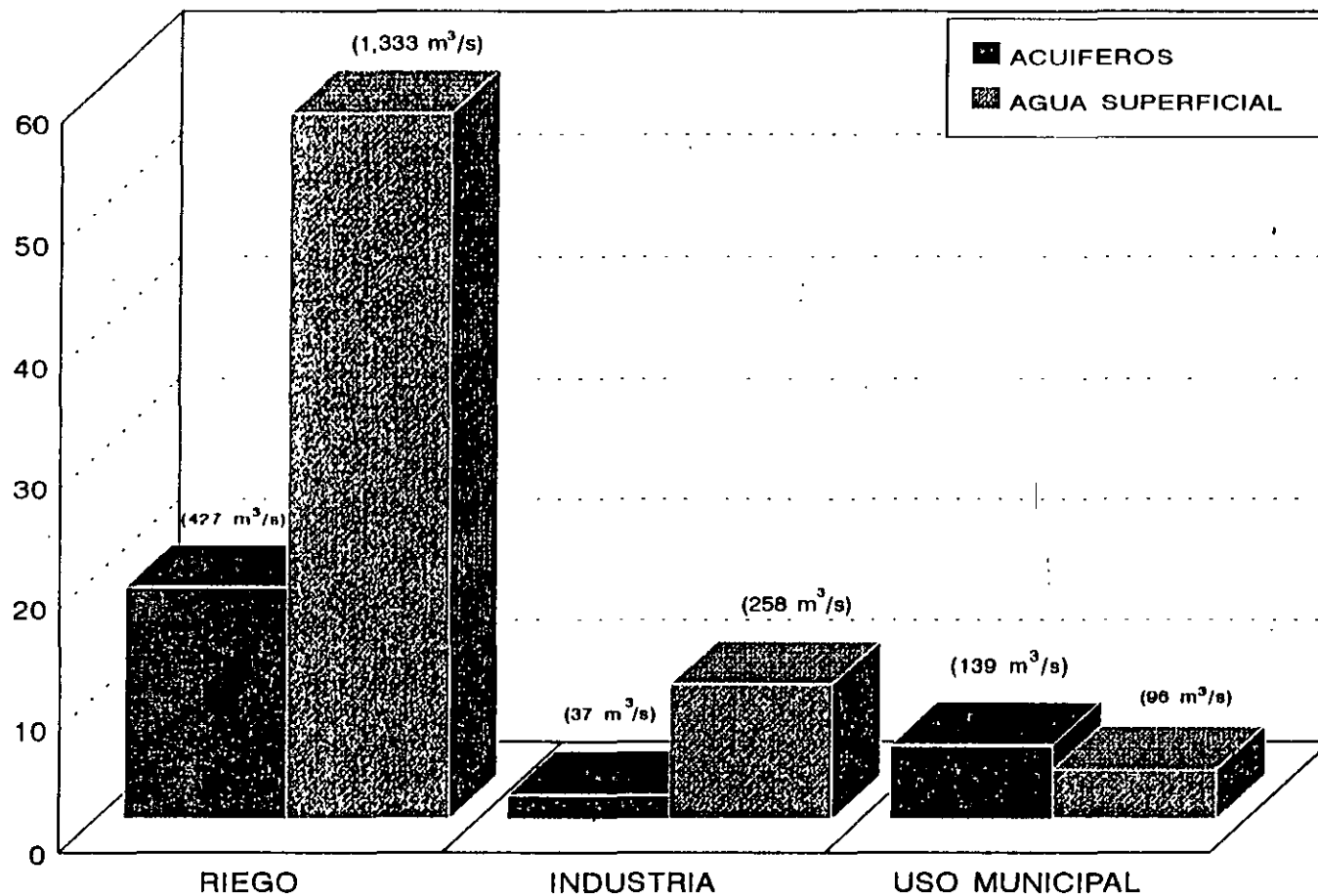


FIG 1 Empleo nacional del agua por los sectores agrícola, industrial y municipal y explotación de los acuíferos

hidróxido de sodio las atacan, dando como resultado la formación de glicerina y ácido graso o sus sales alcalinas.

- **Nitrato y nitrito.** Los nitratos y nitritos son iones presentes en la naturaleza que forman parte del ciclo del nitrógeno. En las aguas superficiales y subterráneas, las concentraciones de nitratos naturales ascienden generalmente a unos pocos miligramos por litro. En muchas aguas subterráneas, se ha observado en numerosas ocasiones, debido a la intensificación de las prácticas agrícolas, un aumento de las concentraciones de nitratos, que pueden llegar a varios centenares de miligramos por litro. En algunos países hasta el 10% de la población puede estar expuesto a concentraciones de nitratos superiores a 50 mg/L en el agua para consumo humano.

Por lo común, cuando las concentraciones en el agua potable son inferiores a 10 mg/L, la principal fuente de la ingesta total de nitratos serán las verduras. Cuando las concentraciones son superiores a 50 mg/L, el agua será la fuente principal.

El valor guía de nitrógeno como nitrato es de 10 mg/L. No obstante, el valor no debe expresarse sobre esta base sino sobre la del propio nitrato, que es la entidad química que puede perjudicar la salud, por lo que se establece un valor guía para el nitrato de 50 mg/L.

Dado que recientemente se han obtenido datos que indican la presencia de nitritos en algunos sistemas de abastecimiento de agua, se llegó a la conclusión de que debía proponerse un valor guía para el nitrito.

- **Oxígeno disuelto.** La concentración de oxígeno disuelto (OD) es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua. Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables, de la capacidad para mantener vivos peces u otros organismos aerobios y de la capacidad autodepuradora de un cuerpo receptor.

- **pH.** No se propone un valor guía basado en sistemas sanitarios para éste parámetro, aunque valores superiores a 11 tienen relación con la irritación ocular y agravación de trastornos cutáneos. Aunque el pH no tiene, por lo común efectos directos en los consumidores, es uno de los parámetros operacionales más importantes de la calidad del agua.

- **Sulfato.** Los sulfatos están presentes en forma natural en diversos minerales y se utilizan comercialmente sobre todo en la industria química. Se descarga en el agua a través de los desechos industriales y de los depósitos atmosféricos; sin embargo, es común concentraciones mayores en las aguas subterráneas.

El sulfato es uno de los aniones menos tóxicos; sin embargo, en grandes concentraciones, se ha observado catarsis, deshidratación e irritación gastrointestinal. No se propone un valor guía basado en criterios sanitarios para el sulfato.

La presencia de sulfato en el agua potable puede causar también un sabor perceptible y contribuir a la corrosión de los sistemas de distribución.



- **Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)**. Las sales alcalinas de las grasas son conocidas como jabones y, como en el caso de las grasas, son estables. Los jabones comunes se hacen por saponificación de grasas con hidróxido sódico. Son solubles en agua, pero en presencia de los constituyentes de la dureza, las sales sódicas se transforman en sales cálcicas y magnésicas de ácidos grasos, también conocidas como jabones minerales, que son insolubles y precipitan.

Los principales problemas que provocan estos compuestos son la producción de espuma y la impartición de sabor a concentraciones muy bajas. Por ello, el estándar de 0.5 mg/L representa un factor de seguridad de 15,000 veces en relación con su toxicidad.

- **Sustancias extractables con cloroformo**. Los compuestos extractables con cloroformo corresponden al contenido de materia orgánica en el agua. Esta prueba se emplea como un primer cribado para separar insecticidas clorados, nitrobenzenos y éteres aromáticos. Cuando se tienen concentraciones superiores a 0.2 mg/L, el olor y el sabor del agua son de mala calidad. Es una prueba poco usada que ha sido sobrepasada por métodos más modernos y precisos.

### 3.6 Metales

Son un grupo de elementos situados en los grupos I, II III y parte del IV de la Tabla periódica. En la determinación de metales es frecuente emplear el término disueltos, cuando el análisis se efectúa sobre el filtrado a  $0.45 \mu$  y sin acidificar, en caso contrario se habla de metales suspendidos. Por metales totales se entiende la detección en una muestra no filtrada y sujeta a una digestión fuerte. Por último, los metales extractables en ácidos se refiere a la determinación efectuada en una muestra no filtrada y tratada con un ácido mineral caliente. Los metales principales son los siguientes:

- **Aluminio**. El aluminio es un elemento abundante y difundido, que representa alrededor del 8% de la corteza terrestre. En el tratamiento del agua utilizada para el abastecimiento público se usan ampliamente compuestos de aluminio, y la presencia de éste en el agua para consumo humano se debe con frecuencia a deficiencias del control y el funcionamiento del proceso. La exposición de los seres humanos puede producirse por diversas vías, y probablemente corresponde al agua potable menos del 5% de la ingesta total.

El metabolismo del aluminio en los seres humanos no es bien conocido pero, al parecer, el aluminio inorgánico se absorbe mal y la mayor parte del absorbido se, excreta rápidamente en la orina.

En algunos estudios, se ha observado una relación entre la presencia de aluminio en el agua para consumo humano y la aparición de lesiones cerebrales características de la enfermedad de Alzheimer. No se recomienda un valor guía basado en los efectos sanitarios. No obstante, una concentración de aluminio de 0.2 mg/L permite llegar a una solución de transacción entre la necesidad práctica de utilizar sales de aluminio para el tratamiento del agua y la conveniencia de evitar la coloración del agua distribuida.

- **Arsénico**. El arsénico está ampliamente distribuido por toda la corteza terrestre y se utiliza comercialmente, sobre todo en agentes aleadores. El presente en el agua procede de la disolución de minerales y minas, de efluentes industriales y de la atmósfera; en algunas zonas, las concentraciones que existen en las aguas subterráneas son elevadas, resultado de la erosión. Se estima que la ingesta diaria media de arsénico inorgánico en el agua es similar a la procedente de los alimentos.

Está demostrado que el arsénico inorgánico es carcinógeno para los seres humanos, y el CIIC lo ha clasificado en el grupo 1. En poblaciones que consumen agua con altas concentraciones de arsénico, se ha observado una incidencia relativamente elevada de cáncer de la piel y posiblemente de otros tipos, que aumenta con la dosis y la edad.

A fin de reducir la concentración de este contaminante carcinógeno, se ha establecido un valor guía provisional para el arsénico en el agua potable de 0.01  $\mu\text{g/L}$ .

- **Bario**. El bario está presente en varios compuestos que forman parte de la corteza terrestre y se utiliza en aplicaciones industriales muy diversas; el que se encuentra en el agua procede principalmente de fuentes naturales. En general, la principal fuente de exposición al bario son los alimentos; no obstante, en la zonas donde el agua contiene concentraciones elevadas de este elemento, una parte importante de la ingesta total puede proceder del agua para consumo humano.

El valor guía para el bario en agua potable es de 0.7 mg/L.

- **Boro**. El boro se utiliza principalmente en materiales estructurales. Los compuestos de boro se usan en algunos detergentes y procesos industriales y llegan al agua en los efluentes industriales y domésticos. Las concentraciones de boro que suelen hallarse en el agua para consumo humano son inferiores a 1 mg/L, pero se han observado niveles superiores, debido a la presencia de boro natural. Se estima que la ingesta diaria total se sitúa entre 1 y 5 mg/L. Cuando se administra en forma de borato o ácido bórico, el boro se absorbe rápida y casi completamente a través del tracto gastrointestinal.

Si se asigna el 10% de la Ingesta Diaria Total (IDT) al agua potable, se obtiene un valor guía de 0.3 mg/L. No obstante, debe señalarse que la ingesta de boro procedente de los alimentos no es bien conocida y que al parecer, el tratamiento del agua para consumo humano no elimina adecuadamente este elemento.

- **Hierro**. El hierro es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre. Se encuentra en las corrientes naturales, en concentraciones que varían de 0.5 a 50 mg/L. También puede estar presente en el agua para consumo humano debido a la utilización de coagulantes de hierro o a la corrosión de las tuberías de acero y hierro fundido durante el proceso de distribución.

El hierro es un elemento indispensable de la nutrición humana. Sin embargo, la posible acumulación de un volumen excesivo de hierro en el organismo, marca una ingesta diaria

tolerable máxima provisional (IDTMP) de 0.8 mg/kg de peso corporal, que se aplica al hierro de todas las fuentes con excepción de los óxidos de hierro utilizados como colorantes y los suplementos de hierro administrados durante el embarazo y la lactancia o por razones clínicas concretas. La asignación del 10% de esta IDTMP al agua potable proporciona un valor de unos 2 mg/L, que no representa un riesgo para la salud. Por lo general concentraciones inferiores afectan ya al sabor y la apariencia del agua.

No se propone un valor guía basado en criterios sanitarios para el hierro presentes en el agua potable.

- **Manganeso.** El manganeso es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre y, por lo general, se presenta junto con el hierro. Las concentraciones de manganeso disuelto en las aguas subterráneas y superficiales pobres en oxígeno pueden alcanzar varios miligramos por litro. En presencia de oxígeno, el manganeso forma óxidos insolubles que pueden provocar la aparición de depósitos no deseables y causar problemas de color en los sistemas de distribución. La ingesta diaria de manganeso procedente de los alimentos es de 2 a 9 mg para los adultos.

El manganeso es un oligo elemento indispensable, requiriéndose diariamente de 30 a 50  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal. Su tasa de absorción puede variar considerablemente según la ingesta efectiva, la forma química y la presencia de otros metales, como el hierro y el cobre, en el régimen de alimentación. En los lactantes y los animales jóvenes se han detectado tasa de absorción muy altas.

No hay datos convincentes que indiquen la aparición de efectos tóxicos en los seres humanos debido al consumo de manganeso en el agua para consumo humano, pero sólo se dispone de estudios limitados.

La ingesta del manganeso puede llegar a 20 mg diarios sin efectos perjudiciales aparentes. Con una ingesta de 12 mg diarios, un adulto que pese 60 kg recibirá 0.2 mg diarios /kg de peso corporal. Si se asigna el 20% de la ingesta al agua potable y se aplica un factor de incertidumbre de 3 para tener en cuenta el posible aumento de biodisponibilidad del manganeso procedente del agua, se obtiene un valor de 0.4 mg/L. -

- **Molibdeno.** La concentración de molibdeno en el agua para consumo humano es generalmente inferior a 0.01mg/L. No obstante en las zonas próximas a minas, se ha notificado la presencia de concentraciones de hasta 200  $\mu\text{g}/\text{L}$ . La ingesta alimentaria de esta sustancia es aproximadamente de 0.1 mg diarios por persona. Se considera que el molibdeno es un elemento indispensable, del que los adultos necesitan, según las estimaciones, de 0.1 a 0.3 mg diarios.

No se dispone de datos sobre la carcinogenicidad del molibdeno por vía oral. Como el molibdeno es un elemento indispensable, se considera un factor de 3 lo que proporciona un valor guía de 0.07 mg/L.-

- **Níquel.** La concentración de este metal en el agua para consumo humano es generalmente inferior a 0.02 mg/L. La contribución del níquel liberado por grifos y accesorios puede ser hasta de 1 mg/L. En casos especiales de liberación de depósitos naturales o industriales del suelo, la concentración en el agua para consumo humano puede ser incluso mayor. La ingesta alimentaria diaria media es normalmente de 0.1 a 0.3 mg de níquel, pero puede alcanzar 0.9 mg si se consumen determinados artículos alimenticios.

Si se asigna al agua potable el 10% de la IDT, se obtiene un valor guía basado en criterios sanitarios de 0.02 mg/L que debe proporcionar protección suficiente para las personas sensibles al níquel.

- **Sodio.** Prácticamente todos los alimentos (que son la principal fuente de exposición cotidiana) y el agua para consumo humano contienen sales de sodio (por ejemplo, cloruro sódico). Aunque las concentraciones típicas de sodio en el agua consumida son inferiores a 20 mg/L, en algunos países pueden ser mucho mayores. Las concentraciones de sales de sodio en el aire, son por lo común, bajas en comparación con las que se encuentran en los alimentos o en el agua. Debe señalarse que algunos ablandadores del agua pueden aumentar apreciablemente el contenido de sodio en ésta.

No se ha podido llegar a una conclusión firme sobre la posible relación entre el contenido de sodio en el agua potable y la hipertensión. Por lo tanto, no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. Sin embargo, las concentraciones superiores a 200 mg/L pueden dar lugar a un sabor inaceptable.

### **3.7 Componentes orgánicos**

#### **3.7.1 Alcanos clorados**

- **Tetracloruro de carbono.** El tetracloruro de carbono se utiliza principalmente para producir refrigerantes de clorofluorocarbono y se libera en el aire y el agua durante la fabricación y el uso de éstos. Aunque los datos de que se dispone sobre su concentración en alimentos son limitados, se prevé que la ingesta de tetracloruro de carbono procedente del aire resultará mucho mayor que la absorbida con los alimentos o el agua para consumo humano. Las concentraciones de esta última son generalmente inferiores a 5 µg/L.

El tetracloruro de carbono ha sido clasificado por el CIIC en el grupo 2B. Puede metabolizarse en sistemas microsómicos, produciendo un radical triclorometilo que se une a macromoléculas, iniciando la peroxidación de los lípidos y destruyendo las membranas celulares. Se ha demostrado que causa tumores hepáticos y de otro tipo en ratas, ratones y hamsters tras la exposición por vía oral o subcutánea o por inhalación.

- **Diclorometano.** El diclorometano o cloruro de metileno se utiliza ampliamente como disolvente para muchos propósitos, en partículas para descafeinar el café y para decapar la pintura. La exposición resultante de su presencia en el agua para consumo humano es insignificante comparada con la de otras fuentes.

La toxicidad aguda del diclorometano es reducida. En un estudio de absorción por inhalación de los ratones se demostró en forma concluyente la carcinogenicidad, mientras que otro realizado con el agua sólo proporcionó elementos de juicio favorables a la existencia de ésta. El CIIC ha clasificado el diclorometano en el grupo 2B; no obstante, el conjunto de los datos parece indicar que este compuesto no es un carcinógeno genotóxico y que no se forman *in vivo* metabolitos genotóxicos en cantidades relevantes.

- **1,1-Dicloroetano.** El 1,1-dicloroetano se utiliza como intermediario químico y disolvente. Se dispone de datos limitados que indican que puede estar presente en el agua para consumo humano en concentraciones de hasta 10 µg/L. No obstante, dada la generalización del uso de este compuesto y su consiguiente aparición en los desechos, su presencia en las aguas subterráneas puede aumentar.

Los mamíferos metabolizan rápidamente el 1,1-dicloroetano, produciendo ácido acético y diversos compuestos clorados. La toxicidad aguda es relativamente reducida y sólo se dispone de datos sobre la toxicidad en estudios a corto y a largo plazo.

Dada la limitación de los datos existentes sobre toxicidad y carcinogenicidad, se llegó a la conclusión de que no se debía proponer un valor guía.

- **1,2-Dicloroetano.** El 1,2-dicloroetano se utiliza principalmente como intermediario en la producción de cloruro de vinilo y otros productos químicos y en menor medida, como disolvente. Se han hallado en el agua para consumo humano en concentraciones de hasta unos pocos microgramos por litro. Está también presente en el aire de las zonas urbanas.

El CIIC ha clasificado el 1,2-dicloroetano en el grupo 2B. Se ha demostrado que esta sustancia provoca en animales de laboratorio varios tipos de tumores, en particular del hemangiosarcoma, que suele ser relativamente raro; los datos disponibles en su conjunto indican una posible genotoxicidad. No existen estudios adecuados a largo plazo que puedan servir de base a una IDT.

- **1,1,1-Tricloroetano.** El 1,1,1-tricloroetano solo se ha descubierto en una porción reducida de las aguas superficiales y subterráneas, por lo general en concentraciones inferiores a 20 µg/L. En unos pocos casos, se han observado concentraciones mucho mayores. La exposición a este compuesto parece ir en aumento.

El 1,1,1-tricloroetano se absorbe con rapidez a través de los pulmones y el tracto gastrointestinal, pero solo se metaboliza en pequeñas cantidades -aproximadamente el 6% en los seres humanos y el 3% en los animales de experimentación. La exposición a altas

concentraciones puede producir esteatosis hepática (hígado graso) tanto en seres humanos como en animales de laboratorio.

Se recomienda realizar estudios adecuados sobre la toxicidad por vía oral, a fin de obtener datos aceptables para la determinación de un valor guía.

### 3.7.2 Plaguicidas

Se reconoce que los productos de la degradación de plaguicidas pueden representar un problema en el agua para consumo humano. No se tienen guías de toxicidad de esos productos, ya que los datos disponibles sobre su identidad, su presencia y su actividad biológica son insuficientes.

- **Alacloro**. El alacloro es un hierbicida que se utiliza para controlar las hierbas anuales y numerosas malezas de hoja ancha en los cultivos de maíz y en varios otros, antes y después de su aparición. Desaparece del suelo principalmente por volatilización, fotodegradación y biodegradación y en muchos de los productos se han identificado en el suelo. Se ha detectado la presencia de este compuesto en aguas subterráneas y superficiales. Se ha detectado también en el agua para consumo humano, concentraciones inferiores a 2  $\mu\text{g/L}$ .

Los datos experimentales disponibles no permiten llegar a una conclusión sobre la genotoxicidad del alacloro, aunque se ha demostrado que unos de sus metabolitos es mutagénico.

El valor guía para el agua potable correspondiente a un riesgo adicional de cáncer durante toda la vida de  $10^{-5}$  es de 20  $\mu\text{g/L}$ .

- **Clordano**. El clordano es un insecticida de amplio espectro que se utiliza desde 1947. En los últimos tiempos su uso está limitado cada vez más en muchos países, y ahora se emplea sobre todo para destruir termitas mediante inyección superficial en el suelo.

El clordano es una mezcla de estereoisómeros, con predominio de las formas *cis* y *trans*. Es muy resistente a la degradación, muy inmóvil en el suelo y pasa muy fácilmente a las aguas subterráneas, donde sólo se ha encontrado en raras ocasiones. Desaparece fácilmente por liberación en la atmósfera.

El CIIC reevaluó el clordano en 1991, llegando a la conclusión de que su carcinogenicidad no está suficientemente demostrada en el caso de los seres humanos pero sí en los animales, por lo que lo clasificó en el grupo 2B.

Aunque las concentraciones de clordano en los alimentos han ido disminuyendo, la sustancia es muy persistente y muestra gran potencial de bioacumulación.

- **DDT**. La estructura del DDT permite varias formas isoméricas distintas, y los productos comerciales están constituidos principalmente por *p,p'*-DDT. En algunos países, se ha restringido e incluso prohibido la utilización de este compuesto, pero en otros es utilizado tanto en la agricultura como en la lucha antivectorial. El DDT es un insecticida persistente, estable en la mayor parte de las condiciones ambientales; la sustancia y algunos de sus metabolitos son resistentes a la descomposición completa por los microorganismos presentes en el suelo.

En pequeñas dosis, el DDT y sus metabolitos son absorbidos casi por entero por los seres humanos, tras su ingestión o inhalación, y se acumulan en los tejidos adiposos y la leche.

El CIIC ha llegado a la conclusión de que la carcinogenicidad del DDT no está suficientemente demostrada en el caso de los seres humanos pero sí en los animales de experimentación (grupo 2B), ya que se ha observado la aparición de tumores hepáticos en ratas y ratones expuestos a él.

Como los lactantes y los niños pueden verse expuestos en cantidades de sustancias químicas mayores en relación con su peso corporal y dada la inquietud ante la bioacumulación del DDT, el valor guía se calculó a partir de la hipótesis de que un niño de 10 kg bebe un litro de agua diario. Además como la exposición al DDT por vías distintas al agua es considerable, se asignó al agua potable un valor guía de 2  $\mu\text{g/L}$  para el DDT y sus metabolitos presentes en el agua para consumo humano.

Este valor guía sobrepasa la solubilidad del DDT en el agua, que es de 1  $\mu\text{g/L}$ . No obstante, las pequeñas cantidades de partículas que contiene el agua pueden absorber una cierta cantidad de este producto, por lo que el valor guía de 0.02  $\mu\text{g/L}$  podría alcanzarse en determinadas circunstancias.

Conviene mencionar que, como en el caso de todos los plaguicidas, el valor guía recomendado para el DDT presente en el agua potable se ha establecido para la proteger la salud de los seres humanos y puede no ser suficiente para la protección del medio ambiente, la fauna y la flora acuáticas.

- **Acido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D)**. El 2,4-D es un herbicida clorofenóxido utilizado para el control de las malezas de hoja ancha. Su vida media antes de la biodegradación varía de unos días a 6 semanas en el suelo, mientras que en agua, oscila entre una y varias semanas. Datos limitados obtenidos durante actividades de vigilancia indican que las concentraciones en el agua para consumo humano no sobrepasan, por lo general, unos pocos microgramos por litro. El 2,4-D rara vez se encuentra en los alimentos.

El CIIC ha clasificado los hierbicidas clorofenóxidos en el grupo 2B. Aunque en uno de los estudios realizados con seres humanos se observó una tendencia marginalmente significativa al aumento del riesgo adicional de linfomas distintos del de Hodgkin con la mayor duración a la exposición a hierbicidas clorofenóxidos, no es posible evaluar el potencial carcinógeno del 2,4-D *per se* sobre la base de los datos epidemiológicos disponibles.

- **Lindano.** El lindano ( $\gamma$ -hexaclorociclohexano,  $\gamma$ -HCH) es un insecticida utilizado desde hace mucho tiempo. Aparte de sus usos agrícolas en plantas y animales, se emplea también en salud pública y como preservante de la madera.

El lindano es un compuesto persistente con una afinidad por el agua relativamente baja y una reducida movilidad en el suelo; se volatiliza lentamente en la atmósfera. Es un contaminante ambiental ubicuo, que se ha detectado también en el agua. La exposición de los seres humanos, que tiene lugar a través de los alimentos, está disminuyendo. El valor guía es, pues, de 2  $\mu\text{g/L}$ .

### 3.8 Determinación de organismos patógenos

El análisis de organismos patógenos en el agua se realiza de dos formas: utilizando un organismo indicador, o bien, detectando algún microorganismo específico. El primer caso es el más común como parámetro de control. Un indicador debe estar presente cuando estén presentes patógenos y ausente siempre que estén ausentes los patógenos. El indicador tradicional son las bacterias coliformes y en particular las fecales. Hay bacterias coliformes de origen fecal (humano) y las no fecales (tierra), sólo las fecales son indicadores para agua residual, y todas las bacterias coliformes para agua potable (incluye fecales).

Los coliformes fecales son un componente normal de la flora y fauna del intestino humano, donde se encuentran en grandes cantidades, ya que no son patógenos. Son microorganismos indicadores porque su presencia revela la contaminación del agua con heces fecales y la posible existencia de patógenos. Se escogieron debido a que los patógenos son menos abundantes en el agua residual, no siempre encuentran en el agua su habitat ideal y, su manipulación es menos peligrosa para el analista. Así, su presencia sugiere la existencia de otras bacterias, virus o protozoarios perniciosos para el ser humano.

## 4. NORMATIVIDAD RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA

El término calidad del agua es un concepto abstracto que sólo adquiere sentido cuando se listan parámetros y se les asocia un valor para definirla. La amplia combinación de compuestos y valores que se pueden considerar hace que en la práctica se formen conjuntos en función del uso (Criterios Ecológicos y Norma de agua potable), origen (NOM de descargas) o destino (CPDs).

En México, la normatividad que se relaciona con la calidad del agua se muestra en la TABLA 2 a la cual se deben añadir los tratados y convenciones internacionales que básicamente se limitan a la contaminación de mar con hidrocarburos y los acuerdos derivados del Tratado de Libre Comercio que, en pocas palabras, se resumen que cada país debe cumplir con su propia normatividad. Lo anterior, para México, tiene implicaciones muy serias.



**TABLA 2 NORMATIVIDAD MEXICANA PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA**

DEPENDENCIA ENCARGADA DE LA PUBLICACION	INSTRUMENTO REGULATORIO	FECHA DE EXPEDICION
SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS	LEY DE CONTRIBUCION DE MEJORAS POR OBRAS PUBLICAS FEDERALES DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA	ENERO DE 1991
	LEY DE AGUAS NACIONALES	DICIEMBRE DE 1992
	LEY FEDERAL DE DERECHOS EN MATERIA DE AGUA	FEBRERO DE 1993
SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL	LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE	ENERO DE 1988
	NORMAS OFICIALES MEXICANAS REFERENTES A LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	DICIEMBRE 13 DE 1993 ENERO 11 DE 1995
SECRETARIA DE SALUD	LEY FEDERAL DE PROTECCION AL AMBIENTE	ENERO DE 1982
	REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SALUD EN MATERIA DE CONTROL SANITARIO DE ACTIVIDADES, ESTABLECIMIENTOS, PRODUCTOS Y SERVICIOS	ENERO DE 1988

La definición de las propiedades que debe tener un agua para reconocerle una cierta calidad y por tanto destinarla a un uso se establece en:

*a) Para suministro*

- Los Criterios Ecológicos de Uso del Agua, y
- El Reglamento de la Ley General de salud en Materia de Control sanitario en su título tercero relativo a agua de consumo humano

*b) Para fines de saneamiento*

- Las Normas oficiales Mexicanas referentes a las descargas, y
- Las Condiciones particulares de descarga (CPDs)

Para mejorar la calidad del agua, estos cuatro instrumentos deben estar relacionados (Los parámetros medidos con mayor frecuencia en la Red Nacional de Monitoreo), sin embargo, la falta de visión en forma integral de la normatividad mexicana hace que -a pesar de que el agua sea una sola- es prácticamente imposible asegurar que se mejore la calidad para los usos por

medio del control de la calidad en las descargas. En efecto, es el doble empleo que damos a los cuerpos de agua como fuente de abastecimiento y transporte de contaminantes que hace que sea útil emplear parámetros comunes en la regulación de los usos y las descargas para poder ligar la evolución de la calidad.

Los instrumentos de la FIG 2 son los medios con los que cuenta México para evaluar y medir la calidad del agua así como para establecer de qué manera inciden las políticas de saneamiento en su mejora. Los parámetros establecidos son tales (o deberían ser tales) que si se cumpliesen no habría problemas de contaminación.

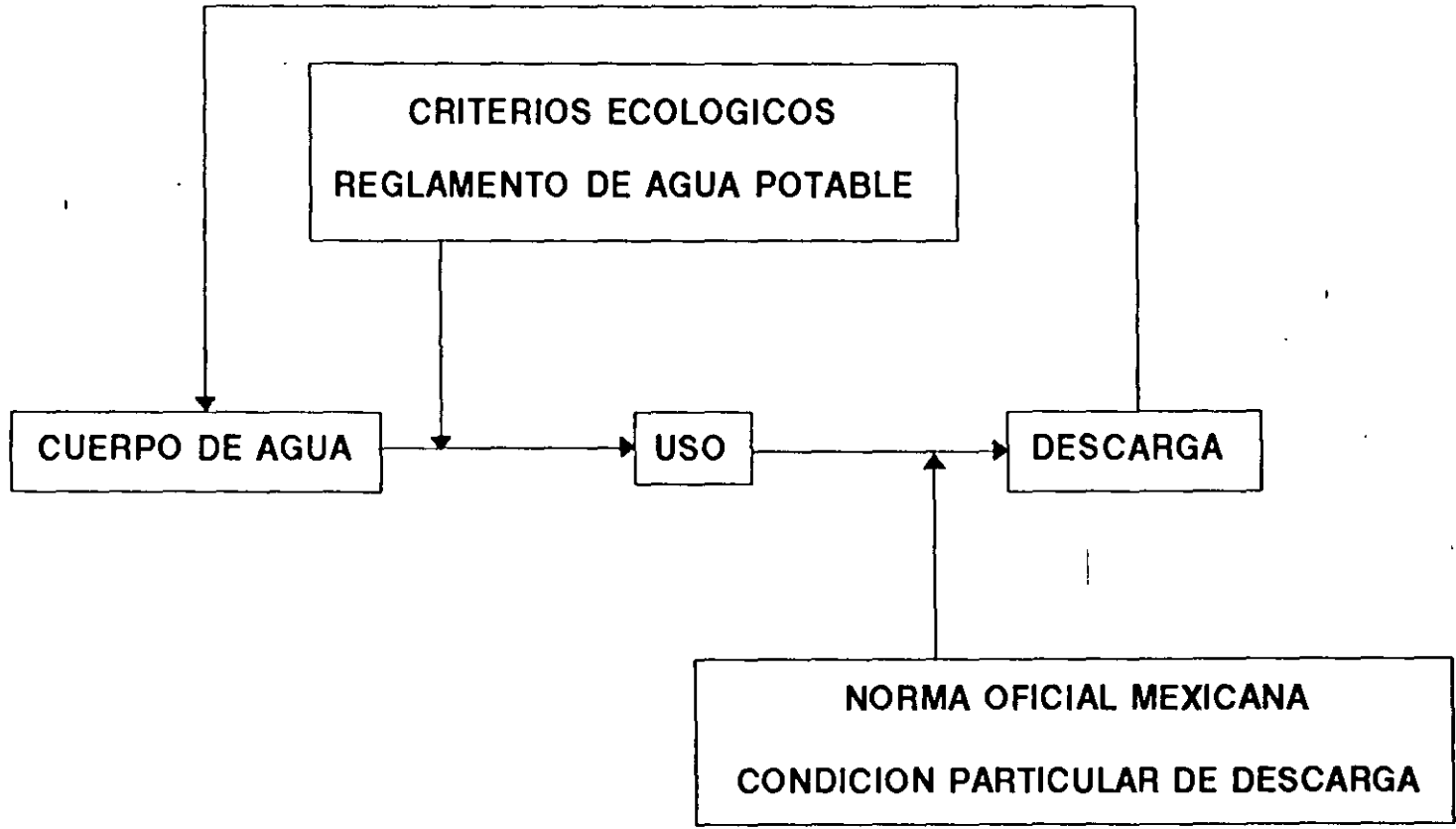
#### **4.1 Normatividad según el empleo**

##### *4.1.1 Calidad del agua en función de sus usos*

El listado que define la calidad del agua en función de sus usos está dado por los Criterios Ecológicos de Uso del Agua de 1989 que han servido como guía para el establecimiento de normas y políticas. Cabe mencionar que los criterios de Calidad del agua son similares a los que la EPA establece como metas a largo plazo (*goal*) y que se basan en conocimientos CIENTIFICOS y no tecnológicos por lo que en Estados Unidos no tienen aplicación directa. Se observa cuales son los usos que se reconocen:

1. Fuente Abastecimiento de Agua Potable.
2. Recreativo con Contacto Primario.
3. Riego Agrícola.
4. Pecuario.
5. Protección de la Vida Acuática:
  - 5.1 Agua Dulce.
  - 5.2 Agua Marina (Areas Costeras).

Una primera observación revela que: los Criterios no son norma, es decir, no son obligatorios y no tienen efecto alguno sobre otras leyes y además, no son congruentes con los diversos usos que define la Ley (TABLA 3). De hecho, no hay correspondencia en ella misma. Situación que se agrava al incluir el análisis de la normatividad regional (Ej., En el D.F. se establece un uso "hospitalario", para el cual no se tiene definida calidad alguna).



**FIG 1 Usos y descargas del agua y su normatividad**

**TABLA 3 USOS DEL AGUA EN LOS DIFERENTES INSTRUMENTOS REGULATORIOS**

Usos del agua reconocidos en la literatura	Ley Federal de Aguas (11 de enero de 1972)	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (13 de diciembre de 1989)	Ley de Aguas Nacionales (1 de diciembre de 1992)
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Consumo humano</li> <li>2. Agricultura</li> <li>3. Municipal (riego de áreas verdes, lavado de calles, fuentes de ornamento, lavado de maquinaria de servicio, etc.)</li> <li>4. Industria</li> <li>5. Recreación               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Con contacto primario</li> <li>- Con contacto secundario</li> </ul> </li> <li>6. Acuicultura</li> <li>7. Protección ecológica</li> <li>8. Abastecimiento pecuario</li> <li>9. Transporte de desechos</li> <li>10. Navegación</li> <li>11. Generación de energía eléctrica</li> <li>12. Control de avenidas</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usos Domésticos</li> <li>2. Servicios Públicos Urbanos</li> <li>3. Abrevaderos de Ganado</li> <li>4. Riego de Terrenos Ejidales y Comunales y de Propiedad Privada</li> <li>5. Industrias:               <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 Generación de Energía Eléctrica para Servicio Público</li> <li>5.2 Otras Industrias</li> </ul> </li> <li>6. Acuicultura</li> <li>7. Generación de Energía Eléctrica para Servicio Privado</li> <li>8. Lavado y Entarquinamiento de Terrenos</li> <li>9. Otros</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fuente Abastecimiento de Agua Potable</li> <li>2. Recreativo con Contacto Primario</li> <li>3. Riego Agrícola</li> <li>4. Pecuario</li> <li>5. Protección de la Vida Acuática.               <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 Agua Dulce</li> <li>5.2 Agua Marina (Áreas Costeras)</li> </ul> </li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Público Urbano</li> <li>2. Agrícola</li> <li>3. Generación de Energía Eléctrica</li> <li>4. Otras Actividades Productivas</li> </ol>

Por otra parte, en cuanto al agua dan el mismo peso e importancia a parámetros realmente limitativos del uso como a los recomendables. Por ejemplo, la turbiedad y el mercurio. Además, el valor numérico de varios de los parámetros no considera la posibilidad de aplicar alguna tecnología para remediarlo. Por ejemplo, no es necesario limitar la concentración de Fe a 0.3 mg/L en agua para preparar agua potable cuando existen sistemas de potabilización que remueven concentraciones mayores a un costo accesible.

La congruencia con los parámetros y valores estipulados en la norma de agua potable no fue reusada. Por ejemplo, los criterios ecológicos para suministro de agua potable limitan el contenido de cianuro a 0.02 y la norma de agua potable a 0.05, lo que hace suponer que alguna de los dos tiene un defecto.

Además, no consideran las condiciones propias del país. En cuerpos de agua limpios de países de climas fríos el contenido de N y de P es bajo. En cambio, en México, existen cuerpos de agua no contaminados y con condiciones ecológicas sanas que tienen concentraciones mayores que las establecidas en los criterios. Algo similar ocurre con el boro.

#### 4.1.2 Calidad del agua potable

Técnicamente, la definición de la "potabilidad de un agua" es un aspecto complicado y se refiere a CERTIFICAR la ausencia del riesgo de enfermedad a largo o corto plazo en el ser humano. La OMS señala que existen más de 70,000 compuestos sintéticos, por los que es imposible y probablemente innecesario regularlos todos. La mayor parte de las legislaciones en

el Mundo consideran entre 70 y 120 compuestos. La selección de ellos se basa, en los países con capacidad económica, en la frecuencia y concentración de los contaminantes en sus cuerpos de agua. En otros países, como es el caso de México, la selección se efectúa mediante revisiones bibliográficas. Actualmente, la norma de agua potable en México esta siendo revisada. La TABLA 4 muestra la comparación de los criterios para Estados Unidos, Canadá, la Organización Mundial de la Salud, la Comunidad Económica Europea, Rusia y con la norma mexicana actualmente vigente así como la propuesta de modificación. Se observa que, si no se toma en cuenta los tóxicos sintéticos, la nuestra es la más completa y estricta. Cabría preguntarse si no es este un esfuerzo de sobrelegislación dado que en la práctica muchos de estos parámetros ni siquiera se miden para certificar la potabilidad de un agua.

TABLA 4 RESUMEN COMPARATIVO DE LOS ESTANDARES SECUNDARIOS DE EUA, CANADA, CEE y la OMS.

PARAMETRO REGULADO	MEXICO	ESTADOS UNIDOS	CANADA	O.M.S.	Comunidad Económica Europea	Rusia
Alcalinidad Total < como CaCO <sub>3</sub> >	400 0	-	-	-		
Aluminio	0.2	-	-	-	0.2	--
Arsénico	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	--
Bario	1 0	1 0	1 0	-	0.1 <sup>(1)</sup>	--
Cadmio	0 005	0.01	0.005	0 005	0.005	0 001
Cianuro < como CN- >	0.05	-	-	0.05	--	0 1
Cloro Libre en Agua Clorada	0 2	-	-	-		
Cloro Libre en Agua Sobre Clorada	1.0	-	-	-		
Cromo Hexavalente	0 05	0.05	0 05	0 05	0.005	0.1/0 5 <sup>(1)</sup>
Demanda Biológica de oxígeno	--	--	--	--	--	3.0
Dureza de Calcio < como CaCO <sub>3</sub> >	300 0	-	-	-	--	--
Fenoles o Compuestos Fenólicos	0 001	-	-	0.002	0 5	1 0
Fierro	0 3	0 3	-	1.0	0 3	0 5
Fluoruros < como F >	1 5	4.0	1 5	1.5	1.5-0 7 <sup>(1)</sup>	1.5
Magnesio	125 0	-	-	150 0		
Manganeso	0 15	0 05	-	0.5	0 5	--
Mercurio	0.001	0 002	0.001	0.001	0 001	0.0005
Nitratos < como N >	5 0	10 0	10.0	10 0	10.0	10.0
Nitritos < como N >	0 05	-	-	-	0 1	1.0
Nitrógeno Protéico	0.1	-	-	-		
Oxígeno Consumido en Medio Acido	3.0	-	-	-		

PARAMETRO REGULADO	MEXICO	ESTADOS UNIDOS	CANADA	O.M.S.	Comunidad Económica Europea	Rusia
Sulfatos < como SO <sub>4</sub> -2 >	250.0	250.0	-	400.0	25 <sup>(1)</sup>	500
Subst. Activas al Azul de Metileno	0.5	-	-	1.0	0.5	0.5
Carbón Extractable en Cloroformo	0.3	-	-	0.5		
Carbón Extractable en Alcohol	1.5	-	-	-		
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	2.0	< 1.0	10.0	0.0	0.0	--
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	0.0	-	0.0	0.0	0.0	
pH (unidades características)	6.9-8.5	6.5-8.5	-	6.5-9.2	6.5-8.5	--
Plata	-	0.05	0.05	-		
2,4 D	-	0.1	0.1	0.001		
Endrin	-	0.0002	0.0002	-		
Lindano	-	0.0004	0.004	0.0003		
Metoxicloro	-	0.1	0.1	0.003		
Pesticidas totales	-	-	0.1	-	0.5	--
Toxafeno	-	0.005	0.005	-		
2,4,5 TP silvex	-	0.01	0.01	-		
Trihalometanos	-	0.1	0.35	0.03(a)		
Particulas β y act. fotónica (mrem)	-	4.0	-	1.0(b)		
Particulas alfa (pCi/l)	-	15.0	-	0.1(b)		
Radio 226-228 (pCi/l)	-	5.0	1.0(b)	-		
Benceno	-	0.005	-	0.01		
Tetracloruro de carbono	-	0.005	-	0.003		
1,1 Dicloroetileno	-	0.007	-	0.003		
1,2 Dicloroetano	-	0.005	-	0.01		
p-Diclorobenceno	-	0.075	-	-		
1,1,1 Tricloroetano	-	0.2	-	-		
Tricloroetileno	-	0.005	-	0.03		
Cloruro de vinilo	-	0.002	-	-		

(a) Sólo cloroformo

(b) Bq/l

NOTA. Las unidades de los parámetros están en mg/l, a menos que se especifique alguna otra.

(1) Valor guía

(5) en función de la temperatura

(8) Como Cr (III) y Cr (IV)

- parámetro subjetivo
- información sobre el estado del agua..
  
- agua supuestamente potable rechazada por mal olor.
  
- agua residual
  - olor diferente si fresca o en descomposición
  - se debe al H<sub>2</sub>S formado por reducción de sulfatos y sulfitos.

TABLA 2:3. PRINCIPALES COMPUESTOS QUE CAUSAN MAL OLOR

COMPUESTO	FORMULA CONDENSADA	DESCRIPCION DEL OLOR
Aminas	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> , (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	Pescado
Amoníaco.	NH <sub>3</sub>	Amoníaco
Diaminas	NH <sub>2</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> NH <sub>2</sub>	Pescado descompuesto
Acido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	Huevos podridos
Mercaptanos	CH <sub>3</sub> SH, CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> SH	Zorrillo
Sulfuros Orgánicos	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> SSCH <sub>3</sub>	Basura podrida
Escatol	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NHCH <sub>3</sub>	Fecal

FUENTE: SAWYER, (1978).

### Características para describir un olor

- a) Carácter: Con lo que lo asocia
  - b) Detectabilidad: A que dilución con aire puro ya no es perceptible.
  - c) Apeatabilidad: Qué tan desagradable es.
  - d) Intensidad: Qué tan fuerte es.
- Evaluado por personas y no con aparatos
  - Resultados subjetivos
  - Difícil coleccionar y preservar muestras.

## Color

- Agua potable indicación rápida de la calidad.

en agua de abastecimiento originado por

fierro

manganeso

sustancias húmicas

plancton

microalgas

- Agua residual

procesos industriales (textil, pinturas, alimentos, etc).

- Método escala Pt-Co (platino-cobalto).

## Temperatura

- Influye sobre

tasas de crecimiento biológico

vida acuática

reacciones químicas

solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos.

- EN UN LÍQUIDO A MAYOR TEMPERATURA MAYOR SOLUBILIDAD DE UN SÓLIDO PERO MENOR LA DE UN GAS.



## Conceptos generales

### Elemento

- Expresión más simple de una sustancia que guarda todas las propiedades de ella.
- Existen 105
- TIENEN el mismo número atómico.

### Ión

- Atomo o conjunto de ellos cargados eléctricamente
- Se comportan como grupo con propiedades específicas
- En estado cristalino o solución.  
iones
  - + cationes
  - aniones.

### **Molécula**

- Partícula neutra
- Dos o más átomos químicamente ligados
- EJ. O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>.

## Evaluación de la contaminación

### TÉCNICAS EMPLEADAS

- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
  - American Public Health Association
  - American Society of Civil Engineers
  - American Water Works Association y Water Pollution Control Federation.
  
- Técnicas estandarizadas
- Protocolo y principio
- Precisión y sensibilidad
- Preservación de la muestra
- Principales interferencias
- Consejos prácticos referentes al tipo de agua

### Composición física

color  
olor  
temperatura  
turbiedad  
contenido de sólidos suspendidos.

# UNIDADES DE MEDIDA DE CONCENTRACIÓN EN SI

\* mol por metro cúbico ( $\text{mol/m}^3$ )

\* ingenieros ambientales

mg/l

$\mu\text{m/l}$

Concentración en porcent<sup>o</sup>

a) Peso/peso.

b) Peso/volumen.

c) Volumen/volumen.

En general, PARA

mezclas gaseosas => volumen/volumen

soluciones en agua => peso/peso

## Clasificación de los contaminantes según su naturaleza

### a) Agentes biológicos:

provocan enfermedades

entran al agua por heces fecales de humanos o animales más comunes

tifo

salmonelosis

disentería

cólera

### b) Compuestos tóxicos o peligrosos:

proviene de los desechos líquidos y sólidos

producen quemaduras en la piel y ojos

enfermedades si son ingeridos.

En este grupo se encuentran:

ácidos

drenados ácidos de minas

desechos de la agricultura

amoníaco

arsénico

cadmio

cianuro

detergentes

plomo

mercurio

óxidos de nitrógeno

derrames de petróleo

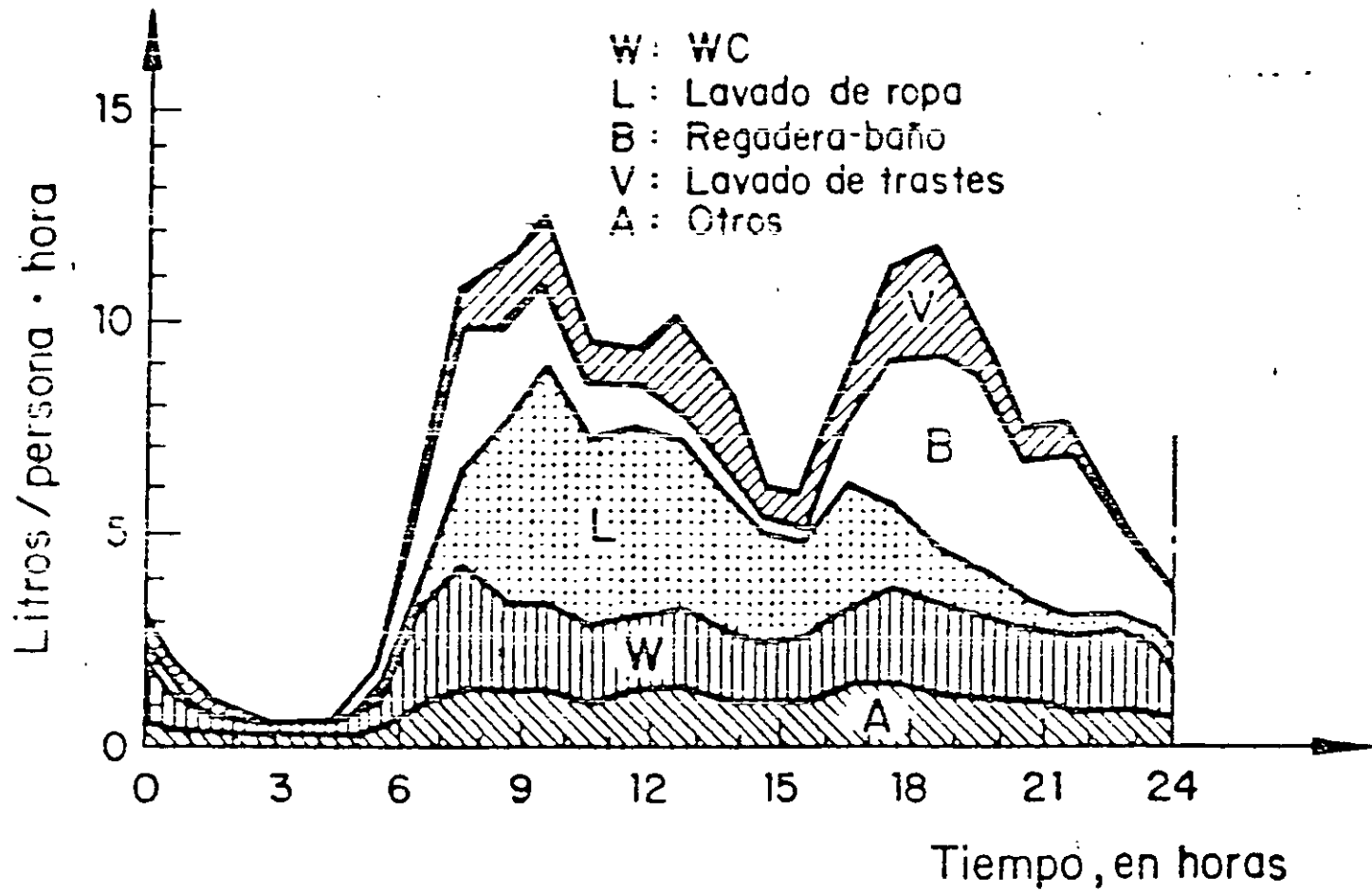
pesticidas

PVC

compuestos radiactivo desechados directamente

se forman por reacción en el agua

y una pequeña fracción se forma durante el propio tratamiento del agua (tetracloruro de carbono y cloroformo)



Evolución en un día del consumo de agua para diferentes usos en una casa habitada.

## ACUIFEROS

LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS, BASUREROS Y CEMENTERIOS  
(ORGANOCOLORADOS, BENECNICOS, ALIFATICOS, ACIDOS HUMICOS,  
TERPENOS, TANINOS, As, Se, Ra, Cd, NITRATOS, ETC)

## AGUAS SUPERFICIALES

RESIDUOS LIQUIDOS SIN TRATAR Y EFLUENTES DE PLANTA DE TRATAMIENTO  
(COMPUESTOS HUMICOS DIFICILMENTE BIODEGRADABLES,)

## PRECIPITACION

CONTAMINANTES DEL AIRE

(OXIDOS DE NITROGENO Y AZUFRE, Pb, POLVO, BACTERIAS, PAN, ETC)

- \* LA MAYORIA SOLUBLES
- \* TODOS PROHIBIDOS POR LAS NORMAS DE POTABILIZACION
- \* NO SON PARAMETROS ESTANDARES DE CONTROL
- \* NO SE ELIMINAN MEDIANTE METODOS TRADICIONALES

Form-11

## Fuentes

- ◆ desechos urbanos e industriales
  - ◆ descargas no controladas
  - ◆ campos agrícolas
  - ◆ minas
  - ◆ efluentes de plantas de tratamiento
  - ◆ drenajes rotos
  - ◆ lavado de la atmósfera
- |       |
|-------|
| ríos  |
| mares |
| lagos |

Problema  
tica  
del  
Agua  
≠  
a la del  
aire

CALIDAD

DISPONIBILIDAD



FUENTE DE  
ABASTECIMIENTO

=

AGUA DE MUY ELEVADA CALIDAD

~ 1800

DIRECTO



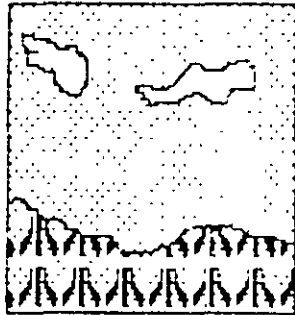
DESINFECCION



FILTRACION



COAGULACION



TRATAMIENTO CONVENCIONAL

OBJETIVO : REMOVER PARTICULAS EN SUSPENSION

CRIBADO + COAGULACION + FILTRACION + DESINFECCION

FUENTE DE  
ABASTECIMIENTO

=

AGUA DISPONIBLE

TRATAMIENTO AVANZADO

OBJETIVO : REMOCION DE MATERIA SOLUBLE

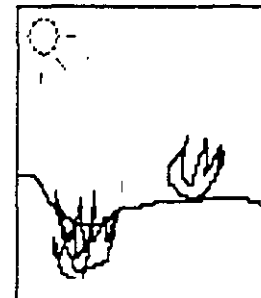


Fig-9

FUENTES DE  
ABASTECIMIENTO

CONVENCIONALES

SUPERFICIAL

MENOS DURAS

OD ↑

H<sub>2</sub>S ↓

FACILMENTE CONTAMINABLES

↑ ACTIVIDAD BIOLÓGICA

COLOR Y TURBIEDAD ↑↓

FREATICAS

UNIFORME

NO ↓

H<sub>2</sub>S ↑

NO CONVENCIONALES

AGUA DE MAR

\$\$\$

AGUAS NEGRAS

\$\$

????

*net  
grab*

*map*

Definición  
de  
Agua contaminada

=

f [ uso,

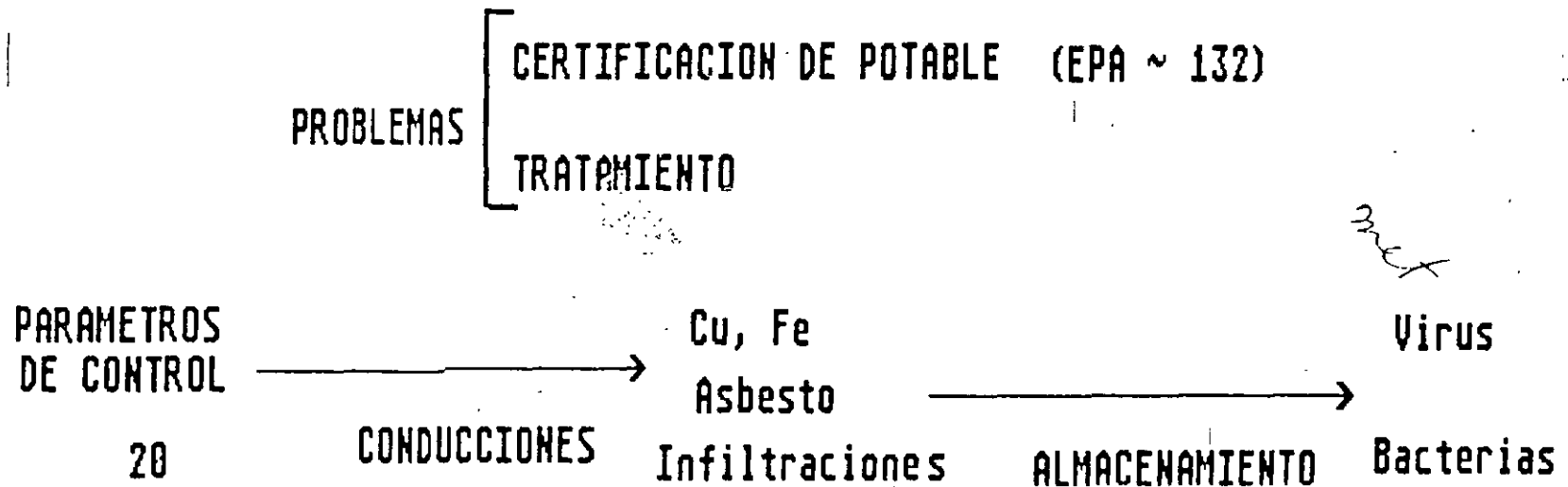
exigencias higiénicas,  
avance del conocimiento y  
técnicas analíticas ]

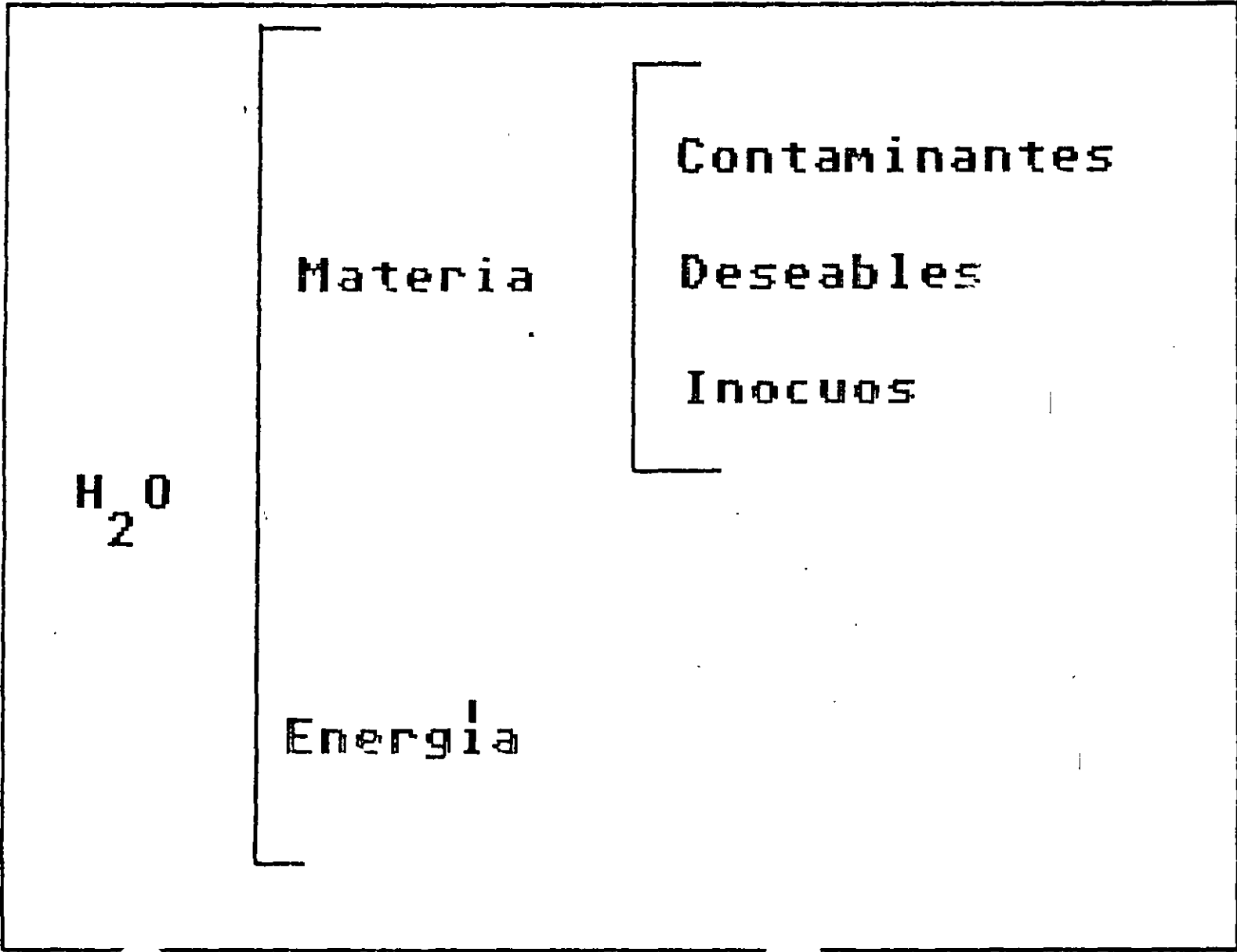
Dem - 8

# EL AGUA ES EL "SOLVENTE UNIVERSAL"

DISUELVE  
ARRASTRA  
SUSPENDE  
EMULSIONA

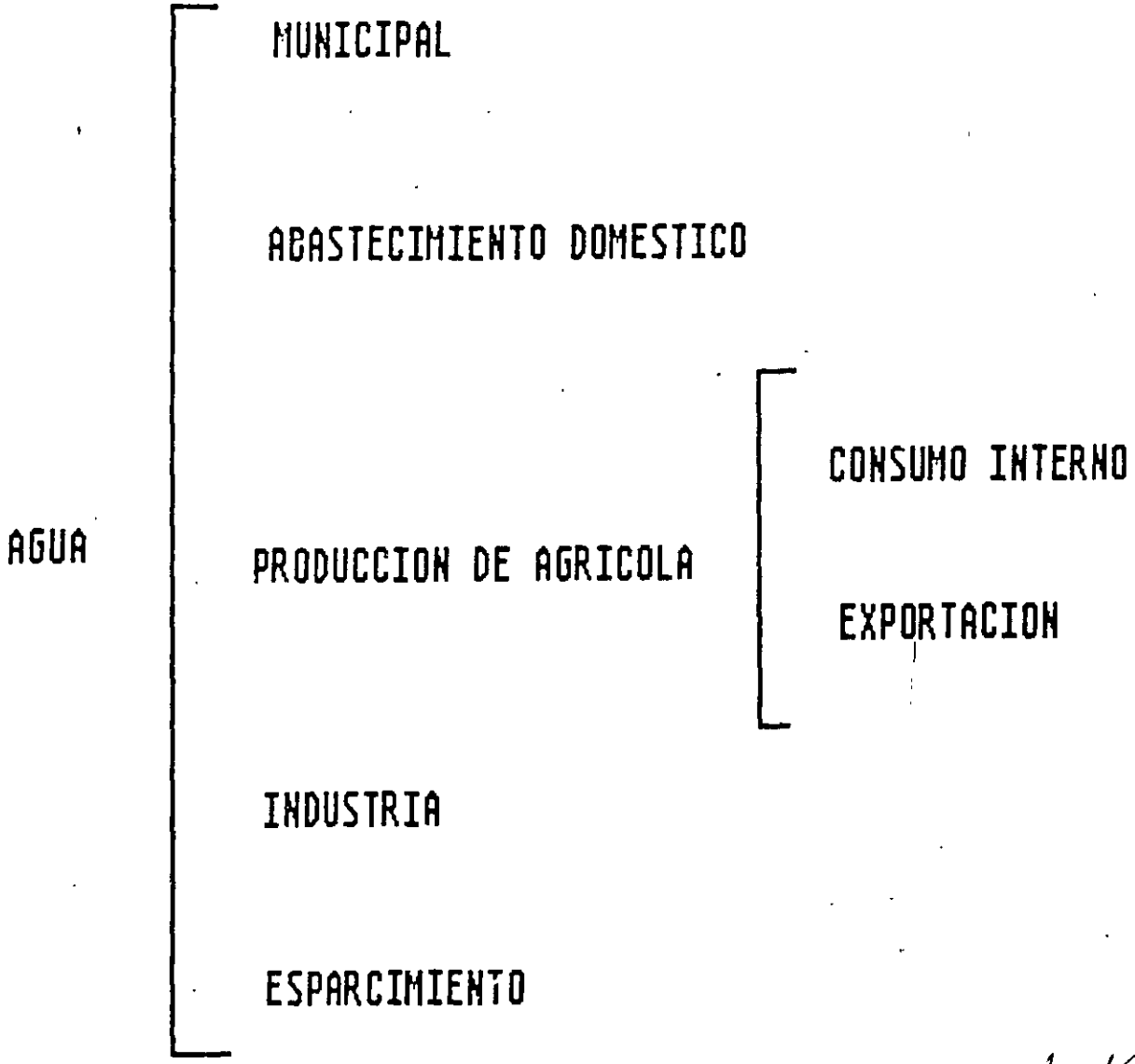
63 000 COMPUESTOS QUIMICOS (OMS, 1980)  
+ 2000 POR AÑO





Contaminantes

17-10-2



1250 M<sup>3</sup> DE AGUA DISPONIBLE/PERSONA, AÑO

*valores de un*

**TABLA 10 AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD POR EL EMPLEO DE AGUA RESIDUAL EN RIEGO EN MEXICO**

CULTIVO	RENDIMIENTO EN TON/HA		% DE CAMBIO
	AGUAS NEGRAS	AGUAS BLANCAS	
Alfalfa	120	70	71
Maíz	5	2	150
Frijol	1	1.3	-23
Trigo	3	1.8	67
Cebada	4	2.0	100
Avena de forraje	22	12.0	83
Tomate	35	18.0	94
Chile	12	7.0	71

## **DETERMINACIÓN DE ORGANISMOS PATÓGENOS**

**EL ANÁLISIS DE ORGANISMOS PATÓGENOS EN EL AGUA SE REALIZA DE DOS FORMAS:**

**UTILIZANDO UN ORGANISMO INDICADOR**

**DETECTANDO ALGÚN MICROORGANISMO ESPECÍFICO.**

**INDICADOR -----> PARÁMETRO DE CONTROL**

**UN INDICADOR DEBE ESTAR PRESENTE CUANDO ESTÉN PRESENTES PATÓGENOS Y AUSENTE SIEMPRE QUE ESTÉN AUSENTES LOS PATÓGENOS (COLIFORMES)**

**COLIFORMES**

**ORIGEN FECAL (HUMANO)**

**NO FECALES (TIERRA),**

**SÓLO LAS FECALES SON INDICADORES PARA AGUA RESIDUAL, Y TODAS LAS BACTERIAS COLIFORMES PARA AGUA POTABLE (INCLUYE FECALES).**



## Microbiológicas

### Coliformes fecales

- Determinar si un agua es legalmente apta para consumo humano
- Coliformes fecales componente normal de la flora y fauna del intestino humano en grandes cantidades
- No son patógenos.
- Los patógenos son
  - \* menos abundantes en el agua residual
  - \* más sensibles a las condiciones ambientales
  - \* manipulación peligrosa para el analista.
- Microorganismos indicadores
  - \* su presencia revela contaminación del agua por heces fecales.
  - \* indica posible existencia de otras bacterias, virus o protozoarios perniciosos
- Para su determinación existen dos técnicas:
  - \* conteo de colonias sobre membrana
  - \* tubos múltiples.
- En ambos selección mediante medios específicos de cultivo e incubación a 44° C.

- DDT en algunos países prohibido, en México se sigue empleando el DDT, las -----loparafinas y el aldrín.
- Compuestos que han ayudado en el control de plagas
- Alteraciones como cáncer, mutaciones, y abortos espontáneos.

## DDT

- Detuvo la epidemia del tifo en 1944 en Nápoles
- Limpió la isla de Cerdeña de los mosquitos de malaria.
- Entre 1947 y 1948 se pensó que erradicaría las moscas pero desarrollaron resistencia al producto.
  - \* Como resultado se aumentaron las dosis
  - \* se crearon programas de investigación para buscar otros compuestos.
  - \* Se sintetizó el lindano, clordano y el dieldrín.
  - \* el problema de la adaptación no fue remediado y se recurrió a otras familias (organofosfatos y carbamatos).
- Los organoclorados y en especial el DDT siguen siendo usado para combatir
  - \* malaria,
  - \* fiebre amarilla
  - \* mal de Chagas.

En agricultura, se emplea para control de plagas de

- \* algodón
- \* maíz
- \* cacahuate
- \* tabaco.

## **Pesticidas**

- Productos muy diversos y la mayor parte artificiales.
- Ejemplo:
  - organoclorados (DDT, HCH, lindano, clordano, heptacloro, aldrín y dieldrín)
  - organofosforados (malatión y paratión)
  - organometálicos que son muy difíciles de biodegradar.

Los organofosforados incluyen principalmente a los fosfatos, fosfonatos y derivados azufrados. La intoxicación con estos compuestos provoca dolor de cabeza, visión borrosa, dificultad para respirar, dolor abdominal, calambres y parálisis.

## **Evaluación del riesgo de carcinogenicidad para los seres humanos**

El CIIC considera los datos disponibles en su conjunto a fin de llegar a una evaluación global de la carcinogenicidad de un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición para los seres humanos.

El agente, la mezcla o las circunstancias se describen de acuerdo con la definición de una de las categorías siguientes, indicando el grupo correspondiente. La clasificación de un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición es una cuestión de apreciación científica, que refleja la fuerza de las pruebas resultantes de estudios con seres humanos y con animales de experimentación y de los demás datos pertinentes.

### **Grupo 1. El agente (o la mezcla) es carcinógeno para los seres humanos.**

**Las circunstancias de exposición implican exposiciones carcinógenas para los seres humanos.**

Esta categoría se utiliza cuando existen *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos. Excepcionalmente, puede clasificarse en ella un agente (o una mezcla) cuando los datos referentes a seres humanos no llegan a ser suficientes pero existen *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad en los animales de experimentación y elementos de juicio sólidos que indican que en los seres humanos expuestos, el agente (o la mezcla) actúa a través de un mecanismo de carcinogenicidad pertinente.

### **Grupo 2**

Esta categoría comprende agentes, mezclas y circunstancias de exposición respecto de los cuales, en un extremo, las pruebas de la carcinogenicidad para los seres humanos son casi suficientes y, en el otro extremo, no se dispone de datos sobre seres humanos pero hay pruebas de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. Los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición se incluyen bien en el grupo 2A (probablemente carcinógeno para los seres humanos) o en el grupo 2B (posiblemente carcinógeno para los seres humanos) sobre la base de los datos epidemiológicos y experimentales favorables a la carcinogenicidad y de otros datos pertinentes.

### **Grupo 2A. El agente (o la mezcla) es probablemente carcinógeno para los seres humanos.**

**Las circunstancias de exposición implican exposiciones probablemente carcinógenas para los seres humanos.**

Esta categoría se aplica cuando existen *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los seres humanos y *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. En algunos casos, se puede clasificar en esta categoría un agente (o una mezcla) cuando se dispone de *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para

los seres humanos y *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación, así como de elementos de juicio sólidos que indican que, en la carcinogénesis, actúa un mecanismo que también existe en los seres humanos. Excepcionalmente, pueden clasificarse en esta categoría un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición únicamente sobre la base de *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los seres humanos

**Grupo 2B. El agente (o la mezcla) es posiblemente carcinógeno para los seres humanos.**

***Las circunstancias de exposición implican exposiciones posiblemente carcinógenas para los seres humanos.***

Esta categoría comprende los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición respecto de los cuales existen *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los seres humanos y *pruebas que no llegan a ser suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. Puede utilizarse también cuando hay *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos pero *pruebas suficientes* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación. En algunos casos, pueden clasificarse en este grupo un agente, una mezcla o unas circunstancias de exposición respecto de los cuales existen *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos pero *pruebas limitadas* de la carcinogenicidad para los animales de experimentación, junto con otros elementos de juicio pertinentes que corroboran las pruebas.

**Grupo 3. El agente (o la mezcla o las circunstancias de exposición) no puede clasificarse sobre la base de su carcinogenicidad para los seres humanos.**

Esta categoría se utiliza sobre todo para los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición respecto de los cuales las pruebas de la carcinogenicidad son insuficientes para los seres humanos e insuficientes o limitadas para los animales de experimentación

Excepcionalmente, se pueden clasificar en esta categoría los agentes (o las mezclas) respecto de los cuales las pruebas de carcinogenicidad son insuficientes para los seres humanos pero suficientes para los animales de experimentación, cuando existen también elementos de juicio sólidos que indican que el mecanismo de acción carcinógena que actúa en los animales de experimentación no existe en los seres humanos.

Se clasifican asimismo en esta categoría los agentes, las mezclas y las circunstancias de exposición que no quedan incluidos en otro grupo

**Grupo 4. El agente (o la mezcla) probablemente no es carcinógeno para los seres humanos.**

Esta categoría se utiliza para los agentes o las mezclas respecto de los cuales *las pruebas parecen indicar una falta de carcinogenicidad* para los seres humanos y los animales de experimentación. En algunos casos, pueden clasificarse en este grupo los agentes o las mezclas respecto de los cuales se dispone de *pruebas insuficientes* de la carcinogenicidad para los seres humanos y de *pruebas que parecen indicar una falta de carcinogenicidad* para los animales de experimentación, corroboradas en forma firme y consistente por una amplia gama de otros elementos de juicio pertinentes.

- **COMPONENTES ORGANICOS**

*1 ALCANOS CLORADOS*

*2 PLAGUICIDAS*

*- LOS PRODUCTOS DE LA DEGRADACION DE PLAGUICIDAS PEPRESENTAR UN PROBLEMA EN EL AGUA PARA CONSUMO HUMANO.*

*- NO SE TIENE GUIAS DE TOXICIDAD DE ESOS PRODUCTOS, YA QUE LOS DATOS DISPONIBLES SOBRE SU IDENTIDAD, SU PRESENCIA Y SU ACTIVIDAD BIOLÓGICA SON INSUFICIENTES*

## En México

- En forma natural en los acuíferos de la Comarca Lagunera (estados de Coahuila y Durango)
- Concentraciones que exceden 15 veces los valores recomendados por la OMS .
- Población afectada de 400 mil campesinos.

## Arsénico

- Elemento metálico de color gris.
- Nombre genérico de varios venenos como:
  - Trióxido de arsénico ( $\text{As}_2 \text{O}_3$ )
  - Pentóxido de As ( $\text{As}_2 \text{O}_5$ ).
  - Arsenito de Na
  - Verde parís (mezcla de compuestos de As y Cu)
  - Arsenato básico de plomo
  - Acido cacodílico
- Compuestos muy tóxicos
- Relacionados con los pesticidas.
- Exposición crónica (=) a daños cardiacos.  
síntomas: dolor abdominal, vómito, pérdida de apetito, debilidad, diarrea y estreñimiento alternados, neuritis, dermatitis y pérdida de cabello.
- Acción tóxica sobre enzimas.

### El trióxido (arsénico blanco)

- polvo para matar roedores.

### El arsenito de sodio comercial

- insecticida y herbicida
- mezcla de ortoarsenito de sodio ( $\text{Na}_3 \text{AsO}_3$ ), metarsenito de sodio ( $\text{NaAsO}_2$ ) y piroarsenito de sodio ( $\text{Na}_4 \text{As}_2 \text{O}_5$ ). -
  - 5 a 50 mg provoca enfermedad
  - 120 mg puede ocurrir la muerte.



## - El problema

- \* Se manifestó en 1953.
- \* Se detectó la fábrica responsable en 1959.
- \* Hasta 1968 los responsables admitieron culpabilidad.

## Cadmio

- Se utiliza en galvanoplastia.
- peligroso para el ser humano a partir de 1 ppm.
- Se introduce en los cultivos por el riego con agua contaminada y por el empleo de tubería y tanques de almacenamiento galvanizados con zinc.
- primeros síntomas parecidos a los del reumatismo y de la neuritis.
  - \* los huesos se ablandan y duelen mucho.
  - \* ocurren fracturas y los pacientes se ven limitados a permanecer en cama.

## Plomo

- Proviene de la contaminación atmosférica en zonas de alta densidad automovilística.
  - \* El agua de lluvia puede contener hasta  $40 \mu\text{g/l}$  y la bruma  $300 \mu\text{g/l}$ .
  - \* El contenido de plomo en los océanos ha pasado de  $0.01 \mu\text{g/lm}$  a  $0.07$  en 75 años.

## Mercurio

- Su forma tóxica es el metil-mercurio que es sintetizado en la naturaleza y por el hombre a partir de mercurio inorgánico.
- Tóxico fuerte que se combina con las proteínas y las enzimas destruyendo el tejido celular y provocando parálisis.
- Afecta los sentidos y provoca la muerte.
- Dosis a partir de la cual comienzan los síntomas es de 0.5 ppm y se tienen problemas serios a partir de 6 ppm.
- Normalmente presente en el agua marina en dosis muy bajas -
  
- Las principales industrias contaminantes son:
  - \* Papeleras que lo emplean para evitar el desarrollo de bacterias en la pulpa.
  - \* Fábricas de tubos fluorescentes y de ciertos aparatos eléctricos.
  - \* Fábricas de plásticos donde el Hg se emplea como catalizador.
  - \* Fábricas de espejos y acabado de superficies.
  - \* Industria farmacéutica.

## EPISODIO AMBIENTAL

- Ocurrió en Minamata, Japón
- Muchos pescadores y gatos murieron debido a un proceso de concentración del Hg por medio de una cadena alimenticia.

## **METALES**

**ELEMENTOS DE LOS GRUPOS I, II, III, Y IV DE LA TABLA PERIODICA.**

### **METALES DISUELTOS**

**CUANDO EL ANALISIS SE AFECTUA SOBRE EL FILTRADO A 0.45 M Y SIN ACIDIFICAR, EN CASO CONTRARIO SE HABLA DE METALES SUSPENDIDOS**

### **METALES TOTALES**

**LA DETECCION EN UNA MUESTRA NO FILTRADA Y SUJETA A UN DIGESTION FUERTE**

### **METALES EXTRACTABLES EN ACIDOS**

**DETERMINACION EFECTUADA EN UNA MUESTRA NO FILTRADA Y TRATADA CON UN ACIDO MINERAL CALIENTE**

## Grasas y aceites

- Técnica global que detecta las sustancias solubles en clorotrifluoretano.
- Interferencias principales compuestos sulfurados y pigmentos como la clorofila.
- Se aplica para la medición de los hidrocarburos con temperatura de ebullición superior a 70° C.
- En aguas residuales es importante ya que puede inhibir el tratamiento biológico.

## Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)

- Mide en forma global los detergentes aniónicos (alquil benceno sulfonato lineal) y los catiónicos.
- Determina las sustancias por con el azul de metileno

## Hidrocarburos

- Principalmente en mares como resultado de la industria petrolera.
- Forman una película que impide la reoxigenación natural de agua y limita la capacidad autodepuradora.
- Olor se percibe a partir de 0.001 mg/l.

## En general PRODUCEN

- Espuma que impide el proceso natural o artificial de depuración y que además propician la diseminación de bacterias o virus.
- Disminuyen la solubilidad del oxígeno por formación de una película aislante de la superficie.
- Sabor a jabón para contenidos muy inferiores al de formación de espuma.
- Aumento de los polifosfatos que favorecen la eutroficación.
- Aumento del boro en el agua proveniente de los aditivos (perborato).

## Detergentes

- Productos de fabricación reciente de mucho uso
- Contienen comúnmente entre 15 y 50% de sustancias tensioactivas
  - efecto de disminuir tanto la tensión superficial del agua (72 dinas/cm<sup>2</sup> a 60 o 50 dinas/cm) como la viscosidad (10% cda 50 mg/l).
- Son productos a la vez emulsionantes, espumantes y mojanter.

Existen tres tipos: aniónicos, catiónicos y no iónicos.

### a) Aniónicos:

- \* Más antiguos
- \* tóxicos para peces en concentraciones superiores a 60 mg/l, rara vez son alcanzadas.
- \* El más común es el aquil-benceno-sulfonato de sodio o ABS.
- \* cadena ramificada muy resistente al ataque de microorganismos
- \* El más actual es el LAS.

### b) Catiónicos.

- \* detergentes bactericidas
- \* peligrosos aún en pequeñas concentraciones (del orden de mg/l)

### c) No iónicos.

- \* En general, a base de alquifenoles.

## Demanda química de oxígeno

- DQO mide la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar materia orgánica con un oxidante fuerte ( $K_2 Cr_2 O_4$ ) a altas temperaturas ( $700^\circ C$ ) y condiciones ácidas
- No siempre guarda una relación con la DBO, aunque en general es mayor.
  - \* en industria textil  $DQO \gg DBO$ , la celulosa es poco biodegradable
  - \* En destilerías y refinerías puede suceder  $DQO < DBO$  a menos que se modifique la prueba para impedir pérdida de volátiles
- Tarda aproximadamente 3 horas en laboratorio

## Sustancias extractables con cloroformo

- ECC (sustancias extractables con cloroformo en filtro de carbono)
- Incluyen sustancias grasosas, solventes orgánicos, pinturas y cualquier otro desecho orgánico de tipo industrial que no es forzosamente biodegradable.
- Concentraciones de  $0.2 \text{ mg/l}$  provoca mal olor y sabor en agua potable.

## Materia orgánica

DBO

COT

DQO

SECC

### Demanda biológica de oxígeno

- Oxígeno que se requiere para que los microorganismos para degraden materia orgánica en el agua.

- Medición se realiza a 20° C y tarda 5 días.

- Se expresa en  $\text{mgO}_2 / \text{l}$ .

- No mide un compuesto en especial sino la biodegradabilidad de varios por vía aerobia.

- Algunos compuestos orgánicos que no producen DBO por ser tóxicos

- Agua potable DBO de 0.75 a 1.5  $\text{mgO}_2 / \text{l}$ .

Agua residual doméstica de 200 a 350



- Si la velocidad con la cual disminuye el OD es mayor a la tasa de disolución del oxígeno se disminuye la concentración de saturación, pudiendo alcanzar condiciones anaerobias.

## Dureza

- Se debe a carbonatos, bicarbonatos y sulfatos de calcio y magnesio y en ocasiones de fierro y aluminio.

- Cantidad importante => el agua es dura

- \* contiene sales incrustantes

- \* dificulta la cocción de legumbres

- \* impide la formación de espuma

- Dureza temporal a aquella que se elimina al hervir el agua

- Dureza permanente requiere métodos más sofisticados

## Oxígeno disuelto

### - Indicador de

- \* el efecto producido por los contaminantes oxidables
- \* la calidad del agua para mantener peces u otros organismos aerobios
- \* la capacidad autodepuradora de un cuerpo receptor

### - El OD disminuye al aumentar

- \* salinidad
- \* temperatura
- \* altitud ( $\sim 7\%$  cada 60 m).

- En agua residual la ausencia de oxígeno genera olores desagradables

- En agua de abastecimiento un exceso de oxígeno provoca corrosión.

### Determinación mediante método electroquímico

- introducción directa de una sonda con ajuste a presión y temperatura dada.

- Cuando no se dispone de oxímetro se hace titulación del permangato de potasio con la sal de Mohr (sulfato ferroso amoniacal).

### Curva de pandeo del oxígeno

- Un desecho biodegradable en una corriente consume oxígeno disuelto proporcional a su concentración por acción de bacterias.

## pH

- Cologaritmo de la concentración de los iones hidronio ( $H^+$ ) en solución

- Define si una solución es ácida o alcalina

- escala de 1 a 14

- pH entre

1 y 7 ácidas

de 7 a 14, alcalinas o básicas.

- Agua neutra pH de 7 a  $24^{\circ} C$ .

### c) Sólidos filtrables.

- Sólidos que atraviezan el filtro corresponde a las sustancias solubles.

En cada una de las porciones anteriores se realiza el análisis de volatilidad ( mufla a 550° C).

- material que se pierde por ignición corresponde al contenido orgánico

- material que permanece es inorgánico.

En la FIG 2.5 se muestra la clasificación completa de los tipos de sólidos que se pueden determinar mediante el método gravimétrico.

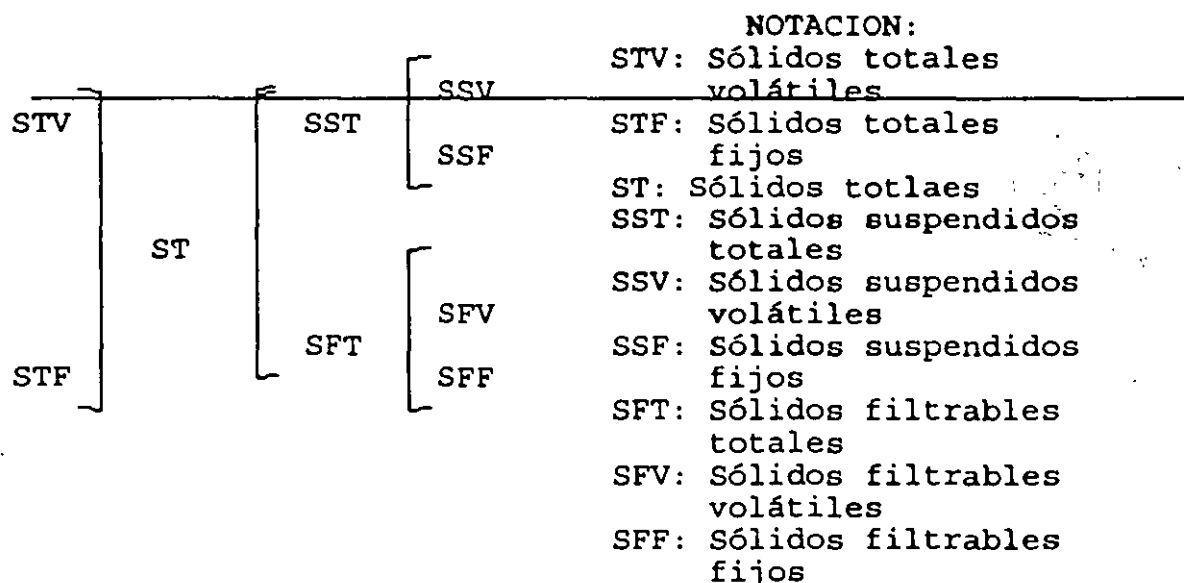


FIG. 2.5 Nueve formas en que se miden los sólidos contenidos en una agua por el método gravimétrico.

## Compuestos químicos

### Alcalinidad

- Hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  ,  $\text{Mg}^{2+}$  ,  $\text{Na}^+$  ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$

\* más comunes los de calcio y magnesio

- Se determina por titulación ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0.02N)

- Resultado como  $\text{CaCO}_3$

- Expresa la capacidad que tiene un agua para mantener su pH cuando se le añade una solución ácida o alcalina.

### pH

- Se determina mediante un electrodo de vidrio.

- El cologaritmo de la concentración de los iones hidronio ( $\text{H}^+$ ).

- Parámetro de operación para procesos biológicos y físico-químicos de agua potable y residual.

- Medición de sólidos por gravimetría
- Evalúa compuestos muy variados (prueba global)
  - \* incluye sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio y trazas de calcio, magnesio, fierro) y materia orgánica.
  - \* mide a los responsables de la dureza, tóxicos y materiales necesarios para la vida.

a) Sólidos sedimentables.

- Volumen retenido en 45 min en cono Imhoff después de 45 min de decantación
- Representan la fracción de los contaminantes que serán fácilmente removidos por desarenación o sedimentación primaria.

FIG . Cono Imhoff

b) Sólidos suspendidos.

- Sólidos retenidos al pasar el agua a través de un filtro con apertura de poro de  $0.47 \mu\text{m}$ .

## Turbiedad

- Sólidos en suspensión
- Los sólidos reflejan parte de la luz que incide  
pérdida de luminiscencia en línea recta se le denomina turbiedad.
- Idea del contenido de materia coloidal y suspendida
- Muchas unidades (UTJ, sílice, etc. ) se debe emplear UTN (Unidades técnicas de nefelometría).
- Agua potable: 5 UTN  
Residual doméstica : entre 100 y 150 UTN.

## Sólidos

- Residuo después de la evaporar el agua a 103°C.

FIG 2.2. Como se presenta la materia en el agua

- A medida que disminuye el tamaño es más complicada la técnica de separación (FIG 2.3).

FIG 2.3. Clasificación y tamaño de las partículas encontradas en el agua residual.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***CICLOS DEL NITRÓGENO Y DEL FIERRO***

**PRESENTADO POR: M. en I. ANTONIO CARDONA BENAVIDES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**



**CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II. CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**CICLOS DEL NITROGENO Y DEL FIERRO**

Dra. Ma. Aurora Armienta H

**CICLO DEL NITRÓGENO.**

*Aspectos Generales.*

La mayor abundancia de nitrógeno se encuentra en el aire, donde constituye alrededor del 79% en volumen, y se presenta en forma molecular (como  $N_2$ ).

Los procesos químicos y biológicos que transfieren el nitrógeno de y hacia la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera, constituyen el **Ciclo del Nitrógeno**.

El cambio en el grado de oxidación del  $N_2$  gaseoso y su transformación en compuestos químicos que contienen nitrógeno se conocen en general como "fijación de nitrógeno" Para ello se requiere una gran cantidad de energía debido al triple enlace que une los dos átomos del elemento

Existen pocas especies capaces de transformar el nitrógeno atmosférico en formas útiles para los organismos vivos. Estos organismos pueden recuperar y utilizar nuevamente el nitrógeno biodisponible siendo una parte fundamental del ciclo del nitrógeno (Figura 1). La primera etapa de este ciclo es la fijación del nitrógeno atmosférico por organismos fijadores del mismo para producir amoníaco. El nitrógeno queda así en forma útil para la mayoría de los organismos con vida. Además existen bacterias del suelo que obtienen su energía oxidando el amoníaco para formar nitrito ( $NO_2^-$ ) y posteriormente, nitrato ( $NO_3^-$ ). A este proceso se le conoce como **nitrificación**. El nitrógeno que usan las plantas se encuentra en su mayoría en forma oxidada. Debido a la abundancia y actividad de las

bacterias nitrificantes, casi todo el amoníaco que llega al suelo se oxida a nitrato. Las plantas y muchas bacterias son capaces de reducir el nitrato a óxido nitroso o a nitrógeno gaseoso. A este proceso se le conoce como **denitrificación**. El proceso de conversión del nitrógeno orgánico a  $\text{NH}_4^+$  se conoce como **amonificación**. El amoníaco formado se incorpora a los aminoácidos de las plantas que luego sirven de alimento a los animales proporcionándoles los aminoácidos con los que se construyen las proteínas animales. Cuando los animales mueren, las proteínas se degradan por la acción de los microorganismos y de esta manera, devuelven amoníaco al suelo donde las bacterias nitrificantes lo convierten nuevamente en nitrito y en nitrato.

### *El Nitrógeno en las Aguas Subterráneas.*

El nitrógeno disuelto, principalmente en forma de nitrato, es el contaminante más común en las aguas subterráneas.

El nitrógeno presente en los acuíferos puede provenir de diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas. En la atmósfera existen óxidos de nitrógeno que se forman por los procesos de combustión de carbón y productos de petróleo (que contienen por lo general cerca de 1 % de nitrógeno), y por la acción de los rayos. Los óxidos de nitrógeno de la atmósfera se transforman a nitratos que se solubilizan en el agua de lluvia, la cual contiene también amoníaco.

El nitrógeno se encuentra en el agua subterránea en forma aniónica como nitrito (con grado de oxidación III -) o nitrato (con grado de oxidación V +), o en forma cationica como amonio,  $\text{NH}_4^+$  (con grado de oxidación III -), también puede encontrarse en estados intermedios de oxidación formando parte de solutos orgánicos. Algunas otras formas tales como los cianuros,  $\text{CN}^-$  (con grado de oxidación III-), pueden presentarse en aguas afectadas por contaminación.

La influencia del hombre en el ciclo del nitrógeno incluye la producción y el uso de fertilizantes sintéticos como el amoníaco y otros compuestos de nitrógeno, además del riego con aguas negras y la utilización de estiércol como fertilizante.

Debido a las distintas formas químicas en que se encuentra, el nitrógeno puede comportarse de manera diversa en los acuíferos (Figura 2). Los iones amonio son adsorbidos fuertemente en las superficies minerales. Las especies aniónicas como el nitrato son fácilmente transportadas por el agua y se mantienen estables en un amplio rango de condiciones. Las especies orgánicas y el nitrito son inestables en agua que contiene oxígeno y se consideran como indicadores de contaminación debida a la disposición de drenaje o basuras orgánicas. La presencia de nitrato o de amonio también puede ser indicativa de este tipo de contaminación pero en un lugar o tiempo alejado del punto de muestreo del agua en cuestión. Los iones amonio y cianuro son capaces de formar complejos solubles muy estables con ciertos iones metálicos, contenidos en algunos tipos de efluentes industriales

En la áreas rurales pueden presentarse concentraciones excesivas de nitratos debido al estiércol y/o a fosas sépticas. Esto ocurre principalmente donde se tiene una gran concentración de ganado.

El  $\text{NO}_3^-$  contenido en el agua subterránea puede introducirse como tal a partir de residuos o fertilizantes aplicados al suelo, o bien, originarse por la oxidación del nitrógeno orgánico o el  $\text{NH}_4^+$ . Los procesos de amonificación y nitrificación normalmente ocurren arriba del nivel freático, generalmente en la zona de suelo, donde abunda la materia orgánica y el oxígeno. Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  que se encuentran normalmente en las aguas subterráneas no están limitadas por su solubilidad. Los  $\text{NO}_3^-$  pueden transportarse a grandes distancias en acuíferos someros en sedimentos con alta permeabilidad o roca fracturada, debido a que la concentración de  $\text{O}_2$  disuelto es por lo general alta. Sin embargo, una disminución en el potencial redox del agua puede, en algunas situaciones causar la desnitrificación, produciendo  $\text{N}_2\text{O}$  o  $\text{N}_2$ . Si en estas condiciones el agua se mueve hacia la zona no saturada, una parte del  $\text{N}_2\text{O}$  o del  $\text{N}_2$  se pierde por degasamiento en el

suelo. La denitrificación se ha observado en numerosos estudios de sistemas de suelo en el laboratorio y en el campo. Este proceso es factible en el agua subterránea, aunque se realiza en condiciones no favorables debido a la ausencia de materia orgánica adecuada para el crecimiento de las bacterias denitrificantes.

Las concentraciones excesivas de nitrato en el agua potable en concentraciones mayores de 45 mg/L pueden ocasionar metahemoglobinemia en los niños pequeños. Es por ello que la concentración máxima permisible en el agua potable en México es de 5 mg/l como N de  $\text{NO}_3^-$ .

## CICLO DEL FIERRO

### *Aspectos Generales*

El hierro es un elemento abundante y ampliamente distribuido en rocas y suelos. En forma de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  constituye el 1.5 % de la corteza continental y como  $\text{FeO}$  el 3.5%.

Los minerales de rocas ígneas con contenidos de hierro relativamente altos incluyen los piroxenos, anfíboles, biotita, magnetita y olivino. En la mayoría de ellos el hierro se encuentra en forma ferrosa con grado de oxidación (II-). Cuando estos minerales son atacados por el agua, el hierro puede disolverse y generalmente se reprecipita como especies sedimentarias. Bajo condiciones reductoras cuando existe azufre disponible se pueden formar polisulfuros ferrosos como pirita o marcasita. Cuando el azufre es menos abundante es posible la formación de siderita. En medios oxidantes las especies sedimentarias del hierro son los óxidos u oxihidróxidos como hematita o goetita. El hierro recién precipitado se presenta como hidróxido férrico con una estructura poco cristalina.

La disponibilidad del hierro para disolverse, depende fuertemente de las condiciones ambientales, especialmente de los cambios en el grado o intensidad de las reacciones de oxidación o reducción. Se pueden presentar altas concentraciones de hierro ferroso disuelto

en lugares donde se produzca la reducción de oxihidróxidos ferrosos o la oxidación de sulfuros ferrosos.

El hierro está presente en los residuos orgánicos en los suelos. En los procesos de oxidación y reducción del hierro juegan un papel muy importante los microorganismos, algunos de los cuales usan estas reacciones como fuentes de energía.

### *El Hierro en las Aguas Subterráneas*

El diagrama potencial-pH para el Fe en las aguas subterráneas es uno de los más importantes y estudiados. En el rango típico de pH de los sistemas acuíferos el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  precipitado es termodinámicamente estable a potenciales moderados o altos. La principal especie disuelta es el Fe(II). Arriba de pH 9.5 el hidróxido ferroso  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  precipitado puede ser la forma predominante del Fe(II). Arriba de pH 11 los aniones  $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$  o  $\text{HFeO}_2^-$  pueden existir en el agua en concentraciones apreciables, aunque este valor de pH es muy raro en el agua subterránea. El par iónico  $\text{FeSO}_4$  llega a ser importante en soluciones conteniendo unos cuantos miligramos de sulfato por litro. Muchas moléculas orgánicas complejan al hierro ferroso, y los complejos formados generalmente son más resistentes a la oxidación que los iones ferrosos libres. Cuando las aguas contienen cantidades apreciables de carbono inorgánico y azufre a bajos valores de Eh se favorece la formación de  $\text{FeCO}_3$  y  $\text{FeS}_2$  que precipitan. La solubilidad del Fe puede cambiar de manera significativa ante pequeñas modificaciones en el pH o el Eh del agua.

El hierro ferrico puede presentarse en soluciones ácidas como  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{FeOH}^{2+}$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ , la forma predominante y la concentración dependen del pH. Arriba de pH de 4.8 la actividad de todas las especies en equilibrio con hidróxido ferrico será menor que  $10\mu\text{g/L}$ .

El ion ferrico forma complejos con sustancias orgánicas y con los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ . Aunque generalmente los complejos orgánicos son los más importantes. El

hierro férrico asociado con coloides orgánicos o material tipo húmico da a algunas aguas un color amarillo o café. Otro efecto de la materia orgánica es la reducción del ión férrico a ferroso.

Las superficies del óxido-hidróxido férrico tienen una gran capacidad de adsorción que puede afectar la concentración de constituyentes menores en aguas en las que se presente este tipo de material. En tales condiciones es posible que ocurran procesos redox de coprecipitación que controlen la solubilidad de otros metales en solución.

La presencia de bacterias es capaz de aumentar o disminuir la concentración de Fe disuelto.

### *Diagrama de Predominio de Especies para el Hierro*

El comportamiento químico del hierro puede predecirse teóricamente como función del pH, Eh y actividad de otros iones en solución. El diagrama Eh-pH del hierro es una gráfica bidimensional en la cual el pH se grafica en la abscisa y el potencial redox en la ordenada. La aplicación de la ley de Nernst y de balances de masas permite expresar las relaciones entre las especies químicas presentes como puntos o líneas en el diagrama.

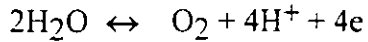
Este tipo de diagramas potencial-pH fue desarrollado por Pourbaix en Bélgica en años anteriores a la segunda Guerra Mundial. Aunque se trata de un diagrama teórico, las predicciones respecto al comportamiento del hierro se ajustan bastante a su comportamiento real.

Para la construcción de este diagrama se asumen condiciones estándar (25 °C y 1 atmósfera) y se realizan los cálculos en función de actividades.

El rango de condiciones esperadas en los sistemas acuosos está limitado obviamente al dominio de estabilidad Eh-pH del agua.

Los límites del diagrama entonces están dados por las reacciones de oxidación y de reducción del agua.

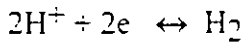
El agua se oxida según la reacción:



Para la cual la ley de Nernst será:

$$E = 1.23 + (0.06/4) \log p\text{O}_2 [\text{H}^+]^{-4} = 1.23 - 0.06\text{pH}$$

El agua se reduce según la reacción:



Para la cual:

$$E = 0.00 + (0.06/2) \log \frac{[\text{H}^+]^2}{\text{PH}_2}$$

$$E = -0.06 \text{ pH}$$

Para elaborar el diagrama Eh-pH para el hierro considerando la formación de hidróxidos, se consideran las actividades de las fases sólidas y del agua como 1. Se utilizan los siguientes datos:

$$E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}} = 0.78\text{V}$$

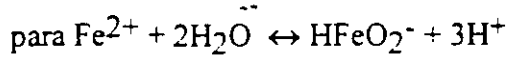
$$K_{\text{eq}} = 10^{-2.3} = [\text{FeOH}^{2+}] [\text{H}^+] [\text{Fe}^{3+}] \quad \text{para } \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{FeOH}^{2+} + \text{H}^+$$

$$K_{\text{eq}} = 10^{-3.4} = [\text{Fe(OH)}_2^+] [\text{H}^+] [\text{Fe(OH)}^{2+}]$$

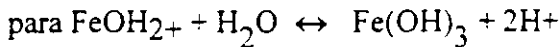
$$\text{para } \text{Fe(OH)}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe(OH)}_2^+ + \text{H}^+$$

$$pK_s \text{Fe(OH)}_2 = 15.1$$

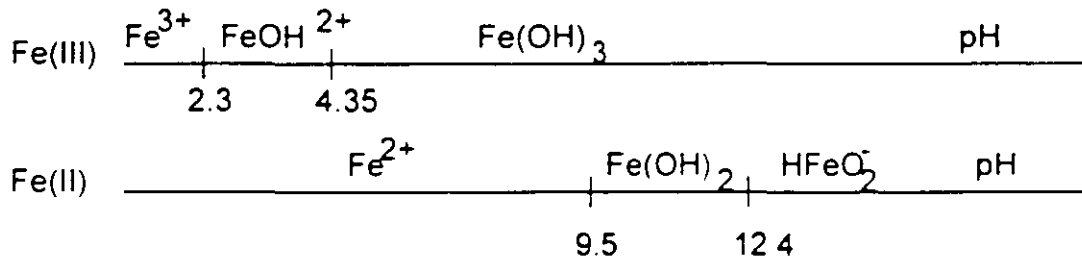
$$K_{eq} = 10^{-31.58} = [\text{HFeO}_2^-] [\text{H}^+]^3 / [\text{Fe}^{2+}]$$



$$K_{eq} = 10^{-2.7} = [\text{H}^+]^2 / [\text{FeOH}^{2+}]$$



Por facilidad se puede iniciar la construcción del diagrama especificando las especies de  $\text{Fe}^{2+}$  y de  $\text{Fe}^{3+}$  en los diversos rangos de pH para una concentración de  $\text{Fe(III)} = \text{Fe(II)} = 10^{-6} \text{ M}$ .



Para construir el diagrama los límites entre especies con el mismo grado de oxidación se fijan por las reacciones y sus respectivas constantes de equilibrio, y se grafican como líneas verticales. La variación de los potenciales de las reacciones entre especies con diferente grado de oxidación se obtienen por la ley de Nernst y se grafican como líneas horizontales o inclinadas. Los cambios en la pendiente de las líneas ocurren solamente cuando intersectan o son intersectadas por una línea vertical.

Con estas consideraciones puede obtenerse la gráfica del sistema  $\text{Fe(III)/Fe(II)}$  en función del pH, para concentraciones de  $\text{Fe(II)} = \text{Fe(III)} = 10^{-6} \text{ M}$  ( $56 \mu\text{g/L}$ ).



Para  $\text{pH} < 2.3$ :

El sistema es independiente del pH. El potencial es igual a 0.77V

Para  $2.3 < \text{pH} < 4.3$ :

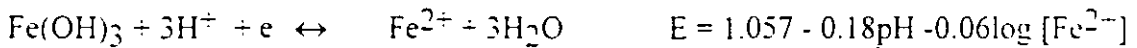
El sistema  $\text{FeOH}^{2+} / \text{Fe}^{2+}$  depende del pH según



$$E = 0.91 - 0.06\text{pH} + 0.061 \log \frac{[\text{FeOH}^{2+}]}{[\text{Fe}^{2+}]}$$

Para  $4.3 < \text{pH} < 9.5$ :

El sistema  $\text{Fe}(\text{OH})_3 / \text{Fe}^{2+}$  es función del pH según



Para  $9.5 < \text{pH} < 12.4$

El sistema  $\text{Fe}(\text{OH})_3 / \text{Fe}(\text{OH})_2$  es función del pH según



Para  $\text{pH} > 12.4$ :

El sistema  $\text{Fe}(\text{OH})_3 / \text{HFeO}_2^-$  es independiente del pH según



Con base a estas ecuaciones se elaboro el diagrama de la figura 3.

## ***Papel de las Bacterias en la Precipitación del Hierro***

Termodinámicamente las bacterias pueden influir el comportamiento del hierro en el agua por los siguientes procesos:

Procesos en los cuales las bacterias ejercen un efecto catalítico para acelerar las reacciones que son termodinámicamente favorables pero que ocurrirían muy lentamente en ausencia de las mismas. En este tipo de procesos participan bacterias tales como *Gallionella*, *Crenothrix* y *Peptothrix* que oxidan el hierro ferroso. Estos géneros requieren oxígeno, por lo tanto viven en ambientes en los que el hierro ferroso es inestable.

Procesos que requieren la contribución de energía de otra fuente para alterar el status del hierro y pueden ser promovidos por las bacterias que consumen alguna otra sustancia como fuente de energía. Estos procesos involucran especies reductoras del hierro y del azufre que requieren una sustancia oxidable, usualmente orgánica como fuente de energía. Incidentalmente puede ocurrir la oxidación o reducción del hierro y éste puede no jugar un papel esencial en los procesos vitales de las bacterias.

Las bacterias oxidantes del azufre son capaces de ejercer una acción indirecta en el comportamiento del hierro al catalizar las reacciones que solubilizan al hierro, por ejemplo la oxidación de la pirita. Esta catálisis bacteriana llega a incrementar la velocidad de conversión del  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  en soluciones ácidas en presencia de pirita hasta en seis órdenes de magnitud, y es un factor primordial en la generación del drenaje ácido de minas.

Las bacterias pueden entonces aumentar o disminuir la concentración de hierro disuelto en el agua de pozos. Es posible separar parcialmente las colonias de bacterias en pozos y tuberías moviendo el agua periódicamente, lo que origina también la liberación ocasional del hidróxido ferrico acumulado. En el agua subterránea la presencia de hierro es fundamentalmente un fenómeno químico. Sin embargo, la biota asociada con la disolución y precipitación del hierro puede agravar cierto tipo de problemas relacionados con la presencia del mismo.

## REFERENCIAS

- Andres A.S., 1993, Nitrate contamination of Ground and Surface Watersm Coastal Sussex County, Delaware. Hydrological Science and technology. AIH. 9pp 106-128.
- Armienta M.A.. 1988. La Contaminación de las Aguas Subterráneas. Comunicaciones Técnicas IGF, UNAM. Serie Investigación No. 76. 40 pp.
- Chapelle F.H. and D.R. Lovley. 1992. Competitive Exclusion of Sulfate Reduction by Fe(III)-Reducing Bacteria: a Mechanism for Producing Discrete zones of High-Iron Ground Water. Groundwater. 30. pp 29-36.
- Cherry J.A., 1984. Groundwater Contamination. MAC Short Course Handbook 10. Ed. M. A. Fleet Cap. 11 pp 269-306.
- Cherry J.A., R.W. Gillham and J.F. Barker. 1984. contaminants in Groundwater: Chemical Processes. en: Studies in Geophysics. Groundwater Contamination. National Academy Press. Washington D.C., pp 46-64.
- Drever J.I., 1982. The Geochemistry of Natural Waters. Prentice-Hall. Inc. Englewood Cliffs, N.J., 388 pp.
- Foster S.S.D., 1989. Diffuse Pollution of groundwater by Agriculture-Lessons learnt and Future Prospects. in: J.E. Moore, A.A. Zaporozec, S.C. Csallany and T. C. Varney (eds.) Recent Advances in Groundwater Hydrology. AIH. pp 185-194.
- Freeze R.A., J.A. Cherry. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 604 pp.
- Garrels R.M. and C.L. Christ. 1965. Solutions. Minerals and Equilibria. Harper& Row, N.Y., 450 pp.
- Garrels R.M., 1976. A survey of low Temperature Water-Mineral Relations. en: Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology. Proceedings of an Advisory group Meeting. Vienna, Austria. 27-31 Junio. 1975. AIEA
- Gillham R.W. and L.R. Webber. 1969. Nitrogen Contamination of Groundwater by Barnyard Leachates. Journal WPCF. pp 1752-1762
- Gillham R.W. and J.A. Cherry. 1978. Field Evidence of denitrification in Shallow Groundwater flow Systems: Water Poll. Res. Canada. 13. pp 53-70.

- Gshwend P. M. and M.D. Reynolds. 1987. Monodisperse Ferrous Phosphate colloids in and Anoxic Groundwater Plume. *J. of Contaminant Hydrology*, 1. pp 309-327.
- Hem J.D., 1992. Study and Interpretation of the chemical Characteristics of Natural Water. Geological Survey Water Supply Paper 2254. Washington D.C.. 264 pp.
- Lloyd J.W., J.A. Heathcote. 1985. Natural Inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. Clarendon Press Oxford. n.Y.. 296 pp.
- Mariotti A., 1986. La dénitrification dans les eaux Souterraines. Principes et Méthodes de son identification: Une Revue. *J. of Hydrology*, 88. pp 1-23.
- Snoeyink V.L., D. Jenkins. 1987. Química del Agua. Limusa. México D.F.. 508 pp.
- Stumm W. and J.J. Morgan. 1981. Aquatic Chemistry. John Wiley & Sons. N.Y.. 780 pp.
- Thornton I., 1983. Applied Environmental Geochemistry. Academic Press. N.Y.. 501 pp.

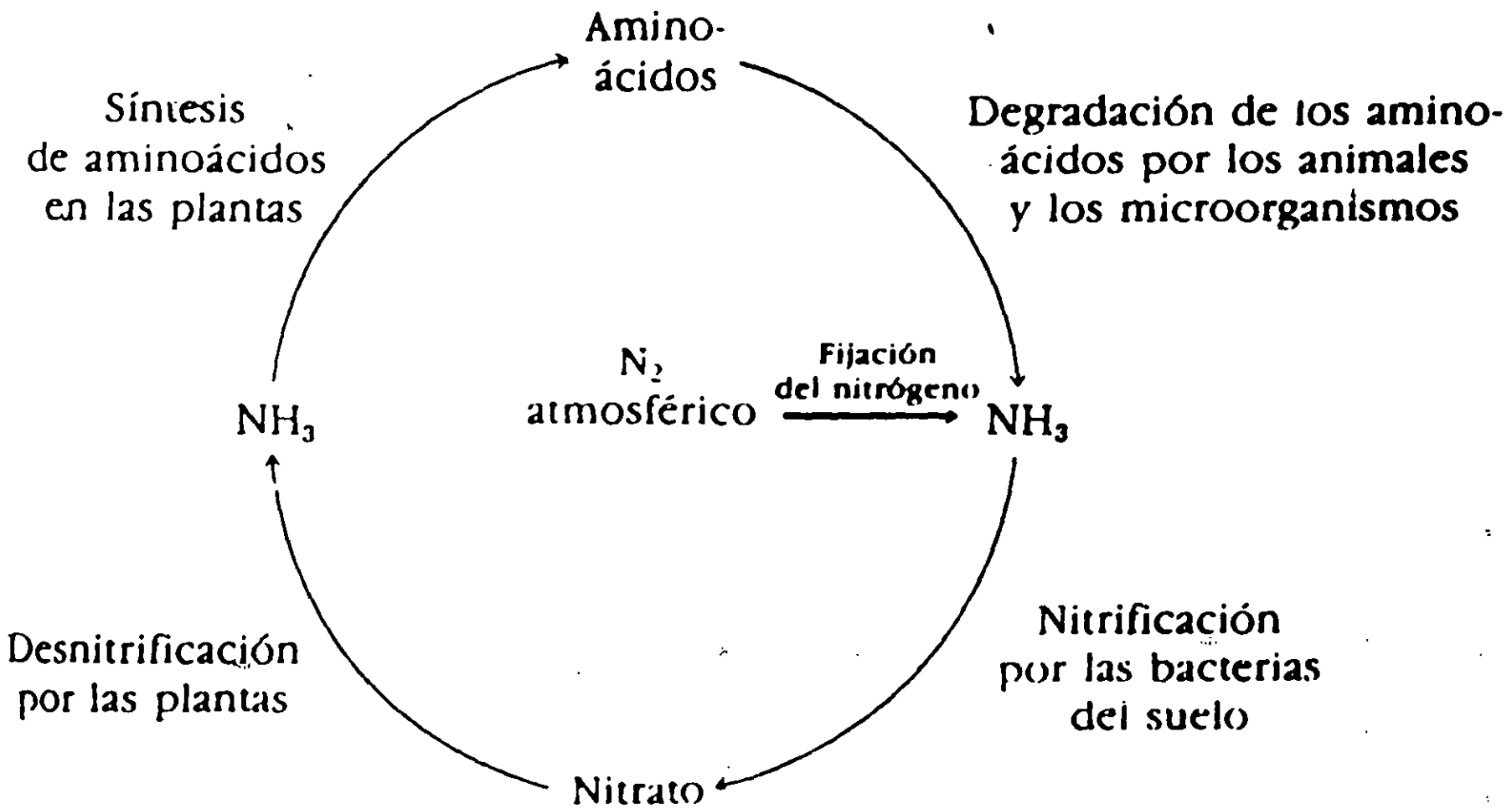
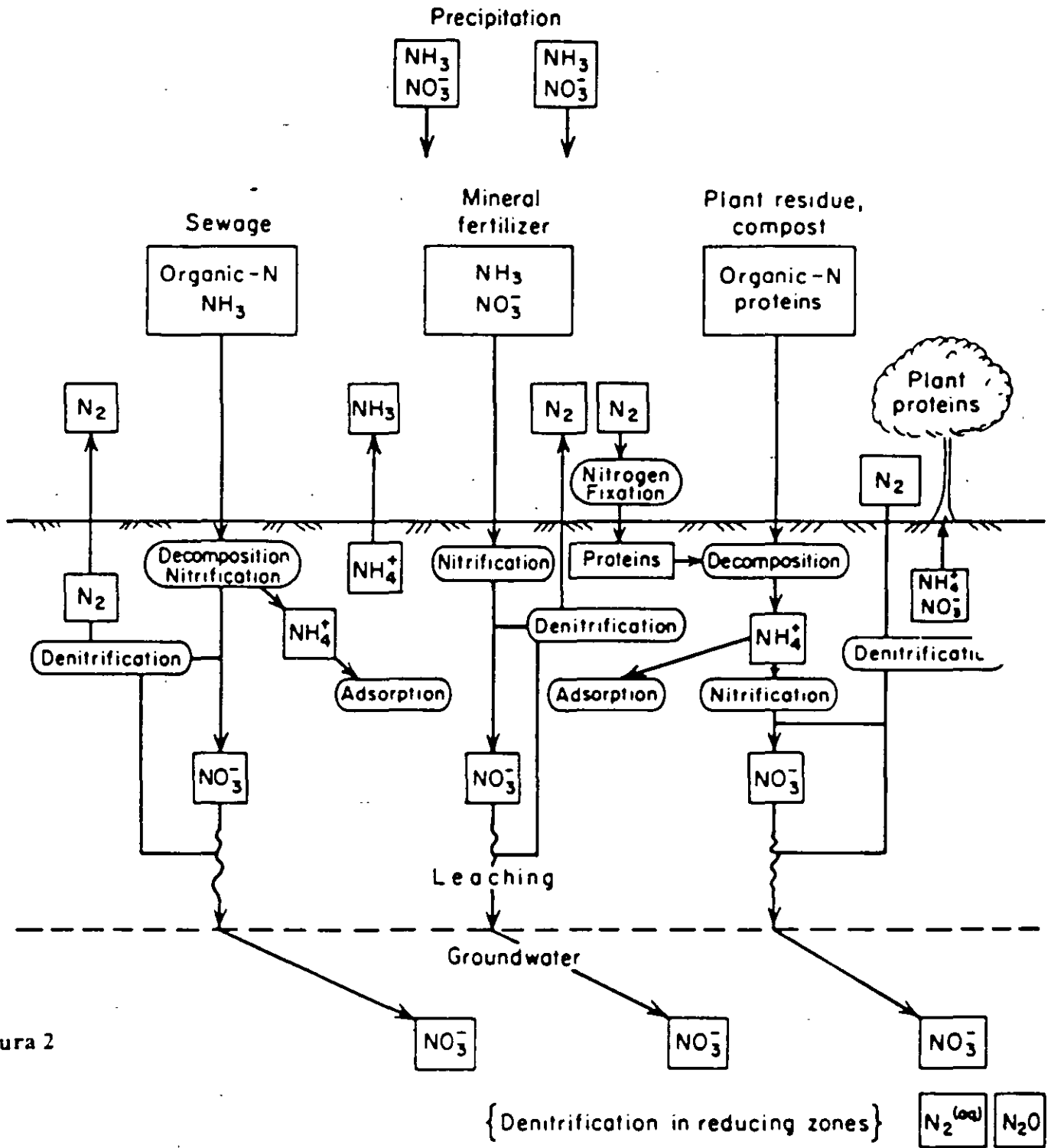


Figura 1



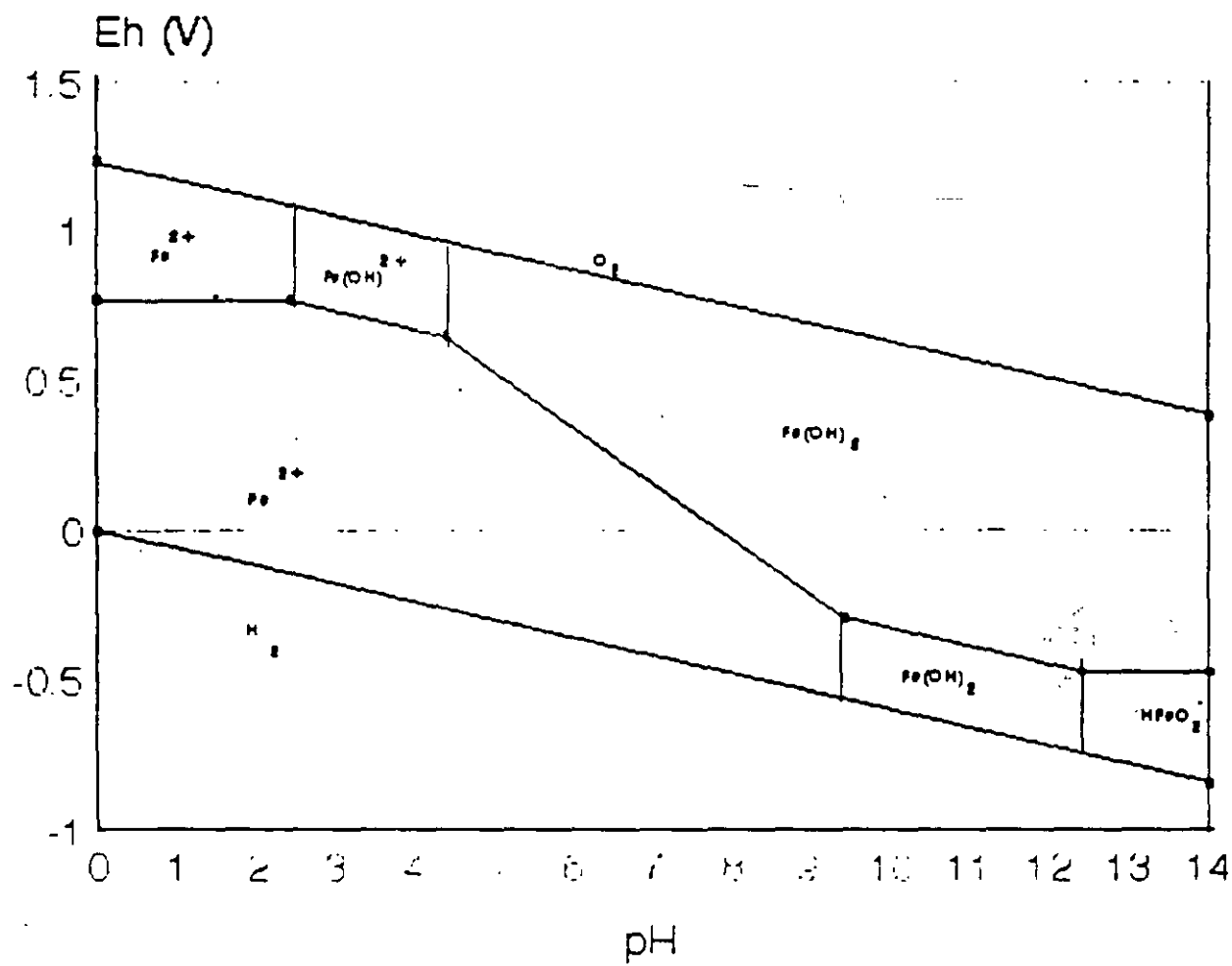


Figura 3



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***MANEJO AMBIENTAL  
DE LAS INDUSTRIAS***

**PRESENTADO POR: M. en I. ANTONIO CARDONA BENAVIDES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**





---

## **MANEJO AMBIENTAL DE LAS INDUSTRIAS**

La ecología y el medio ambiente se han convertido en temas de gran relevancia para la mayoría de los habitantes de la República Mexicana. Su importancia se deriva de lo que años atrás fuera una moda que hoy en día se ha convertido en una necesidad real para los procesos y actividades productivas que se realizan a lo largo y ancho de nuestro territorio. La popularidad del término ecología ha derivado a un sinnúmero de áreas, productos y servicios, a tal grado que hoy en día es común oír hablar de tal o cual producto ecológico, ya sea un refrigerador, una caja de cartón, un automóvil, una torta o un sandwich ecológico, o bien las ya famosas tintorerías o los cines ecológicos que tanta popularidad han alcanzado.

Antes de analizar la problemática que existe entre el medio ambiente y el desarrollo de los procesos productivos, intentaré hacer referencia al concepto ecológico y lo más apropiado, consiste en definir a la ecología. Existen muchas definiciones para el término ecología, pero tal vez la más adecuada sea la que establece que la ecología es la ciencia que estudia las relaciones de los organismos con el medio en el que habitan. Bajo este concepto es difícil hablar o entender cómo es, o cómo debe ser un refrigerador o un cine ecológico, o cómo se protege a la ecología, cuando ésta es una ciencia, sin embargo, resultaría sensato hablar de un producto menos contaminante que emplea tal o cual sistema que le permite reducir las emisiones contaminantes, aquel que no utiliza tal o cual sustancia dañina al medio ambiente, y por consiguiente es un producto "más amable al ambiente", o bien que tal o cual proceso o acciones están encaminadas a proteger el medio ambiente, más no a la ecología.

Por otra parte, las empresas enfrentan cada vez mayores y más difíciles retos y a la crisis económica que actualmente vivimos, debemos añadir la crisis ambiental que también padecemos todos y cada uno de nosotros. En este sentido los empresarios tienen una nueva y difícil responsabilidad que consiste en incorporar prácticas y realizar inversiones que les permitan cumplir con la cada vez más estricta legislación ambiental

Muchos industriales piensan aún que el medio ambiente sigue siendo una moda pasajera y que las inversiones que pudieran realizar en materia ambiental representarían un gasto superfluo, pero deben tener en cuenta que un manejo ambientalmente adecuado de sus empresas, al que erróneamente se le ha denominado como "ecológico" puede representar ahorros sustanciales en sus procesos y actividades productivas. Pensemos simplemente en el industrial que sistemáticamente ha vertido desechos al suelo o a un río y que hoy en día de acuerdo a la legislación ambiental mexicana no solo debe implementar los procedimientos o sistemas que le permitan cumplir con las normas oficiales mexicanas en materia ambiental, sino que debe sanear los suelos o aguas que contaminó en procesos que le pueden tomar varios años a un alto costo, o bien en el industrial que debe pagar para que se lleven sus residuos como cartón, madera, vidrio o metal, cuando mediante la incorporación de sencillas prácticas que le permitan separar los residuos por componentes puede obtener un beneficio económico de la venta de ellos y contribuir a reducir el problema que se deriva de la generación de residuos sólidos industriales.

Un manejo ambientalmente adecuado de las actividades y procesos productivos de una empresa le permite al industrial prevenir en vez de remediar o en su caso minimizar los efectos que pudieran derivarse de un siniestro que en cualquier momento pudiera suceder ya sea por causas asociadas a los procesos y actividades que desarrolla, o por causas ajenas, como una inundación, un temblor o un huracán por citar algunos ejemplos, además de crear una conciencia ambiental entre sus empleados y los habitantes de zonas cercanas a su industria

Para ejemplificar tan solo uno de los problemas a los que me he referido, tomaré como ejemplo el de un tanque con un combustible o una sustancia química que se emplea en el proceso productivo y que por un defecto en una válvula o corrosión en la pared del tanque se derrama la sustancia que se almacena en él



---

y al no contar con un bordo de contención, la fuga se extiende hacia afuera, contaminando el suelo, subsuelo, el acuífero, o un río. En este caso el industrial no solo perderá la materia prima que almacenaba, sino que tendrá que manifestar el accidente ante las autoridades ambientales, realizar un saneamiento de los suelos y aguas afectadas y enviar los residuos que se generen en la remediación de los suelos y aguas afectadas a un confinamiento autorizado para residuos peligrosos a costo extremadamente alto, que pudiera haberse evitado a un bajo costo si se contara con una fosa o un borde para contener los derrames y con un programa de mantenimiento apropiado.

La práctica más común a la que recurren los industriales para identificar los problemas ambientales de sus empresas y posteriormente implementar las medidas correctivas reside en la realización de una auditoría ambiental. La auditoría ambiental consiste en una revisión de la documentación con la que la empresa cuenta en materia ambiental, una revisión exhaustiva de los procesos y actividades productivas que se desarrollan en ella y una investigación de la legislación ambiental aplicable para el giro industrial y para las características y particularidades de la empresa. De esta manera, es posible identificar las áreas o prácticas en las que existe una inobservancia de las leyes, reglamentos y normas oficiales mexicanas en materia ambiental para posteriormente definir las estrategias y líneas de acción que permitan implementar las medidas que conduzcan a un manejo ambientalmente adecuado de la empresa.

Afortunadamente cada vez existe una mayor conciencia entre los empresarios e industriales para enfrentar y resolver los problemas ambientales y en este sentido, debe reconocerse que desde hace mucho tiempo existen los empresarios preocupados por heredarles a sus hijos un ambiente más limpio y sano y que desde años atrás conocían y sabían de sus problemas de contaminación ambiental, tales como la descarga de aguas residuales sin tratamiento alguno o la emisión de agentes contaminantes a la atmósfera, pero que desafortunadamente no tenía a quien recurrir, ni existía tampoco la legislación ambiental que rige hoy en día. En la actualidad, la demanda de estos servicios, ha dado lugar a la creación de un número cada vez mayor de empresas dedicadas a prestar sus servicios en materia de consultoría ambiental, ya sea para regularización de trámites y registros ante las autoridades ambientales, para resolver problemas de contaminación a la atmósfera, al agua o al suelo, para eficientizar sus procesos y actividades productivas, para reemplazar compuestos o sistemas altamente contaminantes por equipos o sustancias que permitan reducir los índices de contaminación, para reducir el riesgo ambiental asociado a procesos y actividades altamente peligrosas, o simple y sencillamente para implementar prácticas como la separación de residuos sólidos y generar recursos extraordinarios para eficientizar sus actividades productivas.

Otra de las áreas en las que cada vez existe una mayor demanda reside en la realización de auditorías ambientales de transferencia de propiedad, esto es que aquel inversionista que desea adquirir un predio, una planta productiva, o acciones de una empresa, solicita la realización de una auditoría ambiental que le permita identificar el estado que guarda esta en materia ambiental y tomar una decisión adecuada para tal fin. En la práctica muchos inversionistas se han encontrado con la triste realidad de haber comprado un problema ambiental cuya solución puede costarles mucho más de lo que invirtieron para su adquisición. Los trabajos de remediación y saneamiento de suelo, subsuelo, acuíferos y cuerpos de agua afectados por problemas de contaminación son evidentemente otra de las áreas en las que las firmas de consultoría ambiental ofrecen sus servicios.

Finalmente, la formulación de estudios de impacto ambiental para el desarrollo de nuevas obras o actividades o de estudios de riesgo, requeridos por las autoridades competentes para identificar de manera previa a su realización los impactos ambientales que estas pudieran ocasionar y proponer las medidas de mitigación y prevención correspondientes, es otro de los campos de acción del consultor ambiental.

\* Artículo publicado en la Revista *Mundo Celular*. Abril de 1995

# **LEGISLACION AMBIENTAL MEXICANA**

**Preparado por:  
ICF Kaiser Servicios Ambientales, S.A. de C.V.**

**Septiembre de 1996**

Petitérico Sur # 3343 Desp - 301. San Jerónimo Lídice, C.P. 10200, México, D.F. Tel. (Fax): 683-3908, 668-4871  
Capitán Caldera # 410. Col. Tequisquapan, C.P. 78200, San Luis Potosí, S.L.P. Tel (Fax): (48) 17-5930, 11-2254  
Av. Nader, Edif Madrid, Of. 28 Lote 29; Mzna. 1; S.M. 2 Cancún, Q Roo, C.P. 77500 Tel (Fax): (98) 87-4828



## **Legislación Ambiental Mexicana**

La Política Ambiental Mexicana se fundamenta en el reconocimiento de la necesidad de vincular el crecimiento económico con la protección al ambiente. Se parte de la convicción de que es posible lograr que los procesos industriales, los usos de la energía y la utilización productiva de los recursos naturales requeridos para impulsar la expansión económica sean cada vez más limpios, eficientes y respetuosos del ambiente

México se ha comprometido con la tarea de atender y resolver problemas ambientales con implicaciones transfronterizas o de repercusión global. Para ello ha suscrito numerosos convenios bilaterales y multilaterales e instrumentado diversos programas, en la aplicación de los cuales ha obtenido reconocimiento internacional por sus logros.

### **Descripción General del Marco Legislativo en Materia Ambiental.**

La base del sistema jurídico mexicano se encuentra en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos o la Carta Magna. De esta norma fundamental, promulgada el 5 de febrero de 1917 y reformada más de 400 veces, derivan las normas jurídicas específicas, siguiendo una jerarquización tal, que cada una valida y fundamenta a otra inferior, y ésta a su vez da origen a otra u otras.

Al amparo de la segunda reforma fue promulgada la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en 1988; así como leyes locales de las 31 Entidades Federativas que integran al Pacto Federal Mexicano; los Reglamentos a la Ley General y las Normas Oficiales Mexicanas para proteger el medio ambiente.

El Sistema Jurídico en México se encuentra estructurado jerárquicamente de la siguiente forma:

- A. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- B. Leyes Reglamentarias de la Constitución
  - I. Leyes reglamentarias de artículos constitucionales.
  - II. Leyes que emanan de conceptos constitucionales.



### C. Reglamentos

- I. Expedidos por el Ejecutivo, especializando y especificando los principios de las leyes reglamentarias o especiales.
- II. Reglamentos autónomos

### D. Normas

A continuación se presenta una descripción de la legislación más sobresaliente en materia ambiental, incluyendo leyes y convenios internacionales, al igual que una descripción de las instituciones gubernamentales con responsabilidad en la materia.

#### **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, sus Reglamentos y NOMs**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) fue publicada el 28 de enero de 1988 en el *Diario Oficial de la Federación (DOF)*. Esta Ley sienta las bases para reglamentar los principios constitucionales en la materia y está compuesta por 194 artículos, divididos en seis Títulos. La LGEEPA es por una parte una Ley Federal sobre protección del ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico, y por la otra una ley que descentraliza ciertas atribuciones para los gobiernos locales.

La LGEEPA señala que son asuntos de competencia federal los de alcance general en la Nación o de interés de la Federación, y enumera cuáles son estos asuntos; describe las facultades de las Entidades Federativas; establece las facultades de la Secretaría de Desarrollo Social, (SEDESOL); hoy Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (SEMARNAP); y por último establece la relación de las atribuciones de la SEMARNAP con las del Departamento del Distrito Federal (D.D.F.).

La política ecológica en México exige, a través de la LGEEPA, sus Reglamentos y Normas Oficiales Mexicanas (NOMs), una serie de requisitos a toda actividad industrial, comercial o antropogénica que por sus características emita o pueda emitir materia o energía que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural. Estos requisitos se encuentran contenidos en la LGEEPA en los Capítulos de su Título Cuarto.

La LGEEPA ha dado fundamento a cinco Reglamentos sobre: Evaluación del Impacto Ambiental; Residuos Peligrosos; Transporte Terrestres de Materiales y Residuos Peligrosos; Prevención y Control de Contaminación de la Atmósfera; y Contaminación Generada por los Vehículos Automotores que Circulan en el D.F. y Zona Metropolitana. Además, la LGEEPA otorgó vigencia jurídica al Reglamento



para la Protección y Control del Medio Ambiente Contra la Contaminación Originada por la Emisión de Ruido. La LGEEPA ha dado fundamento también a las NOMs en materia ambiental.

A partir del 16 de julio de 1992 entró en vigor la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN) por lo que se hizo necesario replantear todas las Normas Técnicas Ecológicas expedidas por la entonces SEDUE y SEDESOL, hoy en día reestructurada en la SEMARNAP, así como las Normas Técnicas Sanitarias expedidas por la Secretaría de Salud, publicadas previamente en el país. Con este replanteamiento se advierte que la expedición de Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) de carácter obligatorio, requiere una fundamentación científico técnica, de costo-beneficio y/o de protección al consumidor.

Con las modificaciones derivadas de la LFMN, las Normas Técnicas Ecológicas y Sanitarias dejaron de estar vigentes en el mes de octubre de 1993, para transformarse en Normas Oficiales Mexicanas, con el propósito de armonizar los procedimientos para su elaboración y reflejar los intereses de los diversos sectores involucrados.

Para lograr las modificaciones hechas a las Normas Técnicas Ecológicas derivadas de la LFMN, se creó la **Comisión Nacional de Normalización** como órgano responsable de instrumentar la política de normalización y coordinar las actividades que en la materia corresponda realizar a las distintas dependencias de la Administración Pública Federal.

El 29 de marzo de 1993 se publicó el Programa Nacional de Normalización, el cual incluye un **Comité Consultivo Nacional** integrado por miembros del sector público, industrial y académico, especialistas en la materia.

El Comité Nacional de Normalización para la Protección Ambiental está integrado por siete subcomités: Aprovechamiento Ecológico de los Recursos Naturales; Ordenamiento Ecológico; Materiales y Residuos Peligrosos, Aire, Agua, Riesgo Ambiental y Energía Contaminante.

Dichos subcomités operan a través de 14 grupos de trabajo, los cuales elaboraron 141 NOMs ambientales para cubrir el Programa Normativo de 1993. El Comité publicó en el DOF un total de 64 proyectos de NOM: 13 en materia de aire (23 de junio de 1993); 33 en materia de agua (28 de junio de 1993); 7 en materia de residuos peligrosos (2 de julio de 1993); 4 más en materia de recursos naturales (2 de agosto de 1993) y 5 regulan el monitoreo.



## **Distribución de Competencias.**

La distribución de competencias en materia ambiental entre los 3 niveles de gobierno que emanan del texto constitucional, ha dado lugar a tres sistemas normativos de protección al ambiente, el federal, el estatal y el municipal, no estando siempre definidos de manera categórica los límites de estos tres niveles competenciales. Aunado a lo anterior, el estudio y aplicación del derecho ambiental se dificulta por su complejidad, dispersión, diversidad y por la gran cantidad de normas existentes, así como por la carencia de orientaciones doctrinales y jurisprudenciales

En materia ambiental las Entidades Federativas sólo pueden legislar sobre aquellos aspectos que constitucionalmente no han sido reservados a la Federación, o bien, sobre aquellos aspectos que el Congreso Federal les delegó en la LGEEPA, y en este último caso sólo pueden hacerlo para establecer procedimientos administrativos que permitan la aplicación de la Ley Federal.

El Artículo 6º de la LGEEPA establece las atribuciones de las Entidades Federativas y Municipios en materia ambiental.

En suma, en materia ambiental no existe ni concurrencia ni coincidencia de facultades legislativas, cada uno de los tres niveles de gobierno tiene perfectamente delimitado su ámbito de atribuciones. Sin embargo, se presenta con frecuencia la invasión de atribuciones legislativas por parte de los congresos locales.

## **Leyes Sectoriales**

La LGEEPA establece las características generales para proteger y preservar el equilibrio ecológico, no obstante la competencia federal en otras materias no contempladas dentro de la LGEEPA está encomendada a otras dependencias de la Administración Pública Federal en el texto de otras leyes. Estas Leyes son las siguientes: Ley de Aguas Nacionales; Ley Forestal; Ley de Pesca; Ley Federal sobre Metrología y Normalización; Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear; Ley Minera; Ley de Vías Generales de Comunicación; Ley General de Salud y; Ley de Caza.

## **Descripción General del Marco Institucional en Materia Ambiental.**

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 1995-2000 establece como un reto a la sociedad y estado asumir plenamente las responsabilidades y costos de un aprovechamiento duradero de los recursos naturales renovables y del medio ambiente que permita mejor calidad de vida



---

para todos, propicie la superación de la pobreza, y contribuya a una economía que no degrade sus bases naturales de sustentación, dicho en otras palabras, se orienta en materia ambiental hacia un desarrollo sustentable.

Las oportunidades de inversión en el rubro ambiental han sido objeto de diversas modificaciones derivadas de la debacle financiera de la que ha sido objeto la presente administración del Presidente Zedillo, derivada en gran medida de la devaluación de la moneda mexicana frente a las divisas extranjeras. En este sentido se espera que los procesos de privatización previstos por el gobierno federal se aceleren y se amplíen a otras áreas adicionales a las ya contempladas inicialmente como la petroquímica secundaria, encaminándose hacia algunos sectores como el aeroportuario, el de generación de energía eléctrica, además de los servicios portuarios, ferroviarios y carreteros que ya se tenían contemplados desde la administración anterior.

La Ley Orgánica de la Administración Pública Federal se reformó en los inicios de la presente administración del Presidente Zedillo llevándose a cabo la reestructuración de diversas dependencias de gobierno como la de las: Secretaría de Pesca; de Energía, Minas e Industria Paraestatal; de Agricultura y Recursos Hidráulicos y; de la Contraloría General de la Federación que fueron reorganizadas en las siguientes secretarías: del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; de Energía; de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y; de Contraloría y Desarrollo Administrativo, respectivamente.

Desde una perspectiva ambiental, las modificaciones más relevantes se centran en lo que fuera la Secretaría de Pesca convertida en la actual Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, dependencia a la que en su esfera de competencia le corresponde el despacho de los siguientes asuntos:

- I. Fomentar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales, con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable;
- II. Formular y conducir la política nacional en materia de recursos naturales, siempre y cuando no estén encomendados expresamente a otra dependencia, así como en materia de ecología, saneamiento ambiental, agua, regulación ambiental del desarrollo urbano y desarrollo de la actividad pesquera, con la participación que corresponda a otras dependencias y entidades;
- III. Administrar y regular el uso y promover el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que correspondan a la Federación con excepción del petróleo y todos los carburos de hidrógeno líquidos, sólidos y gaseosos, así como minerales radioactivos;





- 
- IV Establecer con la participación que corresponda a otras dependencias y a las autoridades estatales y municipales normas oficiales mexicanas sobre la preservación y restauración de la calidad del medio ambiente sobre los ecosistemas naturales; sobre el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y de la flora y fauna terrestre y acuática, sobre descargas de aguas residuales, y en materia minera; sobre materiales peligrosos y residuos sólidos y peligrosos;
- V. Vigilar y estimular, en coordinación con las autoridades federales, estatales y municipales, el cumplimiento de las leyes, normas oficiales mexicanas y programa relacionados con recursos naturales, medio ambiente, aguas, bosques, flora y fauna silvestre, terrestre y acuática y pesca; y demás materias competencia de la Secretaría, así como, en su caso, imponer las sanciones correspondientes;
- VI Proponer al Ejecutivo Federal el establecimiento de áreas naturales protegidas, y promover para su administración y vigilancia, la participación de autoridades federales o locales, y de universidades, centros de investigación y particulares;
- VII Organizar y administrar áreas naturales protegidas, y supervisar las labores de conservación, protección y vigilancia de dichas áreas cuando su administración recaiga en gobiernos estatales y municipales o en personas físicas o morales;
- VIII. Ejercer la posesión y propiedad de la Nación en las playas, zona federal marítimo terrestre y terrenos ganados al mar;
- IX. Intervenir en foros internacionales respecto de las materias de competencia de la Secretaría, con la participación que corresponda a la Secretaría de Relaciones Exteriores, y proponer a ésta la celebración de acuerdos y tratados internacionales en tales materias;
- X. Promover el ordenamiento ecológico del territorio nacional, en coordinación con las autoridades federales, estatales y municipales, y con la participación de los particulares;
- XI. Evaluar y dictaminar las manifestaciones de impacto ambiental de proyectos de desarrollo que le presenten los sectores público, social y privado; resolver sobre los estudios de riesgo ambiental, así como los programas para la prevención de accidentes con incidencia ecológica;
- XII. Elaborar, promover y difundir las tecnologías y formas de uso requeridas para el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y sobre la calidad ambiental de los procesos productivos, de los servicios y del transporte;



- XIII. Fomentar y realizar programas de reforestación y restauración ecológica, con la cooperación de autoridades federales estatales y municipales, en coordinación en su caso, con la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural;
- XIV. Evaluar la calidad del ambiente y establecer y promover el sistema de información ambiental, que incluirá los sistemas de monitoreo atmosférico, de suelos y de cuerpos de agua de jurisdicción federal, y de los inventarios de recursos naturales y de población de fauna silvestre, con la cooperación de autoridades estatales y municipales, las instituciones de investigación y educación superior, y las dependencias y entidades que correspondan;
- XV. Desarrollar y promover metodologías y procedimientos de valuación económica del capital natural y de los bienes y servicios ambientales que éste presta, y cooperar con dependencias y entidades para desarrollar un sistema integrado de contabilidad ambiental y económica;
- XVI. Conducir las políticas nacionales sobre cambio climático y sobre protección de la capa de ozono;
- XVII. Promover la participación social y de la comunidad científica en la formulación, aplicación y vigilancia de la política ambiental, y concertar acciones e inversiones con los sectores social y privado para la protección y restauración del medio ambiente;
- XVIII. Realizar el censo de predios forestales y silvopastoriles y de sus productos; levantar, organizar y manejar la cartografía y estadística forestal, así como llevar el registro y cuidar la conservación de los árboles históricos y notables del país;
- XIX. Proponer, y en su caso resolver sobre el establecimiento y levantamiento de vedas forestales, de caza, y pesca, de conformidad con la legislación aplicable, y establecer el calendario cinegético y el de aves canoras y de ornato;
- XX. Imponer las restricciones que establezcan las disposiciones aplicables, sobre la circulación o tránsito por el territorio nacional de especies de la flora y fauna silvestres procedentes del o destinadas al extranjero, y promover ante la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial el establecimiento de medidas de regulación o restricción a su importación o exportación, cuando se requiera para su conservación o aprovechamiento,
- XXI. Dirigir los estudios, trabajos y servicios meteorológicos, climatológicos, hidrológicos y geohidrológicos, así como el Sistema Meteorológico Nacional, y participar en los convenios internacionales sobre esta materia;



---

XXII. Coordinar, concertar y ejecutar proyectos de formación, capacitación y actualización para mejorar la capacidad de gestión ambiental y el uso sustentable de recursos naturales; estimular que las instituciones de educación superior y los centros de investigación realicen programas de formación de especialistas, proporcionen conocimientos ambientales e impulsen la investigación científica y tecnológica en la materia; promover que los organismos de promoción de la cultura y los medios de comunicación social contribuyan a la formación de actitudes y valores de protección ambiental y de conservación de nuestro patrimonio natural; y en coordinación con la Secretaría de Educación Pública, fortalecer los contenidos ambientales de planes y programas de estudios y los materiales de enseñanza de los diversos niveles y modalidades de la educación;

XXIII. Organizar, dirigir y reglamentar los trabajos de hidrología en cuencas, cauces y alveólos de aguas nacionales, tanto superficiales como subterráneos, conforme a la ley en materia;

XXIV. Administrar, controlar y reglamentar el aprovechamiento de cuencas hidráulicas, vasos, manantiales y aguas de propiedad nacional, y de zonas federales correspondientes, con exclusión de los que se atribuya expresamente a otra dependencia; establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares que deban satisfacer las descargas de aguas residuales, cuando sean de jurisdicción federal; autorizar, en su caso, el vertimiento de aguas residuales en el mar, en coordinación con la Secretaría de Marina, cuando provenga de fuentes móviles o plataformas fijas, en cuencas, cauces y demás depósitos de aguas de propiedad nacional; y promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura y los servicios necesarios para el mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas;

XXV. Estudiar, proyectar, construir y conservar, con la participación que corresponda a la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, las obras de riego, desecación, drenaje, defensa y mejoramiento de terrenos y las de pequeña irrigación, de acuerdo con los programas formulados y que compete realizar al Gobierno Federal, por sí o en cooperación con las autoridades estatales y municipales o de particulares;

XXVI. Regular y vigilar la conservación de las corrientes, lagos y lagunas de jurisdicción federal, en la protección de cuencas alimentadoras y las obras de corrección torrencial;

XXVII. Manejar el Sistema Hidrológico del Valle de México;

XXVIII. Controlar los ríos y demás corrientes y ejecutar las obras de defensa contra inundaciones;



- XXIX Organizar y manejar la explotación de los sistemas nacionales de riego, con la intervención de los usuarios, en los términos que lo determinen las leyes, en coordinación, en su caso, con la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural;
- XXX Ejecutar las obras hidráulicas que deriven de tratados internacionales;
- XXXI Intervenir, en su caso, en la dotación de agua a los centros de población e industrias; fomentar y apoyar técnicamente el desarrollo de los sistemas de agua potable, drenaje, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales que realicen las autoridades locales; así como programar, proyectar, construir, administrar, operar y conservar por sí, o mediante el otorgamiento de la asignación o concesión que en su caso se requiera, o en los términos del convenio que se celebre, las obras y servicios de captación, potabilización, tratamiento de aguas residuales, conducción y suministro de aguas de jurisdicción federal;
- XXXII Regular la explotación pesquera, y expedir las normas oficiales mexicanas que correspondan así como promover, fomentar y asesorar técnicamente la producción, industrialización y comercialización de sus productos en todos sus aspectos, en coordinación con las dependencias competentes;
- XXXIII Estudiar, proyectar, construir y conservar las obras de infraestructura pesquera y de acuicultura que requiera el desarrollo del sector pesquero, con la participación de las autoridades estatales, municipales o de particulares;
- XXXIV Regular la formación y organización de la flota pesquera, así como las artes de pesca, expidiendo al efecto las normas oficiales mexicanas que corresponda;
- XXXV Participar con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, en la determinación de los criterios generales para el establecimiento de los estímulos fiscales y financieros necesarios para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente;
- XXXVI Realizar directamente y autorizar conforme a la ley, lo referente a acuicultura; así como establecer viveros, criaderos y reservas de especies acuáticas, con la participación, en su caso, de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural;
- XXXVII Promover la creación de zonas portuarias pesqueras, así como su conservación y mantenimiento;



---

XXXVIII. Promover en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, el consumo humano de productos pesqueros, asegurar el abasto y la distribución de dichos productos, y de materia prima a la industria nacional;

XXXIX. Otorgar contratos, concesiones, licencias, permisos, autorizaciones, asignaciones, y reconocer derechos, según corresponda, en materia de: aguas; forestal; ecológica; pesquera; explotación de la flora y fauna silvestre y; sobre playas, zona federal marítimo terrestre y terrenos ganados al mar;

XI. Diseñar y operar, con la participación que corresponda a otras dependencias y entidades, la adopción de instrumentos económicos para la protección, restauración y conservación del medio ambiente, y;

XII. Los demás que le atribuyan expresamente las leyes y reglamentos.

Entre las atribuciones que se le confieren a la nueva dependencia, la SEMARNAP, destacan las inherentes a recursos forestales e hidráulicos que anteriormente le correspondían a la SARH.

Por otra parte, es importante señalar que en el mes de Diciembre de 1994 se publicó la Ley que reforma deroga y adiciona diversas disposiciones fiscales, entre las que destacan por su relevancia en el área ambiental, las asociadas a la posibilidad de deducir las aportaciones para fondos destinados a investigación y desarrollo en tecnología, así como las aportaciones a fondos destinados a programas de capacitación de sus empleados.

En materia ambiental, el 3 de Abril de 1996, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el Decreto por el que se aprueba el programa sectorial de mediano plazo denominado "Programa de Medio Ambiente, 1995-2000" (PMA).

El PMA esta compuesto en esencia de 6 capítulos a saber:

- I Marco Jurídico;
- II El Reto del Desarrollo Sustentable, Panorama General;
- III Líneas de Diagnóstico;



- 
- IV Objetivo General y Objetivos Particulares;
  - V Instrumentos para la Política Ambiental;
  - VI Estrategias, Proyectos y Acciones Prioritarias

El PMA, parte del Plan Nacional de Desarrollo (PND) y contempla y se orienta hacia un desarrollo sustentable, basado en principios orientadores para hacer frente al desafío de diseñar un futuro más racional, estable y equitativo. El desarrollo sustentable compatibiliza la satisfacción de las necesidades y aspiraciones sociales de hoy con el mantenimiento de equilibrios biofísicos y sociales indispensables para el propio proceso de desarrollo actual y futuro. El desarrollo sustentable, configura un nuevo paradigma que se articula en torno a un proceso gradual de transición hacia formas cada vez más racionales de utilización de los recursos naturales.

Partiendo de lo expuesto anteriormente, es posible analizar la estructura de la actual SEMARNAP. El Reglamento Interior de la SEMARNAP, publicado en el DOF del 8 de Julio de 1996 establece que para el estudio, planeación y despacho de los asuntos que le competen a la SEMARNAP, ésta tendrá las siguientes unidades administrativas:

*Secretaría de Despacho*

*Subsecretaría de Planeación*

*Subsecretaría de Recursos Naturales*

*Subsecretaría de Pesca*

*Oficialía Mayor*

*Unidad Coordinadora de Análisis Económico y Social*

*Unidad Coordinadora de asuntos Internacionales*



---

*Unidad de Contraloría Interna*

*Dirección General de Asuntos Jurídicos*

*Dirección General de Comunicación Social*

*Dirección General de Planeación*

*Dirección General de Programas Regionales*

*Dirección General del Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable*

*Dirección General de Estadística e Informática*

*Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre*

*Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos*

*Dirección General Forestal*

*Dirección General de Política y Fomento Pesquero*

*Dirección General de Administración de Pesquerías*

*Dirección General de Infraestructura Pesquera*

*Dirección General de Acuacultura*

*Dirección General de Recursos Humanos y Organización*

16



*Dirección General de Programación, Presupuesto y Evaluación*

*Dirección General de Administración*

*Delegaciones Federales y*

*Organos Administrativos Desconcentrados*

*Comisión Nacional del Agua*

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

*Instituto Nacional de Ecología*

*Procuraduría Federal de Protección al Ambiente*

*Instituto Nacional de la Pesca*

Para fines prácticos, se analizarán las funciones y atribuciones de los principales órganos desconcentrados de la SEMARNAP en materia ambiental.

### **Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP)**

La SEMARNAP cuenta con cinco órganos desconcentrados. Dos de ellos, son los que mayor injerencia tienen en materia ambiental:

1. El Instituto Nacional de Ecología (INE), el cual tiene facultades técnico-normativas;
2. La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEP), la cual cuenta con facultades para vigilar la correcta aplicación de la normatividad ambiental vigente en México, y para atender las demandas ciudadanas.





## **Instituto Nacional de Ecología (INE).**

Atribuciones del Instituto Nacional de Ecología:

- \* **Planeación Ecológica**
- \* **NórmAs Ambientales**
- \* **Recursos Naturales.**
- \* **Investigación y Desarrollo**

## **Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).**

La Procuraduría, órgano operativo de la SEMARNAP, esta facultada para ejercer las atribuciones siguientes:

- \* **Participación Social.**
- \* **Auditorías Ambientales.**
- \* **Verificación Normativa**

En cuanto a su responsabilidad en el área de verificación y cumplimiento, es importante resaltar que desde su creación en 1992, la PROFEPA ha ampliado sus actividades de manera muy significativa. Dentro de estas actividades se destacan el incremento en el número de inspecciones a instalaciones industriales y el Programa Voluntario de Auditorías Ambientales. Los esfuerzos de la PROFEPA se han orientado hacia las industrias consideradas de alto riesgo.

A pesar de las limitaciones señaladas, es importante anotar que durante los últimos años, como resultado de sus inspecciones la PROFEPA ha impuesto un gran número de multas y sanciones a diversos tipos de industrias. Estas sanciones han incluido clausuras temporales o permanentes de plantas y, en algunos casos, unidades de operación.

En 1992 la PROFEPA inició un Programa de Auditorías Ambientales a industrias de alto riesgo. Estas auditorías ambientales constituyen una evaluación detallada de todos los aspectos de la operación de una planta industrial que pueden ocasionar un impacto sobre la salud humana o el medio ambiente y tienen como finalidad identificar todo tipo de deficiencias, tanto a nivel de incumplimiento con la normatividad ambiental y de seguridad e higiene en el trabajo. Las auditorías son realizadas por una empresa de consultoría debidamente



---

autorizada por la PROFEPA. La empresa auditora debe ceñirse a los Términos de Referencia establecidos por la PROFEPA y es supervisada directamente por una empresa supervisora que representa a la PROFEPA en este proceso. A partir de las deficiencias identificadas y las acciones correctivas recomendadas por la empresa auditora, los representantes de la planta industrial auditada negocian un convenio con la PROFEPA para corregir dichas deficiencias según un calendario acordado por las partes.

El Programa de Auditorías Voluntarias empezó con un reducido número de industrias, consideradas como especialmente críticas desde un punto de vista de riesgo ambiental, las cuales fueron invitadas a participar por la PROFEPA, quién sufragó los costos. A la fecha, un número considerable de empresas que realizan actividades de alto riesgo ha participado en el programa (actualmente la empresa auditada es responsable del pago de los servicios prestados por las empresas auditora y supervisora). Muchas se encuentran en proceso de negociación del convenio con la PROFEPA y algunas ya están ejecutando las acciones correctivas necesarias para cumplir con los convenios respectivos.

#### **Comisión Nacional del Agua (CNA).**

El 16 de enero de 1989 se creó por decreto la Comisión Nacional del Agua (CNA) como órgano administrativo desconcentrado de la actual Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, la CNA tiene a su cargo, entre otras, las siguientes funciones:

1. Proponer la política hidráulica del país; formular y mantener actualizado el Programa Nacional Hidráulico y ejecutar el Sistema de Programación Hidráulica.
2. Fijar los criterios y lineamientos que permitan dar unidad y congruencia a los programas y acciones del Gobierno Federal en materia de agua.
3. Establecer y, en su caso, proponer las bases para la coordinación de acciones de las unidades administrativas e instituciones públicas relacionadas con el agua.
4. Administrar y regular, en los términos de la Ley, las aguas nacionales, la infraestructura hidráulica y los recursos que se le destinen.
5. Programar, estudiar, construir, operar y conservar obras hidráulicas y realizar las acciones que requiera el aprovechamiento integral

19



---

del agua

6 Manejar el Sistema Hidrológico del Valle de México.

7. Estudiar, programar y proyectar las obras de drenaje, control de ríos y aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la Cuenca del Valle de México, así como construir las obras de drenaje o aprovechamiento hidráulico y realizar acciones que para su desarrollo se requieran.

8 Asegurar y vigilar la congruencia entre los programas relacionados con el agua y la asignación de los recursos públicos para su ejecución; y

9. Estudiar, proponer y ejecutar, en su caso, las medidas de tipo financiero que permitan el desarrollo de la infraestructura y de los servicios hidráulicos del país.

20



## ***Legislación Específica en Temas de Interés***

### **Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.**

La calidad del aire comenzó a cobrar importancia en la década de los sesentas, principalmente en las urbes con zonas industriales como el Valle de México y Monterrey; sin embargo, no fue sino hasta la década de los ochenta en la que con la promulgación de la entonces Ley Federal de Protección al Ambiente, hoy en día abrogada y reemplazada por la LGEEPA y el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, que se intensificaron las acciones tendientes a prevenir y controlar la contaminación atmosférica en las distintas fuentes que la originan.

La Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera en México se encuentra regulada, a nivel Federal por:

- I. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)
- II. El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.
- III. Las Normas Oficiales Mexicanas en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera publicadas en el DOF.
- IV. La Ley General de Salud

En términos de lo dispuesto por el Artículo 1º Fracción VI de la LGEEPA, uno de los objetivos de esta Ley es precisamente la prevención y el control de la contaminación del aire; para ello, se establecen en primer lugar, los criterios que deberán observarse. Dichos criterios son los siguientes:

- "La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y regiones del país," y
- "Las emisiones de contaminantes a la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico." (Artículo 110)

Asimismo, la LGEEPA otorga a las autoridades un conjunto de facultades encaminadas a cumplir con los criterios antes anotados. Así, por ejemplo, a la Federación se le asignan entre otras, las siguientes atribuciones:

- La expedición de Normas Oficiales Mexicanas que establezcan los niveles máximos permisibles de emisión por contaminante y por fuente de

21



contaminación; para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire; para la certificación de los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera; para reducir las emisiones contaminantes de origen vehicular; y para el establecimiento de sistemas de verificación del parque vehicular, y;

- La determinación de los equipos de control de emisiones que deberán instalar los responsables de las fuentes contaminantes.

Asimismo, la LGEEPA establece que los gobiernos de las Entidades Federativas y de los Municipios les corresponde, en sus respectivos ámbitos de competencia, ejercer las siguientes atribuciones:

- Llevar a cabo acciones de prevención y control de la contaminación del aire en bienes, zonas y fuentes contaminantes de jurisdicción local.
- Incorporar los criterios para la protección de la atmósfera en las declaratorias de usos, destinos, reservas y provisiones que expidan; establecer y operar sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación, así como sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

La regulación de actividades relacionadas en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera es asunto de competencia federal, por tener alcance general en la Nación y ser de interés de la Federación, según lo señala el Artículo 5º Fracción XIV de la LGEEPA.

Cabe aclarar que aunque dicho instrumento hace referencia a diversas atribuciones tanto del Gobierno Federal, como de los gobiernos locales, sus preceptos se dirigen a regular las conductas humanas a través de las cuales se pretenden realizar o se realicen obras o actividades por las que se emitan a la atmósfera olores, gases y/o partículas sólidas o líquidas generadas en bienes o zonas federales o que provengan de fuentes federales.

#### **Fuentes Contaminantes de Jurisdicción Federal.**

De acuerdo con la legislación ambiental, existen dos tipos de fuentes contaminantes: las fijas y las móviles. Se entiende por fuente fija toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, o de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Las fuentes móviles son aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses integrales, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinaria no fijos con motores de combustión y similares, que con motivo de su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

El Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera establece una relación de las fuentes fijas que deben ser consideradas de jurisdicción federal. El Artículo 11, fracción II de este Reglamento, señala que son fuentes fijas de jurisdicción federal:

- a) Las instalaciones, obras o actividades industriales, comerciales y de servicios que realicen las dependencias y entidades de la Administración Pública



Federal

b) La industria del asbesto, así como las previstas en el Artículo 29, Fracción III de la LGEEPA. (Industria química, petroquímica, siderúrgica, papelera, azucarera, de bebidas, del cemento, automotriz y de generación y transmisión de electricidad).

Asimismo, el Artículo 28 de nuestra Carta Fundamental, prescribe como federales las siguientes áreas estratégicas: correos, telégrafos, radiotelegrafía, comunicación vía satélite, petróleo y demás hidrocarburos, petroquímica básica, minerales radioactivos, generación de energía nuclear, electricidad y ferrocarriles

Por otra parte, el Artículo 73 Constitucional, en su Fracción X, señala que son federales las siguientes materias: Hidrocarburos, petroquímica, minería, industria cinematográfica, comercio, juegos con apuestas y sorteos, intermediaciones y servicios financieros y energía eléctrica y nuclear.

En tercer lugar, el artículo 123 de la Constitución señala una serie de ramas industriales y de servicios que deben ser consideradas de jurisdicción federal, siendo éstas las siguientes: textil, cinematográfica; huleira; azucarera; minera; metalúrgica y siderúrgica; hidrocarburos; petroquímica; cementera, calera; automotriz, incluyendo autopartes mecánicas y eléctricas; química, incluyendo la química farmacéutica y medicamentos; celulosa y papel; de aceites y grasas vegetales; productora de alimentos, abarcando exclusivamente la fabricación de los que sean empleados, enlatados o envasados o que se destinen a ello; ferrocarrilera; maderera; vidriera exclusivamente por lo que se refiere a la fabricación de vidrio plano, liso o labrado, o de envases de vidrio y tabacalera

c) Asimismo, debemos considerar como fuentes fijas de jurisdicción federal a aquellas instalaciones, obras o actividades que, en términos de la propia normatividad ambiental sean consideradas como altamente riesgosas o en las que se manejen materiales o residuos peligrosos, en virtud de que en ambos casos, se trata de asuntos cuya regulación y control corresponde al Gobierno Federal.

d) La industria que se localice en la zona conurbada del Distrito Federal.

e) Las obras o actividades localizadas en una Entidad Federativa, cuyas emisiones a la atmósfera contaminen o afecten el equilibrio ecológico de otra u otras Entidades Federativas, cuando así los determine la SEMARNAP o lo solicite la Federación, el Estado afectado por las emisiones de contaminantes a la atmósfera

f) Las obras o actividades localizadas en el territorio nacional que puedan afectar el equilibrio ecológico de otros países.

g) En el Distrito Federal, son de jurisdicción federal todas las fuentes fijas, excepto las que funcionen como establecimientos mercantiles o para espectáculos públicos.



Como ya se mencionó, la emisión de olores, gases, así como de partículas sólidas o líquidas a la atmósfera que se generen por fuentes fijas, deberán ajustarse a los niveles máximos permisibles de emisión e inmisión por contaminantes y por fuentes de contaminación que se establezcan en las Normas Oficiales Mexicanas que al respecto se expiden

Dentro de las obligaciones de los responsables de fuentes fijas de jurisdicción federal se encuentran las siguientes: contar con la Licencia de Funcionamiento, emplear equipos y sistemas que controlen las emisiones a la atmósfera; integrar un inventario de sus emisiones contaminantes a la atmósfera para lo cual deberá llevar a cabo las mediciones respectivas; instalar plataformas y puertos de muestreo; llevar a cabo el monitoreo perimetral de sus emisiones contaminantes a la atmósfera; llevar una bitácora de operación y mantenimiento de sus equipos de proceso y de control, y; dar aviso anticipado a la SEMARNAP del inicio de operación de sus procesos en el caso de paros programados, y de inmediato, en el caso de que éstos sean circunstanciales, si ellos pueden provocar contaminación, así como en el caso de falla en el equipo de control.

#### **Fuentes Móviles de Jurisdicción Federal.**

El artículo II del Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, considera como fuentes móviles de jurisdicción federal las siguientes:

- Los vehículos automotores hasta en tanto no salgan de la planta de producción;
- El transporte público federal.

La legislación ambiental determina que las emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera generadas por las fuentes móviles, no deberán rebasar los niveles máximos permisibles de emisión que establezcan las Normas Oficiales Mexicanas respectivas.

Otro de los aspectos contemplados en la legislación ambiental, de ámbito federal, es el establecimiento de un sistema de información de la calidad del aire, el cual se integrará con los datos resultantes del monitoreo atmosférico que se realice tanto en el Distrito Federal como en cada una de las Entidades Federativas, así como de los inventarios de las emisiones contaminantes de fuentes fijas de jurisdicción federal y estatal.

Se prevé que los sistemas de monitoreo de la calidad del aire deberán sujetarse a las Normas Oficiales Mexicanas que se expidan. Sobre el particular, se encuentran en vigor NOMs a través de las cuales se establecen los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono, partículas suspendidas totales, ozono, bióxido de nitrógeno y bióxido de azufre, así como los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

El último aspecto contenido en la legislación federal ambiental, se refiere a la incineración a cielo abierto. De acuerdo con lo previsto en el Reglamento

24



---

en la materia corresponde al Gobierno Federal, a través de la SEMARNAP autorizar dicha actividad siempre que se cumplan con dos requisitos: que se realicen en zonas de jurisdicción federal y tenga por objeto adiestrar y capacitar al personal encargado del combate de incendios.

Los órganos de la Administración Pública que tienen relación con esta materia son, además de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), los siguientes: 1) Secretaría de Salud (SS); 2) Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS); 3) Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI); 4) Secretaría de Energía (SE); y 6) Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

La SEMARNAP requiere que las industrias presenten un inventario anual de emisiones al ambiente. La hoy SEMARNAP cuenta con un Instructivo para el diseño e instalación de puertos y plataformas para el muestreo de emisiones contaminantes originadas por las chimeneas de operaciones y procesos industriales con diámetros internos, iguales o mayores a 30 centímetros y sus equivalentes.

### **Prevención y Control de la Contaminación del Agua**

La prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos en México se encuentra regulada, a nivel Federal por:

- I. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), su Reglamento y Normas Oficiales Mexicanas.
- II. Ley de Aguas Nacionales
- III. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.
- IV. Ley de Salud
- V. Reglamento para el Control de la Contaminación de Aguas Marítimas por Derrames de Residuos y otros materiales.

La SEMARNAP tiene la autoridad prioritaria para establecer los criterios de calidad del agua y los estándares para descarga de aguas residuales a cuerpos de agua dulce y aguas marítimas. La Secretaría de Marina es responsable de controlar la calidad de las aguas marítimas nacionales y controlar la contaminación de barcos mexicanos y otros embarcaciones que se encuentren navegando en aguas nacionales.





---

La Comisión Nacional del Agua es responsable de clasificar los usos de los cuerpos de agua y determinar su capacidad de asimilación con el fin de asistir a la SEMARNAP en el establecimiento de los criterios de la calidad del agua y para el control de descargas contaminantes a cuerpos de agua de jurisdicción federal en coordinación con la SEMARNAP.

La Secretaría de Salud es responsable de emitir normas sanitarias y del control de contaminantes en las aguas de cualquier cuerpo receptor superficial o subterráneo, cuando éstas se destinen para uso o consumo humano.

El artículo 1º Fracción VI de la LGEEPA, establece en uno de sus objetivos la prevención y control de la contaminación del agua; para ello, se establecen en primer lugar, los criterios que deberán observarse. Dichos criterios son los siguientes:

- "La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país;
- "Corresponde al estado y a la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo;
- El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas;
- Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo, y
- La participación y corresponsabilidad de la sociedad es condición indispensable para evitar la contaminación del agua.

La Ley otorga a las autoridades un conjunto de facultades encaminadas a cumplir con los criterios antes anotados. Así, por ejemplo, se le asignan entre otras, las siguientes atribuciones:

- La expedición de Normas Oficiales Mexicanas que establezcan los niveles máximos permisibles del vertimiento de aguas residuales; para el almacenamiento de aguas residuales; para el uso o aprovechamiento de aguas residuales; para el tratamiento de aguas

26



residuales de origen urbano que se destinen a la industria y a la agricultura; para fijar condiciones particulares de descarga cuando se trate de aguas residuales generadas en bienes y zonas de jurisdicción federal y de aquellas vertidas directamente en aguas de propiedad nacional.

- La determinación de los procesos de tratamiento de las aguas residuales, en función del destino de esas aguas y las condiciones del cuerpo receptor
- Promover la incorporación de sistemas de separación de las aguas residuales de origen doméstico de aquellas de origen industrial en los drenajes de los centros de población, así como la instalación de plantas de tratamiento para evitar la contaminación de aguas.

Asimismo la LGEEPA establece que los gobiernos de las Entidades Federativas y de los municipios les corresponde, en sus respectivos ámbitos de competencia, ejercer las siguientes atribuciones:

- Llevar a cabo acciones de prevención y control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado;
- Requerir a quienes generen descargas a dichos sistemas y no satisfagan las Normas Oficiales Mexicanas que se expidan, la instalación de sistemas de tratamiento;
- Determinar el monto de los derechos correspondientes para que el municipio o autoridad estatal respectiva pueda llevar a cabo el tratamiento necesario, y en su caso, proceder a la imposición de las sanciones a que haya lugar, y
- Llevar y actualizar el registro de las descargas a las redes de drenaje y alcantarillado que administren, el que será integrado al Registro Nacional de Descargas a cargo de la SEMARNAP.

La regulación de actividades relacionadas en materia de prevención y control de la contaminación del agua es asunto de competencia federal, por tener alcance general en la Nación y ser de interés de la Federación, según lo señala el Artículo 5º Fracción XII de la LGEEPA.

Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local las siguientes descargas: de origen industrial; de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas; las derivadas de actividades agropecuarias; las que contengan desechos, sustancias



---

o residuos generados en las actividades de extracción de recursos no renovables; la aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas; las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y el vertimiento de residuos sólidos en cuerpos y corrientes de agua.

A la fecha se encuentran vigentes Normas Oficiales Mexicanas específicas que abarcan las siguientes industrias: termoeléctricas, azúcar de caña, refinerías, fertilizantes, plásticos y polímeros, harinas, cervezas y malta, asbestos de construcción, leche y derivados, vidrio plano y fibra, vidrio prensado y soplado, industria hulera, hierro y acero, industria textil, celulosa y papel, bebidas gaseosas, acabados metálicos, laminación de cobre, productos de aserradero, asbestos textiles, curtido de pieles, cárnicos, conservas alimenticias, papel celulosa virgen, papel fibra celulósica, restaurantes u hoteles, beneficio del café, harina y aceite, pescado, hospitales, jabones y detergentes, drenaje y alcantarillado, riego agrícola y riego para hortalizas.

La Ley de Aguas Nacionales tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. Esta Ley se inscribe en el marco de la modernización; planeación y programación de la administración y del uso eficiente y racional de los recursos hidráulicos.

Esta Ley menciona en su Título Séptimo el procedimiento para la prevención y control de la contaminación de las aguas, en el cual se señala que la Comisión Nacional del Agua tiene facultades para establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generen en bienes y zonas de jurisdicción federal, de aguas residuales vertidas directamente en aguas y bienes nacionales o en cualquier terreno cuando dichas descargas puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos y en los demás casos previstos en la LGEEPA realizando la inspección o fiscalización de las descargas de aguas residuales con el objeto de verificar el cumplimiento de esta Ley.

#### **Legislación de Residuos No Peligrosos.**

El artículo 134 fracción III de la LGEEPA establece que "es necesario racionalizar la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; e incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje".

El artículo 135 de la LGEEPA establece en materia de prevención y control del suelo la operación de los sistemas de limpia y disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios, así como la instalación y operación de confinamientos o depósitos de residuos.

Por su parte, el Artículo. 136 de la LGEEPA establece que los residuos que se acumulen y se depositen o infiltren en los suelos deberán



reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

- I. La contaminación del suelo;
- II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;
- III. Las alteraciones en el suelo que alteren su aprovechamiento, uso o explotación; y
- IV. Riesgos de salud".

Los residuos están regulados por otros ordenamientos jurídicos, entre los que deben mencionarse el Reglamento de Tránsito en Carreteras Federales, que dispone que está prohibido dejar o tirar, sobre la vía pública, basura, botellas, vidrios, clavos, tachuelas, alambre, latas, u otros materiales que puedan dañar a las personas o vehículos que hacen uso de las vías.

### **Legislación en Materia de Residuos Peligrosos**

#### **Legislación de Residuos Peligrosos**

La materia de Residuos Peligrosos en México se encuentra regulada en:

- I. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)
- I. El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos (RRP)
- III. El Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos.
- IV. Las Normas Oficiales Mexicanas en materia de Residuos Peligrosos publicadas en el DOF.
- V. La Ley General de Salud

29



VI. El Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios.

Para regular la gestión de los residuos peligrosos se publicaron siete NTEs entre 1988 y 1989, las cuales fueron derogadas y transformadas en las NOMs el 22 de octubre de 1993.

**NOM-052-ECOL/1993** establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

**NOM-053/ECOL/1993** establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

**NOM-054/ECOL/1993** establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la NOM-CRP-001/93.

**NOM-055/ECOL/1993** establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radiactivos.

**NOM-056/ECOL/1993** establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

**NOM-057/ECOL/1993** establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de confinamiento controlado para residuos peligrosos.

**NOM-058/ECOL/1993** establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

La Secretaría de Salud, en coordinación con la SEMARNAP autoriza el almacenamiento temporal de residuos peligrosos, siempre que dicho almacenamiento no constituya riesgo para la salud humana.

En lo relativo a residuos peligrosos que regula este Título queda prohibido de acuerdo al artículo 1235:



- 
1. Rebasar los niveles de concentración máxima permisible en aire, agua, suelo y alimentos y los límites máximos de exposición de las personas
  2. Su transporte con propósitos industriales o comerciales, junto con alimentos, bebidas, medicamentos o vestuario o con utensilios destinados a almacenar o producir alimentos y en general, con cualquier producto que se destine para uso o consumo humano.
  3. Su transporte con propósitos industriales o comerciales, junto con alimentos para animales domésticos.
  4. Su colocación, con propósitos comerciales, junto con cualquier otro producto que se destine para uso o consumo humano.
  5. Su venta a granel y su envase, almacenamiento o transporte en recipientes abiertos, deteriorados, inseguros, desprovistos de rótulo, sin etiquetas o con indicaciones ilegibles o en envases que se destinen para contener productos de consumo humano.
  6. Su transporte con propósitos industriales o comerciales, cuando no posean un embalaje adecuado para la protección de la salud durante su manejo
  7. La realización de cualquier parte de su proceso, en establecimientos dedicados al proceso de productos de uso o consumo humano.
  8. Su emisión o disposición final o temporal, así como la de sus residuos, en sitios que carezcan de licencia sanitaria.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS***

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL BOHÓRQUEZ  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# A Screening Protocol for Bioremediation of Contaminated Soil

**Jean A. Rogers**

James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc., Mannheim, Germany

**Dante J. Tedaldi**

Bechtel Environmental, Inc., San Francisco, CA 94105

**Michael C. Kavanaugh**

James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc., Walnut Creek, CA 94598

---

*A bioremediation treatability protocol for soil is presented which can provide feasibility study and remedial action engineers maximum information with respect to the viability and efficiency of bioremediation. The protocol, divided into two main phases, progressively evaluates the viability of biodegradation and the requirements for optimization of the process once implemented. Chemical and microbiological baseline conditions and the potential for contaminant degradation are assessed during Phase I screening. During Phase II the endpoint achievable and kinetics of the biodegradation reactions can be established with pan and slurry reactor tests for ex-situ systems or column tests for in-situ systems. Models are reviewed which can predict the rate of removal of organic constituents, and these data in conjunction with the Phase I and II may be used to estimate the potential time required to achieve cleanup standards, assess the relative importance of biological versus chemical removal mechanisms, and compare expected performance of alternative bioremediation methods.*

---

## INTRODUCTION

The screening protocol for evaluating and implementing bioremediation involves several distinct phases. Information about the contaminant and the contaminated media must be gathered during the site characterization and feasibility study stages. A treatability study should then be performed to develop information on the effectiveness of bioremediation for specific contaminants and media, and to optimize process parameters. Finally, contaminant removal rates and scale-up parameters should be considered before a project's design phase. A general bioremediation project timeline is shown in Figure 1. This paper presents a practical, phased approach for evaluating bioremediation as a cleanup alternative at hazardous waste sites, and presents the methodology for obtaining kinetic and equilibrium parameters from treatability study data.

## SITE CHARACTERIZATION/FEASIBILITY STUDY ISSUES

A wide range of information should be collected about a potential bioremediation site during the site characterization and feasibility study phases. The data gathered at this point are critical to the evaluation of bioremediation as a viable remedial technology. The factors which should be examined include the chemical characteristics of the contaminants and the chemical, physical, and microbiological characteristics of the site [1, 2]. A summary of these factors is presented in Table 1 (after Dupont [3]).

The data on contaminant and site characteristics gathered during this phase are used to decide on two fundamental issues prior to the commencement of the treatability study and design phases of the project. First, the information gathered provides



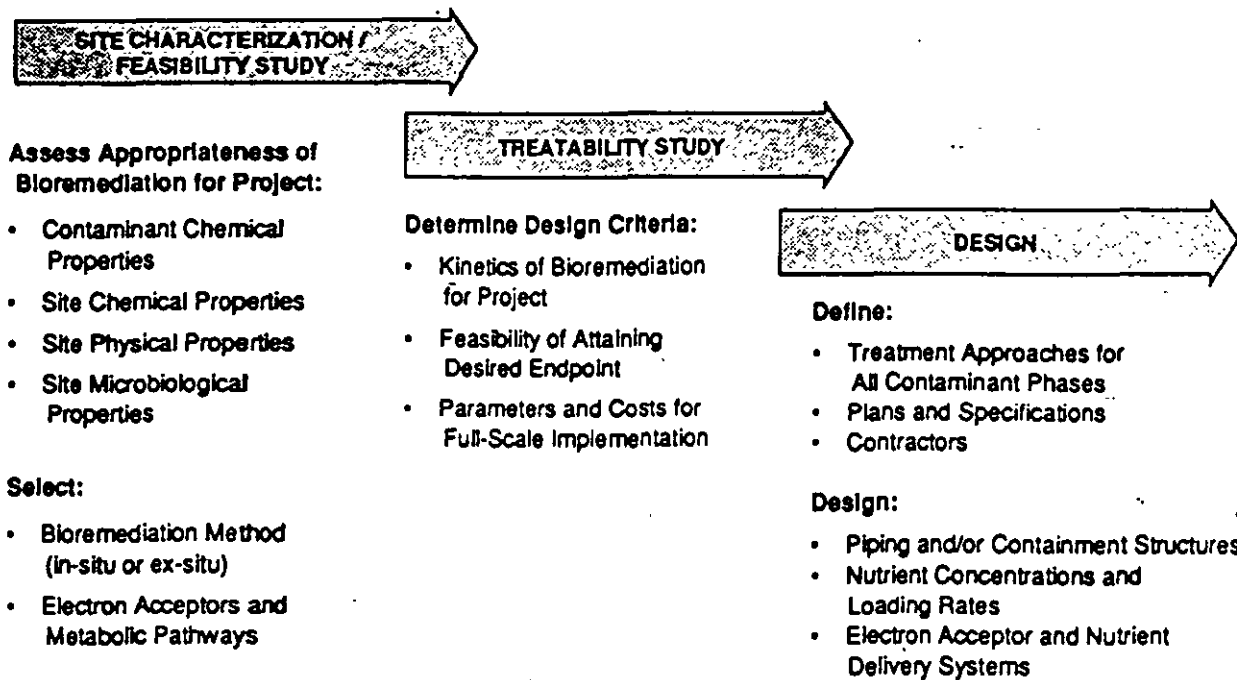


FIGURE 1. Bioremediation project timeline.

a basis for the selection of the most appropriate electron acceptor and redox environment (e.g., oxic/aerobic, anoxic/denitrifying, anaerobic/methanogenic [4, 5, 6]). The complete oxidation of a single organic chemical present at low concentrations in groundwater will typically require very large quantities of oxygen; often well beyond the ability of the system

to naturally replenish the depleted  $O_2$  supply. Thus, within these environments, addition of alternate electron acceptors or the addition of pure oxygen or hydrogen peroxide as a source of oxygen may be required to maintain the viability of the degradation process.

In cases where oxygen concentrations (either in soil gas or

Table 1 Summary of Important Site Characteristics

Soil/Groundwater Characteristics

Texture, pH, nutrient availability, competing carbon sources/oxygen depleters  
 Porosity, permeability, bulk density  
 Organic matter/organic carbon content  
 Cation exchange capacity, clay content  
 Dissolved oxygen, redox potential, metals (Mg, Cu, Ni, total/dissolved Fe & Mn)  
 Alkalinity, moisture content of soils  
 Microbial population—total, contaminant-degraders

Site Characteristics

Recharge rate/runoff potential/water balance  
 Depth of water table  
 Depth of contamination, areal extent of contamination  
 Site/soil temperature  
 Site surficial geology

Waste Characteristics

Whole waste  
 Existence of carrier fluid  
 Carrier fluid chemical composition  
 Carrier fluid density, viscosity -  
 Hazardous constituents  
 Soil concentration, dissolved concentration  
 Physical/chemical properties  
 Vapor pressure, boiling point, melting point, solubility,  
 Molecular weight, diffusivity  
 Distribution in soil environment  
 Soil/water, soil/air, air/water, carrier fluid/soil-air-water  
 Degradation rate constants  
 Biotic, abiotic

**Table 2 Electron Acceptors and Redox Potential in Bioremediation Systems**

Process	Electron Acceptor	Environment	Typical Redox Potential, mV	Order of Preference
Aerobic	O <sub>2</sub>	Aerobic metabolism	+ 810	1
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Denitrification	+ 750	2
Anaerobic	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfate reduction	- 220	3
	CO <sub>2</sub>	Methanogenesis	- 240	4

in dissolved in water) are insufficient to maintain aerobic respiration, nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), iron (Fe<sup>3+</sup>), and manganese (Mn<sup>2+</sup>) can act as electron acceptors if the organisms have the appropriate enzyme systems. However, these reactions can occur only if the organic matter (contaminant or cometabolite) is present in a soluble and consumable form, the bacteria present have a suitable supply of nutrients to maintain the biochemical process, and temperature variations are not excessive. Electron acceptors in microbial processes, typical values for redox potential of various modes of microbial metabolism, and the order of preference for use by microorganisms (after Vogel [7]) are presented in Table 2.

The second principal task is to use the information to identify the general method (in-situ or ex-situ) of bioremediation that is most appropriate for the project. A thorough understanding of contaminant chemical characteristics (such as molecular structure, degree of substitution, vapor pressure, and partition coefficient) is critical to the selection and design of an appropriate treatment system. The complexity and structure of the organic material often determines the likelihood of the molecule being degraded. In general, most simple petroleum hydrocarbons, phenols, and lower ringed polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) are degraded rapidly under aerobic conditions [8]. While a few chlorinated compounds can be used as primary substrates for growth many are transformed as secondary substrates. Less chlorinated compounds are more easily transformed by oxidation processes, while more highly chlorinated compounds are more easily transformed by reduction processes.

Furthermore, the estimated total mass in each phase (e.g., dissolved or solid), media chemical characteristics (including redox potential and organic carbon content), and site microbiological and hydrogeological characteristics should all be very well defined during the site investigation to ensure that treatment system design address the complexities of the site as well as those of the contaminants.

**BIOREMEDIATION METHOD**

The method of bioremediation to be employed is chosen based on the information gathered during the characterization phase of a project. Conventional treatment processes for con-

taminated soils typically rely on modifications and improvements to aerobic processes which were originally developed for land farming of petroleum wastes and for wastewater treatment. These processes consist of enriching an environment with a source of oxygen in the presence of the appropriate microorganisms to mineralize the contaminants to carbon dioxide and water. *Ex-situ* treatment systems include land treatment, biopiles/composting, and liquid/solids (slurry) reactors. *In-situ* systems include above-ground inoculation of extracted groundwater followed by injection after addition of nutrients and an electron acceptor; direct injection or infiltration of nutrients, electron acceptors and bacteria, and bioventing which seeks to stimulate biodegradation process through enhanced air flow (oxygen transfer) through the soil.

*In-situ* bioremediation offers the benefit of not requiring movement of contaminated soils to establish the appropriate conditions for contaminant degradation. Typically, nutrients, water and oxygen have to be supplied by injection wells to stimulate the indigenous organisms to metabolize the waste. *In-situ* bioventing may offer a less intrusive yet effective approach under certain circumstances. Implementation of *ex-situ* bioremediation avoids the difficulties imposed by hydrogeological constraints [9, 10]. *In-situ* systems are generally applicable where the hydrogeology of the site permits the transport of water, nutrients, and/or oxygen through the subsurface and permits the hydraulic containment of the contaminant [11]. In general, sites with conductivities greater than 10<sup>-4</sup> cm/s and fairly homogeneous stratigraphy are good candidates for *in-situ* bioremediation [12, 13]. If the contamination is shallow and can be excavated easily, or site physical and/or chemical characteristics prohibit *in-situ* bioremediation, an *ex-situ* system may be preferred.

Bouwer [14] has summarized the favorable and unfavorable characteristics affecting the feasibility of *in-situ* bioremediation (Table 3).

**COMPONENTS REQUIRED FOR BIODEGRADATION**

The basic components required for the degradation process include the following:

**Table 3 Favorable and Unfavorable Factors Affecting Bioremediation**

Favorable Chemical and Biological Factors	Unfavorable Chemical and Biological Factors
Small number of organic contaminants	Numerous contaminants, or a complex mixture of inorganic and organic compounds
Non-toxic concentrations	Toxic concentration
Diverse microbial populations	Sparse microbial activity
Suitable electron acceptor condition	Absence of appropriate electron acceptors
pH 6 to 8	pH extremes
Favorable Hydrogeologic Factors	Unfavorable Hydrogeologic Factors
Granular porous media	Fractured rock
High permeability (> 10 <sup>-4</sup> cm/sec)	Low permeability
Uniform mineralogy	Complex mineralogy with high organic carbon content
Homogeneous media	Heterogeneous media
Saturated conditions	Unsaturated strata, or intermittently saturated conditions

- Microorganisms
- Terminal electron acceptor
- Carbon source
- Nutrients
- Water.

The biotreatability study evaluates the presence of these components, and to what extent these components need to be supplemented. Tests which can be performed encompass both chemical analyses necessary for basic soil and groundwater characterization, and engineered studies to assess optimization of parameters, and to determine kinetic and/or equilibrium measurements.

Information from mass balance studies, including laboratory screening, bench- and pilot-scale studies, is combined with information concerning site and waste characteristics in order to determine applications and limitations of each technology. Information obtained from treatability studies should be focused on identifying ultimate limitations to the use of a remediation technology at a specific site, which usually are related to 1) time required for cleanup 2) level of cleanup attainable, and 3) cost of cleanup.

Environmental factors which will affect remediation efforts include:

- Oxygen and nutrient availability
- Soil moisture content
- The pH of the soil, groundwater, and hazardous waste
- Soil structure and organic content
- Temperature
- Solubility of the pollutants
- Concentration of toxic compounds
- Concentration of contaminant-degrading microbes.

All of these factors should be assessed during treatability studies, and subsequently controlled during the bioremediation process.

### Microorganisms

The availability and viability of microorganisms indigenous to the contaminated media are determined during treatability studies. It is generally desirable to enhance the microbial activity of indigenous organisms, rather than using exogenous organisms, because the indigenous organisms are already acclimated to the waste material. Additionally, it has been shown that exogenous organisms do not effectively compete with indigenous microorganisms. Only if the environment is sterile, or the present microbial population does not degrade the contaminant, should exogenous microorganisms be considered. Whatever types of degraders are selected, nutrient addition rates favorable to organisms which preferentially degrade the contaminants of concern must also be determined during treatability studies.

### Substrate Requirements

Microorganisms require a primary substrate, which is the carbon and energy source, also termed the electron donor, in the redox reaction governing oxidation of hydrocarbons, for example. Ideally, the contaminant of concern serves as the primary substrate. If the contaminant of concern cannot be degraded as primary substrate, then an analog compound which acts as the primary substrate must be added, and the contaminant of concern can be cometabolized, or degraded as a secondary substrate. Additional substrate may also be required if contaminant levels are too low to support the microbial mass necessary for degradation.

### Nutrient Requirements

Nutrient requirements for microorganisms have been established through extensive research for activated sludge processes in the wastewater treatment field. The nutrients include both macronutrients and micronutrients, and are based on the composition of cell matter. Macronutrients include nitrogen, phosphorus, sulfur, iron, potassium, calcium, magnesium, and manganese. Nitrogen and phosphorus are the major requirements in soil bioremediation systems because the soil itself generally provides the other nutrients which are needed in much smaller amounts. Oxidation-reduction reactions can be written for the synthesis and growth of the microbes in order to rigorously determine the mass of nutrients required for a given mass of contamination to be degraded based on the method of McCarty [15]. A rule of thumb ratio for C:N:P is 120:10:1 on a weight basis [16].

### Oxygen Requirements

Oxygen requirements for aerobic systems can also be determined by mass balances, and for *in-situ* systems, hydrogen peroxide may be evaluated during treatability studies for use as an oxygen source. Hydrogen peroxide is cytotoxic to those species of microorganisms that do not possess the catalytic enzyme catalase that breaks down hydrogen peroxide to oxygen and water [17]. If hydrogen peroxide is being considered as an alternative oxygen source, the population of biodegrading organisms present should be tested for this enzyme in the treatability study stage.

## FOCUS AND OBJECTIVES OF TREATABILITY STUDIES

There are two fundamental objectives of treatability studies, which define the scope of the study to be conducted. The primary objectives of the treatability protocol are:

- to rapidly and inexpensively evaluate the susceptibility of site soils to biological treatment, and
- to determine the rate and extent of treatment which can be achieved.

Secondary objectives include:

- to better understand site-specific chemical partition coefficients of soils for use in risk assessment and remediation efforts, and
- to provide insight regarding non-biological soil treatment options, e.g., soil washing.

A preliminary (Phase I) study is performed during the remedial investigation/feasibility study (RI/FS) stage, in order to obtain comparative information for technology selection. The intent of the Phase I treatability study is to determine if bioremediation is indeed an appropriate remedial activity, given the hydrogeological and contaminant characteristics. A Phase II treatability study is appropriate after bioremediation has been selected as the technology of choice, in order to provide design criteria for a full-scale remediation project. The Phase I and Phase II treatability studies can then be followed by field studies, if necessary, prior to full scale implementation.

### Primary Elements of the Soil Treatability Protocol

While some elements of environmental fate mechanisms and required components for biological degradation can be quantified under strict laboratory conditions for some simple cases,

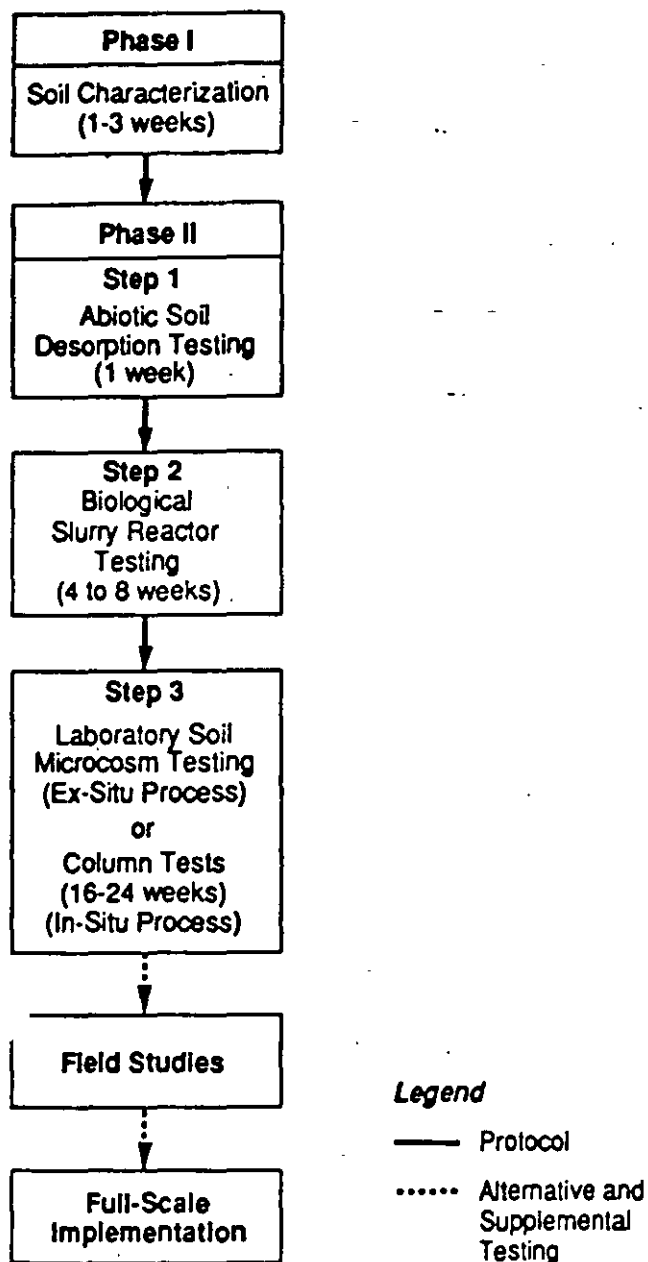


FIGURE 2. Elements of the soil treatability test protocol evaluation.

no one model or set of models can adequately simulate or predict biodegradation in soils because of the complexity of the system. The accelerated soil treatability protocol discussed below was developed and evaluated for the United States Environmental Protection Agency [16, 18] and was proposed earlier by Nakels and Smith [19]. The protocol is based on the premise that chemical contaminants must first desorb and diffuse from the soil and enter the aqueous phase before they can be assimilated by the bacteria and degraded.

The treatability study protocol is designed to evaluate 1) equilibrium sorption relationships, 2) sorption kinetics, and 3) biological oxidation. Protocol elements are shown in Figure 2. Phase I consists of complete characterization of the soil for chemical, microbial, and physical parameters. During Phase II the rate and extent of contaminant desorption which can be achieved is determined. The ability of the microbes to biodegrade the contaminants under aerobic or anaerobic conditions can also be assessed. These tests are not intended to simulate particular soil treatment processes, but rather are intended to examine the biodegradability of contaminants associated with site soils under optimal environmental condi-

tions. Slurry reactor configurations, used in Phase II studies, maximize contaminant mass transfer and ensure that the rate of desorption from soil to water is as rapid as possible. Slurry reactor and soil desorption test results are used to determine the relationship between the extent of contaminant soil desorption and the extent of biodegradation. Soil desorption testing results also provide an indication of the leaching potential of soil contaminants.

Results from this accelerated test protocol can then be applied toward field studies and full-scale implementation. Each of the steps in the treatability study protocol is discussed below.

### Phase I—Soil Characterization

The objective of Phase I is to define the chemical, microbial, and physical characteristics of the soil. Chemical analyses are used to identify the chemicals of interest and to quantify their concentrations for a particular site soil. Statistical analysis can determine if soil collected for treatability evaluation is representative of the site (as defined by the site investigation). The chemical concentrations are also needed to help determine the amount of soil, nutrients, and other additives required for the soil desorption and slurry reactor tests. A complete gas chromatographic (GC) scan for volatile and semi-volatile organics should be conducted, as well as testing for metals if the soil has not previously been tested. In addition, the following tests should be conducted:

- Gas chromatographic analysis of volatile organic compounds and base/neutral extractable contaminants of concern
- Total organic carbon
- Ammoniacal nitrogen phosphorous
- Nitrate
- Potassium
- Sulfate
- pH
- Moisture content
- Redox potential
- Metals concentrations (Fe, Mn, Mg, Cu, Ni)
- Radioactivity (gross alpha and gross beta radiation), if suspected
- Alkalinity.

The characterization of soil and water chemistry indicates the contaminants of concern, possible metabolic modes for microbial activity, existing nutrients, and potential inhibitors.

### Microbial Enumeration/Composition

Microbial characterization should include enumeration of total microbes and contaminant-specific degraders. Total microbes may be determined by the "Agar Plate Method for Total Microbial Count" as described by Clark [20]. The total microbial count should be compared to an estimate of the population present which will degrade the contaminant of concern. The preliminary screen for contaminant-specific degraders is performed in a medium that provides only the necessary inorganic nutrients required for microbial growth and no intrinsic carbon source. The contaminant supplement serves as the sole source of carbon. Cultures of selected potential biodegraders are prepared in supplemented and unsupplemented (control) media. Following incubation, the cultures are evaluated for the presence and relative abundance of microbial growth. Isolates demonstrating little or no growth are judged to be poor or non-degraders of the contaminant and should be eliminated from further study. The remaining isolates can be evaluated for the effects of environmental parameters or for performance in bench scale reactor systems [21].

Protocol for isolating and identifying contaminant-specific degraders should be developed in conjunction with a micro-

biologist. There are many competent laboratories which can develop specific agars for enumeration of bacteria which degrade the contaminants of concern. Numerous other methods for determining viable counts of microorganisms have been developed recently. These include electron microscopy, viable counts, epifluorescence microscopy, and measurements of biochemical components. Readers are referred to selected references for additional information on newly developed microbial enumeration techniques [5, 22]. Results of total microorganisms and contaminant-specific degraders provide an indication of microbial activity for the soil for existing (unamended) site conditions. If viable populations exist, the potential for bioremediation has been established.

Another technique which establishes the viability of the existing population is respirometry. This method measures the  $CO_2$  production of the microbes, and indicates the activity which is present. This technique is better suited to monitoring and process control than site characterization, because a real-time reading can be obtained. However, the respirometry technique does not distinguish between total organisms and contaminant degraders.

### Toxicity Testing

In conjunction with plate counts, bioassays may be used to determine if toxic substances which may inhibit biodegradation exist in the soil matrix. The Microtox<sup>®</sup> assay is an aqueous general toxicity assay that measures the reduction in light output by a suspension of marine luminescent bacteria in response to an environmental sample. Bioluminescence of the test organism depends on a complex chain of biochemical reactions. Chemical inhibition of any of the biochemical reactions causes a reduction in bacterial luminescence. Therefore, the Microtox<sup>®</sup> test considers the physiological effect of a toxicant, and not just mortality.

Matthews and Bulich [23] describe a method of using the Microtox<sup>®</sup> assay to predict the land treatability of hazardous organic wastes. When plate counts yield low results for indigenous microorganisms, the Microtox<sup>®</sup> assay indicates whether the condition is controllable or not. If the low counts are due to the presence of toxins, bioremediation may be very complicated or infeasible. If toxins are absent, the microbial activity may be enhanced through nutrient addition.

### Physical Characterization

Particle size distribution using a dry sieve method developed by Lambe [24] with points of clarification provided by ASTM [25] is used to interpret the results of desorption and slurry reactor testing, and to determine if *in-situ* bioremediation is feasible with respect to hydraulic considerations. Field hydraulic conductivity tests should also be performed by a hydrogeologist as part of a Phase I screening if *in-situ* biodegradation is being considered.

### Phase II Testing

#### Step 1 Abiotic Soil Desorption Testing

Soil desorption tests are performed under abiotic conditions with the results used to compute site-specific soil/water partition coefficients ( $K_p$ ) for chemicals of interest (i.e., site-specific desorption isotherms). Desorption tests can be conducted many different ways. Readers are referred to selected references to design an applicable protocol for the contaminant of concern [16, 26, 27, 28]. Experimentally determined partition coefficients provide a quick indication of the extent to which organic chemicals will leach off of the site soils. The extent to which chemicals desorb off of soils into solution can be directly correlated with their susceptibility to biodegradation. If a specific organic chemical is detected near its aqueous solubility, then it is expected that biodegradation will occur to some extent. If, on the other hand, a specific chemical is not measured in solution, then it is unlikely that bioremediation of this chemical will occur to any significant extent [29]. Thus, the ultimate effectiveness of bioremediation is strongly affected by the solubility of a contaminant to be degraded. Many common organic contaminants found in soil and groundwater are highly hydrophobic and nonpolar; thus they have relatively low solubilities in water. This fact can hamper the degradation of these compounds because degradation is most likely to occur in the aqueous phase where the bacteria are present and where assimilation of substrate and nutrients can easily occur. The role of sorption and desorption in the aqueous phase biodegradation process has been modeled by Annoke [30] and is presented in Figure 3. In this model, biological oxidation can

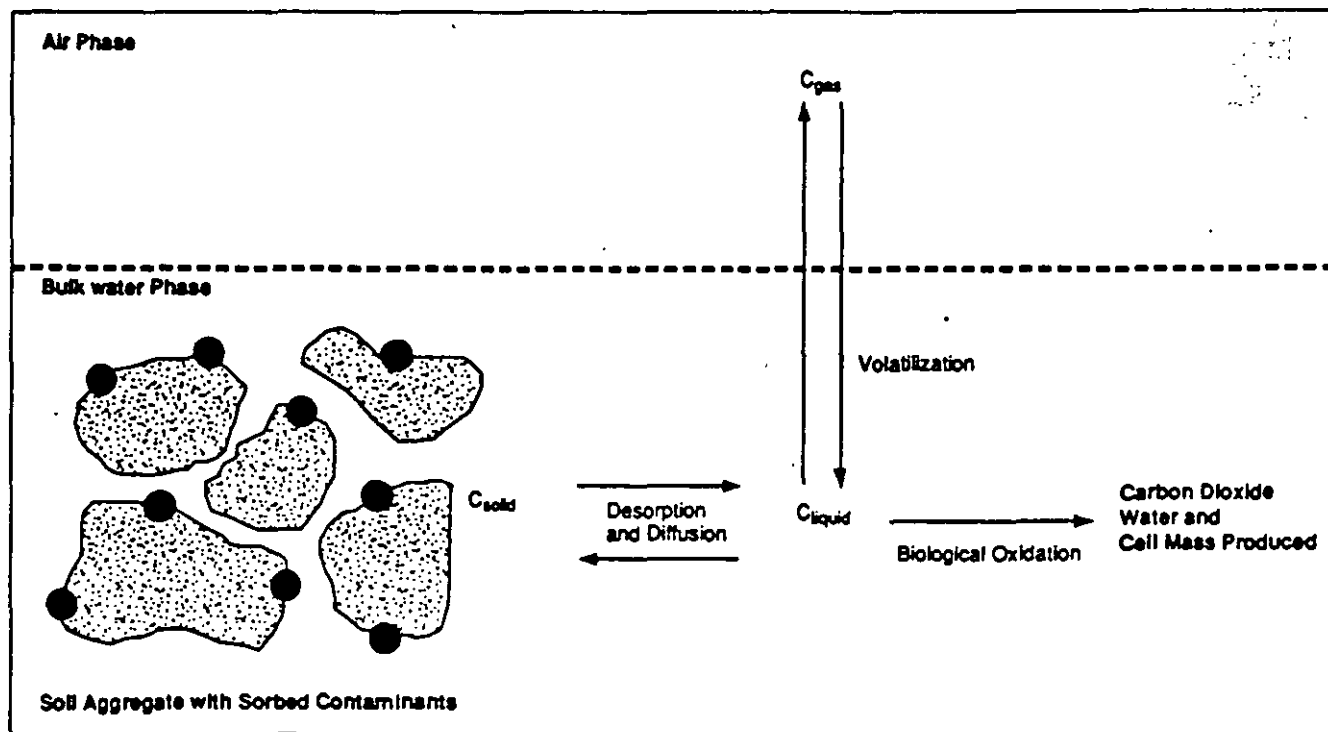


FIGURE 3. Role of desorption/diffusion in biodegradation process.

only occur if the compound within or on a soil particle desorbs and diffuses into the aqueous phase. Once in solution, volatilization can also occur. In many cases, desorption and diffusion of the contaminant into the aqueous phase may be the rate limiting step controlling both volatilization and biological oxidation [37]. These mechanisms control removal of contaminants in both *in-situ* and *ex-situ* biodegradation systems.

A great deal of research has been devoted to the facilitation of bioremediation through the enhancement of the aqueous solubility of organic chemicals. For example, Loehr [32, 33] observed that the loss rates of PAH compounds found at manufactured gas plant (MGP) sites were near zero and little affected by changing nutrient addition rates, water content, temperature, or pH. The test soils were non-toxic, and despite low loss rates of the compounds, significant populations of bacteria were present. Also, aqueous extracts of MGP soils indicated that PAH compounds in such soils were not soluble. This failure of bioremediation of PAHs was surprising as these compounds had been successfully biodegraded in numerous other laboratory and field studies [34]. It was postulated that the probable cause of this phenomenon was the biological unavailability of these compounds. The low solubilities of these compounds and their strong adsorption to the soil could lead to inaccessibility of these chemicals to microorganisms. As a result of these findings and corroborating research by others, many researchers have been investigating the use of surfactants and cosolvents to enhance the solubility of organic chemicals in the environment and thus, make these chemicals more available for bioremediation [35, 36, 37, 38].

Current research in this area has focused on several major areas:

- Surfactants or cosolvent additions are not required at all
- Surfactants are indigenous in the soil
- Surfactants are created by the microbes
- Excess mixing in above-ground reactors enhances chemical release
- Biotreatment is not required at all
- Surfactants or cosolvents remove contaminants from soil
- Design optimization
- Combined use of surfactants/cosolvents and bioremediation.

Large increases (orders of magnitude) in the solubility of individual compounds have been observed by these researchers through surfactant or cosolvent addition. However, because of the very low initial solubilities of many higher ringed PAHs (often less than 200 µg/L for the pure chemical) the resultant aqueous concentrations are still very low and biotreatment may have difficulty in proceeding. In such instances, even with enhancement of solubility and increases in the mass degraded, the mass of contaminant remaining on the soil may still be quite high and well-above regulatory limits. It is important to note that in all cases, these researchers reported that very high concentrations (tens of percent) of surfactants or cosolvents were required to achieve very small increases in solubility. Thus, even if surfactants and cosolvents are found to be effective for the enhancement of bioremediation, reagent costs as well as the ultimate environmental fate of the added reagents become important considerations which may detract from the applicability of these techniques.

Because aqueous solubilities within a chemical class (e.g., chlorinated aliphatics) can vary by several orders of magnitude, it is not possible to provide a broadly-based characterization of relative solubilities. Thus it is important to review the solubilities of contaminants of interest in bioremediation studies. From the solubility and desorption data, it may also be possible, based upon the hypothesis that mass transfer limitations dominate chemical fate in a soil matrix, to estimate the treatment endpoint for some chemicals.

## Step 2 Biological Slurry Reactor Testing

Biological slurry reactors are operated to examine the ability of the microbes to biodegrade the desorbed organics under either aerobic or anaerobic conditions. Bioreactors maximize degradation rates by reducing or eliminating mass transfer limitations, thereby providing the equilibrium concentrations which will be achievable in the shortest period of time. Figure 4 provides a schematic representation of a common laboratory slurry reactor. Initial and final aqueous phase chemical concentrations are measured along with the concentration time profile of the chemical in the soil phase. The proper microbial environment (i.e., pH, nutrients, sufficient electron acceptor, and no toxic compounds) must be maintained through periodic monitoring and supplemental additives. The biodegradation tests can be completed with 4 to 8 weeks. In the event that necessary indigenous bacteria are not sufficient to biodegrade the aqueous phase organics, the protocol can involve bioaugmentation using cultured organisms.

Bioreactors can be operated in batch, fed batch, or continuous culture modes. The size of the reactor is dependent on the quantity of waste to be treated as well as the hydraulic retention time required to meet target levels. If the slurry reactor tests show statistically significant reduction in soil contaminants, then the technical viability of soil biodegradation will be established. Under slurry reactor conditions, soil desorption and solubilization of organic compounds is maximized, thus, biodegradation should also be maximized. The premise of the protocol is that if biodegradation cannot be achieved under slurry reactor conditions, then it is highly unlikely that biodegradation can be achieved in any other soil treatment process. Biological slurry reactor data quickly provides an estimate of the potential end point for biological treatment. With this understanding, it is possible to decide if further investigation is warranted to select the best process configuration to take advantage of the waste-specific desorption and biodegradation factors. Optimization of operating parameters can be quickly accomplished, such as temperature variation and surfactant addition.

After viability is established, a bench-scale or pilot-scale test is completed to determine the system's operating parameters, which are listed below [39, 40].

- Biological solids retention time
- Hydraulic retention time
- Total suspended solids
- Mixed liquor volatile suspended solids
- BOD, COD, TOC, nitrogen, and phosphorus removal efficiencies
- Sludge yield coefficients
- Dissolved oxygen uptake rates
- Surfactant addition requirements
- Nitrification potential investigations.

## Step 3 Pan Microcosm Testing or Column Tests

Pan microcosm tests and/or column tests are conducted to determine the kinetics of the reaction, depending upon whether an *ex-* or *in-situ* approach is desired.

### Pan Microcosm Testing

This procedure most closely emulates the land treatment process and represents the conventional test procedure for developing design parameters for the biological land treatment of contaminated soils. For the case of hydrocarbon-contaminated soil, the test is conducted by mixing contaminated soils with an appropriate amount of clean soil to produce a mixture that has oil and grease levels no greater than 1 to 2 percent by

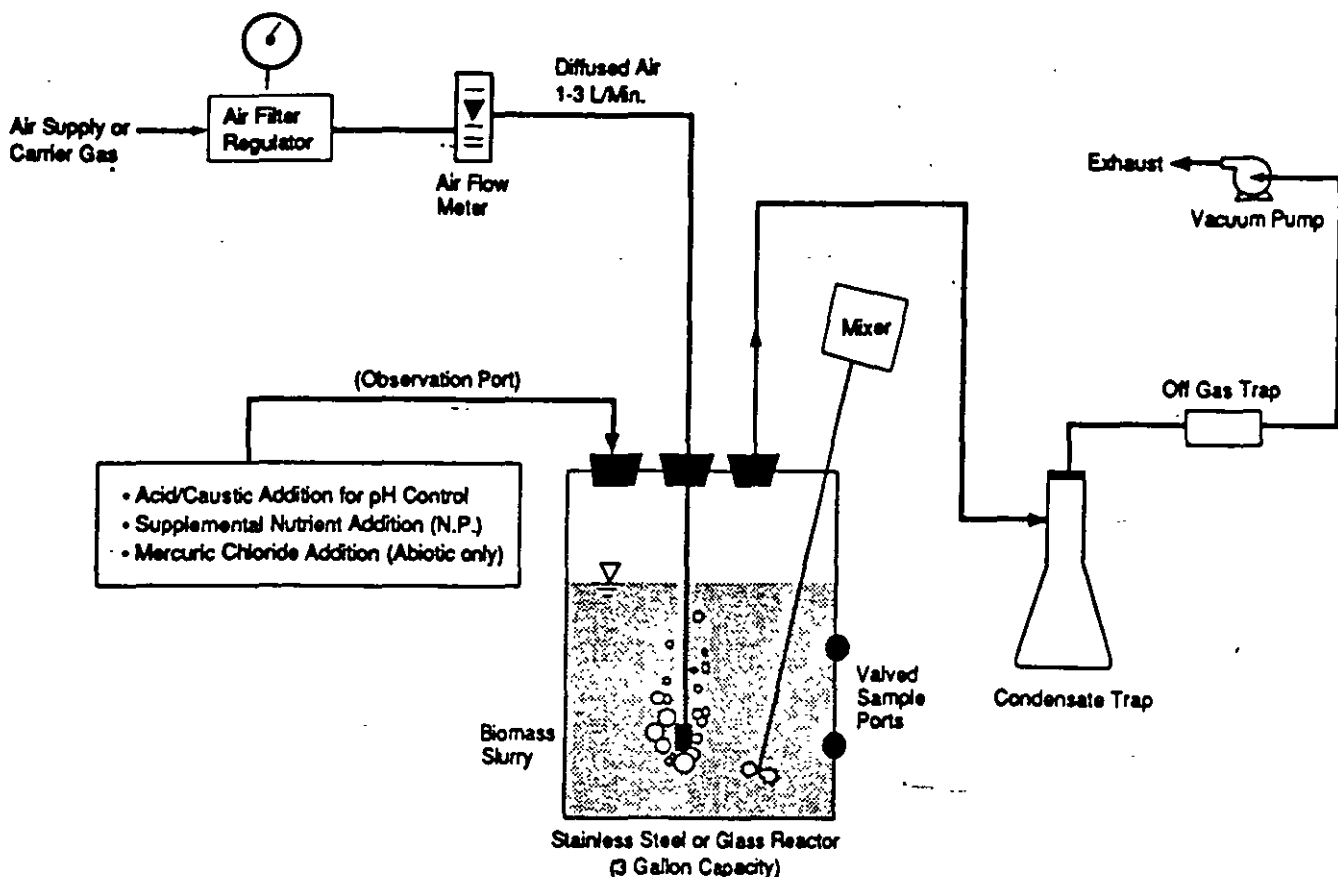


FIGURE 4. Slurry reactor process schematic.

weight. This mixture is placed in a pan reactor with typical dimensions of 20 cm by 30 cm with 10 cm depth [18]. Nutrients (i.e., phosphorus and nitrogen) and water are then added to the soil to enhance the activity of the indigenous bacteria, in amounts determined by the initial soil characterization. Periodically, the pan soils are mixed, and nutrient, pH, and moisture levels are measured, and if necessary, adjusted. Samples of the soils are taken at the start of the experiment, and every week for 2 to 3 months. The concentration-time profiles that are generated are used to estimate contaminant removal kinetics and the basic design parameters for the land treatment process. The pans must be operated for a 2- to 3-month period because this bioremediation process is not as aggressive as a slurry reactor in terms of maximizing soil surface exposure to biological activity.

### Column Tests

This procedure simulates *in-situ* biodegradation of organic contaminants in the subsurface environment. A vertical column of contaminated soil is used, allowing a solution of water, microorganisms, and nutrients to flow through the system. Test and control columns are run. Hydraulic conductivity considerations can be assessed in this manner, as well as the potential for clogging due to biomass generation. Biofouling, common in *in-situ* systems, is caused by poor soil permeability and inhibits the flow of applied materials through the treatable soil matrix. The resultant biomaterial "plug" precludes homogeneous aqueous dispersion, saturation, and maintenance of biological activity, thereby negating effective biotreatment. During the course of the column studies, chemical, microbiological, and contaminant parameters of control and test systems are evaluated. Samples are subsequently evaluated for chemical and biological changes as well as terminal end procedure. If anaerobic or methanogenic conditions are being studied, metabolic pathways and potentially toxic by-products should be investigated [41, 42, 43].

### Data Analysis

Following the collection of site characterization and contaminant treatability data, various data interpretation and modeling approaches are available to estimate the expected effectiveness of bioremediation for cleanup of soils contaminated with organic chemicals. Modeling approaches range from simple analytical equations to complex computer codes. The two most effective uses of models in remediation projects are for either screening purposes or for field validation activities. In this section, relatively simple analytical equations are presented which allow the rate and extent of contaminant removal to be estimated. These model results can be used to estimate the potential time required to achieve cleanup standards, assess the relative importance of biological versus physical/chemical reaction mechanisms, and compare expected performance of alternative bioremediation methods.

The data obtained from the slurry reactor study can be interpreted using the classical model of microbial growth, given by the Monod equation:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{kXS}{K_s + S} \quad (1)$$

Where:

- S is substrate concentration, mg/L
- X is biomass concentration, mg/L
- $K_s$  is the half-velocity coefficient, mg/L
- t is the time in hours
- k is the maximum specific substrate utilization rate, 1/hr.

The measurement of substrate and biomass with time will enable the quantification of  $K_s$  and k. The application of the Monod expression to soil bioremediation, however, has been limited in practice due to difficulty in quantifying X, which

represents the active, contaminant-degrading microorganisms on a mass/volume basis and is a required parameter in the above second order equation. Many treatability studies rely on cultural techniques to estimate the abundance of microorganisms in soils, although these methods may detect less than ten percent of the amount actually present [22]. The application of this equation has traditionally been in slurry reactors, where activated sludge is dried and weighed to determine  $X$ . The presence of a solid phase in pan or column reactors complicates biomass determination. Non-traditional methods of determining  $X$  for soil/water systems are being investigated. Readers are referred to selected references for further information [5, 22]. Additional research is needed in the area of soil biomass quantification to provide a reliable method to distinguish between contaminant degrading the non-contaminant degrading cells.

In addition to problems associated with quantifying  $X$ , many of the assumptions upon which Monod kinetics are based may not be valid for *in-situ* applications or land treatment processes. These include the assumption that utilization rate is limited by a single enzymatic process, that there is a constant enzyme concentration, and that there is no change in the species distribution of the microbial community.

In view of the problems of applying the Monod equation in *in-situ* or land farming processes, approximations to the rigorous equation given above can be used. At high primary substrate concentration, the rate is a maximum and first order with respect to organism concentration, but zero order with respect to substrate concentration:

$$-dS/dt = kX \text{ with } (S \gg K_s) \quad (2)$$

At low primary substrate concentration, the rate of utilization is first order with respect to both organism concentration and substrate concentration:

$$-dS/dt = (k/K_s)XS \text{ with } (S \ll K_s) \quad (3)$$

The ratio of  $k/K_s$  is called the second order rate constant for biological degradation. This value is useful when considering the degradation of contaminants at low mg/L concentrations.

From these equations it is clear that  $X$ , or the biomass concentration should be increased in order to increase the rate of degradation. At a constant biomass level, one can determine the half-life of a compound by integrating.

$$C_0 - C_t = kX(t - t_0) \quad (4)$$

where

$C_t$  = concentration at time  $t$ ,  
 $C_0$  = concentration at time  $t_0 = 0$   
 for the half-life,  $t_{1/2}$ , set  $C_t = 1/2C_0$

$$1/2C_0 = kXt_{1/2} \quad (5)$$

$$t_{1/2} = C_0/2kX \quad (6)$$

These concepts are illustrated by the following example, for this case assume:

$k = 0.1 \text{ d}^{-1}$  (a typical value)  
 $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ , or 100 ppm  
 $t_{1/2} = 1,000 \text{ hr}$ , or about 40 days  
 then,  $X$  (biomass concentration) = 12.5 mg/L

The relatively slow rate of biodegradation is partially due to very low biomass concentration and this factor would tend to limit *in-situ* degradation. This slow rate is further compounded by the fact that many degradable compounds may have half-lives of months to years under natural conditions.

Table 4 Volumetric Productivity Comparison

Type of Bioreactor	Volumetric Productivity (mg/L-hr)
Fermentor	5,000 to 25,000
Trickling filter	5 to 250
Activated sludge	10 to 100
Bioremediation	0.02 to 30

The extent to which biomass concentrations can be increased can be estimated by comparison to other biotreatment processes. In order to compare biodegradation with other bioprocesses it is useful to consider another way to express microbial kinetics in terms of volumetric productivity [44]. In the example just given, the rate of conversion could be stated as:

$$\text{Volumetric productivity} = \text{Rate/volume} = kX \quad (7)$$

or, volumetric productivity =  $(0.1 \text{ d}^{-1})(12.5 \text{ mg/L}) = 1.25 \text{ mg/L-d}$ . Other examples of biological reactions stated in the same terms are listed in Table 4.

One strategy to enhance biotreatment is to add a substrate that causes the biomass to increase *in-situ*. However, this is limited by the stoichiometric constraints discussed above particularly for aerobic reactions. This same effect can also be obtained by adding externally grown biomass to the contaminated matrix, i.e., enrichment. In this case, biomass would be grown in a fermentor where it is much easier to optimize nutrient addition rates and environmental conditions such as temperature and pH. In a fermentor, biomass concentrations of greater than 25,000 mg/L can be achieved. The addition of this biomass to a contaminated matrix may increase the rate of degradation by orders of magnitude. However the rate will also decay as the bacteria die off if the substrate (and/or nutrient) concentration in the soil is insufficient for continued cell maintenance and growth. In addition, although the introduction of exogenous biomass (as recycle in the activated sludge process for conventional wastewater treatment) may be practical in open or batch systems, it is unlikely that biomass addition to groundwater systems will be practical due to problems associated with fouling of the porous media.

The minimum substrate concentration is also a useful parameter which can be obtained from slurry reactor data, [14] and is given as follows:

$$S_{\text{min}} = \frac{K_s b}{Yk - b} \quad (8)$$

Where:

$Y$  = yield coefficient, mg bacteria/mg substrate  
 $b$  = decay coefficient or death rate,  $\text{day}^{-1}$ .

$S_{\text{min}}$  represents the minimum substrate concentration that can support a viable biomass community. If the substrate concentration is below  $S_{\text{min}}$  the organisms will not multiply or increase in concentration. Thus, if a contaminant enters the soil at a low level, the bacteria responsible for degradation will not increase substantially and the degradation will take place very slowly.

For example under aerobic conditions where  $k = 0.1 \text{ hr}^{-1}$ ,  $K_s = 10 \text{ mg/L}$ ,  $Y = 0.5$ , and  $b = 0.005 \text{ hr}^{-1}$ , the  $S_{\text{min}}$  would equal about 100  $\mu\text{g/L}$ . That is, degradation cannot achieve a concentration below 100  $\mu\text{g/L}$  within a reasonable period of time.  $S_{\text{min}}$  is likely to vary by an order of magnitude or more above or below 100  $\mu\text{g/L}$ , depending on the organism, the substrate, and the environmental conditions under which the organism grows. In any event, there appears to be a minimum value under steady-state conditions to which substrate concentration can be reduced when this substrate is the sole source of energy. However, it may possible to overcome this limitation by adding



a non-toxic primary substrate which can act as cometabolite. This has the effect of increasing the rate of metabolism and overcoming the minimum concentration limitation. In this way it may be possible to achieve residual concentration levels of  $\mu\text{g/L}$  or even  $\text{ng/L}$  levels.

This determination is useful to estimate minimum concentrations which can be achieved without adding an additional primary substrate. The significance of determining  $S_{\text{min}}$  from treatability study data is that the treatability studies do not have to be carried out to their endpoint. Once sufficient data is collected to determine kinetic parameters,  $S_{\text{min}}$  can be predicted.

Although a contaminant being degraded as a primary substrate can not be reduced to concentrations below  $S_{\text{min}}$ , a contaminant acting as a secondary substrate may be removed to lower concentrations through cometabolism. In this case, utilization of the primary substrate determines the amount of biomass present in the system and the secondary substrate is degraded without contributing significant energy to the system. Kinetic parameters determined for bioremediation projects can be based on either primary or secondary substrate kinetics.

Recent efforts to describe substrate utilization in soil and subsurface environments are focusing on a biofilm concept as a basis for modeling [45]. Soil microorganisms are typically present as a biofilm on the soil particles. The change in substrate concentration, then, is a function of the mass transport of substrate, nutrients, and electron acceptor into the biofilm.

A comparison of the rates observed in the slurry reactor and in either the column or pan reactor will permit an evaluation of the rate limiting process. If the observed kinetics are similar in the two reactor configurations, the rate at which the microorganisms can metabolize the substrate limits the rate at which the substrate is used. Similarly, if the kinetics observed in the pan or column are much slower than those in the slurry reactor, then either the rate of desorption, mass transfer, or nutrient/electron acceptor availability limit the rate of substrate utilization. The latter case is typical of *in-situ* applications and suggests that the rate of disappearance of contaminant is typically related to the engineering of an appropriate system, rather than on the ability of the microorganisms to degrade the contaminant quickly. The column or pan reactor, being more representative of the system in which the remediation effort will occur, will give a closer approximation of the kinetics which can be expected in the field.

## SUMMARY

The above treatability protocol is designed to provide maximum information with respect to the viability and efficiency of bioremediation, with a minimum of laboratory effort. The Phase I screening provides information with regard to chemical and microbiological parameters required to determine if bioremediation is a feasible technology given the site conditions. Once bioremediation has been selected as the appropriate technology, a Phase II screening should be performed. The Phase II screening provides information pertaining to the endpoint achievable (slurry reactors) or kinetics of the reaction (established with pan tests for *ex-situ* systems or column tests for *in-situ* systems). Data analysis can predict the rate of removal of constituents using one of the models discussed. Data from the preliminary screening and the kinetic predictions from the model are used to estimate the potential time required to achieve cleanup standards, assess the relative importance of biological versus chemical removal mechanisms, and compare expected performance of alternative bioremediation methods.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the indirect and

direct contributions of researchers in the Environmental and Water Resources Program at the University of Texas at Austin especially Dr. Raymond C. Loehr, and the approach towards volumetric productivity advanced by Dr. Philip Stewart of the Center for Interfacial Microbial Processes at Montana State University.

## LITERATURE CITED

1. McCarty, P. L., "Bioengineering Issues Related to In-Situ Remediation of Contaminated Soil and Groundwater," Presented at Reducing Risks from Environmental Chemicals through Biotechnology, University of Washington, Seattle, WA (1987).
2. Kobayashi, H., and B. Rittman, "Microbial Removal of Hazardous Organic Compounds," *Environmental Science and Technology*, 16 p. 170A (1982).
3. Dupont, R. R., "Applications of Treatability Studies in Management of Fuels/Petroleum Waste Impacted Soils," For Presentation at 84th Annual Meeting & Exhibition, Vancouver, B.C., (1991).
4. McCarty, P. L., B. E. Rittmann, and E. J. Bouwer, "Microbial Processes Affecting Chemical Transformations in Groundwater," *Groundwater Pollution Microbiology*, G. Bitton and C. P. Gerba (Eds.) J. Wiley and Sons, New York, N.Y. (1984).
5. Lee, M. D., et al., "Bioremediation of Aquifers Contaminated with Organic Compounds," *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, 18 (1) pp. 29-89 (1981).
6. Babea, L., and D. D. Vaishnav, "Prediction of Biodegradability of Selected Organic Compounds," *Journal of Industrial Microbiology*, 2 pp. 107-115 (1987).
7. Vogel, T. M., C. S. Criddle, and P. L. McCarty, "Transformations of Halogenated Aliphatic Compounds," *Environmental Science & Technology*, 21 (8) pp. 722-736 (1987).
8. Bradford, M. L., and R. Krishnamoorthy, "Consider Bioremediation for Waste Site Cleanup," *Chemical Engineering Progress*, 87 (2) pp. 80-85 (1991).
9. Brown, R. A., R. D. Norris, and G. R. Brubaker, "Aquifer Restoration with Enhanced Bioreclamation," *Pollution Engineering*, pp. 25-28 (1985).
10. Brubaker, G. R., and E. L. Crockett, "In Situ Aquifer Remediation Using Enhanced Bioreclamation," In Proceedings of Hazmat 86. Atlantic City, Tower Conference Management, Glen Ellyn, IL (1986).
11. Raymond, R. L., M. D. Lee, and C. H. Ward, "Assessment of Potential for In-situ Bioremediation," In Proceedings of the DECHEMA Conference, Frankfurt am Main, pp. 30-31 (1989).
12. Thomas, J. M., and C. H. Ward, "In Situ Bioremediation of Organic Contaminants in the Subsurface," *Environmental Science and Technology*, 23 (7) pp. 760-765.
13. United States Environmental Protection Agency (EPA), International Evaluation of In-Situ Bioremediation of Contaminated Soil and Groundwater, EPA 540/2-90/012, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C. (1990).
14. Bouwer, E. J., "Bioremediation of Organic Contaminants in the Subsurface," in *New Concepts in Environmental Microbiology*, Ralph Mitchell ed., in Press.
15. McCarty, P. L., "Stoichiometry of Biological Reactions," Presented at the International Conference, Toward a Unified Concept of Biological Waste Treatment Design, Atlanta, GA (1972).
16. Sims, R. C., "Soil Remediation Techniques at Uncontrolled Hazardous Waste Sites," *J. Air and Waste Management Association*, 40 (5) pp. 704-732 (1990).
17. American Petroleum Institute, "Field Study of Enhanced

- Subsurface Biodegradation of Hydrocarbons using Hydrogen Peroxide as an Oxygen Source," Publication No. 4448, Washington, D.C. (1987).
18. United States Environmental Protection Agency (EPA), "Guide for Conducting Treatability Studies under CERCLA," EPA/540/2-89/058, Office of Solid Waste and Emergency Response, and Office of Research and Development, Washington, D.C. (1989).
  19. Nakles, D. V., and J. R. Smith, "Treatability Protocol for Screening Biodegradation of Heavy Hydrocarbons in Soil," In: *Proceedings of Hazardous Materials and Management Conference and Exhibition*, Atlantic City, NJ (1989).
  20. Clark, F., "Agar Plate Method for Total Microbial Count," *Methods of Soil and Analysis*, American Society of Agronomy, Madison, WI, Vol. 2, pp. 1460-1465 (1965).
  21. Kaufman, K., "Applied Bioremedial Technology," Presented at Hazmacon '89, Santa Clara, CA (1989).
  22. Ghiorse, W. C., and D. L. Balkwill, "Microbial Characterization of Subsurface Environments," in *Ground Water Quality*, Ward, C. H., W. Giger, and P. L. McCarty eds., Wiley, New York, NY (1985).
  23. Matthews, J., and A. Bulich, "A Toxicity Reduction Test System to Assist in Predicting Land Treatability of Hazardous Waste," in *Hazardous and Industrial Solid Waste Testing: Fourth Symposium*, STP-886, J. K. Petros, Ed., ASTM, Philadelphia, PA (1984).
  24. Lambe, T. W., *Soil Testing for Engineers*, John Wiley and Sons, New York, NY (1951).
  25. American Society of Testing and Materials (ASTM), "Standard Method for Particle-Size Analysis," ASTM D 422-63, (Reapproved 1972).
  26. DiToro and Horzumpa, "Reversible and Resistant Components of PCB Adsorption-Desorption: Isotherms," *Environmental Science and Technology*, 16 (9) pp. 594-603 (1982).
  27. Lu, S., and P. M. Gschwend, "Sorption Kinetics of Hydrophobic Compounds to Natural Sediments and Soils," *Environmental Science and Technology*, 20 (7) pp. 717-725 (1986).
  28. Hamaker, J. W., and J. M. Thompson, *Adsorption of Organic Chemicals in the Soil Environment*, Vol. 1, C. A. I. Goring and J. W. Hamaker, Eds., Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. (1972).
  29. Torphy, M. F., H. F. Stroo, and G. Brubaker, "Biological Treatment of Hazardous Wastes," *Pollution Engineering* May 80-86 (1989).
  30. Annoke, G. J., "Research on Decontamination of Polluted Soils and Dredging Sludges in Bioreactor Systems," Assessment of International Technologies for Superfund Application EPA/540/2-88/003, Washington, D.C. (1988).
  31. Hamaker, J. W., and J. M. Thompson, "Adsorption," *Organic Chemicals in the Soil Environment*, Vol. 1, C. A. I. Goring and J. W. Hamaker, Eds., Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. (1972).
  32. Loehr, R. C., "Treatability Potential for EPA Listed Hazardous Wastes in Soils," EPA-600/2-89-011, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK. (1989).
  33. Loehr, R. C., "Bioremediation of PAH Compounds in Contaminated Soil," Second Annual West Coast Conference on Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Newport Beach, CA (1991).
  34. Park, K. S., R. C. Sims, and R. R. DuPont, "Transformation of PAHs in Soil Systems," *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 116 (3) pp. 632-642 (1990).
  35. Vedvyas, S. K., "Enhancement of the Solubilization of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Using Cosolvents and Surfactants," M.S. Thesis, University of Texas at Austin, Austin, TX (1990).
  36. Groves, F., Jr., "Effect of Cosolvents on the Solubility of Hydrocarbons in Water," *Environmental Science & Technology*, 22 (3) pp. 282-286 (1988).
  37. Ellis, W. D., J. R. Payne, and G. D. McNabb, "Treatment of Contaminated Soils with Aqueous Surfactants," EPA/600/S2-85/129. USEPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH (1985).
  38. Nkedi-Kizza, P., P. S. C. Rao, and A. G. Hornsby, "Influence of Organic Cosolvents on Sorption of Hydrophobic Organic Chemicals by Soils," *Environmental Science & Technology*, 19 (10) pp. 975-979 (1985).
  39. Eckenfelder, W. W., *Industrial Water Pollution Control*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, NY (1989).
  40. Benefield, L. D., and C. W. Randall, "Biological Process Design for Wastewater Treatment," Prentice-Hall Series, Englewood Cliffs, NJ (1980).
  41. Bragg, J. R., J. C. Roffall, S. McMillen, "Column Flow Studies of Bioremediation in Prince William Sound," Exxon Production Research Company, Houston, TX (1990).
  42. Bouwer, E. J., and P. L. McCarty, "Transformations of Halogenated Organic Compounds Under Denitrification Conditions," *Applied and Environmental Microbiology*, 45 1295 (1983).
  43. Gibson, S. A., and J. M. Sufita, "Extrapolation of Biodegradation Results to Groundwater Aquifers: Reductive Dehalogenation of Aromatic Compounds," *Applied and Environmental Microbiology*, 52 p. 161 (1986).
  44. Stewart, P. S., D. J. Tedaldi, A. R. Lewis, and E. Goldman, "Biodegradation Rates of Crude Oil in Seawater," *Water Environment Research* (In Press).
  45. Rittman, B. E., D. Jackson, S. L. Storck, "Potential for Treatment of Hazardous Organic Chemicals with Biological Processes," in *Biotreatment Systems*, CRC Press, Boca Raton, FL (1989).

# CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO

---

ANÁLISIS DEL SITIO Y SUS ALREDEDORES



ANÁLISIS GEOHIDROLÓGICO



ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS CONTAMINANTES  
diagnóstico *in-situ*  
muestreo directo



ANÁLISIS FISICOQUÍMICO



ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

---



PROPUESTA DE REMEDIACIÓN DEL SITIO

## ***ANÁLISIS DEL SITIO CONTAMINADO***

---

- ubicación geográfica
  - tipo de instalación
  - plano de instalaciones superficiales y vías de acceso (terrestre, fluvial y marítimo)
  - plano de instalaciones subterráneas
  - instalaciones aledañas
  - ubicación de zonas urbanas aledañas
  - estudios previos (auditorías ambientales, gasometrías, mediciones de la profundidad del nivel freático)
  - material contaminante (materia prima, producto o residuo de proceso)
  - ubicación de fuentes de contaminación (obra subterránea o superficial)
  - antigüedad de la contaminación
  - precipitaciones pluviales (frecuencia y nivel)
  - escorrentías
  - ubicación de cuerpos de agua aledaños
  - clima y temperatura ambiente del sitio
  - uso del suelo afectado (agrícola, forestal, recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación)
  - tipo de vegetación
-

## ***ANÁLISIS GEOHIDROLÓGICO DEL SITIO***

---

- topografía
  - ubicación de pozos de extracción de agua (incluye norias)
  - profundidad del nivel freático
  - dirección y velocidad del flujo del agua subterránea
  - espesor de producto libre (cuando éste ha alcanzado el nivel freático)
  - definición tridimensional de la mancha de contaminación
  - perfiles estratigráficos
  - pozos indio
-

## ***DIAGNÓSTICO DE LA CONTAMINACIÓN***

---

√ métodos geofísicos

√ métodos gasométricos

- lectura directa
- colocación de absorbedores

√ muestreo directo

---

## ***ANÁLISIS QUÍMICO DE CONTAMINANTES***

---

- Compuestos monoaromáticos volátiles (BTEX): benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, método EPA 8020 (GC/FID) o método EPA 8060 o EPA 8240 (GC/MS)
  - Hidrocarburos totales de gasolina y diesel, método EPA 8015 (GC/FID)
  - Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310 (GC/FID)
  - Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), método EPA 418.1 M (infrarrojo)
  - Bifenilos Policlorados, método EPA 8080
  - Metales pesados: As, Ba, Cd, Cr VI, Ni, Hg, Ag, Pb y Se , según NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
-

# **ANÁLISIS FISICOQUÍMICO**

---

## ***en material geológico***

- pH
- humedad
- capacidad de retención de agua
- concentración de materia y carbono orgánicos
- contenido de materia inorgánica (sólidos fijos)
- contenido de carbono inorgánico (carbonatos y bicarbonatos)
- porosidad
- permeabilidad
- tipo de suelo (tamaño de partículas)

## ***en agua subterránea***

- pH
  - demanda química de oxígeno
  - demanda bioquímica de oxígeno
  - alcalinidad
  - concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
-



# ***ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO***

---

## *Caracterización*

- cuenta total de microorganismos
- cuenta de microorganismos heterótrofos
- cuenta de microorganismos degradadores

## *Pruebas de biofactibilidad (microcosmos)*

- consumo de oxígeno
- generación de bióxido de carbono

## *Pruebas de biotratabilidad (mesocosmos)*

- definición de los requerimientos nutricionales y de condiciones de experimentación
-

## BIBLIOGRAFIA

- Alxander M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. Academic Press, Inc. USA.
- Baker K.H. and Herson D.S., 1994. Bioremediation. McGraw Hill, Inc., New York.
- Carter M.R. 1993. Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers. Boca Raton, USA.
- Chapelle F.H., 1993. Groundwater Microbiology and Geochemistry, John Wilwy & Sons, Inc., New York.
- EPA. 1993. Cleaning Up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends. EPA 542-R-92-012. Environmental Protection Agency. Washington D.C.
- EPA. 1991. Understanding Bioremediation a Guidebook for Citizens. EPA/540/2-91/002. Environmental Protection Agency
- Gibson D.T. 1984. Microbial Degradation of Organic Compounds. Marcel Dekker, Inc. New York and Basel.
- King R.B., Long G.M. and Sheldon J.K., 1992. Practical environmental Bioremediation. Lewis Pub. Boca Raton, USA.
- Kitmann B.E., Valocchi A.J., Seagren E., Ray C., Wrenn B. and Gallagher J.R. 1992. Topical Report. A Criticl Review of in Situ Bioremediation. Gas Research Institute. Environment and Safety Research Departament.
- Kuznetsov S.I., Ivanov M.V. and Lyalikova N.N. Geological Microbiology. McGraw Hill Book Co. New York.
- Kuznetsov S.I., Ivanov M.v., Lyalikova N.N. Oppenheimer C.H. and Broneer P.T. 1963. Introduction to Geological Microbiology. McGraw Hill Book Company, Inc. New York.
- Leahy J.G. and Colwell R.R. 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. Microb. Rev. 54(3): 305-315.
- Paul E.A. and Clark F.E. 1989. Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, Inc. New York.
- Rittmann B.E., 1993. In situ bioremediation. When does it work?. National Academy Press, Washington D.C., USA.
- Russell D.L. 1992. Remediation Manual for Petroleum-Contaminated Sites. Technomic Publishing Company, Inc. USA.

Russell L. D. 1992. *Remediation Manual For Petroleum-Contaminated Sites*. Technomic Publishing Company. USA.

Kostecki T. P., Calabrese J. E. 1989. *Petroleum Contaminated Soils. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment*. Volume I. Lewis Publishers, INC. USA.

Kostecki T. P., Calabrese J. E. 1989. *Petroleum Contaminated Soils. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment. Analytical Methodologies. Regulatory Considerations*. Volume 3. Lewis Publishers, INC. USA.

Calabrese E. J. and Kostecki T. P. 1993. *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Lewis Publishers, INC. USA.

Wise D. L. and Trantolo D. J. 1994. *Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils*. Marcel Dekker, Inc. USA.

Calabrese E. J. and Kostecki T. P. 1991. *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater: Analysis Fate, Environmental and Public Health Effects Remediation*. Volume I. Lewis Publishers, INC. USA.

Calabrese E. J. and Kostecki T. P. 1993. *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater: Sampling and Site Assessment Environmental Fate and Modeling Remediation Assessment and Design Risk Management*. Volume 3. Lewis Publishers, INC. USA.

US Department of Energy Office of Environmental Restoration and Waste Management. 1993. *Fy 1993 Program Summary Office of Research and Development Office of Demonstration, Testing and Evaluation*. October. The National Technical Information Service. USA.

EPA. 1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Health, Evaluation Manual (Part A)*. December. Volume 1. Department of Commerce. USA.

EPA. 1993. *Cleaning Up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends*. April. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Health, Evaluation Manual (Part B, Development of Risk-based Preliminary Remediation Goals)*. December. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA: Aerobic Biodegradation Remedy Screening*. July. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Understanding Bioremediation: A Guidebook for Citizens*. February. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Health, Evaluation Manual (Part C, Risk Evaluation of Remedial Alternatives)*. December. Environmental Protection Agency. USA.

US Department of Health and Human Services. 1992. *Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos*. Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, USA.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL  
Y AUDITORIAS AMBIENTALES***

**PRESENTADO POR: BIOL. HECTOR LESSER H.  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

---

# Estudios de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales.

— Dos Herramientas Básicas en el  
— Quehacer Ambiental.

---

NOTAS:

# Introducción.

---

- En México, el Plan Nacional de Desarrollo (PND) establece entre sus líneas de acción el compromiso insoslayable de resolver los grandes problemas que enfrenta nuestro País. En el ámbito social, se establece una Cruzada Nacional por el Bienestar, misma que se encuentra orientada a resolver los rezagos existentes en la materia derivados de la crisis económica.

NOTAS:

## Introducción (continua).

---

- Para elevar el nivel de vida de los Mexicanos, el estado establece como una alta prioridad la **protección y restauración del medio ambiente**, ya que el bienestar de nuestra población se encuentra estrechamente ligado a la protección y conservación de nuestros recursos naturales y el medio ambiente en el que habitamos.

NOTAS:



## Introducción (continua)

- En materia ambiental, la política gubernamental se ha enfocado hacia el desarrollo sustentable y en este sentido se establece como una alta prioridad el cuidado del medio ambiente en el desarrollo de las actividades productivas, así como en el restablecimiento del equilibrio ecológico en las áreas en las que existe un deterioro del entorno natural.

NOTAS:

## Introducción (continua)

---

- Desde una perspectiva de carácter eminentemente preventivo, la **planeación ecológica y la educación ambiental** son sin duda alguna dos de los elementos que mayor relevancia adquieren en la aplicación de la nueva **política ambiental**.

NOTAS:

## Introducción (continua)

---

- El crecimiento económico, llámese desarrollo, puede y debe ser compatible con el medio ambiente. Más aún, no se contraponen ya que ambos persiguen un objetivo común que es elevar el nivel de vida o bienestar de la población.

NOTAS:

## El Reto.

---

- Implementar los cambios necesarios mediante los programas de modernización sectorial que permitan alcanzar el **desarrollo sustentable**
- Identificar los problemas que ocasionan el **deterioro del medio ambiente**, e implementar los mecanismos que permitan garantizar el cumplimiento de las Normas, Reglamentos y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

NOTAS:

## **Herramientas para la Identificación, Evaluación, Toma de Decisiones, e Implementación de Soluciones.**

---

- La política ambiental del gobierno mexicano contempla diversos instrumentos que independientemente o en su conjunto pueden coadyuvar a corregir los problemas de carácter ambiental. Los principales instrumentos de la política ambiental gubernamental se agrupan en cuatro grandes rubros: Instrumentos de **persuasión moral**; instrumentos **económicos**; instrumentos de **control directo** e; instrumentos de **inversión del gobierno**.

NOTAS:

# Los Instrumentos de la Política Ambiental.

- **Instrumentos de persuasión moral**, en los que se busca, a través de la información y del convencimiento que los agentes cambien su comportamiento;
- **Instrumentos económicos**, en los que se busca que los agentes cambien su comportamiento mediante la afectación de sus costos y beneficios;
- **Instrumentos de control directo**, en los que se busca cambiar el comportamiento de los agentes vía imposición de estándares y tecnologías e;
- **Instrumentos de inversión de gobierno**, en los que se busca que los agentes cambien su comportamiento vía la inversión directa en infraestructura y otro tipo de apoyos.

NOTAS:

# Estudios de Impacto Ambiental.

---

- La evaluación de impacto ambiental ha sido reconocida por las autoridades ambientales como una herramienta de gran importancia en la generación de información ambiental. Así mismo se le reconoce como un proceso analítico para evaluar elementos más comprensivos de costo y beneficio social en cada proyecto de desarrollo.

NOTAS:

# Estudios de Impacto Ambiental (continuación).

---

- Existen tres modalidades en los estudios de impacto ambiental:
  - 
  - Manifestación de Impacto Ambiental en su **Modalidad General**
  - Manifestación de Impacto Ambiental en su **Modalidad Intermedia**
  - Manifestación de Impacto Ambiental en su **Modalidad Específica**

NOTAS:



# Estudios de Impacto Ambiental (continuación)

---

- La evaluación de impacto ambiental es un instrumento de aplicación específica y requiere de analizar las particularidades de cada caso, ejerciendo una regulación en distintos planos y etapas.

NOTAS:

# Auditorías Ambientales.

- Las auditorías ambientales consisten en la revisión exhaustiva de las instalaciones, procesos, almacenamientos, transporte, seguridad y riesgo, entre otros aspectos, que permitan establecer planes de acción que definan con plazos determinados las obras, reparaciones, correcciones, adquisiciones y acciones necesarias emanadas del dictamen de auditoría, estén o no normadas, para finalmente ser firmadas entre la autoridad y el empresario y garantizar su cumplimiento mediante fianza.

NOTAS:

# Auditorías Ambientales.

- Las auditorías ambientales consisten en la revisión exhaustiva de las instalaciones, procesos, almacenamientos, transporte, seguridad y riesgo, entre otros aspectos, que permitan establecer planes de acción que definan con plazos determinados las obras, reparaciones, correcciones, adquisiciones y acciones necesarias emanadas del dictamen de auditoría, estén o no normadas, para finalmente ser firmadas entre la autoridad y el empresario y garantizar su cumplimiento mediante fianza.

NOTAS:

# Autoregulación

- La responsabilidad y los beneficios de los problemas ambientales no debe recaer exclusivamente en el ámbito gubernamental. En dicho sentido es de gran importancia fomentar el desarrollo de esquemas voluntarios que procuren el mejoramiento ambiental a través de la promoción de las actividades de autoregulación.

NOTAS:



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA  
PARA CONSUMO HUMANO***

**PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION Y OPERACION HIDRAULICA  
 SUBDIRECCION DE DESARROLLO  
 UNIDAD DEPARTAMENTAL DEL LABORATORIO CENTRAL DE CONTROL  
 RESULTADO DE ANALISIS FISICOS, QUIMICOS Y BACTERIOLOGICOS.

PARAMETROS	NORMAS mg/l				
TURBIEDAD	10 UTN				
pH	6.9-8.5				
COND. ELEC.	1250				
ALC. TOTAL	400				
CLORUROS	250				
COLOR	20 UPT/Co				
O.C.M.A.	3				
DUREZA TOTAL	300				
DUREZA DE Ca	114				
DUREZA DE Mg	186				
FLUORUROS	1.5				
SOL. TOT.	500				
N. DE NITRATO	5				
N. DE NITRITO	0.05				
N. AMONIACAL	0.5				
N. PROTEICO	0.1				
SULFATOS	250				
S.A.A.M	0.5				
D.Q.O. TOTAL	4				
ALUMINIO	**				
ARSENICO	0.05				
CADMIO	0.005				
CALCIO	200				
CINC	5				
COBRE	1.5				
CROMO	0.05				
FIERRO	0.3				
MAGNESIO	125				
MANGANESO	0.15				
MERCURIO	0.001				
PLOMO	0.05				
POTASIO	12				
SELENIO	0.05				
SILICE	**				
SODIO	100				
CUENTA STD.	**				
COLIFORME TOTAL	2COL/100ml				
COLIFORME FECAL	0				

OBSERVACIONES

- LOS RESULTADOS DE *Vibrio cholerae* FUERON NEGATIVOS.
- NO SE DETECTARON COMPUESTOS VOLATILES NI EXTRACTABLES.
- \* PARAMETRO FUERA DE NORMA
- \*\* PARAMETROS NO SANCIONADOS POR S.S.A.

ción o información que proporcionen los interesados podrán dictar las medidas sanitarias para corregir, las irregularidades que se hubieren detectado, notificándolas al interesado y dándole un plazo adecuado para su realización, que podrá ser hasta por treinta días naturales, el cual podrá prorrogarse por un plazo igual a petición del interesado, siempre y cuando demuestre que está corrigiendo las anomalías.

ARTICULO 203.—En los casos en que el interesado acuda de propia iniciativa ante la autoridad sanitaria competente para cumplir con una obligación fuera de los términos señalados en este Reglamento, la autoridad calificará la infracción considerando dicha circunstancia como atenuante de la sanción que corresponda.

ARTICULO 204.—En los casos de reincidencia, se estará a lo dispuesto por el artículo 423 de la Ley.

ARTICULO 205.—Las infracciones no previstas en este Reglamento, serán sancionadas en los términos del Artículo 422 de la Ley.

#### CAPITULO XV

##### Procedimientos para aplicar sanciones y medidas de seguridad

ARTICULO 206.—El procedimiento para aplicar las medidas de seguridad y sanciones, que se deriven del ejercicio del control sanitario en las materias que comprende este Reglamento, se sujetará a lo que dispone el Capítulo III, del Título Décimo Octavo de la Ley.

#### CAPITULO XVI

##### Recurso de Inconformidad

ARTICULO 207.—Contra actos y resoluciones de la Secretaría, que con motivo de la aplicación de este Reglamento, den fin a una instancia o resuelvan un expediente, los interesados podrán interponer el recurso de inconformidad y su tramitación se ajustará al Capítulo IV del Título Décimo Octavo de la Ley.

ARTICULO 208.—El recurso de inconformidad podrá desecharse en los siguientes casos:

- I.—Cuando se presente fuera del término a que se refiere el artículo 439 de la Ley;
- II.—Cuando no se acredite, en términos de la Ley, la personalidad del promovente;
- III.—Si el recurrente, dentro del término señalado en el acuerdo respectivo, no cumple con la prevención emitida por la Secretaría, y
- IV.—Los demás que procedan conforme a las disposiciones legales aplicables en la Ley y el Código Federal de Procedimientos Civiles.

#### TITULO TERCERO

##### Agua y hielo para uso y consumo humano y para refrigerar

#### CAPITULO I

##### Agua

ARTICULO 209.—Se considera agua potable o agua apta para consumo humano, toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud.

Se considera que no causa efectos nocivos a la salud, cuando se encuentra libre de gérmenes patógenos y de sustancias tóxicas, y cumpla, además con los requisitos que se señalan en este Título y en la norma correspondiente.

ARTICULO 210.—Para considerar que el agua es potable, la investigación bacteriológica se realizará de acuerdo a las normas respectivas y deberá dar como resultado lo siguiente:

- I. El número de organismos coliformes totales, deberá ser, como máximo, de dos organismos en 100 ml, según las técnicas del número más probable (NMP) o de la de filtro de membrana, y

- II. No contendrá organismos fecales.

Aparte de lo anterior, se podrán realizar, a satisfacción de las autoridades sanitarias, todas las pruebas que se consideren necesarias, a fin de identificar otros riesgos a la salud.

ARTICULO 211.—Los requisitos organolépticos y físicos, se establecerán atendiendo a las siguientes características: aspecto, pH, sabor, olor, color, turbiedad del agua y, en su caso, los demás que señale la norma.

ARTICULO 212.—Se considera que el agua es potable, en lo relativo a las características organolépticas y físicas, cuando se encuentre dentro de los límites siguientes:

- I. Aspecto: Líquido;
- II. pH: De 6.9 a 8.5;
- III. Sabor: Característico;

IV. Olor: Característico;

V. Color: Hasta 20 unidades de la escala de platino cobalto, o su equivalente en otro método, y

VI. Turbiedad: Hasta 10 unidades de la escala de sílice, o su equivalente en otro método.

ARTICULO 213.—El contenido, expresado en miligramos por litro, de elementos, iones y sustancias, no excederá los límites permisibles que a continuación se expresan:

Alcalinidad Total expresada-Como $\text{CaCO}_3$ .....	400.00
Aluminio.....	0.20
Arsénico.....	0.05
Bario.....	1.00
Cadmio.....	0.005
Cianuro expresado como-ión $\text{CN}$ .....	0.05
Cobre.....	1.50
Cloro libre: En agua clorada.....	0.20
En agua sobre clorada.....	1.00
Cromo hexavalente.....	0.05
Dureza de Calcio expresada como- $\text{CaCO}_3$ .....	300.00
Fenoles o compuestos fenólicos.....	0.001
Hierro.....	0.30
Fluoruros expresado como elemento.....	1.50
Magnesio.....	125.00
Manganeso.....	0.15
Mercurio.....	0.001
Nitratos expresados como nitrógeno.....	5.00
Nitritos expresados como nitrógeno.....	0.05
Nitrógeno protéico.....	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido.....	3.00
Plomo.....	0.05
Selenio.....	0.05
Sulfatos, expresados como ión.....	250.00
Zinc.....	5.0
SAAM (Substancias Activas al Azul de Metileno).....	0.5
ECC (Extractables Carbón-Cloroformo).....	0.5
ECA (Extractables Carbón-Alcohol).....	1.5

Los demás que señale la norma correspondiente.

ARTICULO 214.—En materia de agua para consumo humano, se determinará en la norma:

I. El tratamiento a que deberá sujetarse en los sistemas públicos de abastecimiento, para asegurar su potabilidad;

II. El tipo, contenido y periodicidad de los análisis y exámenes necesarios para vigilar su potabilidad;

III. Las técnicas para la toma, conservación, transporte y manejo de muestras, así como los métodos para realizar las determinaciones necesarias para verificar su potabilidad;

IV. Los métodos de prueba de equipos y aparatos purificadores de tipo doméstico, y

V. Los demás aspectos, condiciones, requisitos y características que la Secretaría juzgue necesarios para que el agua pueda ser destinada para consumo humano.

ARTICULO 215.—Para los efectos de este Reglamento, se entiende por sistema de abastecimiento, el conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, líneas de conducción y distribución, que abastece de agua para consumo humano a una o más localidades o locales, sean de propiedad pública o privada.

ARTICULO 216.—La Secretaría establecerá los requisitos sanitarios que deban cumplir las construcciones, instalaciones y equipos de los sistemas de abastecimiento para proteger la salud de la población.

ARTICULO 217.—Los gobiernos de las entidades federativas otorgarán, de confor-



**3.5 Características físicas y organolépticas.-** Son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.

**3.6 Características químicas.-** Son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

**3.7 Características radiactivas.-** Son aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

**3.8 Coagulación química.-** Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

**3.9 Contingencia.-** Situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa y que pongan en riesgo la salud humana.

**3.10 Desinfección.-** Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

**3.11 Filtración.-** Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

**3.12 Floculación.-** Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.

**3.13 Intercambio iónico.-** Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.

**3.14 Límite permisible.-** Concentración o contenido máximos o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

**3.15 Neutralización.-** Ajuste del pH, mediante la adición de agentes químicos básicos o ácidos al agua en su caso, con la finalidad de evitar incrustación o corrosión de materiales que puedan afectar su calidad.

**3.16 Osmosis inversa.-** Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltas en el agua, el cual por medio de altas presiones fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniendo los iones y moléculas de mayor tamaño.

**3.17 Oxidación.-** Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos

**3.18 Potabilización.-** Conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano.

**3.19 Precipitación.-** Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.

**3.20 Sistema de abastecimiento.-** Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

#### **4 LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA**

##### **4.1 Límites permisibles de características bacteriológicas**

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra de agua simple, deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

Bajo situaciones de emergencia sanitaria, las autoridades competentes dictarán las medidas necesarias para identificar la presencia de otros agentes biológicos nocivos a la salud.

**TABLA 1**

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE</b>
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

**4.2 LIMITES PERMISIBLES DE CARACTERISTICAS FISICAS Y ORGANOLEPTICAS**

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

**TABLA 2**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	15 unidades de color verdadero en la escala de platino cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquéllos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

**4.3 LIMITES PERMISIBLES DE CARACTERISTICAS QUIMICAS**

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

**TABLA 3**

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.5-1.00 (después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min)
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Fosfatos (como PO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	0.10
Manganeso	0.10
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
Oxígeno consumido en medio ácido	3.00
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l Aldrin y dieldrin (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00

Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

#### 4.4 LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS RADIACTIVAS

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

TABLA 4

RADIATIVIDAD ALFA GLOBAL	0.1
RADIATIVIDAD BETA GLOBAL	1.0

#### 5 TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

##### 5.1 Contaminación biológica.

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

##### 5.2 Características físicas y organolépticas.

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción con carbón activado u oxidación.

##### 5.3 Constituyentes químicos.

5.3.1 Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción con carbón activado.

5.3.3 Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa, o evaporación.

5.3.4 Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción con carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros.- Adsorción con carbón activado, ósmosis inversa o coagulación química.

5.3.8 Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción con carbón activado.



# HANDBOOK OF DRINKING WATER QUALITY

Standards  
and  
Controls

**John De Zuane, P.E.**  
*Consulting Engineer and Former  
Director of the Bureau of  
Public Health Engineering  
New York City Department of Health*



VAN NOSTRAND REINHOLD  
New York

CADMIUM
---------

**CHEMISTRY**

A soft, blue-white metallic chemical element occurring as a sulfide or carbonate in zinc ores; symbol Cd; at. wt. 112.41; at. no. 48; sp. gr. 8.65; valence 2. As an element it is insoluble in water; in nature cadmium appears in zinc, copper and lead ores. Chlorides, nitrates, and sulfate of cadmium are soluble in water. (Cadmium will precipitate at high pH since carbonate and hydroxide are insoluble.)

Similar to zinc, it is used in electroplating, in many types of solders, batteries, television sets, and as a yellow pigment. It is also used in ceramics, photography, insecticides, and as an alloy with copper, lead, silver, aluminum, and nickel.

**ENVIRONMENTAL EXPOSURE****Raw Water**

Since it is found in low concentrations in rocks, coal, and petroleum, it is found in ground water more than in surface water as a natural occurrence. Therefore, it may enter the water supply from mining, industrial operation, and leachates from landfill. Also, cadmium may enter the distribution system from corrosion of galvanized pipes. Raw water may contain normally less than 1  $\mu\text{g/L}$ .

**Air and Nutrition**

Cigarettes contain high levels of cadmium (1 ppm). Urban air has higher levels of cadmium: reported levels in air from 0.0005–0.01  $\mu\text{g}/\text{mc}$  according to Regulatory Agencies in the U.S. With 20 mc/day ventilation rate and a typical value of 0.01  $\mu\text{g}/\text{mc}$ , a male adult respiratory intake is 0.2  $\mu\text{g}/\text{day}$ . Exposure to cadmium dust should not exceed 0.15 mg/mc (15 min). Cadmium oxide fume exposure should not exceed 0.05 mg/mc.

Daily dietary intake of cadmium for an adult male averages between 10 and 50  $\mu\text{g}$ , with grains, cereals, potatoes, meat, fish, and poultry as major cadmium suppliers. A tolerable weekly intake of 0.4–0.5 mg/individual was accepted by FAO\*/WHO in 1972.

\* United Nations Food and Agricultural Organization (Rome, Italy)

**Water Surveys**

The USEPA reported the results of federal surveys conducted between 1969 and 1980 of 707 ground water supplies and 117 surface water supplies as:

- Ground water—27% above 2  $\mu\text{g/L}$  (mean of positives: 3  $\mu\text{g/L}$ ).
- Surface water—20% above 2  $\mu\text{g/L}$  (mean of positives: 3.2  $\mu\text{g/L}$ ).

Soft water of low pH may register higher values when plumbing systems contain cadmium.

**HEALTH EFFECTS**

Human beings reported nausea and vomiting at 15 mg/L, with no adverse effects at 0.05 mg/L. Severe toxic, but not fatal, symptoms are reported at concentrations of 10–326 mg (NAS, Vol. 4, 1982). The death of a boy within 1.5 hr was reported after ingestion of 9 g of cadmium chloride. The kidneys are the critical target organ by ingestion (renal dysfunction, hypertension, and anemia).

**A. HUMAN STUDY—One-Day assessment**

Uncertainty factor = 10

0.043 mg/kg/day of NOAEL

Consumption: 1 liter per 10-kg child = 43  $\mu\text{g/L}$

2 liters per 70-kg adult = 150  $\mu\text{g/L}$

**B. ANIMAL STUDY—Ten-Day assessments**

Uncertainty factor = 1000(+ additional factor of  $10^{-1}$ )

0.08 mg/kg/day NOAEL (proteinuria in rats)

Consumption: 1 liter per 10-kg child = 8  $\mu\text{g/L}$

2 liters per 70-kg adult = 29  $\mu\text{g/L}$

**C. AADI**

Endpoint: renal dysfunction

Threshold: critical concentration of cadmium in the renal cortex

Range: 50–300  $\mu\text{g/g}$

LOAEL = 0.352 mg/day (in humans)

Provisional AADI = 0.018 mg/L  $[0.352 \div (10 \times 2)]$

Uncertainty factor = 10

Consumption: 2 liters of water per day

IARC = group 2B (limited evidence of carcinogenicity in humans, sufficient evidence for animals)

Exposure: inhalation

Ingestion: no evidence of carcinogenicity in animals or humans

EPA Regulation: based on chronic toxicity

## STANDARDS

USPHS 1925-1942-1946	= not stated
USPHS 1962	= 0.01 mg/L
NIPDWR	= 0.01 mg/L
WHO Guidelines	= 0.005 mg/L
European Community	= 0.005 mg/L
RMLC (1985)	= 0.005 mg/L
NAS-SNARL	= 0.005 mg/L*
EPA Classification	= B1 = "Limited evidence in humans exposed to cadmium fumes, cancer in rats exposed to cadmium chloride aerosol, injection site tumors in animals given cadmium salts. However, regulating as "D" (see Barium) since there is inadequate evidence to conclude that the chemical is carcinogenic via ingestion." MLCG (1989) and MCL (1989) = 0.005 mg/L (USEPA)

## ANALYSIS

*Standard Methods* introducing cadmium states that the cadmium concentrations of U.S. drinking water have been reported to vary between 0.4–60 µg/L, with a mean of 8.2 µg/L.

Reliable analytical methods have been determined and applied for cadmium in drinking water. Atomic Absorption Spectrometric Method is the preferred with the Dithizone Method considered acceptable when an AA Spectrometer is unavailable. The USEPA (1985) approved the same methods reported for barium.

## REMOVAL/NOTES

There is no accepted, economically effective method for direct removal of cadmium at high concentration. Pilot plant study may be used attempting precipitation as carbonate and hydroxide at high pH. Every effort for locating the source of cadmium contamination and its partial or total elimination should be undertaken prior to consideration of a treatment solution.

\* Based on 10 mg/L concentration of cadmium as the no-effect level in rats, resulting in 0.75 mg/kg, using a safety factor of 1,000, a 70-kg human consuming 2 L per day and assuming a 20% exposure from drinking water, SNARL is calculated as

$$\frac{0.75 \text{ mg/L} \times 70 \text{ kg} \times 0.20}{1000 \times 2 \text{ L}} = 0.005 \text{ mg/L (NAS Vol. 4, 1982)}$$

The USEPA *Quality Criteria For Water* of 1976 recommends 10 µg/L for domestic water supply (based on health criteria). New York State limits to 0.3 mg/L cadmium content reaching all fresh waters with none in amounts that will be injurious to fish life or shellfish, or that would impair any designated uses of water.

Water treatment industry has confidence in cadmium removal by lime softening when concentrations are less than 0.5 mg/L. Less effective is the removal with ferric sulfate and alum clarification.

USEPA proposed in 1989 the following treatment processes as BAT for cadmium removal: ion exchange; reverse osmosis; coagulation/filtration; and lime softening.

## CHROMIUM

## CHEMISTRY

Defined as a grayish-white crystalline, very hard metallic chemical element with a high resistance to corrosion; used in chromium electroplating, in alloy steel (stainless steel), and in alloys containing nickel, copper, manganese, and other metals; symbol Cr; at. wt. 51.996, at. no. 24; sp. gr. 7.20, valence 2, 3, or 6. Principal ore is chromite—FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. The most important compounds are the chromates of sodium and potassium (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>); the dichromates (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), and the potassium and ammonium chrome alums (KCr(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> × 12H<sub>2</sub>O); and lead chromate.

chromous ion Cr <sup>++</sup>	metallic chromium
chromic ion Cr <sup>+++</sup>	} <i>trivalent</i> —more stable in general but not in chlorinated water
chromite ion CrO <sub>5</sub> <sup>---</sup> or CrO <sub>7</sub> <sup>---</sup>	
chromite ion CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	} <i>hexavalent</i> —with tendency to be quickly reduced by organic species
dichromate ion Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>-</sup>	

- chlorides, nitrate, and sulfate (trivalent chromic salts) are soluble in water;
- hydroxide and carbonates are quite insoluble; and
- sodium, potassium, and ammonium chromates (hexavalent chromates salts) are soluble; corresponding dichromates are quite insoluble

Chromium is also used as a corrosion inhibitor in the textile, glass, and photographic industries.

**Benzene**  
**C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>**

**Contaminant**

A volatile, flammable, colorless liquid with an ethereal odor. Basically a commercial solvent and a product by chemical processes related to petroleum refining, coal tar distillation, and coal processing.

**Use**

Benzene is normally used as a chemical intermediate in the manufacturing of styrene, cyclohexane, detergents, pesticides, synthetic rubber, aviation fuel, dye, paints, pharmaceuticals, gasoline and photographic chemicals.

**Occurrence in the Environment**

In gasoline benzene accounts for 0.8% by volume normally, with some higher concentration occasionally. In ambient air of gasoline stations, benzene varies between 0.001–0.008 mg/L. The highest concentration reported in drinking water was 10 µg/L. Summarizing reported values in drinking water, NAS—1980 (Vol. III) recorded from surveys conducted by the USEPA 0/111, 7/113 (0.4 µg/L), and 4/16 (0.55 µg/L) as positive samples for benzene per number of cities sampled.

**Health Effects**

According to USEPA (*Fed. Reg.* Vol. 49, No. 114, June 12, 1984, and Vol. 50, No. 219, Nov. 13, 1985, carcinogenic effects in humans have been documented: myelocytic anemia, thrombocytopenia, and leukemia. Toxic effects include the central nervous system, hematological and immunological effects.

A NOAEL of 1 mg/kg was determined in animals, so using an uncertainty factor of 1,000, the ADI resulted in 0.025 mg/L (100% exposure from drinking water, 70-kg adult and 2 liters of water per day and 5/7 correction factor for weekly feeding

days). The IARC, NAS, and USEPA classify benzene as a contaminant with sufficient evidence of carcinogenicity in humans.

**Standards**

USEPA final MCL	= 0.005 mg/L (July 1987)
USEPA RMCL	= zero (Nov. 1985)
USEPA proposed MCL	= 0.005 mg/L (Nov. 1985)
WHO recommended 1984	= 0.010 mg/L as a guide (see Notes)
EEC 1980	= No Guideline

**Analytical Methods**

Benzene can be analyzed as other volatile aromatic and unsaturated organic compounds in water by purge-and-trap gas chromatography (photoionization detector). Also all regulated VOCs in the above mentioned regulations can be determined by purge-and-trap gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS).

**Notes**

Minimum detectable concentration of benzene in water is registered at 0.5 mg/L, with taste detectability at 4.5 mg/L. NAS—1977, Vol. 1—recognized only the possibility of carcinogenicity of benzene in water. Because all data were related to industrial exposure to benzene, more toxicological studies were recommended prior to the issuance of drinking water standards by USEPA.

The USEPA final rules for public notification include the following language to be used by public water supply system responsible managers:

*"Benzene.* The United States Environmental Protection Agency (EPA) sets drinking water standards and has determined that benzene is a health concern at certain levels of exposure. This chemical is used as a solvent and degreaser of metals. It is also a major component of gasoline. Drinking water contamination generally results from leaking underground gasoline and petroleum tanks or improper

waste disposal. This chemical has been associated with significantly increased risks of leukemia among certain industrial workers who were exposed to relatively large amounts of this chemical during their working careers. This chemical has also been shown to cause cancer in laboratory animals when the animals are exposed at high levels over their lifetimes. Chemicals that cause increased risk of cancer among exposed industrial workers and in laboratory animals also may increase the risk of cancer in humans who are exposed at lower levels over long periods of time. EPA has set the enforceable drinking water standard for benzene at 0.005 parts per million (ppm) to reduce the risk of cancer or other adverse health effects which have been observed in humans and laboratory animals. Drinking water which meets this standard is associated with little to none of this risk and should be considered safe."

12  
The WHO (1984) issued a guideline value for benzene of 10 µg/L under the organic constituents of health significance. This value was computed "from a conservative hypothetical mathematical model." The WHO recognized that drinking water concentrations of benzene did not exceed 1 µg/L and all the studies involved inhalation exposure. Because benzene tends to effect the entire organism (systemic), WHO guidelines were set on data for leukemia applied to a linear multi-stage extrapolation model.

Total uptake of benzene in urban environments have been estimated in about 125 mg/year; food is considered to have contributed with 90 mg/year. Normal water concentration of less than 1 µg/L would contribute to less than 1 mg/year ( $1 \mu\text{g/L} \times 2 \text{ L/day} \times 365 \text{ days} = 0.730 \text{ mg/year}$ ).

**Vinyl Chloride  
or Chloro Ethylene  
or Monochloroethylene  
CH<sub>2</sub> = CHCl**

**Contaminant**

Commercially synthesized by the halogenation of ethylene; slightly soluble in water (less than 0.11% by weight). CAS #75.01-4.

**Use**

The major use in the U.S. is in the production of polyvinyl chloride (PVC) resins for the building and construction industry (pipes, conduit, floor covering).

USEPA banned the sale of propellents and all the aerosols containing vinyl chloride monomer due to human and animal carcinogenicity. A distribution system constructed with PVC pipes showed concentrations of 1.4 µg/L.

**Occurrence in the Environment**

USEPA in 1975 tested the finished water of 10 cities registering a concentration of 5.6 µg/L in Miami and 0.27 µg/L in Philadelphia. States recorded 2 positives out of 646 samples collected with a max. = 17 ppb.

**Health Effects**

Industrial exposure to this contaminant in workers confirmed hepatic angiosarcoma when liquified vinyl chloride under pressure was handled, probably in concentrations from 1,000 to several thousand ppm (NAS—1977). Lesions of skin, bones, liver, spleen, and lungs were reported after chronic exposure. NAS—1983 (Vol. 5) recorded the no-observed-effect level at less than 1.7 mg/L. Mutagenicity and teratogenicity studies did not produce conclusive results (mutagen in-vitro), but carcinogenicity in animals was proved by inhalation (NAS—1977 and 1983).





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS  
Y RELLENOS SANITARIOS***

**PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# GASOLINERA

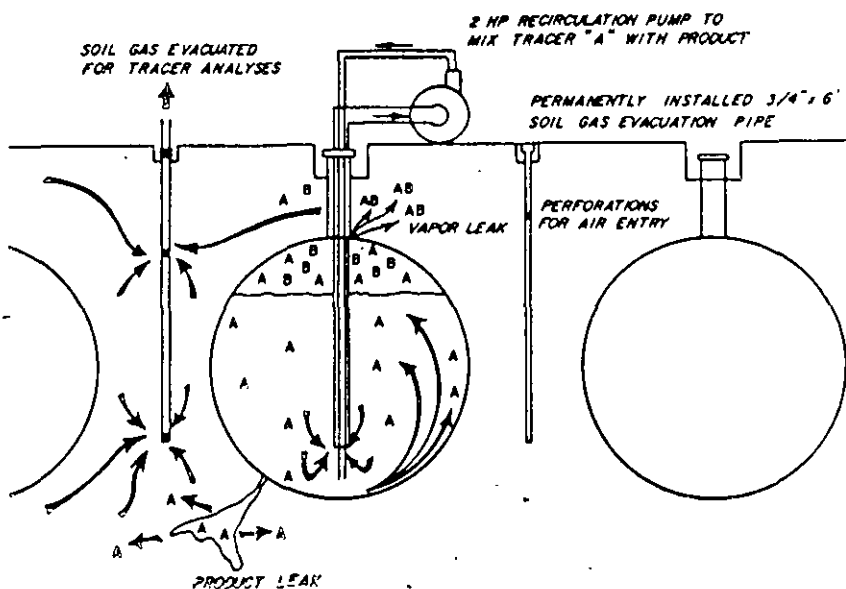
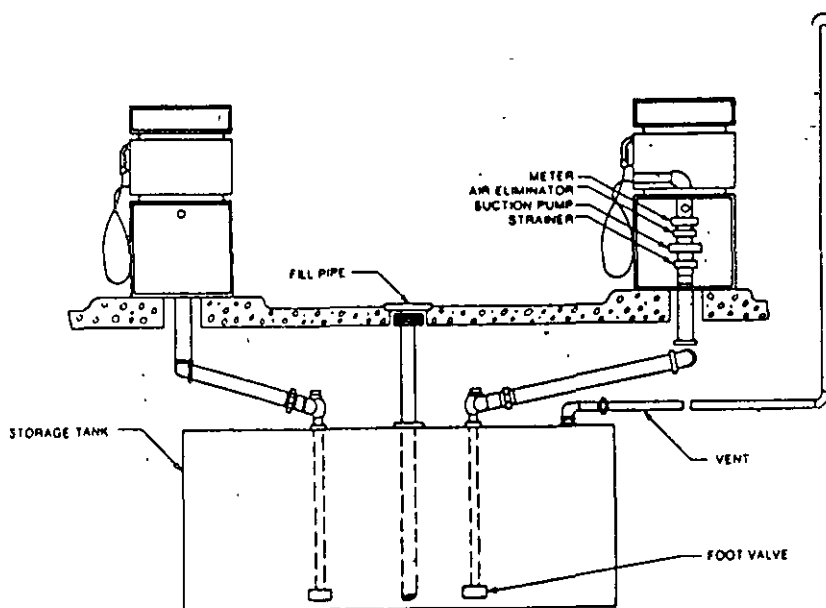
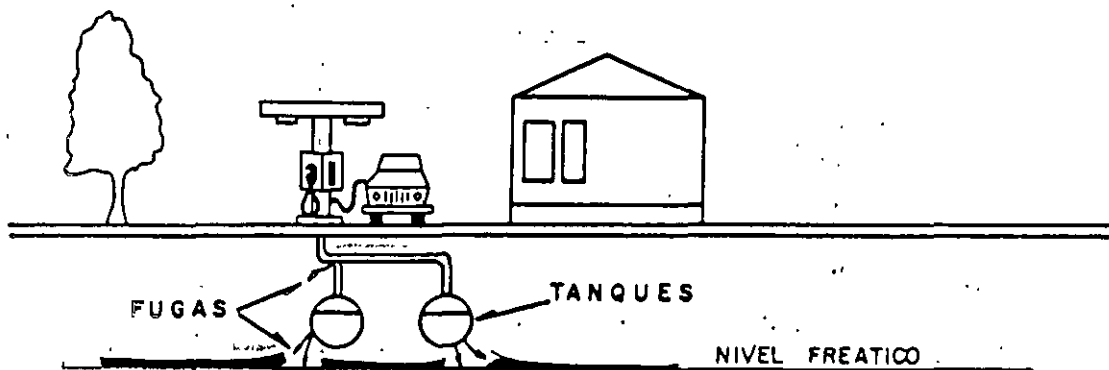
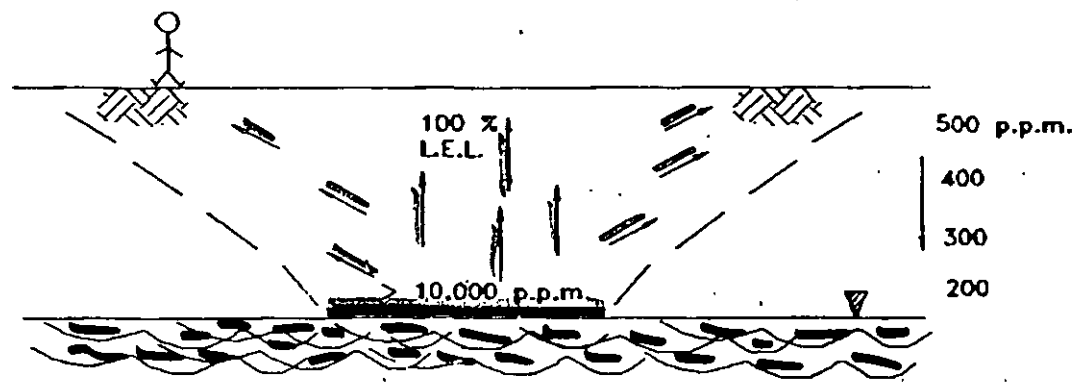
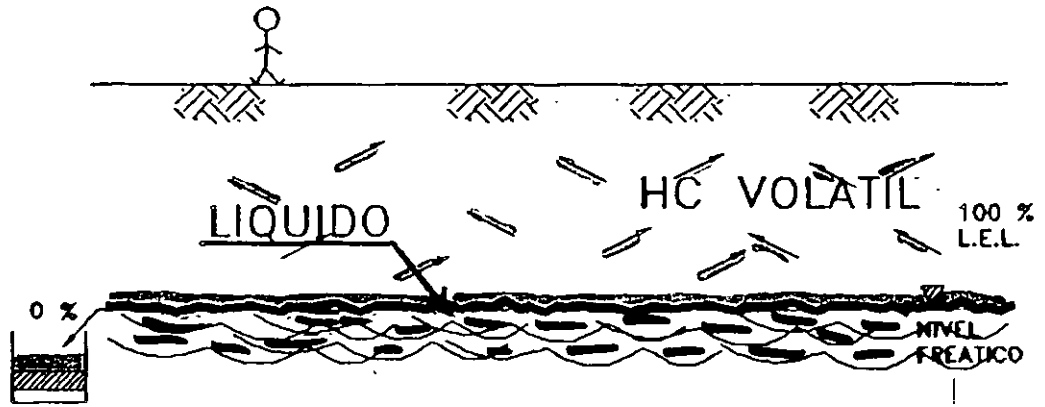


Figure 10. Dual-tracer leak detection method. (Source: Thompson, 1985, 1988)



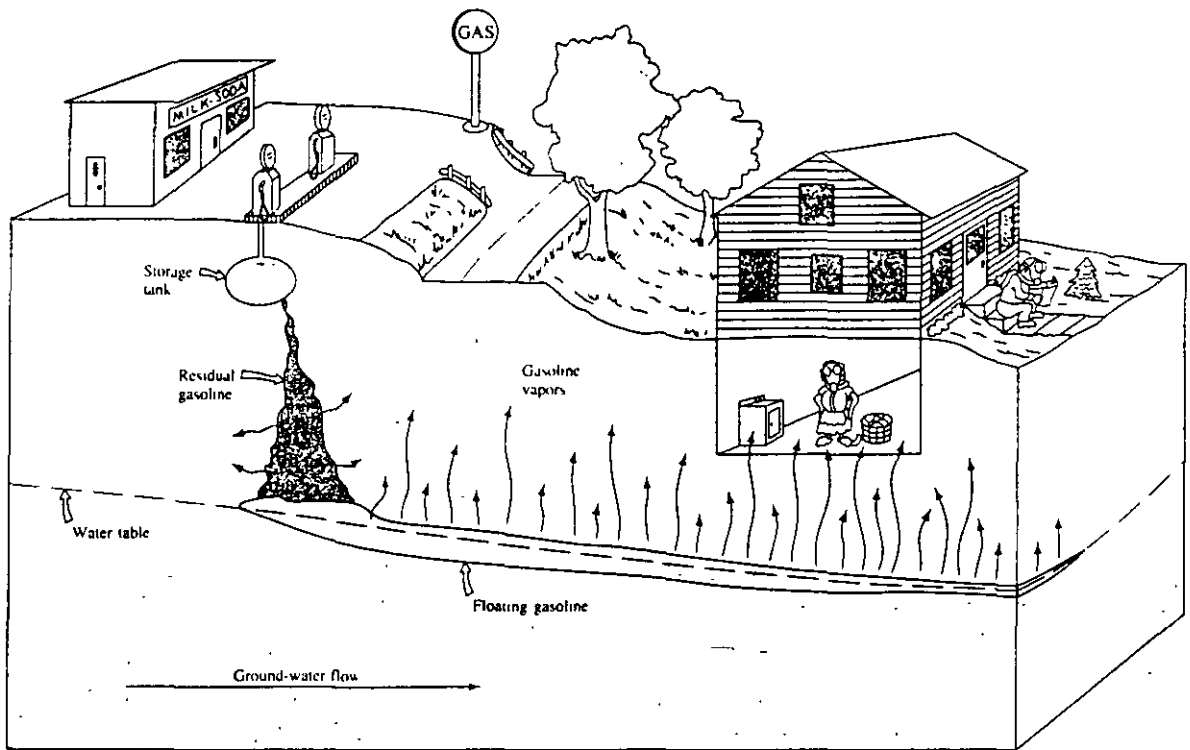


FIGURE 9.25 Release of organic vapors in vadose zone from residual saturation and floating product.

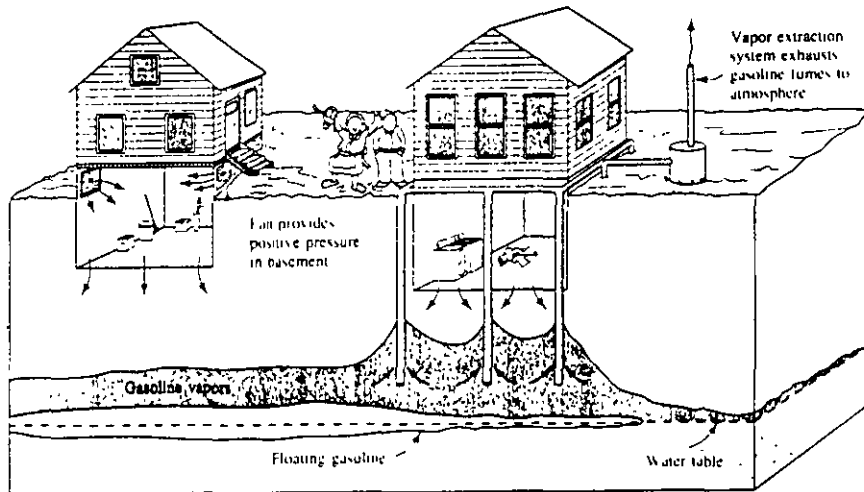
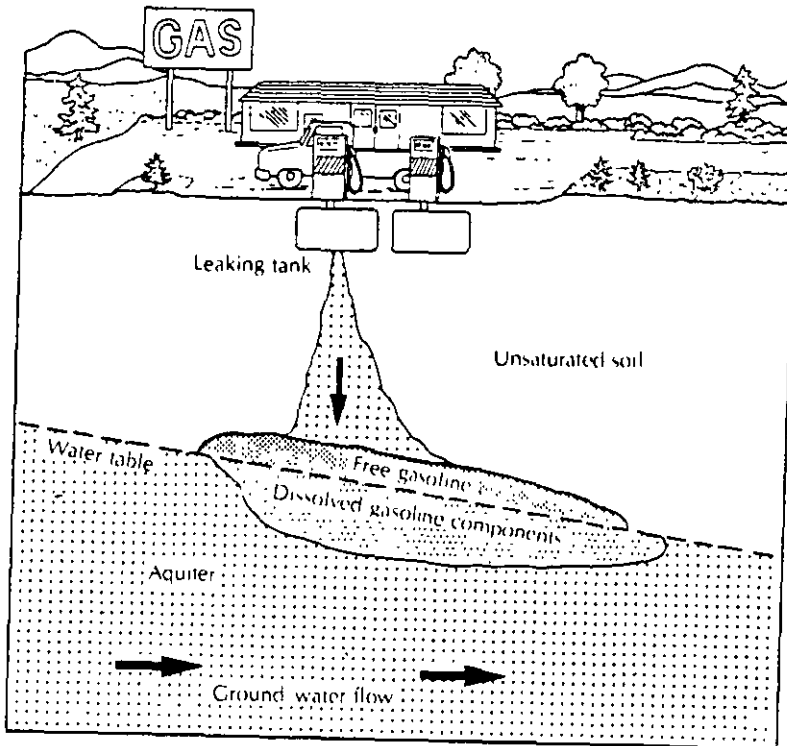
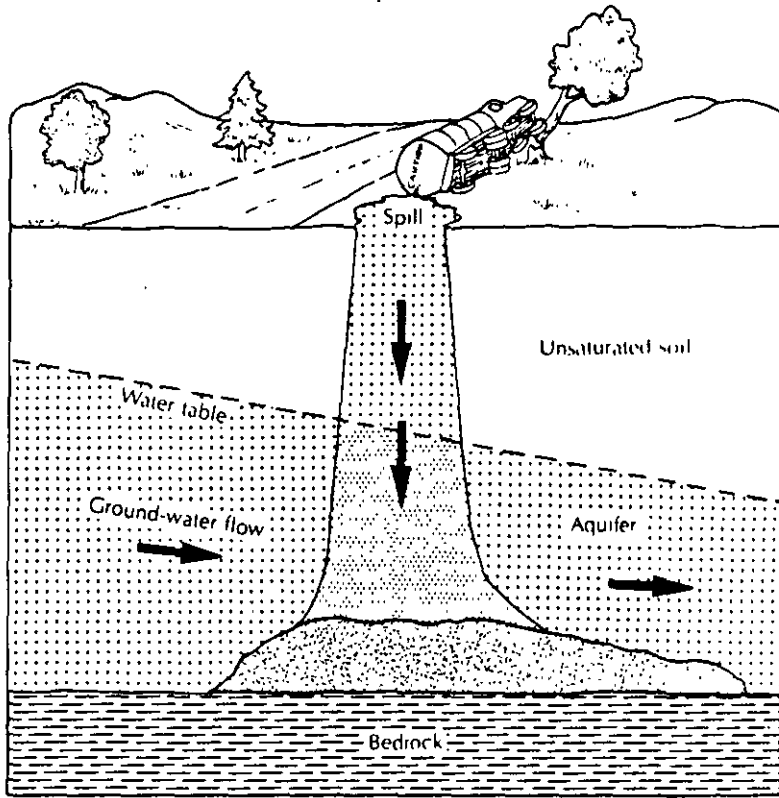
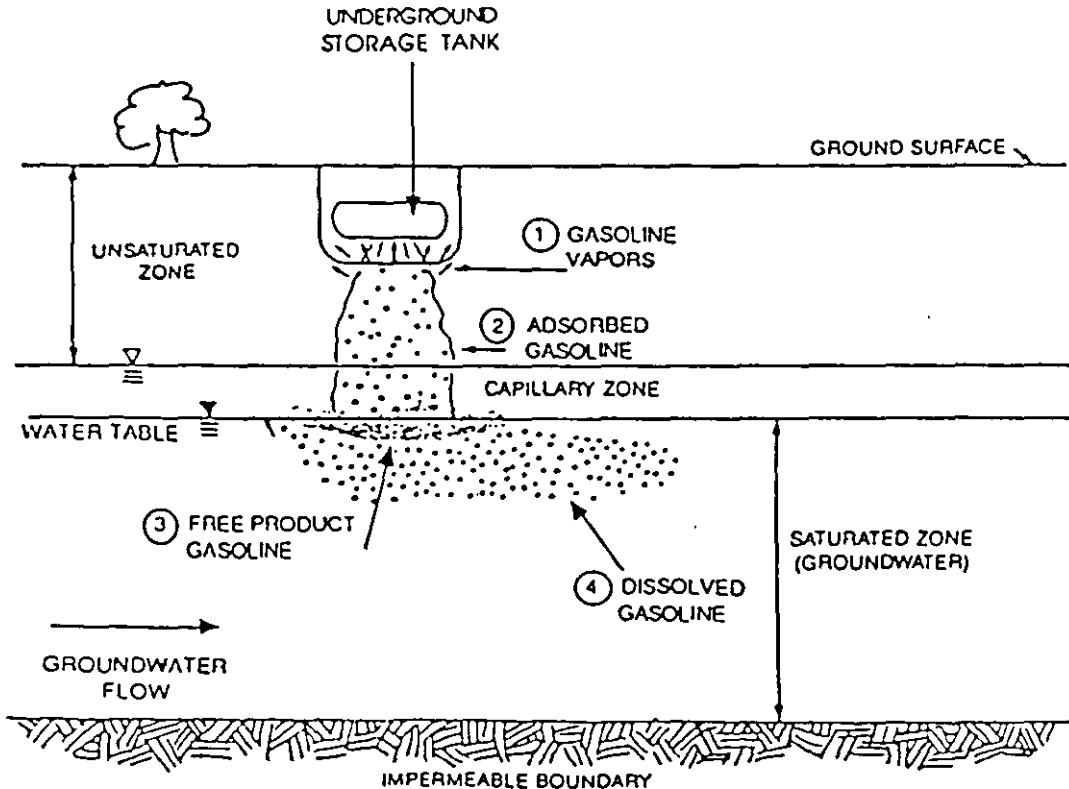
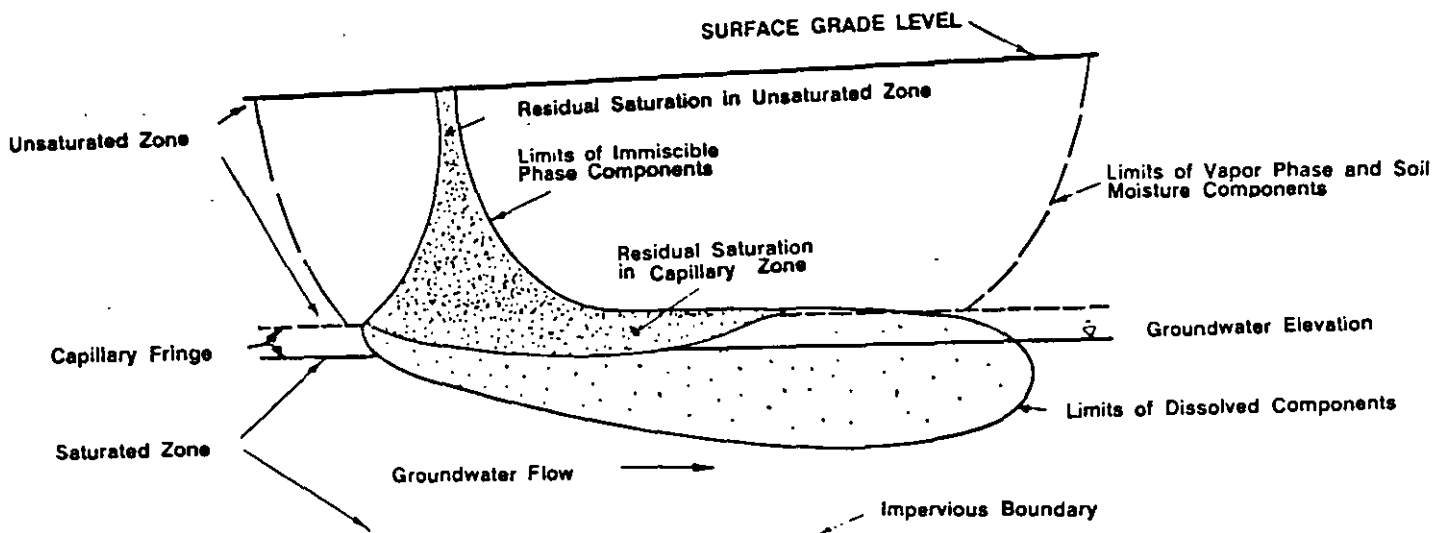


FIGURE 9.26 Control of organic vapors in the vadose zone. Source: Modified from M. J. O'Conner, J. G. Agar and R. D. King, *Proceedings of Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration*, 1984, pp. 519-33. National Water Well Association. Used with permission.





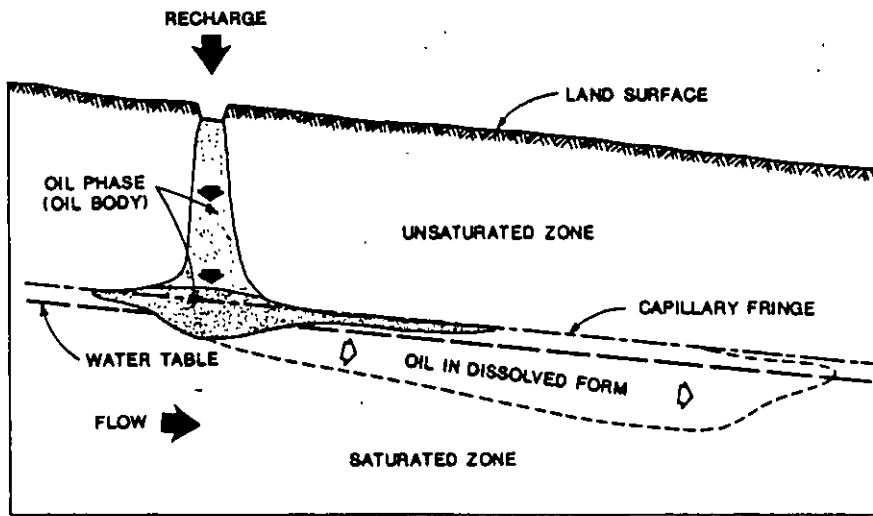


Figure 3-35. Example of multiphase flow in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

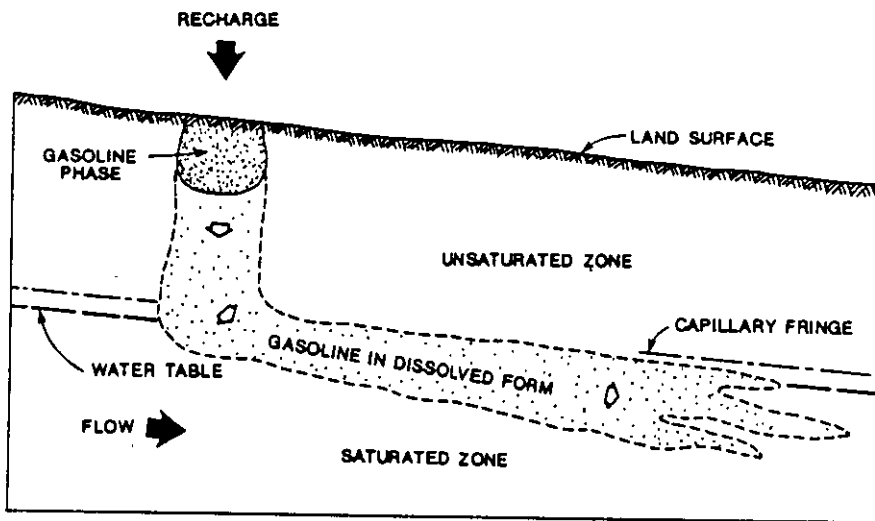


Figure 3-34. Movement of gasoline in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

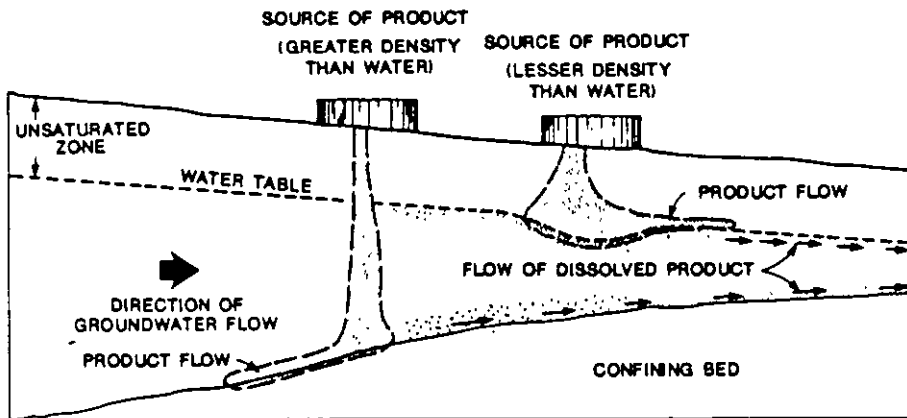
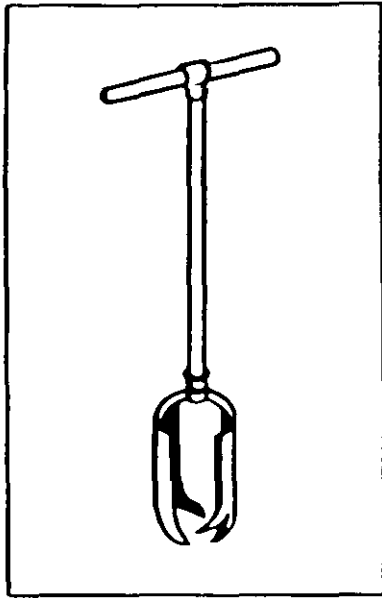
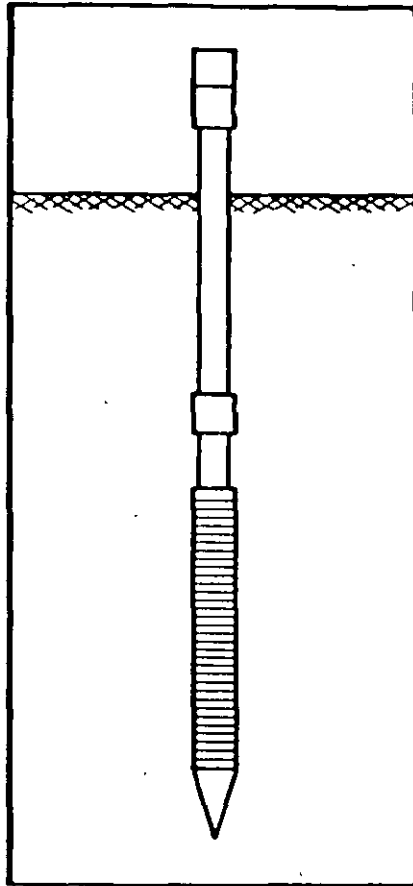


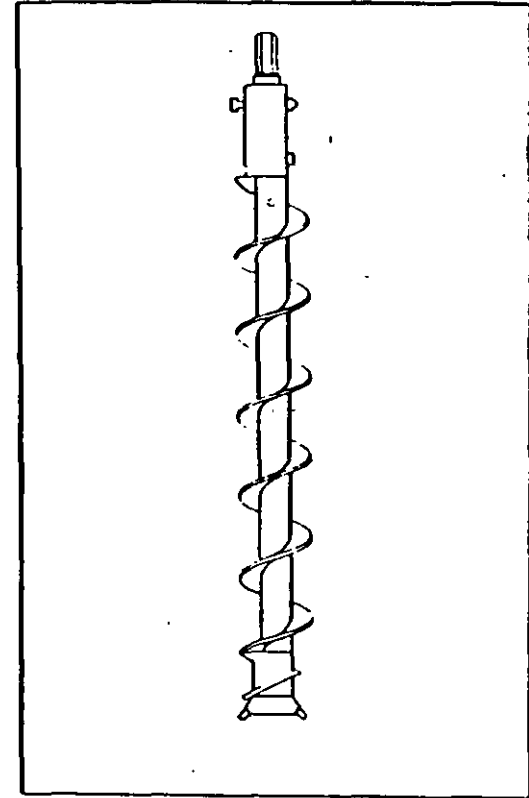
Figure 3-36. Example of the subsurface movement of fluids with densities greater than, and less than, that of water.



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE  
INCADO DE TUBERÍA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

FUENTE: NWWA, 1989, HANDBOOK OF SUGGESTED

FIGURA 3

8



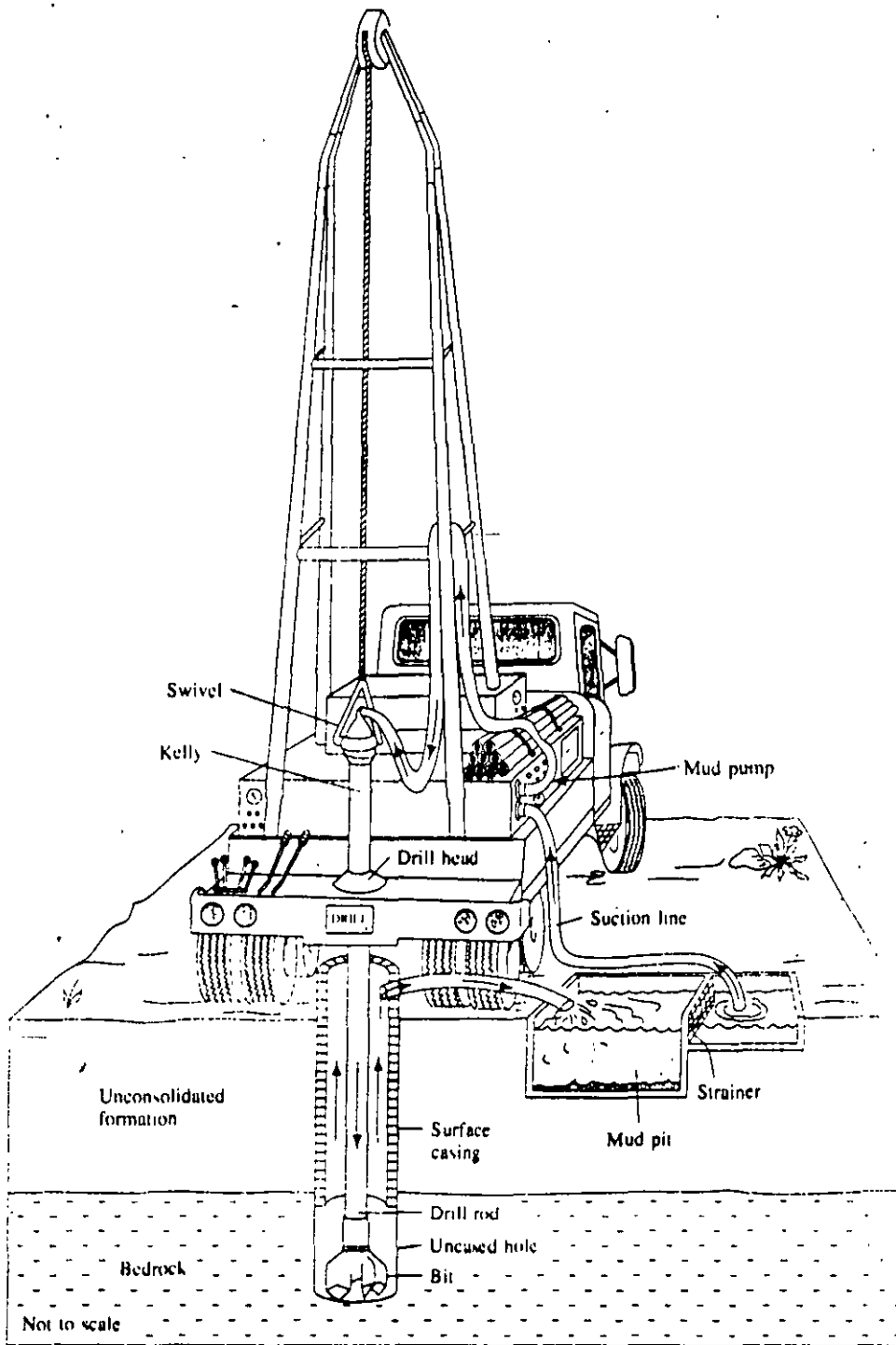


FIGURE 8.11 Circulation of drilling fluid in mud-rotary drilling.

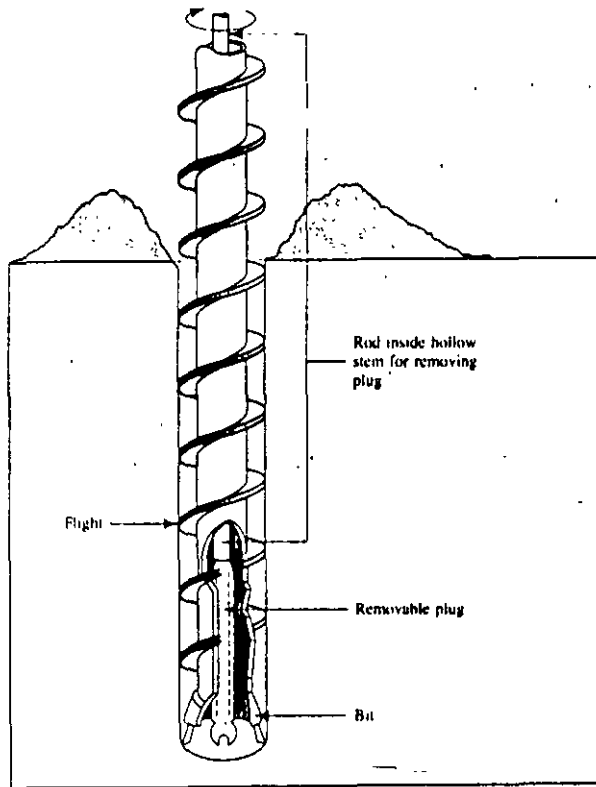


FIGURE 8.9 Hollow-stem auger drill rod and bit. Source: M. L. Scall et al. *Manual of Ground Water Sampling Procedures*, 1981. National Water Well Association. Used with permission.

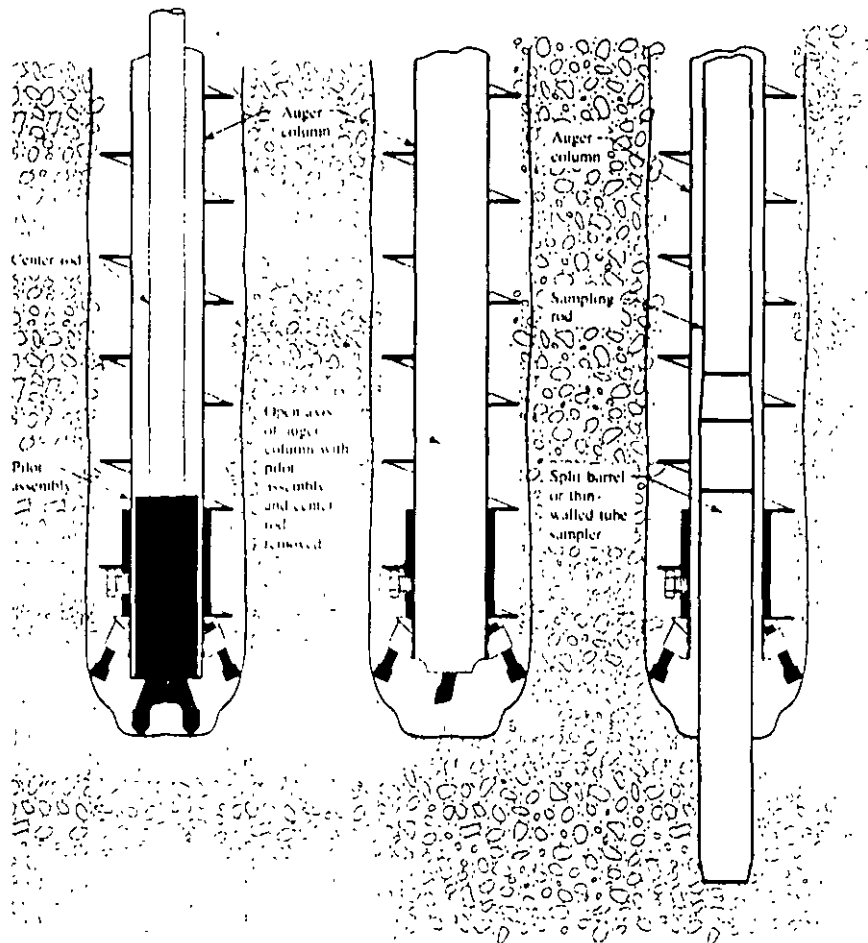
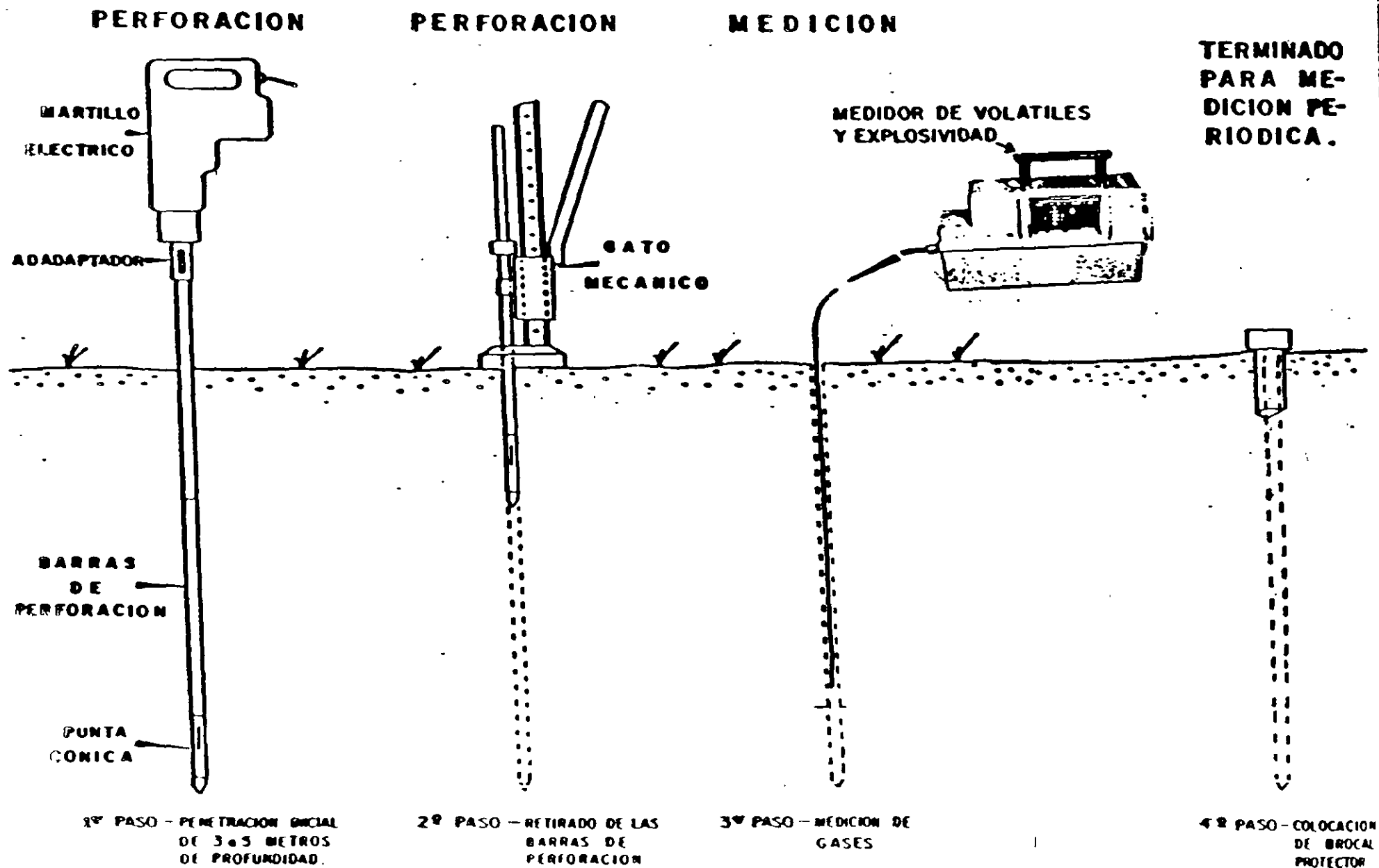


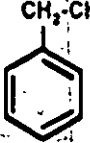
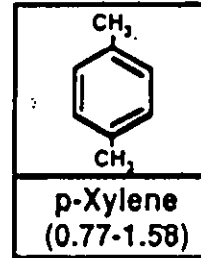
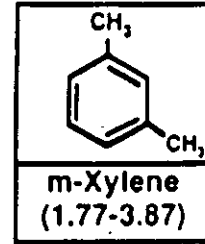
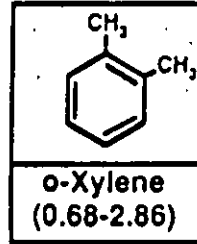


FIGURE 8.13 Sequential steps for the collection of a core sample through a hollow-stem auger. Source: Glen Mockett, *Ground Water Monitoring Review* 7, no. 4 (1987): 51-62. Used with permission. Copyright © 1987 Water Well Journal Publishing Co.



**FIGURA 3.1** INSTALACION DE PUNTOS DE OBSERVACION PARA DETECCION DE VOLATILES

	<b>Benzene</b> (0.12-3.50)
	<b>Toluene</b> (2.73-21.80)
	<b>Ethyl Benzene</b> (0.36-2.86)



Lesser y Asoc. S.A. de C.V.

**B  
T  
E  
X**

# BIOTREATMENT SYSTEM SCHEMATIC

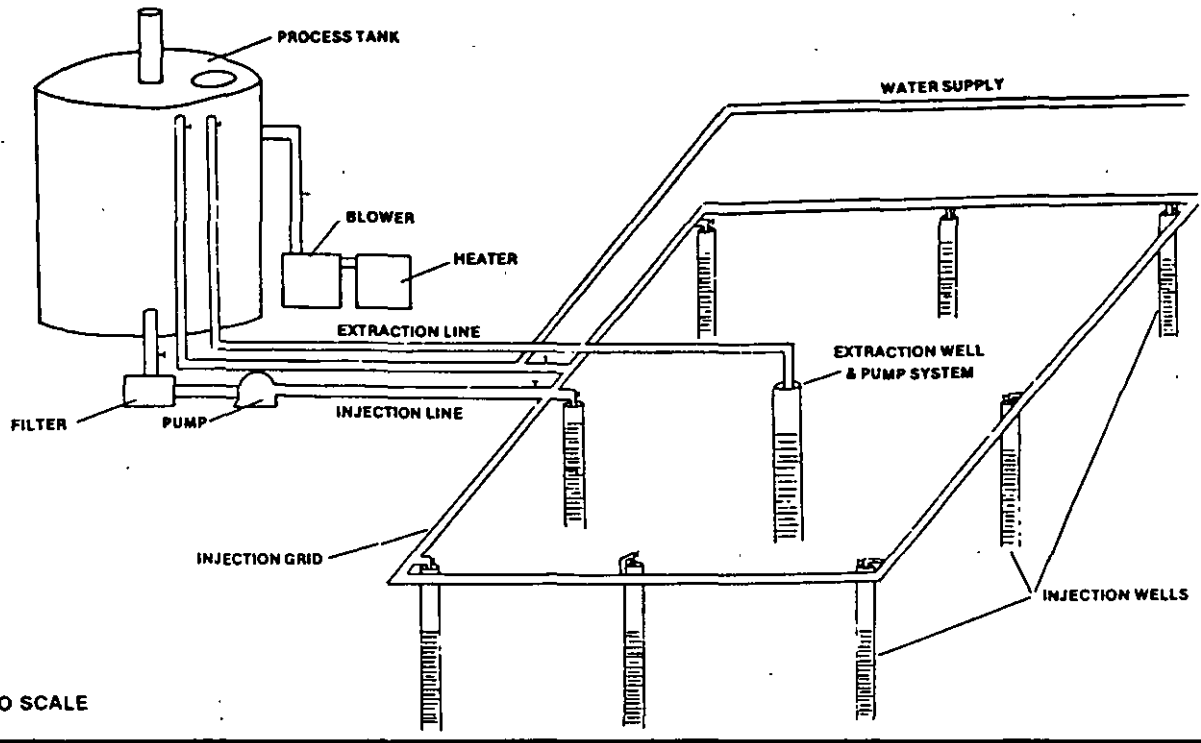
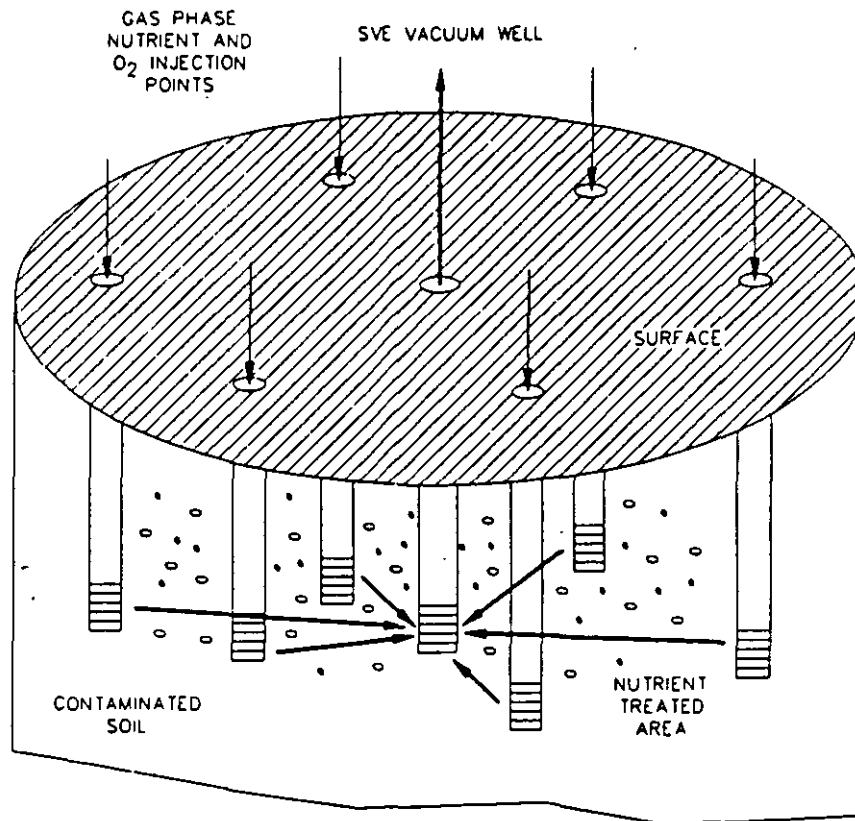
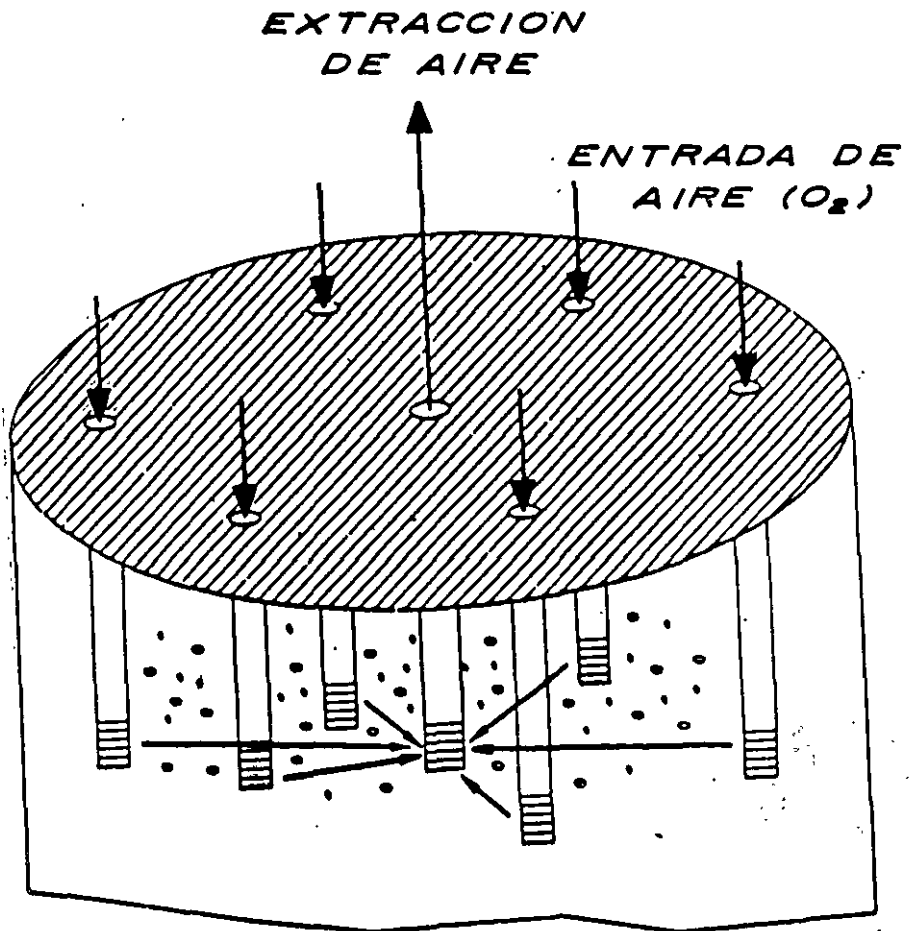


Figure 1. Continuous recirculation.



# SANEAMIENTO

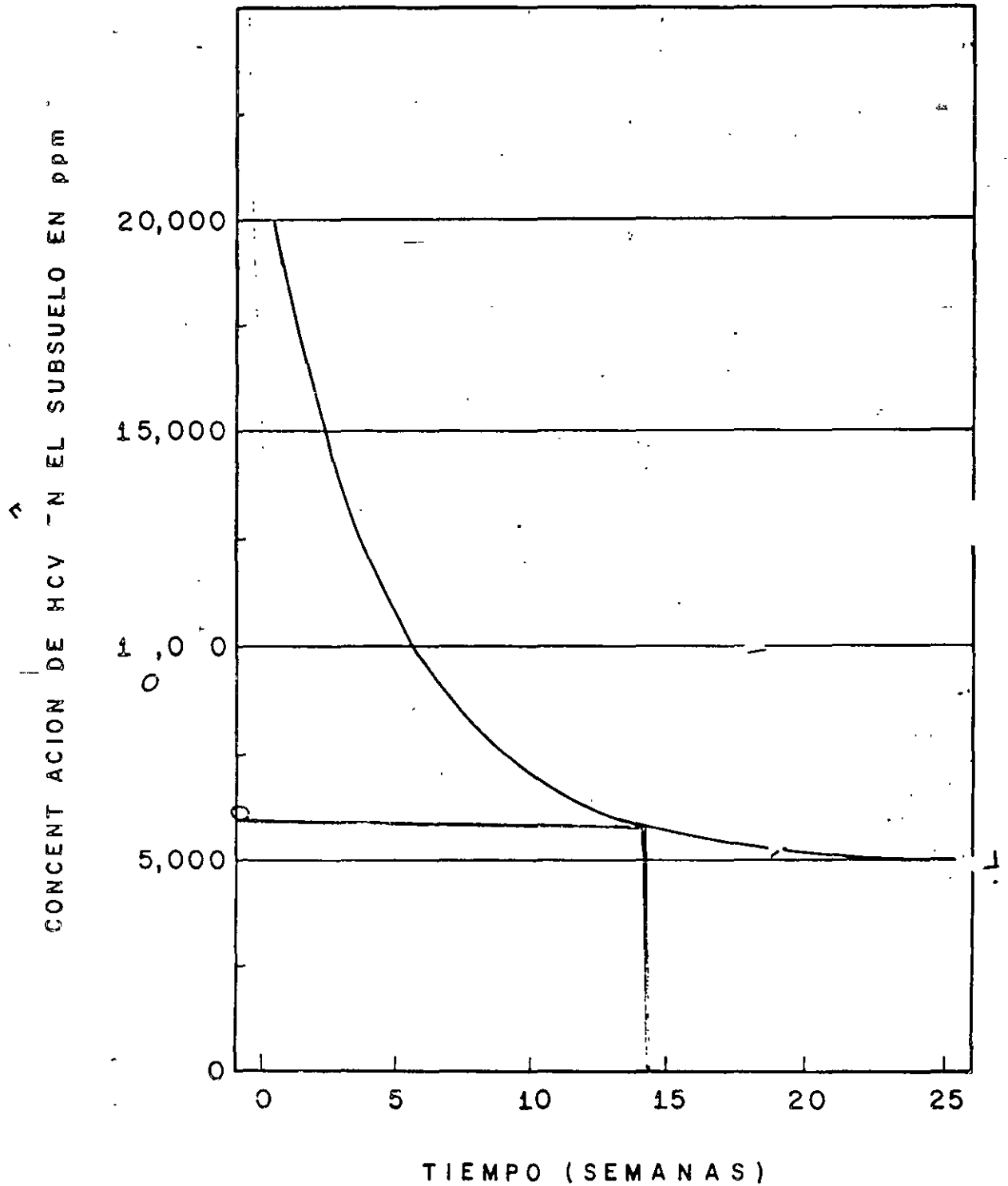
## EXTRACCION DE VOLATILES



SE PRODUCE BIODEGRADACION  
DEL 50 % DE LOS VOLATILES,  
SE EXTRAHE EL 50% RESTANTE



RELACION TIPICA DE VOLUMEN DE REMOSIO.  
DE HCV RESPECTO AL TIEMPO



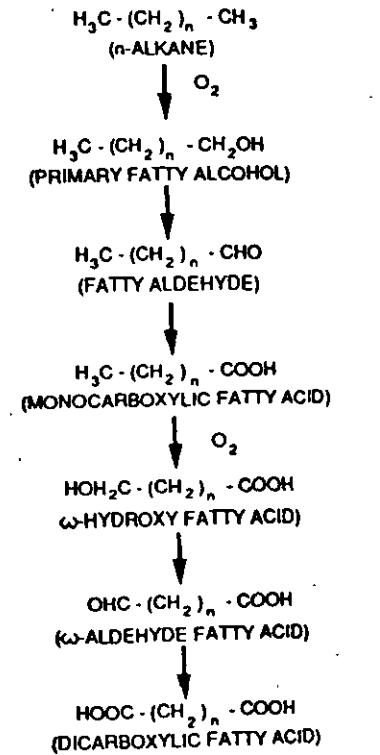
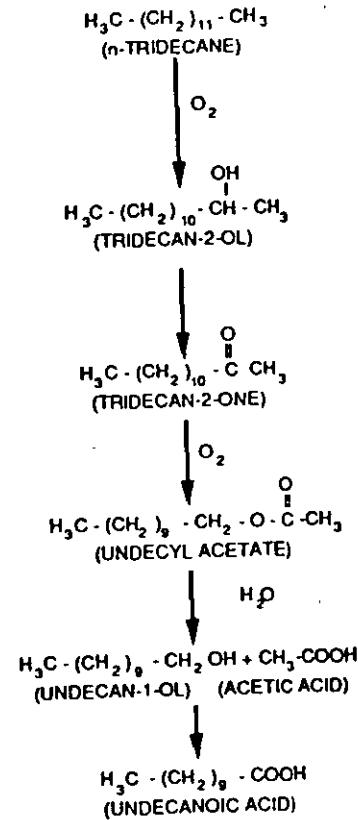
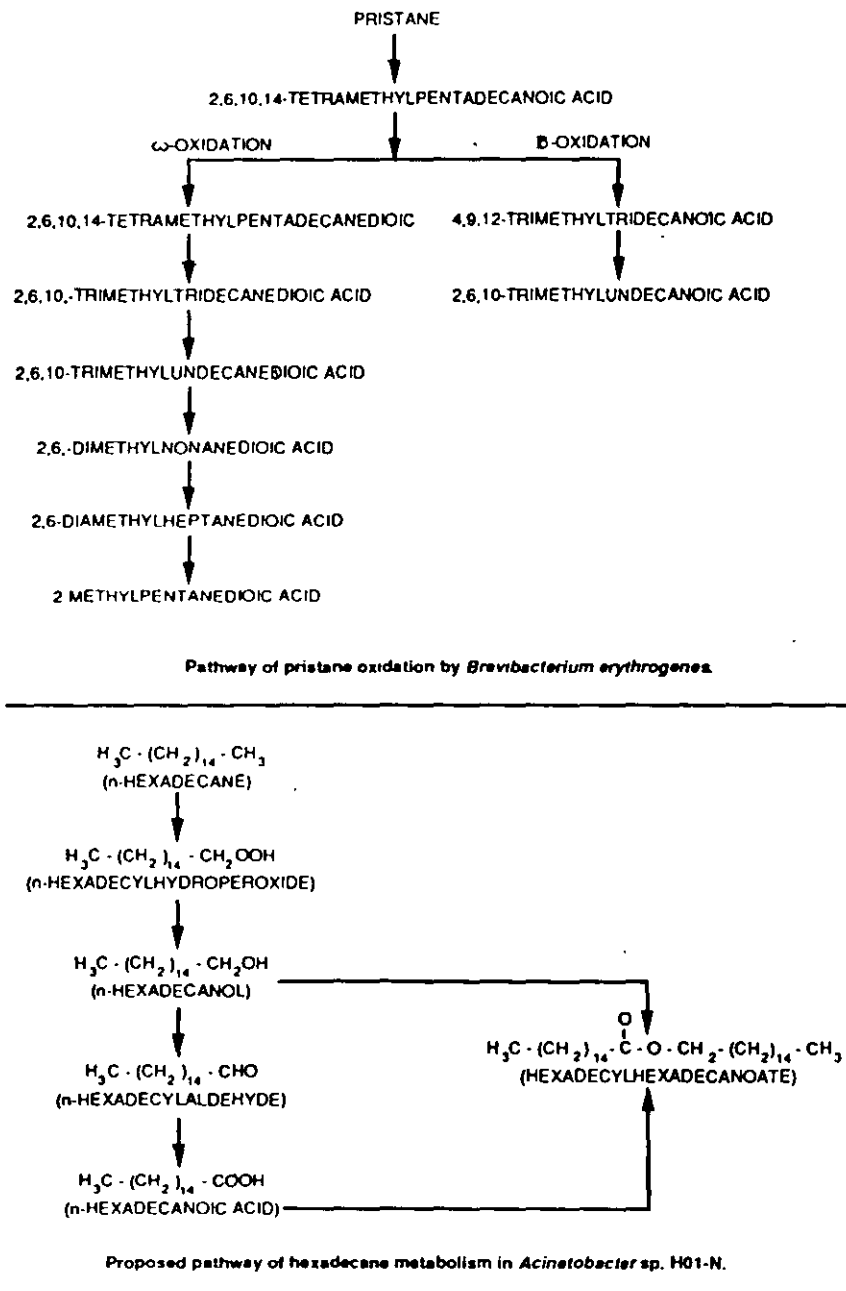


Figure 11-4. (continued).

$$\mu = \frac{\mu_{max} C}{(K_s + C)} \quad (11.3)$$

where  $\mu = dB/dt (1/B) =$  specific growth rate ( $day^{-1}$ )

$B =$  microbial population density ( $\frac{\text{bacteria cell count}}{\text{g soil}}$ )

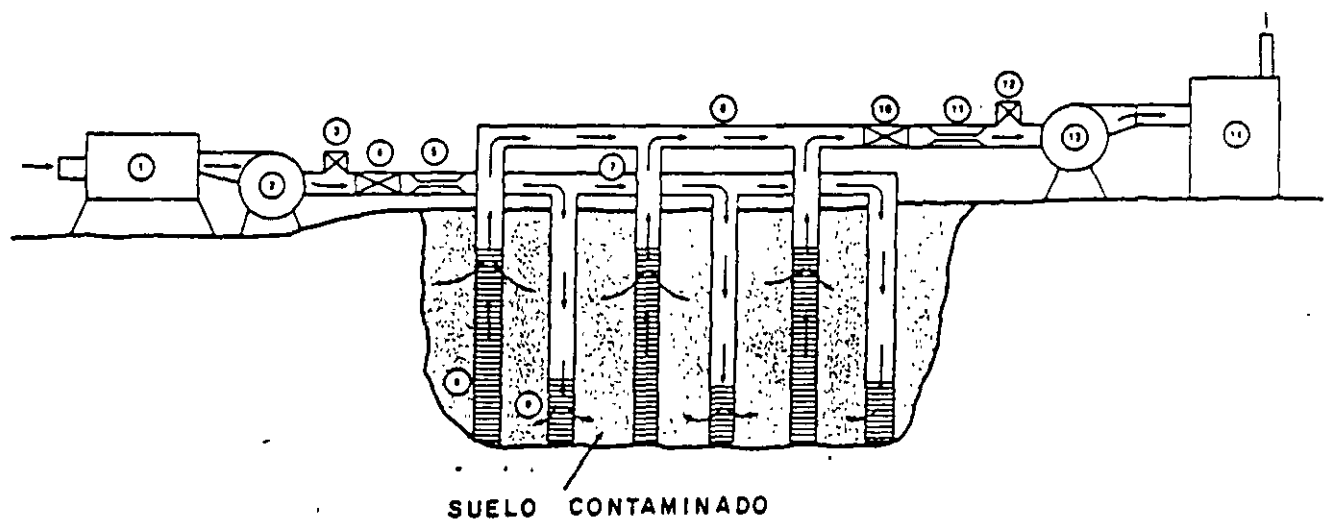
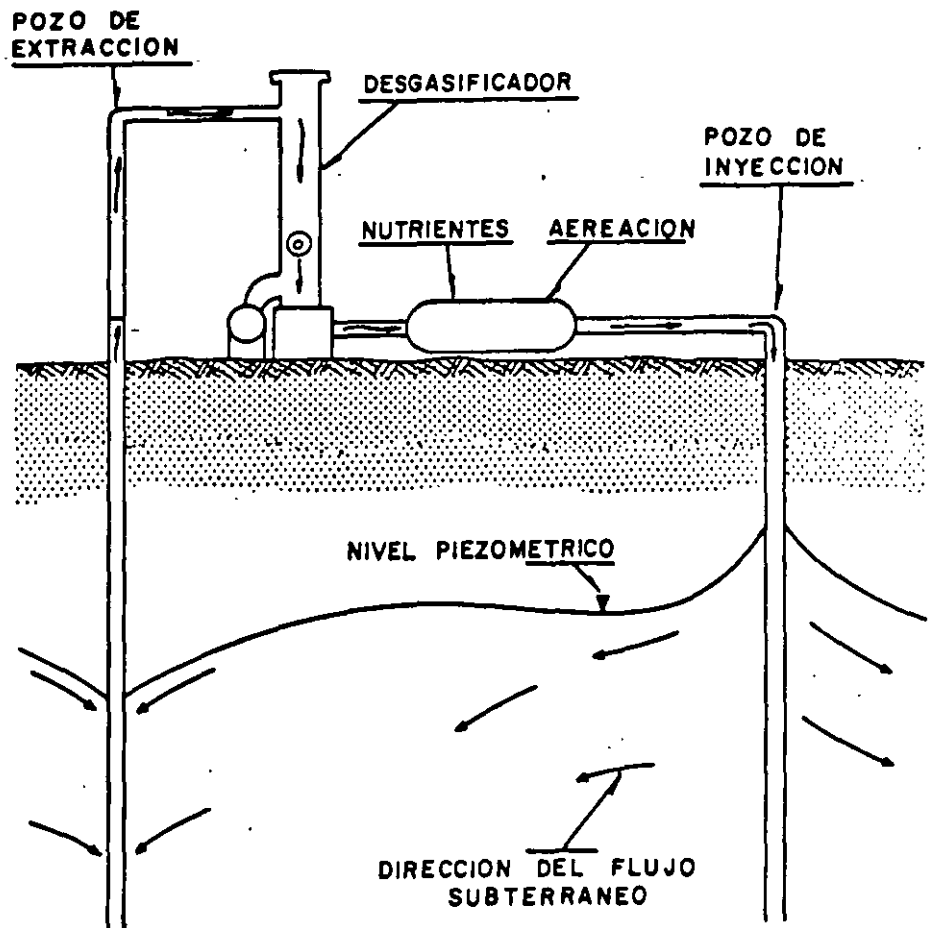
$\mu_{max} =$  maximum specific growth rate ( $day^{-1}$ )

$C =$  substrate concentration ( $\frac{\text{g hydrocarbon}}{\text{g soil}}$ )

Figure 11-4. Pathways of biodegradation for several hydrocarbons. Source: Adapted from Singer and Finnerty, 1984.

91







COLONIA MODERNA  
GUADALAJARA, JAL  
MAYO-93

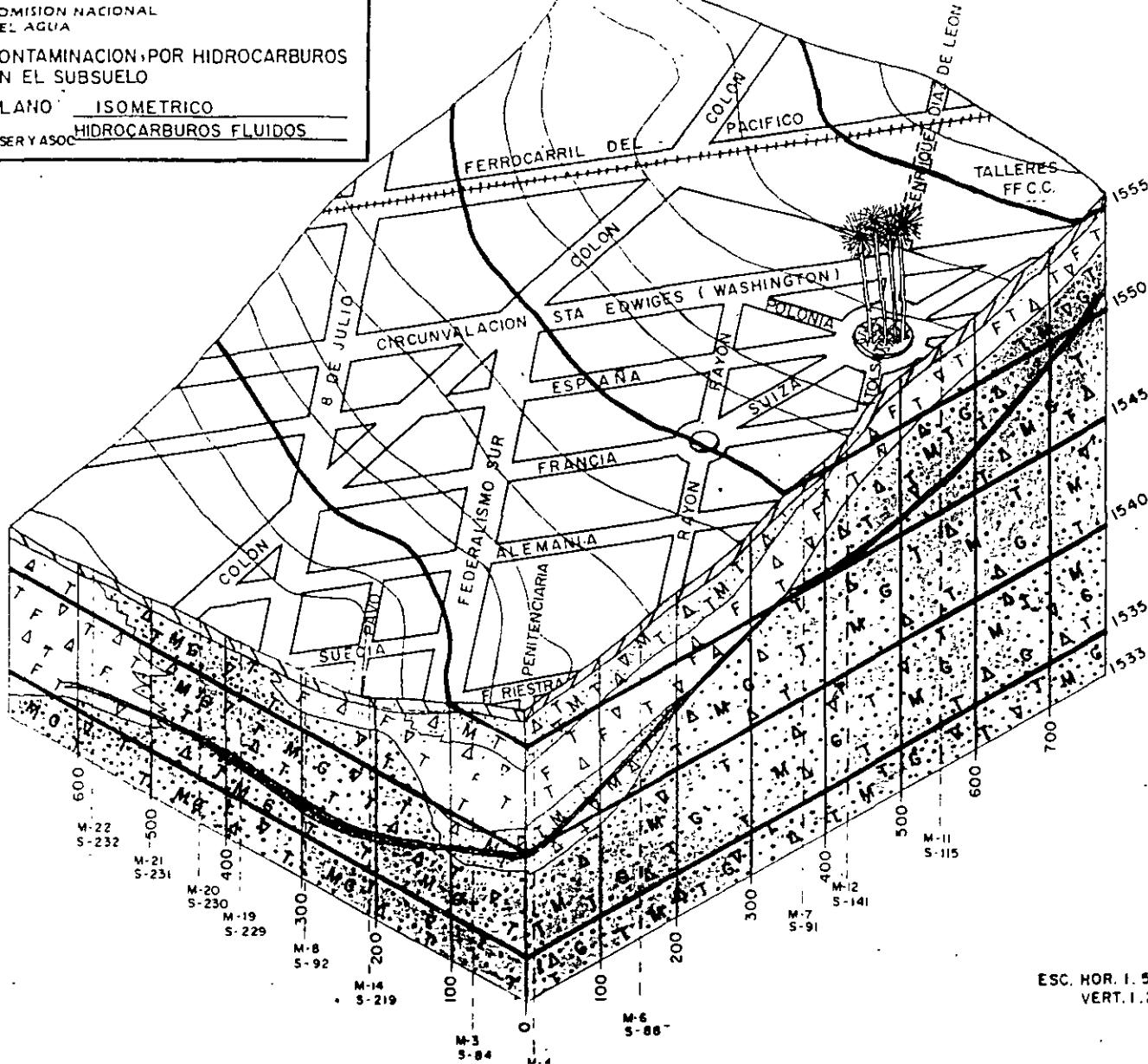
COMISION NACIONAL  
DEL AGUA

CONTAMINACION POR HIDROCARBUROS  
EN EL SUBSUELO

PLANO ISOMETRICO

HIDROCARBUROS FLUIDOS

FUENTE: LESSER Y ASOC



## EXPLICACION

M-4 N° DE MUESTR  
S-8 N° DE POZO  
N. F. NIVEL FREATICO



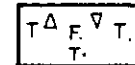
CARPETA ASFAL



ARCILLA



ARENA PUMITICA  
DE GRANO MEDI



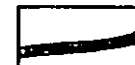
ARENA PUMITICA  
DE GRANO FINO



ARENA PUMITICA  
DE GRANO GRUE



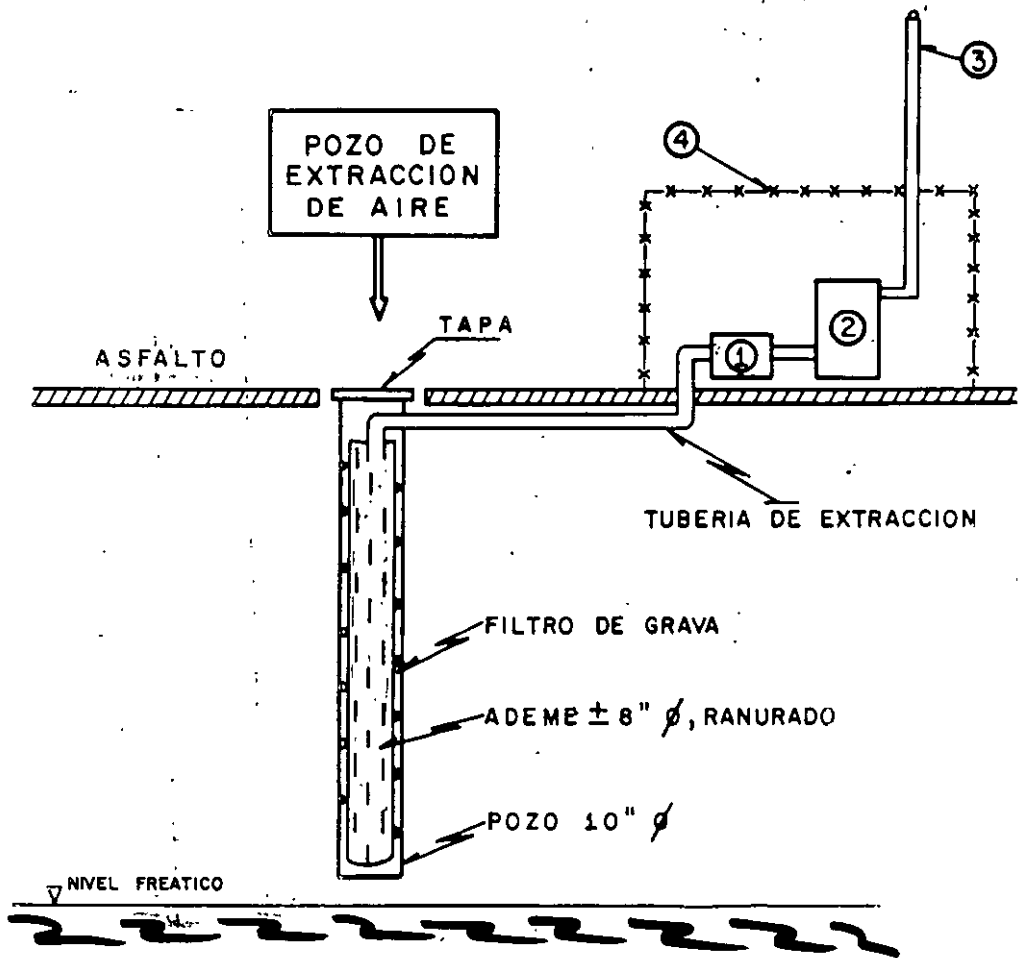
TOBA PUMITICA  
SEMICOMPACTA



HIDROCARBURC  
FLUIDOS

ESC. HOR. 1:5,000  
VERT. 1:200

# MÉTODO DE EXTRACCION DE VOLATILES DEL SUBSUELO



- ① EXTRACCION DE AIRE
- ② TRATAMIENTO DEL VOLATIL
- ③ CHIMENEA
- ④ CERCADO (MALLA O SIMILAR)

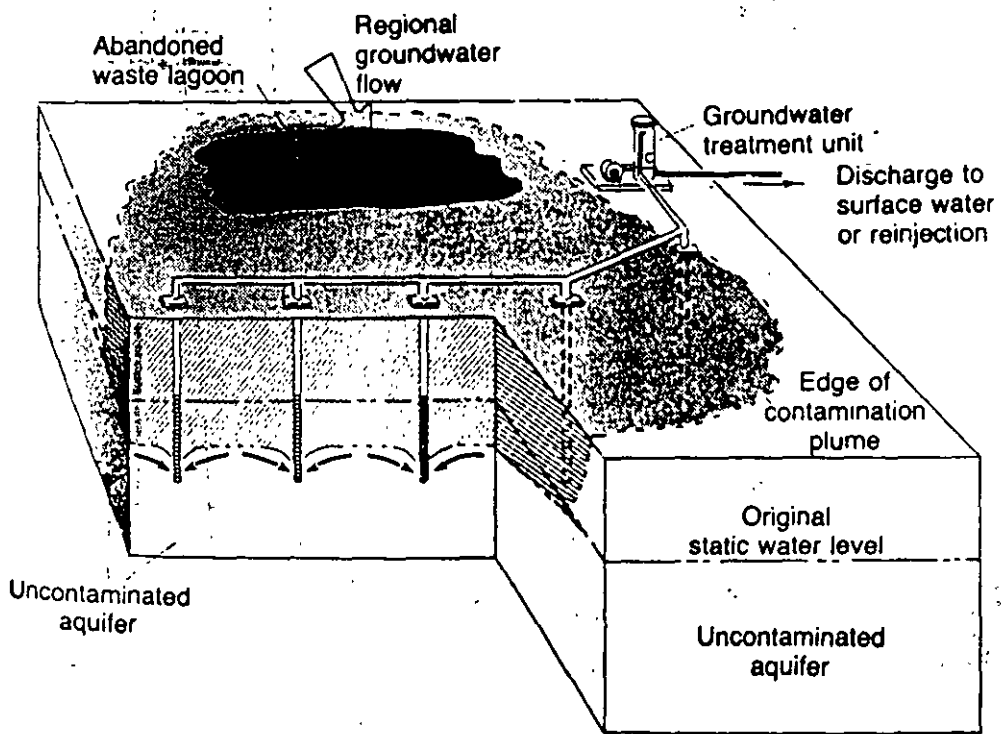


Fig. 19.1 Typical well recovery system.

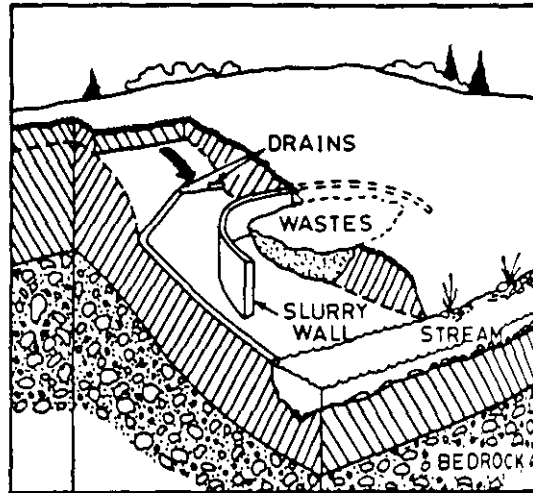
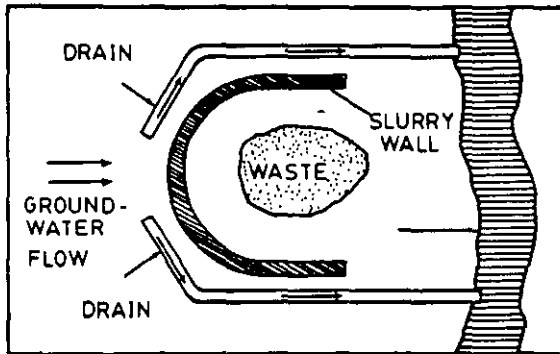


Figure 9-6. Combination of drains and slurry wall used to prevent leaching of contaminants into groundwater and a surface stream.

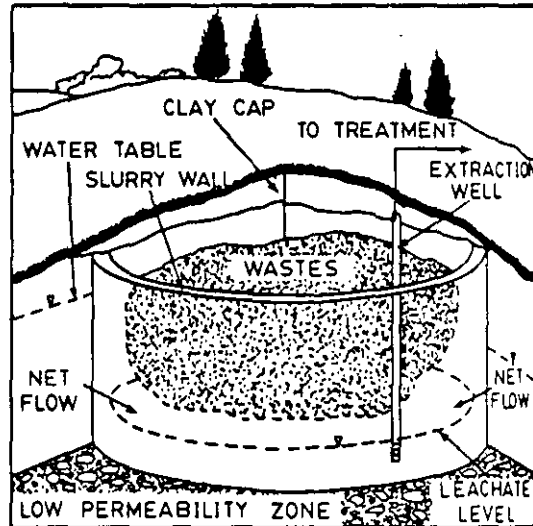
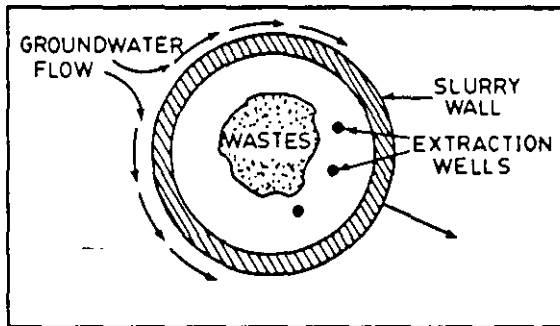


Figure 9-7. Circular slurry wall and groundwater extraction combined to prevent groundwater contamination.

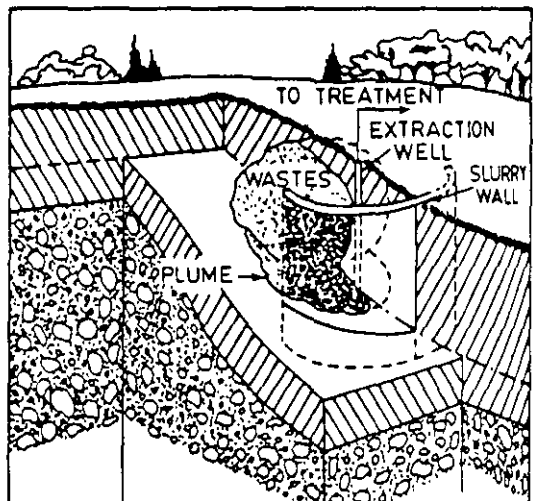
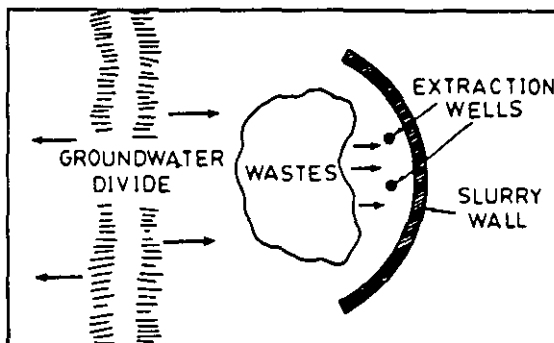
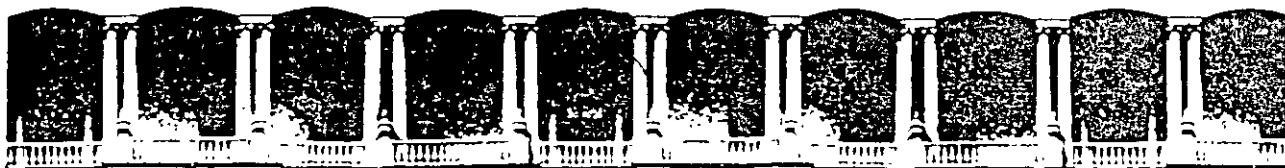


Figure 9-8. Slurry wall and extraction wells used to collect leachate.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE  
ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL***

**PRESENTADO POR M. en C. JOSÉ ALFREDO RAMOS LEAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

## EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

M. en C. José Alfredo Ramos Leal

**RIESGO DE CONTAMINACIÓN.**- Se puede definir como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano.

El propósito de una evaluación de riesgo es determinar cuales fuentes potenciales de riesgo representan mayor potencial de causar daños a la salud humana y/o al ambiente y que acciones de planeación se deben tomar.

El hecho de que el riesgo pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de agua subterránea ya desarrollada o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero.

**MEDICIÓN DEL RIESGO.**- La idea de una evaluación de riesgo es obtener valores cuantitativos. En la evaluación de riesgo se toman en cuenta al menos dos componentes desde el punto de vista de manejo de riesgo ambiental: a) la exposición y b) la cantidad de impacto. Para el caso de la exposición se toma muy en cuenta el tiempo sobre el cual un blanco se pone en contacto con la sustancia contaminante. Esto implica que si no hay contacto no hay riesgo. La cantidad de impacto se relaciona con la clase, tipo y severidad que resulte en una probable exposición.

**VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO** - Este término es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante, debido al impacto humano y/o natural

La vulnerabilidad del acuífero depende de la inaccesibilidad de la zona saturada y de la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero como resultado de su retención física y reacción química con contaminantes.

Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan además con factores relacionados con la carga contaminante en el subsuelo; a) modo de disposición del contaminante en el subsuelo y en particular de la cantidad de carga hidráulica asociada y b) la clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

La mejor manera de presentar la vulnerabilidad del acuífero es en forma de mapas que muestren como varía espacialmente los diferentes grados de vulnerabilidad.

Los mapas de vulnerabilidad de agua subterránea involucran la delineación de áreas susceptibles de variar a la contaminación del agua subterránea, basado en la interacción de características que promueven o inhiben el movimiento de contaminantes en el subsuelo.

### **METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS.**

Se han desarrollado varios métodos para el mapeo de vulnerabilidad y evaluación de riesgo ambiental. Estos pueden ser de dos tipos:

1) Sistemas que utilizan tasas numéricas (AVI, DRASTIC y ERIS).

2) Sistemas no numéricas, los cuales pueden usar números para ordenar el incremento de vulnerabilidad o clasificar como altamente vulnerables o menos vulnerables

Una diferencia entre los métodos de vulnerabilidad y los de riesgo ambiental es la presencia o ausencia de la fuente contaminante. Desde este punto de vista algunos métodos de vulnerabilidad (AVI, DRASTIC, son inherentes de que existe la fuente, otros en cambio toman en cuenta la presencia de la fuente contaminante (SAFE y ERIS), cabe mencionar que algunos de estos métodos (ERIS) fueron desarrollados para obtener índices de impacto a los diferentes partes del medio ambiente (agua superficial, agua subterránea, aire, contacto directo con humanos f fuego y explosión)

### **ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS (AVI)**

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas sobre el nivel del agua

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero (Van Stempvoort et al. 1992), por medio de la resistencia hidráulica  $c$  al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero.

La resistencia hidráulica  $c$  se calcula por la expresión

$$c = \sum b_i / K_i \text{ para las capas } 1, 2, 3, \dots, i$$

donde  $b_i$  es el espesor de cada capa sobre el acuífero,  $K_i$  es la conductividad hidráulica de cada capa,  $c$  es la resistencia hidráulica (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica menor vulnerabilidad.

Para construir los mapas de vulnerabilidad se utiliza el log c para cada pozo y se interpolan los valores. Esto da como resultado un zoneamiento de resistencias hidráulicas, las cuales están directamente relacionadas con vulnerabilidad.

### ÍNDICE DRASTIC PARA AGRICULTURA

El DRASTIC es un esquema de clasificación numérica ha sido desarrollada para la evaluar la contaminación potencial del agua subterránea para un sitio dado Este esquema de clasificación se basa en 7 factores escogido por un gran numero de científicos geohidrologos en toda la unión americana. También los científicos han establecido pesos de relativa importancia y puntuación de escala de clasificación para cada factor cuando el método es aplicado a fuentes de contaminación no puntuales para pesticidas o fertilizantes. Las siglas de DRASTIC se deriva de los 7 factores del esquema de clasificación

D = profundidad al agua subterránea, R = rapidez de descarga, A = medio acuífero, S = tipo de suelo  
T = topografía (pendiente), I = impacto de la zona vadosa, C = conductividad hidráulica del acuífero

La determinación del índice de agricultura DRASTIC involucra la multiplicación de cada uno de los factores por la puntuación del rango y se suma el total. Valores altos de la suma representan fuertes potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuífero. Para un área dada será evaluada, cada factor es relacionado a una escala 1 a 10 que indica el relativa contaminación potencial de un factor dado para esa área. Una vez que todos los factores han sido asignados a un rango, cada rango es multiplicado por el peso asignado y el numero resultante es sumado como se indica a continuación.

$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw = \text{Contaminación potencial}$   
donde r = rango para cada área a ser evaluada  
w = peso de importancia para los parámetros

En la tabla 1 se presenta la escala de rangos para factores de la profundidad al agua subterránea; este peso de importancia en agricultura DRASTIC es 5 (Aller et al., 1985)

La tabla 2 contiene la clase de información para el factor de recarga neta y su índice de agricultura DRASTIC es 4 (Aller et al. op cit.). La tabla 3 muestra los rangos para la evaluación de un factor del medio acuífero El peso de importancia para este factor en el índice de agricultura DRASTIC es de 3 puntos.

La información para la evaluación del factor de tipo de suelo se incluye en la tabla 4, con su peso de importancia en el DRASTIC de 5 puntos (Aller et al op. cit.). La tabla 5 muestra información sobre el factor de topografía y su peso de importancia para este factor en el DRASTIC es de 3 puntos (Aller et al. op cit.). La aproximación para la evaluación del impacto de la zona vadosa en el DRASTIC se presenta en la tabla 6 con su peso de importancia para este factor será de 5 puntos (Aller et al. op. cit ) Finalmente la tabla 7 resume información pertinente para la conductividad hidráulica del factor acuífero, con su peso de importancia DRASTIC, el cual será de 3 puntos (Aller et al op. cit.).

Parámetro	Rango (ft)	(m)	Clase
Profundidad del Agua  Dw = 5	0 - 5	0 - 1.5	10
	5 - 15	1.5 - 4.6	9
	15 - 30	4.6 - 9.1	7
	30 - 50	9.1 - 15.2	5
	50 - 75	15.2 - 22.9	3
	75 - 100	22.9 - 30.5	2
	> 100	> 30.5	1

Tabla 1.- Evaluación del factor de profundidad al agua subterránea en el DRASTIC

Parámetro	Rango (inches)	(mm)	Clase
Recarga Neta	0-2	0 - 50	1
	2-4	50 - 102.6	3
	4-7	102 - 178	6
Rw = 4	7-10	178 - 254	8
	> 10	> 254	9

Tabla 2 - Evaluación del factor de recarga neta en el DRASTIC



Parámetro	Tipo de Material	Clase
Medio Acuifero	Lutita masiva	1 - 3
	Ignea/metamórfica	2 - 5
Aw = 3	Ignea/metamorfica alterada	3 - 5
	till glacial	4 - 6
	Arenisca estratificada, caliza, lutitas	5 - 9
	Arenisca masiva	4 - 9
	Caliza masiva	4 - 9
	Arena y grava	4 - 9
	Basaltos	2 - 10
	Caliza karstica	9 - 10

Tabla 3.- Evaluación del factor del medio acuifero en el DRASTIC.

Parámetro	Rango	Clase
Tipo de Suelo	Fino o ausente	10
	Grava	10
	Arena	9
	Agregado arcilloso o comprimido	7
Sw = 2	Arenisca margosa	6
	Marga	5
	Limo margoso	4
	Arcilla margosa	3
	Arcillas no agregadas y material no compacto	1

Tabla 4 - Evaluación del factor del tipo de suelo en el DRASTIC

Parámetro	Rango (% pendiente)	Clase
Topografía	0-2	10
	2-6	9
	6-12	5
Tw = 1	12-18	3
	> 18	1

Tabla 5 - Evaluación de topografía en el DRASTIC

Parámetro	Rango	Clase
Impacto a la Zona Vadosa	Capa confinante	1
	Limo/arcilla	2 - 6
Iw = 2	Lutita	2 - 5
	Caliza	2 - 7
	Arenisca	4 - 8
	Caliza estratificada, arenisca, lutita	4 - 8
	Arena, grava con limo, arcilla	4 - 8
	Ignea/metamorfica	2 - 8
	Arena y Grava	6 - 9
	Basalto	2 - 10
	Caliza karstica	8 - 10

Tabla 6 - Evaluación del factor de impacto a la zona vadosa en el DRASTIC

Parámetro	Rango (GPD/A <sup>2</sup> )	(m/d)	(m/s)	Clase
Conductividad Hidráulica	1-100	0.040746-4.0746	$4.6 \times 10^{-7}$ - $4.7 \times 10^{-5}$	1
	100-300	4.0746-12.2238	$4.7 \times 10^{-5}$ - $1.4 \times 10^{-4}$	2
Cw = 3	300-700	12.2238-28.522	$1.4 \times 10^{-4}$ - $3.4 \times 10^{-4}$	4
	700-1000	28.522-40.746	$3.4 \times 10^{-4}$ - $4.7 \times 10^{-4}$	6
	1000-2000	40.746-81.492	$4.7 \times 10^{-4}$ - $9.5 \times 10^{-4}$	8
	> 2000	> 81.492	$> 9.5 \times 10^{-4}$	10

Tabla 7.- Evaluación de conductividad hidráulica en el DRASTIC.

### SISTEMA DE INVENTARIO DE RIESGO AMBIENTAL (ERIS)

Una vez que en el sistema se produce una falla y la sustancia contaminante ha salido de control y constituye una fuente de riesgo. Para evaluar sus efectos a los seres humanos y al medio ambiente sensible se puede aplicar el modelo del Sistema de Inventario de Riesgo Ambiental (ERIS), (Wilson, 1991) el cual toma en cuenta elementos muy importantes como son:

- Tipo de riesgo ambiental
- Cantidad y extensión de la fuente
- Mecanismos de control que intervienen en los niveles de riesgo
- Las condiciones actuales y futuras de los mecanismos de control
- Identificación espacial de las áreas de mayor riesgo.
- La cuantificación de los daños a los posibles blancos

Para agua superficiales utiliza datos como precipitación media anual, condiciones físicas del terreno, estado físico de suelo, uso del suelo, distancia a poblaciones y hábitats cercanos, población afectada en un tiempo actual y tiempos futuros, distancia a las fuentes de riesgo y uso de agua superficial y sensibilidad ambiental.

Para aguas subterráneas utiliza datos como profundidad de acuífero, distancia a la fuente, precipitación neta, conductividad hidráulica, estado físico de suelos, distancia a pozos cercanos, uso de aguas subterráneas, distancia a poblaciones y cercanas, población afectada para un tiempo actual y a futuro, probabilidades de uso.

En el análisis de la ruta de aire se requieren datos de probabilidad de uso, reactividad e incompatibilidad de la sustancia en cuestión, población afectada para un tiempo actual y para tiempos futuros, distancia a poblaciones cercanas, uso del suelo y sensibilidad ambiental.

La evaluación de la ruta de contacto directo requiere datos de probabilidad de uso, accesibilidad, población afectada para un tiempo actual y tiempos futuros, población en un radio de una milla, persistencia y toxicidad y sensibilidad ambiental.

El análisis de riesgo de la ruta de fuego/explosión requiere de datos como probabilidad de uso, ignibilidad, reactividad, incompatibilidad, población afectada para un tiempo actual y tiempos futuros, población en un radio de dos millas, uso del suelo, distancia a edificios y hábitats cercanos. Todos estos datos mencionados anteriormente son normalizados mediante pesos basados en la técnica Delphi.

### EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL ERIS

Este método será utilizado para realizar una evaluación de riesgo ambiental en el área de La Presa de San German, León Gto.

• Relleno Sanitario (F1), este se localiza aproximadamente 1.6 km al poniente de la Presa de San German, en las cercanías de las vías del ferrocarril, pertenece a la Industria de Química Central de México, tiene una capacidad de 38,840 tons, al parecer esta fue construido bajo estrictas especificaciones de ingeniería sanitaria, cuenta con 8 pozos someros (4 m de profundidad) de observación, cuenta con una cubierta plástica, una capa de tepetate comprimido y asfalto en la superficie, fue construido en arcillas cuya conductividad hidráulica alcanza los  $10^{-9}$  m/s

Para cada mecanismo de transporte se analizará las condiciones de la fuente, así como sus características físicas (Hazard Ranking System => HRS) tablas 8a-d y 9a-d

Confinamiento Superficial	Peso
Diques o estructuras de separación seguras, bordos adecuados y la erosión no es evidente.	0
Diques o estructuras separación seguras pero los bordos son inadecuados.	1
Diques sin infiltraciones pero potencialmente inseguros.	2
Diques inseguros, infiltraciones, o en peligro de colapsarse	3

Tabla 8a.- HRS de Confinamiento Superficial para transporte en agua superficial

Contenedores	Peso
Contenedores sellados, en condiciones seguras y bordeados por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	0
Contenedores sellados, en condiciones seguras y pero no están rodeados por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	1
Contenedores con fugas y separadores o estructuras de confinamiento potencialmente inseguras.	2
Contenedores con fugas y sin separadores, ni estructuras de confinamiento, ni estructuras de captación de fugas o en peligro de colapso	3

Tabla 8b.- HRS de Contenedores para transporte en agua superficial.

Pila de Residuos	Peso
Pilas cubiertas y rodeadas por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	0
Pilas cubiertas, residuos sin consolidar, los separadores o sistemas de confinamiento son inadecuados	1
Pilas no cubiertas, residuos sin consolidar y con separadores o sistemas de confinamiento potencialmente inseguros.	2
Pilas no cubiertas, residuos sin consolidar y sin separadores, ni confinamiento, ni sistemas de captación de fugas o en peligro de colapso.	3

Tabla 8c.- HRS de Pila de Residuos para transporte en agua superficial.

Relleno Sanitario	Peso
La pendientes del Relleno Sanitario impide escurrimientos, relleno sanitario bordeado por sistemas de aislamiento seguros, o el relleno sanitario tiene una cubierta material adecuada.	0
Relleno Sanitario cubierto inadecuadamente y con sistemas de aislamiento seguros.	1
Relleno Sanitario descubierto y con sistemas de aislamiento potencialmente inseguros.	2
Relleno Sanitario descubierto y sin sistemas de aislamiento y con sistemas de aislamiento inseguros.	3

Tabla 8d.- Valores de HRS de Contenedores para transporte en agua superficial.

*Se asignan valores de 0 si 1) Todos los residuos del sitio son rodeados por diferentes estructuras de separación que se encuentran en condiciones seguras y adecuadas para contener todos los escurrimientos, derrames o lixiviados de residuos, o 2) si la intervención del terreno no permite escurrimientos en la entrada de agua superficial. Por otro lado al evaluar los contenedores para cada uno de los diferentes formas de almacenamiento o disposición en los sitios se asignan los siguientes valores.*

Confinamiento Superficial	Peso
Estructuras de aislamiento para infiltraciones seguras, forradas con material impermeable (natural o artificial) compatible con los residuos y sistemas de colección de lixiviados adecuados	0
Forradas con material impermeable (natural o artificial) compatible con los residuos y sin sistemas de colección de lixiviados o bordos inadecuados	1
Estructuras de aislamiento para infiltraciones potencialmente inseguras o con cubierta moderadamente permeable compatible	2
Estructuras de aislamiento para infiltraciones inseguras, sin cubierta o cubierta incompatible.	3

Tabla 9a.- HRS de Confinamiento Superficial para transporte en agua subterránea.

Contenedores	Peso
Contenedores sellados, en condiciones seguras, sin cubierta o cubierta moderadamente permeable	1
Contenedores con fugas, cubierta moderadamente permeable.	2
Contenedores con fugas y sin cubierta o cubierta incompatible.	3

Tabla 9b - HRS de Contenedores para transporte en agua subterránea

Pilas	Peso
Pilas descubiertas y residuos estabilizados; o pilas cubiertas, residuos no estabilizados y cubierta esencialmente impermeable.	0
Pilas descubiertas, residuos no estabilizados, cubierta moderadamente permeable y sistemas de colección de lixiviados.	1
Pilas descubiertas, residuos no estabilizados, cubierta moderadamente permeable y sin sistemas de colección de lixiviados.	2
Pilas descubiertas, residuos no estabilizados y sin cubierta.	3

Tabla 9c.- HRS de Pila de Residuos para transporte en agua subterránea

Relleno Sanitario	Peso
Esencialmente cubierta impermeable, cubierta compatible con los residuos, y adecuado sistema de colección de lixiviados.	0
Esencialmente cubierta impermeable compatible sin sistema de colección de lixiviados y la superficie del relleno sanitario evita estancamientos de agua.	1
Cubierta moderadamente permeable y compatible, y la superficie del relleno sanitario evita estancamientos.	2
Sin cubierta o cubierta incompatible; cubierta moderadamente permeable compatible, la superficie del relleno sanitario facilita el estancamiento de agua, sin control de infiltraciones	3

Tabla 9d.- Valores de HRS de Contenedores para transporte en agua subterránea.

Se asignan valores de 0 si 1) Las sustancias peligrosas, no tienen fácil acceso por la presencia de una superficie impermeable (natural o artificial) y sistemas de colección de lixiviados adecuados y con sistemas de aislamiento, 2) no hay agua subterránea cerca. El valor de "0" no indica que no haya riesgo, más bien indica un riesgo relativamente bajo, cuando es comparado con sitios más serios a nivel regional. Por otro lado al evaluar el confinamiento para cada uno de los diferentes formas de almacenamiento es más fácil al usar la anterior guía.

Para la ruta por aire, el método no proporciona ningún valor

Para contacto directo, se refiere a accesibilidad de las sustancias al contacto directo. En el caso de que las sustancias sean accesibles al contacto directo como en las lagunas de desechos, pilas, tanques o rellenos sanitarios con una cubierta menor a 2 pies de profundidad o si ha sido depositada sobre el suelo y es fácilmente contactada en la superficie se le asigna un peso de 15 Para el caso de materiales que sean inaccesibles es decir no sean directamente contactada tan fácilmente, se le asigna un peso de 0.

En la ruta de fuego/explosión se le asigna un peso de 1 para el caso de materiales que no sean explosivos y un peso de 3 si hay la presencia de gases explosivos y flamables

De las características anteriormente mencionadas para cada fuente se obtuvieron los pesos de la componente físicas para cada una de los mecanismos de transporte, como se muestra en las tabla 10

FUENTES	ERIS (F1) RELLENO SANITARIO
AGUA SUPERFICIAL	0
AGUA SUBTERRANEA	0
CONTACTO DIRECTO	0
FUEGO/EXPLOSION	1
HRS (MAXIMO 69*) TOTAL	1

Tabla 10 - Valores de HRS (Hazard Ranking System) de la fuente para sus mecanismos de transporte

\* Si hay evidencia directa de una fuga se suma un peso de 45

### RECONOCIMIENTO DE MECANISMOS DE CONTROL PRIMARIO (PCMRS)

El valor del PCMRS tiene una componente física y una componente humana, el valor de ambos componentes para cada una de las fuentes, se determino con base a las condiciones actuales y a la forma en que fueron construidas, el peso dado para cada una es mostrado en la tabla 11

ANÁLISIS DE MECANISMOS DE CONTROL PRIMARIO										
COMPONENTE FÍSICO						COMPONENTE HUMANO				PCMRS
FUENTE	CONDICIONES ACTUALES	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	HR5 VALOR	CAPACIDAD	ENTRENAMIENTO	EQUIPAMIENTO	DISCIPLINA	
F.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00046
TASA DE** CONVERSIÓN	G/F/P 1/3/5	H/M/L 5/3/1	H/M/L 5/3/1	H/M/L 5/3/1		G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	

Tabla 11.- Valores del PCMRS de la fuentes F1 (t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> y t<sub>3</sub> representan probabilidades de fallas futuras, G/F/P => Good/Fair/Poor, H/M/L => High/Medium/Low).

El valor de reconocimiento de los mecanismos de control primario se obtiene mediante la siguiente expresión.

PCMRS = CONDICIONES ACTUALES\*VALOR DEL HR5\*CAPACIDAD\*ENTRENAMIENTO\*EQUIPAMIENTO\*DISCIPLINA\*0.000464

$$PCMRS(F1) = (1*1*1*1*1*100)/215\ 625 = 0.00046$$

## MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTROL SECUNDARIO

### ERIS Agua Superficial

La precipitación media anual para la región varía de 680 a 700 mm, la evaporación potencial anual es de 2100 mm, el área se encuentra en una planicie, donde las pendientes topográficas son menores a 3%, las distancias de las fuentes a las aguas superficiales (presa) alcanzan poco más del rango de una milla en algunos casos, el estado físico del suelo puede considerarse como sólido consolidado, los pesos dados para estas características son dados en las tablas 12, 13, 14, 15 y 16.

Cantidad de lluvia (Pulgadas)	mm	Peso
< 1 0	< 25.4	0
1.0 a 2 0	25.4 a 50 8	1
2.1 a 3.0	53 34 a 76.2	2
> 3 0	> 76.2	3

Tabla 12 - Peso para la lluvia.

Intervención del terreno					
Facilidad de pendiente	Promedio de la pendiente del terreno				Pendiente del agua**
	< 3 %*	3 - 5 %	5 - 8 %	> 8 %	
Facilidad en cuenca cerrada	0	0	0	0	3
Facilidad con promedio de pendiente (< 3 %)	0	1	1	2	3
Promedio de pendiente ( 3 - 5%)	0	1	2	2	3
Promedio de pendiente ( 5 - 8%)	0	2	2	3	3
Promedio de pendiente ( > 8%)	0	2	3	3	3

Tabla 13 - Peso para facilidad de pendiente e intervención del terreno

\*Esta columna será usada tanto para terrenos que tienen una pendiente < 3 % ó para áreas de gran elevación que separa sitios de cuerpos de agua superficial.

\*\*Esta columna será usada cuando hay distinto gradiente en corrientes de agua superficial al de la pendiente en la superficies cercanas, esto implica un rápido movimiento de la corriente.

Distancia (millas y pies)	metros	Peso
> 2 millas	> 3218 6	0
1 a 2 millas	1609.3 a 3218 6	2
1000 ft a 1 milla	304 8 a 1609 3	4
< 1000 ft	< 304 8	6

Tabla 14.- Pesos para distancias a aguas superficiales cercanas.

Estado físico	Peso
Sólido, consolidado o estabilizado	0
Sólido, no consolidado o inestable	1
Polvo o material fino	2
Líquido, viscoso o gas	3

Tabla 15.- Peso para el estado físico del suelo

FUENTE	F1
LLUVIA DE 24 hrs	0
FACILIDAD DE PENDIENTE E INTERVENCIÓN DEL TERRENO	0
DISTANCIA A AGUAS SUPERFICIALES	2
ESTADO FÍSICO DEL SUELO	0
VALOR DE AGUAS SUPERFICIALES NORMALIZADO *1.11	2.22

Tabla 16.- Valor de ERIS para aguas superficiales de diferentes fuentes.

### ERIS Aguas Subterráneas -

En general la profundidad del acuífero varía de 15 a 33 m, la evaporación es mucho mayor que la precipitación, la conductibilidad hidráulica de las arcillas alcanza los  $10^{-9}$  m/s, en arena limosa se alcanzan valores de  $10^{-7}$  m/s, en tanto que en arenas con grava alcanza los  $5.787 \times 10^{-4}$  m/s, la distancia de los pozos a las fuentes varía, por lo que se maneja para diferentes intervalos de distancia (de 1 a 2 millas y de 2 a 3 millas). La frecuencia de pozos distancia se da en las siguientes tablas.

FUENTE	F1
PESO(# DE POZOS)	1(9)
PESO(# DE POZOS)	2(21)
PESO(# DE POZOS)	3(9)
PESO(# DE POZOS)	4(0)

Tabla 17.- Relación entre número de pozos y pesos debido a su distancia con las fuentes.

Distancia (ft)	metros	Peso
> 150	> 45.72	0
76 a 150	23.16 a 45.72	2
21 a 75	6.4 a 23.16	4
0 a 20	0 a 6.09	6

Tabla 18.- Pesos para profundidad al acuífero.

Precipitación Neta(pulgadas) (precipitación - evaporación)	(mm)	Peso
< -10	< -254	0
-10 a +5	-254 a +127	1
+5 a +15	+127 a +381	2
> +15	> +381	3

Tabla 19 - Peso para precipitación neta.

Tipo de material	Rango de K (m/d)	Peso
Arcilla, till compacto, lutita, rocas ígneas y metamórficas no fracturadas	$< 8.64 \times 10^{-5}$	0
Limos, loess, arcillas limosas, margas limosas, margas arcillosas, calizas menos permeables, dolomías y areniscas, till moderadamente permeables	$< 8.64 \times 10^{-3} > 8.64 \times 10^{-5}$	2
Arenas finas, arenas limosas, margas, arenas margosas, calizas moderadamente permeables dolomías y calizas (no karsticas), rocas ígneas y metamórficas moderadamente fracturadas y algunos till gruesos	$< 8.64 \times 10^{-1} > 8.64 \times 10^{-5}$	4
Gravas y arenas, rocas ígneas y metamórficas altamente fracturados, lavas y basaltos permeables dolomías y calizas karsticas.	$> 8.64 \times 10^{-1}$	6

Tabla 20.- Peso para conductividad hidráulica de algunos materiales geológicos.

Distancia (millas y pies)	metros	Peso
> a 3 millas	4827.9	0
2 a 3 millas	3218.6 a 4827.9	1
1 a 2 millas	1609.3 a 3218.6	2
2001 ft a 1 milla	609.9 a 1609.3	3
< a 2001 ft	< 609.9	4

Tabla 21.- Peso por distancia a pozos cercanos a la fuente contaminante.

FUENTE	F1
PROFUNDIDAD DEL ACUIFERO	2
PRECIPITACIÓN NETA	0
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	0
ESTADO FÍSICO DEL SUELO	0
DISTANCIA A POZOS CERCANOS	2
VALOR TOTAL CRUDO	4
VALOR TOTAL NORMALIZADO *0.91	3.64

Tabla 22.- Valor de ERIS normalizado para aguas subterráneas de diferentes fuentes.

### ERIS Aire

Dado que no hay sustancias incompatibles, tampoco se tiene reactividad del Cromo, por lo tanto se le asigno un peso de 0 como se muestra en las tablas 23, 24a-f, 25 y 26.

Nivel NFPA	Peso
0 Materiales que normalmente son estables aún bajo condiciones de exposición al fuego en los cuales no reacciona con el agua.	0
1 Materiales en los cuales ellos mismos son normalmente estables, pero en los cuales pueden ser inestables a altas presiones y temperaturas o pueden reaccionar con agua liberando algo de energía pero no violentamente	1
2 Materiales en los cuales ellos mismos son normalmente inestables y sufren cambios químicos violentos pero no detonan. Incluyen materiales que pueden sufrir cambios químicos con liberación rápida de energía a presiones y temperaturas normales o los cuales pueden sufrir cambios químicos violentos a elevadas presiones y temperaturas También incluyen materiales que pueden reaccionar violentamente con agua o los cuales pueden formar mezclas potencialmente explosivas con agua.	2
3 Materiales que ellos mismos son capaces de detonar o de una descomposición explosiva o de una reacción explosiva pero los cuales pueden ser inicialmente confinados y calentados Incluye materiales que son termalmente sensibles o a choques mecánicos a temperaturas y presiones elevadas o los cuales reaccionan explosivamente con agua sin requerir de calor o confinamiento.	3
4 Materiales que son capaces de detonar o de una descomposición explosiva o reacción explosiva en condiciones normales de presión y temperatura Incluye materiales que son sensibles a golpes mecánicos o choques térmicos	3

Tabla 23.- Peso para clasificación de reactividad de la NFPA (National Fire Protection Association)

Grupo 1-A	Grupo 1-B
Acetileno viscoso	Acido viscoso
Líquidos cáusticos alcalinos	Bateria ácida
Limpiadores alcalinos	Electrolito Acido
Líquidos corrosivos alcalinos	Solventes
Fluidos de baterías corrosivas alcalinas	Otros ácidos corrosivos
Aguas residuales cáusticas	Desgastadores ácidos
	Desgastadores mezclados con ácidos
Desgastador cáustico	Desgastadores de ácidos sulfúricos
Consecuencias potenciales: Generación de calor, reacción violenta	

Tabla 24a - Materiales incompatibles del Grupo 1 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975

Grupo 2-A	Grupo 2-B
Aluminio	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B
Acido y agua	
Berilio	
Limpiadores químicos	Calcio
Litio	
Potasio	

Sodio Polvo de zinc Metales hidridos	Otros metales reactivos.
--	--------------------------

Secuencias potenciales: Fuego o explosión; generación de gas hidrogeno flamable.

Tabla 24b.- Materiales incompatibles del Grupo 2 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 3-A	Grupo 3-B
Alcoholes  Agua	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B Calcio Litio Metales hidridos Potasio SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , SOCl <sub>2</sub> , PCl <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> , SiCl <sub>3</sub> Otros residuos reactivos con agua

Consecuencias potenciales. Fuego, explosión; o generación de calor, generación de gas flamable o tóxico.

Tabla 24c.- Materiales incompatibles del Grupo 3 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 4-A	Grupo 4-B
Alcoholes Aldehidos Hidrocarburos halogenados Hidrocarburos nitrados Hidrocarbonos no saturados Otros componentes reactivos orgánicos y solventes	Residuos concentrados del Grupo 1-A o 1-B Residuos del Grupo 2-A

Consecuencias potenciales: Fuego, explosión o reacción violenta.

Tabla 24d.- Materiales incompatibles del Grupo 4 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 5-A	Grupo 5-B
Limpiadores cianuros y soluciones sulfúricos Cloritos	

Consecuencias potenciales: Generación de cianuro hidrogenado tóxico o gas de hidrogeno sulfúrico.

Tabla 24e.- Materiales incompatibles del Grupo 5 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975

Grupo 6-A	Grupo 6-B
Cloratos Cloruros Residuos del Grupo 2-A Acido cromico Residuos del Grupo 4-A Hipocloritos Nitratos Acido nítrico Percloratos Permanganatos Peróxido Otros oxidantes fuertes	Acido acético y otros ácidos orgánicos Concentrado de ácidos minerales       Otros residuos combustibles y flamables

Consecuencias potenciales: Fuego, explosión o reacciones violentas

Tabla 24f.- Materiales incompatibles del Grupo 6 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Incompatibilidad	Peso
No se presentan sustancias incompatibles	0
Se presentan, pero no representan peligro	1
Se presentan, y pueden presentar peligro a futuro	2
Se presentan y poseen un peligro inmediato	3

Tabla 25.- Peso por incompatibilidad de quimicos



FUENTE	F1
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *6.67	0

Tabla 26.- Valor de ERIS normalizado para ruta aire, en diferentes fuentes

### ERIS Contacto Directo

Dado que el relleno sanitario(F1), tiene barreras de seguridad y continuamente es monitoreado por medio de piezómetros, se le asigno un peso de 0 (Tabla 27), el resumen de las pesos es dado en la Tabla 28.

Barreras	Peso
Sistema de vigilancia las 24 hrs., (monitores de TV o vigilantes que vigilen la entrada) los cuales continuamente controlan la entrada o barreras artificiales (por ejemplo una cerca combinada con un acantilado) la cual bordea totalmente el acceso (por ejemplo monitores de TV, candados en la entrada, o entrada de acceso controlado).	0
Guardias de seguridad, sin barreras	1
Una barrera pero no separa	2
Barreras pero no bordean completamente el acceso.	3

Tabla 27.- Peso para accesibilidad a la fuente de contaminación.

FUENTE	F1
ACCESIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO* 6.67	0

Tabla 28.- Valor de ERIS normalizado para ruta contacto directo.

### ERIS Fuego/Explosión

Dado que el cromo no presenta reactividad con otras sustancias, no se localizan sustancias incompatibles y tiene un punto de ignición muy alto (>200°F) se le asignaron pesos de 0, como se ve en las tablas 29, 30 y 31.

Nivel	NEFPA	Peso
4	Gases muy inflamables, líquidos inflamables muy volátiles, y materiales que en forma de polvo o vapor en forma de mezclas explosivas cuando se dispersan en el aire	3
3	Líquidos los cuales pueden ser encendidos bajo condiciones normales de temperatura. Algunos materiales que encienden espontáneamente a temperaturas normales en aire	3
2	Líquidos que pueden ser moderadamente antes de ocurrir el encendido, así como sólidos que pueden producir vapores inflamables.	2
1	Materiales que pueden ser precalentados antes de que encienda. Muchos combustibles sólidos tienen un rango de inflamabilidad de 1	1
0	Materiales que no encienden	0

Tabla 29.- Niveles de ignibilidad NEFPA y pesos asignados

Ignibilidad	Peso
Punto de ignición > 200°F o Nivel NEFPA 0	0
Punto de ignición 140 - 200°F o Nivel NEFPA 1	1
Punto de ignición 80 - 140°F o Nivel NEFPA 2	2
Punto de ignición < 80°F o Nivel NEFPA 3 o 4	3

Tabla 30.- Peso para ignibilidad

FUENTE	F1
IGNICIÓN	0
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *2.22	0

Tabla 31.- Valor de ERIS normalizado via fuego/explosión en diferentes fuentes.

### VALOR COMPUESTO DE RIESGO (CRS)

El CRS es una forma de valor esperado de que ocurra un evento adverso al humano o medio ambiente. Este puede ser calculado con la siguiente expresión.

$$\text{Valor esperado} = [(p_1) \cdot (p_2) \cdot \dots \cdot (p_n) \cdot v]$$

$p_i$  = Probabilidad de que ocurra el evento y, n posible evento en la cadena de eventos para realizar v.

v = Valor del evento

Se calculó el CRS para cada fuente, para lo cual primero se obtuvo el valor de peso por mecanismo de transporte (TMRS), el cual se obtiene de la siguiente relación.

*Si la probabilidad de uso es "0", no tiene sentido continuar con los calculos posteriores.*

TMRS=Probabilidad de uso (para cada mecanismo de transporte)\*valor normalizado para cada ruta de transporte

Una forma más práctica de probabilidad de uso de los diferentes mecanismos de transporte es usando la siguiente tabla, en donde la probabilidad puede ser alta (H), media (M), baja (L) y cero (0).

Valor H/M/L	Probabilidad Normal	Valor ERIS
H	0.83 - 1.00	5
M	0.17 - 0.82	3
L	0.01 - 0.16	1
0	0.00	0

Tabla 32.- Conversión de valores numéricos y relativos (H/M/L) a valores ERIS

$$\text{RSCS} = (\text{Cantidad de la sustancia peligrosa} \cdot \text{toxicidad/persistencia}) \cdot 0.694$$

Usando las tablas 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 se obtiene el RSCS.

Sustancia	Valor asignado
Componentes fácilmente biodegradables	0
Cadenas fuertes de hidrocarburos	1
Estructuras anilladas sustituidas.	2
Metales y componentes policíclicos e hidrocarburos halogenados	3

Tabla 33.- Factor de riesgo para persistencia

Peso = 3 Componentes altamente persistentes	Peso = 2 Componentes persistentes	Peso = 1 Componentes algo persistentes.	Peso = 0 Componentes no persistentes.
aldrin	acemaphthylene	acetylene dichloride	acetaldehyde
benzopyrene	atrazine	acetylene dichloride	acetic acid
benzothiazole	(diethyl) atrazine	acetylene dichloride	acetone
benzothioephene	barbital	benzene sulfonic acid	acetophenone
benzyl butyl phthalate	borneol	butyl benzene	benzoic acid
bromochlorobenzene	bromobenzene	butyl bromide	di-tert-butyl carbinol
bromoform butanal	camphor	ε-caprolactam	docosane
bromophenyl phenyl ether	chlorobenzene	carbon disulfide	eicosane
chlordane	1,2-bis-chloroethoxy ethane	o-cresol	ethanol
chlorobisoxazone	bis-chloroethyl methyl ether	dioxane	ethylamine
bis-chloroisopropyl ether	chloromethyl ether	1,2-dichloroethane	hexadecane
m-chlorotoluene	chloromethyl ethyl ether	1,2-dimethoxy benzene	methanol
DDE	2-chloropyridine	1,4-dimethyl naphthalene	methyl benzotate
DDT	di-4-butyl-p-benzoquinone	1,4-dimethyl phenol	3-methyl butanol
di-bromobenzene	dichloroethyl ether	diethyl adipate	methyl ethyl ketone
di-butyl phthalate	dihydrocarbazone	n-decane	2-methylpropanol
1,4-dichlorobenzene	dimethyl sulfide	ethyl benzene	octadecane
dichlorodifluoroethane	2-n-dimethyltoluene	2-ethyl-n-hexane	pentadecane
dieldrin	is-2-ethyl-1-methyl-1,3-dioxolane	o-ethyltoluene	pentanol
dimethyl phthalate	trans-2-ethyl-1-methyl-1,3-dioxolane	isodecane	propanol
di(2-ethylhexyl) phthalate	guaiacol	isopropyl benzene	propylamine
dibenzyl phthalate	2-hydroxyadiponitrile	limonene	tetradecane
di-tert-butyl phthalate	isophorone	methyl ester of lignocenic acid	n-tridecane
dimethyl phthalate	indene	methane	n-undecane
4,6-dinitro-2-aminoophenol	isoborneol	2-methyl-3-ethyl pyridine	
di-n-propyl phthalate	isopropenyl-4-isopropyl benzene	methyl naphthalene	
endrin	2-methoxy biphenyl	methyl palmitate	
heptachlor	methyl biphenyl	methyl phenyl carbinol	
heptachlor epoxide	methyl chloride	methyl stearate, naphthalene	
1,2,3,4,5,7,7-heptachloronorbornene	methylindene	nonane	
hexachlorobenzene	methylindene chloride	actane	
hexachloro-1,3-butadiene	nitroamylol	acetyl chloride	
hexachlorocyclohexane	nitrobenzene	pentane	
hexachloroethane	1,1,2-trichloroethylene	phenyl benzoate	
methyl benzothiazole	trimethyl-mono-tercaryldrotrazine	phthalic anhydride	

pentachlorobiphenyl	isomer	propylbenzene	
pentachlorobiphenol		1-terpineol	
1,1,3,3-tetrachloroacetone		toluene	
tetrachlorophenyl		vinyl benzene	
thiomethylbenzothiazole		xylene	
trichlorobenzene			
trichloromphenyl			
trichlorofluoromethane			
2,4,6-trichlorophenol			
triphenyl phosphate			
bromodichloromethane			
bromoform			
carbon tetrachloride			
chloroform			
chloromochloromethane			
dibromodichloroethane			
tetrachloroethane			
1,1,2-trichloroethane			

Tabla 34 - Persistencia (Biodegradabilidad) de algunos componentes orgánicos.

<p>0 = No tóxico (Ninguno). Esta designación es dada para materiales que caen en una de las siguientes categorías:</p> <p>a) Materiales que no causan daño bajo condiciones normales de uso.</p> <p>b) Materiales que producen efectos tóxicos en humanos solo bajo condiciones poco usuales o por sobredosis</p>
<p>1 = Ligeramente tóxico (Baja)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo unos segundos, minutos, u horas de exposición causan solo ligeros efectos sobre la piel o membranas mucosas sin tomar en cuenta lo extenso de la exposición</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir solo ligeros efectos en segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis sin tomar en cuenta la cantidad absorbida o el tiempo de exposición.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan solo ligeras y generalmente daños reversibles en la piel o la membrana mucosa. El tiempo de exposición puede ser pequeños o largos</p> <p>d) Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y puede producir solo ligeros y generalmente efectos reversibles en periodos de días, meses o años. La extensión de la exposición puede ser grande o pequeña.</p> <p>En general la clasificación de estas sustancias sido de toxicidad ligera, produce cambios en el cuerpo humano que son reversibles y pueden desaparecer después de que termina la exposición con o sin tratamiento medico."</p>
<p>2 = Moderadamente tóxico (Media)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo unos segundos, minutos, u horas de exposición causan solo moderados efectos sobre la piel o membranas mucosas. Estos efectos pueden ser el resultado de intensas exposiciones en cuestiones de segundos o de una moderada exposición en cuestión de horas.</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir moderados efectos en segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan moderados daños en la piel o la membrana mucosa.</p> <p>d) Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y puede producir moderados efectos después de continuas o repetidas exposiciones en periodos de días, meses o años.</p> <p>En general la clasificación de estas sustancias ha sido de toxicidad moderada, produce cambios tanto reversibles como irreversibles en el cuerpo humano. Estos cambios no son tan severos que pongan en peligro la vida o producir serios daños físicos.</p>
<p>3 = Toxicidad severa (Alta)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo segundos, minutos, u horas de exposición causan heridas a la piel o membranas mucosas de suficiente severidad como para poner en peligro la vida o causar permanentes daños físicos o deformación</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir daños de suficiente severidad como para poner en peligro la vida después de una sola exposición en cuestión de segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan fuertes daños en la piel o la membrana mucosa de suficiente severidad que pone en peligro la vida o causar daños permanentes o deformaciones o cambios irreversibles</p>

Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden causar la muerte o serias heridas físicas después de continuas o repetidas en pequeños exposiciones, en periodos de días, meses o años.

Tabla 35.- Rangos de toxicidad SAX

1. Materiales que al ser expuesto a condiciones de fuego, no puede ocurrir riesgo a la salud.
2. Materiales con un ligero riesgo a la salud, es recomendable usar aparatos de respiración.
3. Materiales peligrosos a la salud, pero se puede ingresar libremente a las áreas con aparatos de respiración.
4. Materiales extremadamente peligrosos a la salud, pero se puede ingresar a las áreas con extremo cuidado. Bien protegido, incluyendo aparatos de respiración, mascara protectora, botas, guantes, vendas alrededor de las piernas, brazos, cintura. La superficie de la piel no debe ser expuesta.
5. Unos cuantos soplos del gas o vapor pueden causar la muerte, o el gas, vapor o líquido podría ser fatal, normalmente cuando ingresan los bomberos, llevan ropa resistente al calor.

Tabla 36.- Rangos de Toxicidad NFPA.

Toxicidad	Peso
Sax o NFPA nivel 0	0
Sax o NFPA nivel 1	1
Sax o NFPA nivel 2	2
Sax o NFPA nivel 3	3

Tabla 37.- Conversión de factores de pesos SAX/NFPA

Peso para toxicidad	Peso para persistencia			
	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	3	6	9	12
2	6	9	12	15
3	9	12	15	18

Tabla 38 - Matriz de Persistencia vs Toxicidad.

Tons en yardas cubicas	Numero de drums	Peso
0	0	0
1 - 10	1 - 40	1
11 - 62	41 - 250	2
63 - 125	251 - 500	3
126 - 250	501 - 1,000	4
251 - 625	1,001 - 2,500	5
626 - 1,250	2,501 - 5,000	6
1,251 - 2,500	5,001 - 10,000	7
> 2,500	> 10,000	8

Tabla 39.- Conversión para peso por cantidad (1 ton = 1 yarda cubica = 4 drums; 1 drums = 50 galones.

$$CRS = (TMRS + RSCS + PCMRS) / 3$$

Para el relleno sanitario (F1) se obtuvieron los siguientes valores y dado que se manejaron diferentes valores de ERIS en aguas subterráneas debido al riesgo en función de la distancia, debido a esto se observa que los mayores valores de riesgo compuesto es por la ruta de agua subterránea y agua superficial se obtuvieron diferentes valores de TMRS, al igual que el CRS, como se muestra en la tabla 40

	PROBABILIDAD DE USO	ERIS F1	TMRS	RSCS	PCMRS	CRS
AGUA SUPERFICIAL	0	2.22	0	0	0	0
AGUA SUBTERRANEA	1	3.64	3.64	66.624	0.00046	23.42
AIRE	0	0	0	0	0	0
CONTACTO DIRECTO	1	0	0	0	0	0
FUEGO/EXPLOSION	0	0	0	0	0	0

Tabla 40.- Valores de TMRS y CRS para el relleno sanitario (F1).

Como puede observarse los mayores valores del valor de riesgo compuesto se obtienen en mecanismos de transporte de agua subterránea

### BLANCOS HUMANOS

Se hizo una evaluación de riesgo en blancos humanos, para cada una de las fuentes con cada uno de los mecanismos de transporte.

#### ERIS Agua Superficial--Blanco Humano

Los pesos para población por distancia se manejan varios valores para diferente número de población (actual, para un tiempo de respuesta a la emergencia  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ ) y distancia, como se muestra en las tablas 42, 43 y 44

*Población actual.- Considera el número de población que puede ser afectada al momento de la fuga.*

*Población en  $t_1$ .- Considera la población que puede ser afectada entre la fuga y tiempo de respuesta a la emergencia.*

*Población en  $t_2$ .- Considera la población que puede ser afectada un año después de la fuga.*

*Población en  $t_3$ .- Considera la población que puede ser afectada 10 años después de la fuga.*

Población	Distancia al o al pozo				
	> 4828 (m) > 3 millas	3218 - 4828 (m) 2 - 3 millas	1609 - 3218 (m) 1 - 2 millas	609 - 1609 (m) 2000 ft - 1 milla	0 - 609 (m) 0 - 2000 ft
0	0	0	0	0	0
1 - 100	0	4	8	8	10
101 - 1000	0	8	16	16	20
1001 - 3000	0	12	24	24	30
3001 - 10000	0	16	32	32	35
> 10000	0	20	35	35	40

Tabla 41.- Peso por Población vs Distancia para consumo de agua superficial o pozos de agua subterránea

Uso de agua superficial (agua fresca o agua salada)	Valor asignado
Normalmente no usado	0
Comercial o industrial	3
Irrigación, fuente importante económicamente preparación de comida comercial o recreación (pesca, remo, balneario)	6
Agua potable	9

Tabla 42 - Peso para uso de agua superficial

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN $t_1$	0
POBLACION EN $t_2$	0
POBLACION EN $t_3$	0
POBLACION TOTAL	0
USO DE AGUA SUPERFICIAL	3
POBLACION/DISTANCIA	10
VALOR CRUDO TOTAL	13
VALOR NORMALIZADO X 2.043	26.56

Tabla 43.- Valores de ERIS de aguas superficiales - blanco humano para diferentes fuentes.

#### ERIS Agua Subterránea--Blanco Humano

Los resultados de ERIS aguas subterráneas - blanco humano son resumidos en la tabla 45 y 46

Uso del agua subterránea.	Peso
Sin uso (acuífero extremadamente salino, extremadamente baja producción)	0

Comercial, industrial o irrigación y otras fuentes de agua disponibles no usadas pero podrían ser usadas	3
Fuentes alternas de agua potable con agua municipal sin tratar, siempre disponibles o comercial, industrial o para irrigación, sin otras fuentes disponibles.	6
Agua potable, sin agua municipal de fuentes alternas sin tratar siempre disponibles	9

Tabla 44.- Peso para uso de agua subterránea.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0.01
POBLACION EN t3	0.07
POBLACION TOTAL	0.08
USO DE AGUA SUBTERRANEA	3
POBLACION/DISTANCIA	10
VALOR CRUDO TOTAL	13.08
VALOR NORMALIZADO X 2 043	26.72

Tabla 45.- Valores de ERIS para aguas subterráneas - blanco humano, en diferentes fuentes.

### ERIS Aire--Blanco Humano

El valor del ERIS normalizado esta en función de la distancia y tipo de uso del suelo, como se muestra en las tablas 46 y 47.

Población	0 - 4 millas (6436 m)	0 - 1 milla (1609 m)	0 - ½ milla (804 m)	0 - ¼ milla (402 m)
0	0	0	0	0
1 - 100	9	12	15	18
101 - 1,000	12	15	18	21
1,001 - 3,000	15	18	21	24
3,001 - 10,000	18	21	24	27
> 10,000	21	24	27	30

Tabla 46 - Distancia de la población a la sustancia peligrosa.

Valor asignado	0	1	2	3
Distancia a comercios-industrias	> 1 milla (> 1609 m)	½ -1 milla (804-1609 m)	¼ - ½ milla (402-804 m)	< ¼ milla (< 402 m)
Distancia a Parques nacionales/estatales, bosques, reservas ecológicas y áreas residenciales	> 2 millas (> 3212 m)	1 - 2 millas (1609-3212m)	¼ - 1 milla (402-1609m)	< ¼ milla (< 402 m)
Distancia a zonas agrícolas (en producción los 5 últimos años)	> 1 milla (> 1609 m)	½ -1 milla (804-1609 m)	¼ - ½ milla (402-804 m)	< ¼ milla (< 402 m)
Zonas agrícolas principales	> 2 millas (> 3212 m)	1 - 2 millas (1609-3212m)	½ - 1 milla (804-1609m)	< ½ milla (< 804 m)
Distancia a sitios históricos				*

Tabla 47.- Peso para uso de suelo (ruta aire y fuego/explosión). \* Si el sitio es sujeto aun impacto importante.

Los valores de ERIS via aire - blanco humano son resumidos en la tabla 48

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION/DISTANCIA	9
USO DEL SUELO a	3
b	2
c	1
VALOR CRUDO TOTAL a	12

b	11
c	10
VALOR NORMALIZADO X 3.03 a	36.36
b	33.33
c	30.30

Tabla 48.- Valores de ERIS aire-blanco humano para diferentes fuentes.

#### ERIS Contacto Directo--Blanco Humano

El valor del ERIS esta en función del numero de personas como se ve en la siguiente tabla.

Población	Peso
0	0
1 - 100	1
101 - 1,000	2
1,001 - 3,000	3
3,001 - 10,000	4
> 10,000	5

Tabla 49.- Peso para población en un radio de una milla

Los datos de ERIS de contacto directo son dados en la tabla 50.

FUENTES	F1
POBLACIÓN ACTUAL	0
POBLACIÓN EN t1	0
POBLACIÓN EN t2	0
POBLACIÓN EN t3	0
POBLACIÓN TOTAL	0
POBLACIÓN EN UNA MILLA	1
VALOR CRUDO TOTAL	1
VALOR NORMALIZADO X 20	20

Tabla 50 - Valores de ERIS vía contacto directo - blanco humano.

#### ERIS Fuego/Explosión --Blanco Humano

Los valores de peso para población en un radio de 2 millas se da en la siguiente tabla.

Población	Peso
0	0
1 - 100	1
101 - 1,000	2
1,001 - 3,000	3
3,001 - 10,000	4
> 10,000	5

Tabla 51.- Peso para población en un radio de 2 millas

Los valores del ERIS vía fuego/explosión - blanco humano son resumidos en la tabla 52.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION EN DOS MILLAS	1
USO DEL SUELO	1
VALOR CRUDO TOTAL	2
VALOR NORMALIZADO X 12.5 a	25

Tabla 52 - Valores de ERIS via fuego/explosión -- blanco humano, para diferentes fuentes

Cabe hacer notar que el Cromo no representa riesgos de fuego y explosión, sin embargo se hace el análisis del escenario.

### BLANCO AMBIENTES SENSIBLES

#### ERIS Ruta de Agua Superficial-Sensibilidad Ambiental

Los posibles ambientes sensibles (hábitats críticos) se localizan a distancias entre 1 - 2 millas, por lo que se les asigno un peso de 1, como se muestra en las tablas 53 y 54.

Peso	0	1	2	3
Distancia a zonas húmedas (5 acres (20235 m <sup>2</sup> ) como mínimo) costeras.	> 2 millas (> 3212 m)	1 - 2 millas (1609-3212m)	½ - 1 milla (804-1609m)	< ½ milla (< 804 m)
Aguas dulces	> 1 milla (> 1609 m)	¼ - 1 milla (402-1609m)	100 ft - ¼ milla (30.48 m - 402 m)	< 100 ft (< 30.48 m)
Distancias a hábitats críticos (especies en peligro de extinción)	> 1 milla (> 1609 m)	½ - 1 milla (804-1609m)	¼ - ½ milla (402-804 m)	< ¼ milla (< 402 m)

Tabla 53.- Peso para ambientes sensibles (Agua superficial).

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 54.- Valores de ERIS vía agua superficial - blanco ambientes sensibles, para diferentes fuentes

#### ERIS Ruta Aire--Sensibilidad Ambiental

La sensibilidad ambiental se obtiene de la tabla 53 El resumen de los valores de ERIS vía aire - blanco ambientes sensibles se da en la tabla 55

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 55.- Valores de ERIS vía aire - blanco ambientes sensibles.

#### ERIS Ruta Contacto Directo--Sensibilidad Ambiental

La sensibilidad ambiental se obtiene de la tabla 56. La tabla 57 muestra los valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental

Distancia	Peso
> 1 milla (1609 m)	0
½ - 1 milla (804-1609 m)	1
¼ - ½ milla (402-804 m)	2
< ¼ milla (< 402 m)	3

Tabla 56 - Peso para distancia a hábitats críticos .

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 57 - Valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental

#### ERIS Ruta Fuego/Explosión--Sensibilidad Ambiental

Los valores de pesos para ambientes sensibles, número de construcciones y construcciones cercanas se obtienen de las tablas 58, 59 y 60

Peso	0	1	2	3
Distancia zonas húmedas	> 100 ft (30.48 m)			< 100 ft (< 30.48 m)
Distancia a hábitats críticos	> ½ milla (> 804 m)	1000 ft - ½ milla (304.8-804 m)	100-1000 ft (30.48-304.8 m)	< 100 ft (< 30.48 m)

Tabla 58 - Peso para ambientes sensibles (fuego/explosión)



Número de construcciones	Peso
0	0
1-26	1
27-260	2
261-790	3
791-2600	4
> 2600	5

Tabla 59.- Peso para número de construcciones (fuego/explosión).

Distancia	Peso
> ½ milla (> 804 m)	0
201 ft - ½ milla (61.26-804 m)	1
51 ft - 200 ft (15.54-61 m)	2
0-50 ft (0-15.24 m)	3

Tabla 60.- Peso para distancia a construcciones cercanas

FUENTE	F1
DISTANCIA A AMBIENTES SENSIBLES	0
NUMERO DE CONSTRUCCIONES	1
DISTANCIA A CONSTRUCCIONES CERCANAS	0
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 61.- Valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental

### VALORES DE RIESGO HUMANO Y AMBIENTES SENSIBLES

Los valores de riesgo humano y riesgo a ambientes sensibles son resumidos para cada de las diferentes rutas, en la tabla 62.

#### RELLENO SANITARIO (F1)

POBLACION ACTUAL	VALOR DE ERIS BLANCO HUMANO	CRS	BLANCO AMBIENTES SENSIBLES	RIESGO HUMANO	RIESGO AMBIENTAL	F-A...S
0.07	26.56	0	33.33	0	0	A.-AGUA SUPERFICIAL
0.07	26.72	23.42		43.8		B.-AGUA SUBTERRANEA
0.07	26.56	0	33.33	0	0	D.-AIRE
0.07	24.51	0	33.33	0	0	E.-AIRE
0.07	22.47	0	33.33	0	0	F.-AIRE
0.07	20	0	33.33	0	0	G.-CONTACTO DIRECTO
0.07	25	0	33.33	0	0	H.-FUEGO/EXPLOSION

Tabla 62 - Valores de riesgo humano y ambientes sensibles, para el relleno sanitario (F1), en la diferentes rutas de transporte.

En donde los valores de riesgo humano es analizado considerando diferentes factores, sin embargo debido a que tiene probabilidades de uso representa sólo riesgo humano

Para riesgo ambiental se considera que no hay ningún riesgo, debido a la nula probabilidad de uso de los diferentes mecanismos de transporte y para el mecanismo de transporte de agua subterránea no es aplicable según el autor del método

## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Aller, L., T Bennet, JH Lehr, R J.Pety, and G Hackett, 1985. DRASTIC: A Standar System for Evaluation Ground Water Pollution Potential Usm Hydrogeologic Setting". EPA/600/2-85/018. U.S. Enviromental Protection Agency, Robert S Kerr Enviromental Research Laboratory, Ada, OK (original no consultado, citado en Knox, Robert C. , Sabatini, David A. and Canter, Larry W., 1993).
- Armienta Hernández M.A., Contribución a los Mecanismos de Transporte del Cromo en el Acuífero de León Gto. Tesis Doctorado, Instituto de Geofísica-UNAM, 1992.
- Armienta Hernández Ma , Rodríguez Castillo R., "Investigación de Impacto Ambiental de la Dispersión de Compuestos de Cromo en el Area Occidente-Central del Valle de León Gto.". Reporte Interno, Instituto de Geofísica-UNAM, 1992.
- Foster, Stephen and Hirata, Ricardo, "Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas" Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 1991, 81 pp.
- Ramos-Leal, J.A., "Evaluación de Riesgo Ambiental para diferentes fuentes de Cromo en los alrededores de la Presa de San Germa, León, Gto.". Trabajo de Investigación, (Inédito), 1994.
- Vrba, J. y Zaporozec, A., Guidebook on Mapping Grounwater Vulnerability, International Association of Hydrogeologists, Vol 16, 1994, 131 p
- Van Stempvoort, D, L. Ewert and L. Wassenaar, 1992. AVI A method for Groundwater Protection Mapping in the Praire Province of Canada PPWB Report No 114, National Hydrology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, (original no consultado, citado en Romneseth, K Wei, M and Gallo, M., 1994 Evaluatng methods of Aquifer vulnerability mapping for the prevention of groundwater contamination in British Columbia Hydrology Branch, Ministry of Environment, Lands and Parks, Victoria, British Columbia, Canada)
- Wilson Albert, R. "Enviromental Risk, Identification and Management, Lewis Publisher Inc, 1991.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***PROSPECCIÓN DE CONTAMINACIÓN  
DE ACUÍFEROS POR HIDROCARBUROS***

**PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

## PROSPECCION DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR HIDROCARBUROS

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.  
RIO GUADALQUIVIR No. 3  
QUERETARO, QRO. 76020  
MEXICO

### RESUMEN

En nuestros días es común la presencia de hidrocarburos en el subsuelo. Las principales fuentes de contaminación son las fugas que se generan a partir de tanques de almacenamiento y de líneas de conducción, así como en el manejo y disposición inadecuados, principalmente en patios de mantenimiento de automóviles, autobuses, ferrocarriles y aeropuertos. Los tanques y conducciones llegan a ser corroídos; acomodamientos del terreno producen tensiones y dislocaciones de tuberías; roturas accidentales también son frecuentes. En terminales de diferentes medios de transporte, se manejan hidrocarburos para el lavado de motores, los que después de su utilización eran descargados al sitio más próximo. Esta práctica no se realizaba por negligencia; era el método usual. Actualmente, ante el conocimiento del problema, en algunos países se ha tomado conciencia del problema y se trabaja en la limpieza del subsuelo. El hidrocarburo ligero, como puede ser una gasolina, se infiltra al subsuelo y tiende a avanzar hasta el nivel estático, donde por presentar una menor densidad que el agua, flota sobre ella. Parte de este hidrocarburo se volatiliza ocupando espacios porosos o fracturas arriba del nivel estático. Cuando el hidrocarburo es más pesado, tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia las partes inferiores del acuífero o permanece absorbido por retención molecular en las partículas del suelo. Una porción del hidrocarburo llega a ser diluida por el agua. La porción volátil es la que se aprovecha para su prospección, la cual se realiza a través de pozos de monitoreo someros. Práctica útil y común es la realización de análisis de cromatografía de gases, a partir de cuyos resultados se identifica el tipo de hidrocarburo y se cuantifican sus componentes. En relación a la calidad del agua contaminada por hidrocarburos, recibe especial atención el benceno, debido al bajo límite permisible para el agua potable, el cual es de 1 ppb; es cancerígeno y el 35% de este compuesto es soluble en el agua. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. En zonas cubiertas por arcillas, como es el caso de la Ciudad de México, la circulación del contaminante es restringida, en contraste, suelos de alta permeabilidad como es el caso de la Ciudad de Guadalajara, la alta permeabilidad permite la libre circulación del contaminante en el subsuelo.

## ABSTRACT

Nowadays is common to find underground hydrocarbons (HC) leakages. The main pollutant sources are: leakage from underground storage tanks and pipes, and inadequate management at the maintenance yards of cars, buses, trains and airplanes. After some time storage tanks are corroded; ground movements produce accidental ruptures and dislocations of pipes. At terminals of different kind of transports, HC are used in motors cleaning and were discharged to the closest area after being used. This was not done by negligence, it was the usual method. Nowadays several countries have realized this problem and are working at underground remediation. A light HC like gasoline, infiltrates into the ground and tends to reach the static level. Due to its lower density, gasoline floats over the water. Part of this HC is volatilized and stored at the ground porous or fractures above the static level. When the HC is heavier, it tends to infiltrate and acumulate towards the base of the aquifer, or it is absorbed by molecular retention to ground particles. The volatile portion of a HC is used for detection through shallow monitoring wells. From chromatographic analysis are determined the type of HC and amount of its components. In relation to water quality polluted by HC, benzene is special importance due to its very low permissible limit in drinking water (1 ppb). Benzene is carcinogenic and 35% of it is soluble in water.

## INTRODUCCION

Una fuerte transformación en la tecnología y en la vida del hombre, se produjo a partir del cambio de energía de vapor por hidrocarburo, a partir de los años 40s. El manejo y disposición de los hidrocarburos no contemplaba la repercusión de los efectos que causaría al infiltrarse al subsuelo. No fue sino hasta que se empezó a manifestar la contaminación de suelo y el agua, que se inició la cultura de la prevención de la contaminación y saneamiento del subsuelo y los acuíferos.

Por ello, es común encontrar zonas contaminadas por fugas de hidrocarburos. En esta década de los 90s, se inició en México la exploración y saneamiento del subsuelo por hidrocarburos, con las limitantes que la economía del país ha permitido.

## **MOVIMIENTO DEL HIDROCARBURO EN EL SUBSUELO**

El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. A manera de ilustración de este punto, a continuación se mencionan las características de los subsuelos de las ciudades de México y Guadalajara, ya que, en la primera de ellas la existencia de arcillas superficiales restringen la contaminación, mientras que en la otra lado la alta permeabilidad del subsuelo permite la libre circulación del contaminante.

La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México se encuentra asentada sobre sedimentos arcillosos de origen lacustre, cuyo espesor varía de 20 a más de 80 metros. Estas arcillas, presentan una permeabilidad reducida que las hace que funcionen como un acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita su salida por retención molecular). El flujo de agua en el acuitardo de la Ciudad de México es muy reducido; tiene una permeabilidad del orden de  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  m/seg. La presencia de estas arcillas en el subsuelo limita el movimiento del agua y de sus contaminantes, los que circulan en forma muy lenta, retardando la contaminación. Sin embargo, el contacto de zonas impregnadas de hidrocarburos con espacios abiertos en el subsuelo, tales como el drenaje, ductos telefónicos e infraestructura subterránea en general, pueden constituir zonas a través de las cuales pueda circular libremente el hidrocarburo en el subsuelo. También la existencia de agrietamientos llega a permitir el flujo rápido de agua con hidrocarburos.

En contraste, el subsuelo de la Ciudad de Guadalajara está constituido en sus aproximadamente 20 metros superiores, por arenas pumíticas (llamadas localmente "jales"), las cuales presentan una alta permeabilidad que permite la libre y rápida infiltración de contaminantes al subsuelo. A profundidades de entre 5 y 15 metros se encuentra el nivel freático, sobre el cual se llegan a acumular fugas de hidrocarburos líquidos. La zona no saturada, entre la superficie y el nivel freático, permite la libre circulación de volátiles, haciendo de ésta, una zona de alta vulnerabilidad.

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS**

Con el objeto de entender el comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo, se presentan algunas de sus características físicas y químicas.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos en una gasolina típica. Estudios efectuados por Fleischer et al (1986), enfocados a los 13 compuestos más comunes de las gasolinas, los dividió en los 4 grupos siguientes: (1) Compuestos que preferentemente son absorbidos por la estructura del suelo; (2) los que se volatilizan rápidamente; (3) los que pueden causar mayor peligro; (4) los que no tienen un comportamiento de migración definido. En la tabla No. 1 se muestra la capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componente más comunes de las gasolinas.

Los hidrocarburos ligeros tienden a volatilizarse, mientras que los pesados permanecen entre las partículas del suelo. Los hidrocarburos ligeros son conocidos como LNAPLS (Ligth-Nonaqueos Phase Liquids)

Las gasolinas son utilizadas como combustible para máquinas. Los principales componentes químicos incluyen las cadenas de los alcanos, los cicloalcanos y los aromáticos. La primera cadena corresponde también a parafinas. El porcentaje en volumen de las cadenas mencionadas, son de aproximadamente 51% para los alcanos, 36% para los cicloalcanos y 14% de aromáticos, En la tabla No. 2, se presentan algunos de estos compuestos en ciertas gasolinas.

El diesel es una mezcla de parafinas de cadena rota. Los diferentes tipos de hidrocarburos comerciales, entre ellos la gasolina y el diesel, corresponden a cortes de destilación. La gasolina contiene relativamente grandes concentraciones de aromáticos como benceno y tolueno. En contraste, en el diesel estos aromáticos prácticamente no se encuentra presentes.

Dentro de los productos del petróleo, los aromáticos corresponden al grupo más importante desde el punto de vista ambiental. El benceno, el tolueno y los xilenos, presenta densidades menores a uno. El benceno es el más soluble con hasta 1780 ppm a la temperatura ambiente. El tolueno tiene una solubilidad de 515 ppm a 20° C. Los componentes aromáticos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), se consideran los de más alta movilidad.

La identificación de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante un análisis de cromatografía, por medio del cual se llegan a identificar y cuantificar. En la figura 1 se muestra el cromatograma de una mezcla de hidrocarburos, así como los rangos de destilación de ciertos compuestos y en la figura 2 los cromatogramas de algunos productos.

Algunos constituyentes de los hidrocarburos puede ser cancerigenos, en especial el benceno. La norma de calidad para el benceno en agua es de 1 ppb. (parte por billón).

Los hidrocarburos se pueden encontrar en diferentes formas en el subsuelo como son: fase líquida; fase disuelta en el agua y; fase absorbida por el suelo. Estudios recientes han adoptado el BTEX como una forma de expresar a los hidrocarburos.

## **EXPLORACION Y DELIMITACION DE PLUMAS DE HIDROCARBUROS EN EL SUBSUELO**

Parte de los hidrocarburos más comunes se volatiliza, propiedad que se aprovecha para, mediante perforaciones someras, realizar mediciones de los hidrocarburos volátiles existentes y delimitar la zona afectada.

El proceso de exploración se inicia con la perforación de pozos someros, mediante los cuales se realizan mediciones insitu y se obtienen muestras de gas y líquido para análisis de cromatografía. Los resultados de las mediciones permiten delimitar la zona afectada y, cuantificar el volátil y el líquido.

### POZOS DE MEDICION O MONITOREO

La perforación de los pozos someros de medición, se puede realizar mediante muestreadores manuales o perforadoras sencillas. Son comunes los rotomartillos accionados por energía eléctrica. El rotomartillo "inca" barras de acero inoxidable generalmente de 3/4" de diámetro. La perforación de este tipo de pozos generalmente alcanza de 2 a 6 metros de profundidad.

Mayores profundidades requieren maquinas perforadoras especiales que incluyen tuberías para perforación y muestreo de suelo, denominadas "augers".

### MEDICIONES INSITU

Una vez perforados los pozos someros, se pueden realizar mediciones insitu de hidrocarburos volátiles (HCV), oxígeno, explosividad y bióxido de carbono. Un plano con la distribución de HCV puede mostrar claramente la presencia y



extensión de la zona contaminada. Los valores de explosividad, además de poder indicar la magnitud de la pluma, dan una "idea" del riesgo, aunque su medición puede estar afectada por la ausencia de oxígeno.

En todos los suelos existen bacterias, las que biodegradan a los hidrocarburos provocando: (1) ausencia de oxígeno que es consumido por la acción bacteriana y (2) abundancia de bióxido de carbono, como producto de la biodegradación. Por ello, la medición y mapeo de los parámetros mencionados constituyen otras formas de delimitar las áreas impregnadas por hidrocarburos.

Cuando en las perforaciones de monitoreo se alcanza el nivel freático, se puede medir el espesor de los hidrocarburos líquidos (HCL) que se encuentran flotando sobre el nivel freático.

## **MUESTREO DE HIDROCARBUROS**

El muestreo se puede llevar a cabo sobre muestras de suelo, gas, agua y producto líquido.

### **MUESTRAS DE SUELOS**

Con el objeto de definir la litología del subsuelo y extraer muestras de suelo e hidrocarburos, se perforan pozos con obtención de núcleos de suelo inalterado, a partir de la superficie y hasta la profundidad total del pozo. Los núcleos son enviados al laboratorio para efectuarles un análisis de cromatografía. Existen varias formas de realizar el muestreo de núcleos de suelo. Generalmente para profundidades someras (1-10 m), el muestreo se realiza mediante un tubo de acero inoxidable, el cual incluye una punta cónica truncada; a través de ésta, entra el material arcilloso del suelo al tubo, al ser impulsado el muestreador hacia abajo. El tubo muestreador se encuentra revestido en su interior por un empaque de acetato, dentro del cual se aloja la muestra de material. Al sacar el tubo muestreador, se extrae el empaque de acetato y muestra de suelo, al que se le colocan tapas en las partes superior e inferior. Las tapas pueden ser de diferente color con el objeto de marcar la orientación de la muestra.

Para el muestreo a profundidades mayores de 10 metros, generalmente se utilizan máquinas perforadoras rotarias, equipadas con tuberías de perforación especiales para muestreo, denominadas "augers". En la figura 3 se muestran diferentes tipos de equipos de muestreo.

## MUESTRAS DE GAS

La obtención de muestras de gas en los pozos someros se realiza colocando un tubo plástico flexible dentro del pozo. Se extrae el gas por medio de una pequeña bomba o una hipodérmica y se almacena en bolsas especiales, fabricadas con materiales que no reaccionan con el hidrocarburo o bien en recipientes de vidrio. Las muestras obtenidas son enviadas al laboratorio para su análisis cromatográfico. Son comunes los cromatógrafos portátiles que pueden realizar el análisis en el sitio.

## MUESTRAS DE PRODUCTO LIQUIDO

Cuando la perforación alcanza el nivel freático, puede obtenerse una muestra de agua y del producto (hidrocarburo) líquido. Existen diferentes aparatos para su extracción. El producto líquido debe envasarse y sellarse en recipientes especiales.

## **ANALISIS DE LABORATORIO**

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de gas, agua o suelo, son analizadas por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra. (figuras 1 y 2).

## **CONCLUSIONES**

Las fugas de hidrocarburos y su consecuente contaminación de suelos y agua subterránea, son comunes en sitios donde se manejan estos productos, principalmente gasolineras y patios de ferrocarriles, autobuses y aeropuertos. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo depende del tipo y características del material que constituye el medio. Los hidrocarburos comerciales corresponden a cortes de destilación, que van de ligeros y alto grado de volatilización, a pesados o densos. La exploración y delimitación de hidrocarburos en el subsuelo

se realiza mediante determinaciones de HCV, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y BTEX, entre otros, medidos en pozos someros. Generalmente se obtienen muestras de gas, líquido y/o sólido para su análisis, cualitativo y cuantitativo; la técnica usual es la cromatografía de gases.

## REFERENCIAS

ABDUL, S.A. 1989. Limitations of Monitoring Wells for the Detection and Quantification of Petroleum Products in Soil and Aquifers In: GWMR.

CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 p.

FETTER, C.W. 1993, Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company. 458 p.

KVA, ANALYTICAL SYSTEMAS. 1990. Soil Gas Equipment and Brief Field Techniques. Publisher K-V Associates, INC. 50 p.

KERFOOT, H. B. 1988. Is Soil-Gas Analysis, an Effective Means of Tracking Contaminant Plumes in Groundwater? What are the limitations of the Technology Currently Employed, In: GWMR.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers, 227 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

NIELSEN, D. M. 1991. Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. National Water Well Association. 717 p.

ODISK, G. AND K MUSICA. 1989. Handbook for the Identification, Location and Investigation of Pollution Sources Affecting Ground Water. NWWA. 185 p.

TABLA 1 CAPACIDAD DE ADSORCION, VOLATILIZACION Y SOLUBILIDAD DE LOS COMPONENTES MAS COMUNES DE LAS GASOLINAS

	CAPACIDAD DE		
	ADSORCION POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACION (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a)	100	0	0
Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	61	8	31
Naftaleno	88	2	10
Fenantreno	0.1	99.8	0.1
1-pentano	9	0.01	91
Fenol	3	77	20
Tolueno	15	54	31
Xileno			

De: Fleischer et al., 1986

TABLA 2 ALGUNOS DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES DE LAS GASOLINAS (ADAPTADA POR PERRY Y MODIFICADA POR NYER 1993)

	VOLUMEN %		
	GASOLINA 1	GASOLINA 2	GASOLINA 3
<u>ALCANOS</u>			
n-PENTANO	0.33	0.44	1.12
n-HEXANO	6.44	7.75	9.15
n-HEPTANO	6.90	5.94	8.42
2-METILPENTANO	2.89	2.58	3.47
2,3-DIMETILHEXANO	0.22	1.30	2.39
<u>CICLOALCANOS</u>			
CICLOPENTANO	0.96	1.76	0.67
METILCICLOPENTANO	6.51	10.29	5.01
CICLOHEXANO	10.40	7.63	7.13
METILCICLOHEXANO	22.00	14.55	18.07
ETILCICLOPENTANO	2.03	4.38	2.34
TRIMENTILCICLOPENTANO	3.64	8.12	4.18
<u>AROMATICOS</u>			
BENCENO	3.27	2.22	3.61
TOLUENO	16.19	7.94	12.02

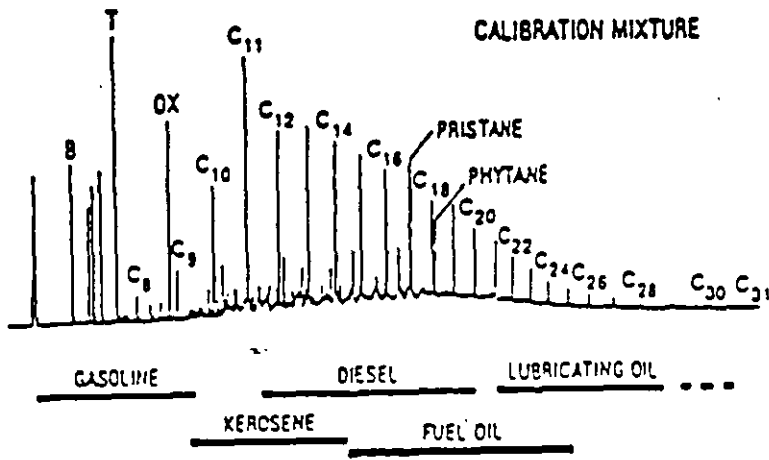


FIGURA 1. CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE HIDROCARBUROS (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON, 1985)

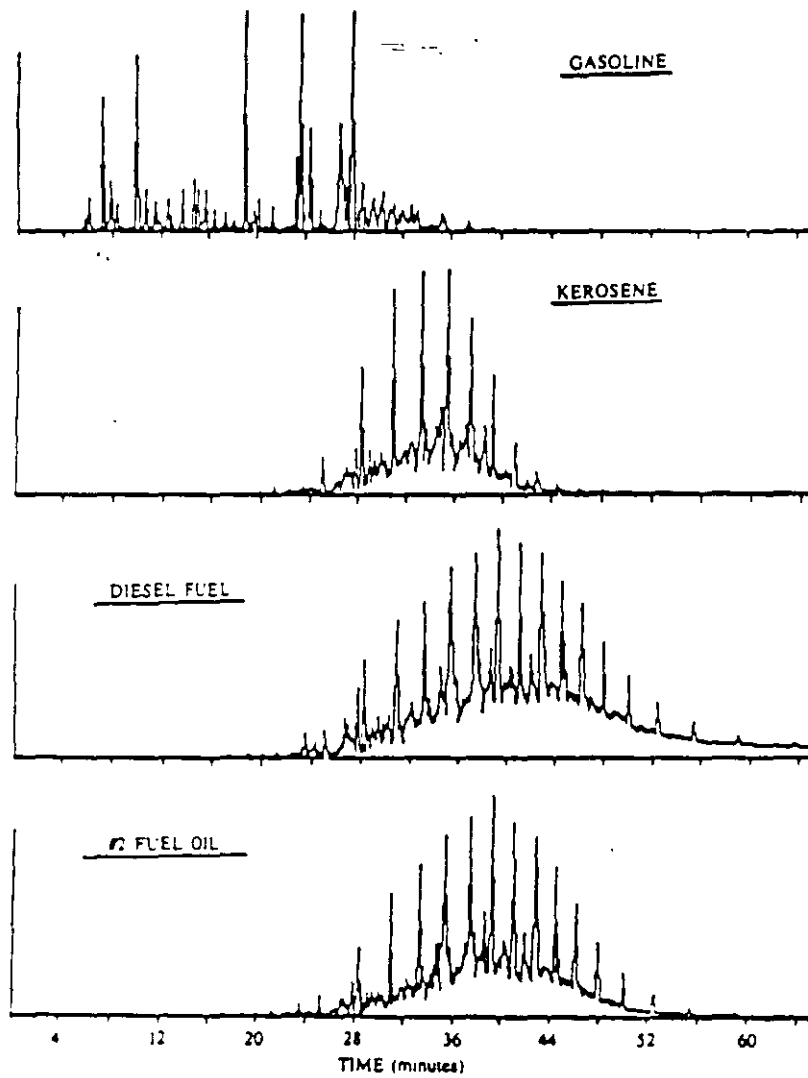
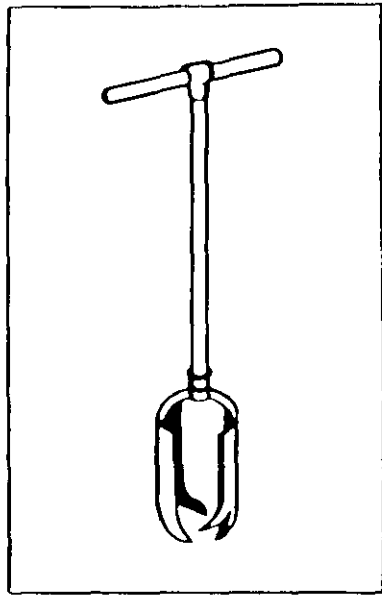
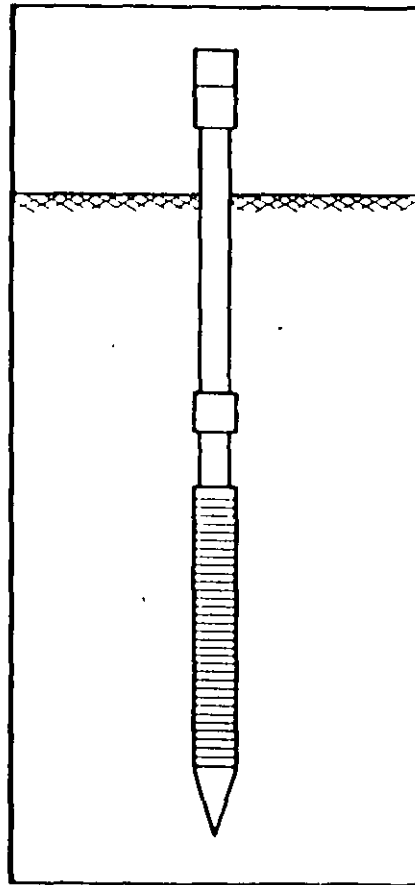


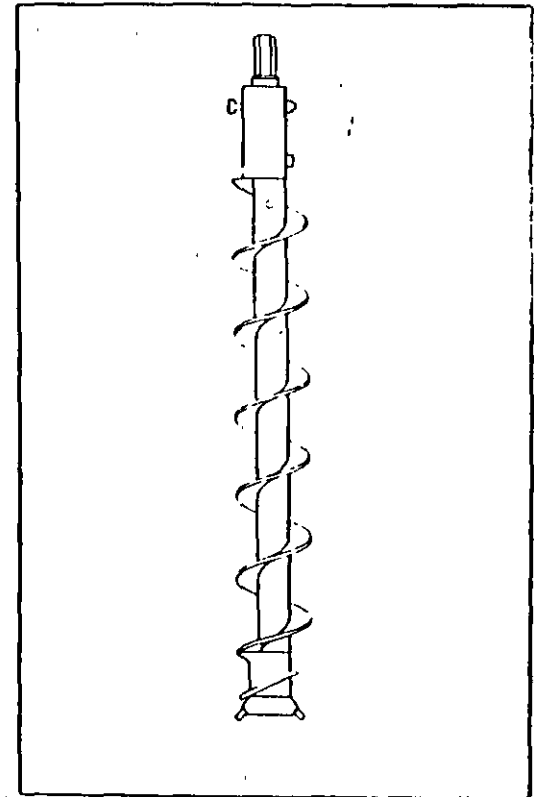
FIGURA 2 CROMATOGRAMAS DE DIFERENTES HIDROCARBUROS (DE CALABRESE Y KOSTECKI, 1989)



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE  
INCADO DE TUBERIA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

FUENTE NWWA 1989 HANDBOOK OF SEGGESTED

FIGURA 3

11

# DETERMINACION DE HIDROCARBUROS VOLATILES EN LA CONTAMINACION DEL SUBSUELO

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.  
RIO GUADALQUIVIR No. 3  
QUERETARO 76020, QRO.  
MEXICO

## RESUMEN

En suelos y acuíferos contaminados por hidrocarburos (HC), algunos de sus componentes se disuelven en el agua; otros flotan sobre el nivel freático y otra parte se volatiliza. En los estudios de prospección de HC, se obtienen y analizan muestras de agua, de HC líquido, de volátiles y de suelos. El estudio de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante análisis de cromatográfico, por medio del cual se llegan a identificar los tipos de HC y a cuantificar sus componentes.

## INTRODUCCION

En la prospección y saneamiento del subsuelo y acuíferos por hidrocarburos, una herramienta útil es el análisis cromatográfico. El análisis incluye una gráfica denominada cromatograma, en la que se registra la presencia de diferentes orgánicos volátiles. Mediante este análisis es factible cuantificar los compuestos presente y clasificar el tipo de hidrocarburo.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos diferentes en una gasolina típica y en general, se caracteriza por que los compuestos que la constituyen son más volátiles que los que forman al diesel. En contraste, los aceites lubricantes prácticamente no contienen compuestos ligeros, lo cual es claramente identificable en los cromatogramas.

Los hidrocarburos que presentan mayor volatilidad pueden perder fácilmente los compuestos más ligeros en relación al tiempo, factor que llega a permitir la diferenciación de un hidrocarburo fresco de otro antiguo.

## ANALISIS DE LABORATORIO

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de agua o suelo son analizadas en el laboratorio por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra.

En la figura 1 se muestra un cromatograma donde se marcan los cortes de destilación de algunos hidrocarburos como la gasolina, el diesel y el keroseno. En la figura 2 se incluyen cromatogramas típicos de una gasolina y del diesel, entre otros

## VOLATILIZACION DE LOS HIDROCARBUROS

Conforme un hidrocarburo se volatiliza, la cantidad de HC ligeros disminuye. En las figuras 3 a 5, se presentan los cromatogramas de gasolina nova, diesel y petróleo, tanto frescos como volatilizados, observándose que es notoria la pérdida de volátiles en los dos primeros. En el petróleo, no se aprecia un cambio significativo, debido a que este hidrocarburo está constituido por una mezcla pobre en volátiles ligeros. A partir de los resultados del análisis cromatográfico puede clasificarse el tipo de hidrocarburos y cuantificarse los diferentes compuestos que lo constituyen.

Con el objeto de conocer el comportamiento de la volatilización de los hidrocarburos a la intemperie, se obtuvieron muestras de gasolina magna, gasolina nova, diesel y petróleo. A las muestras obtenidas se les efectuó un análisis de cromatografía. Se colocaron en un espacio abierto y ventilado, y se tomaron muestras periódicas. Algunos de los cromatogramas resultantes se muestran en las figuras 3 a 5. Con los valores de compuestos volátiles obtenidos, se formó una gráfica (fig. 6) donde se observó una clara volatilización en las gasolinas. Por lo que respecta al diesel y al petróleo, la respuesta fue mínima, debido a que estos hidrocarburos son pobres en volátiles, en relación con las gasolinas.

## CONCLUSIONES

La cromatografía de gases es una herramienta útil para la identificación de los hidrocarburos y para la cuantificación de sus componentes. Dentro de un cromatograma se marcan los compuestos de acuerdo a su grado de volatilización. Las gasolinas presentan compuestos más ligeros que el diesel. En contraste, los aceites



lubricantes no contienen compuestos ligeros. Con el tiempo un hidrocarburo puede volatilizarse, factor que llega a permitir diferenciar a un hidrocarburo fresco de otro antiguo.

## REFERENCIAS

CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 1. Lewis Publishers. 357 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Lewis Publishers. 354 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992. Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments. C. K. Sholey, Inc. 395 P.

RISER-ROBERTS, E. 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, C. K. Smoley, Inc. 264 p.

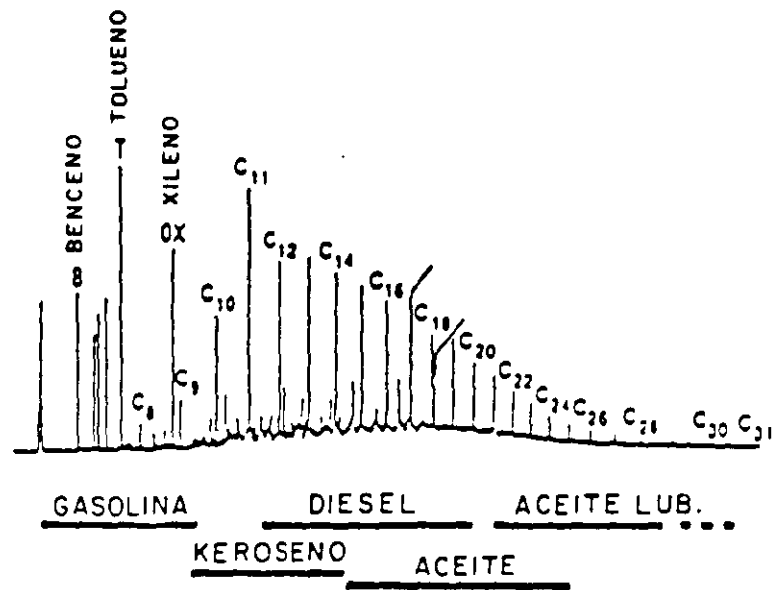
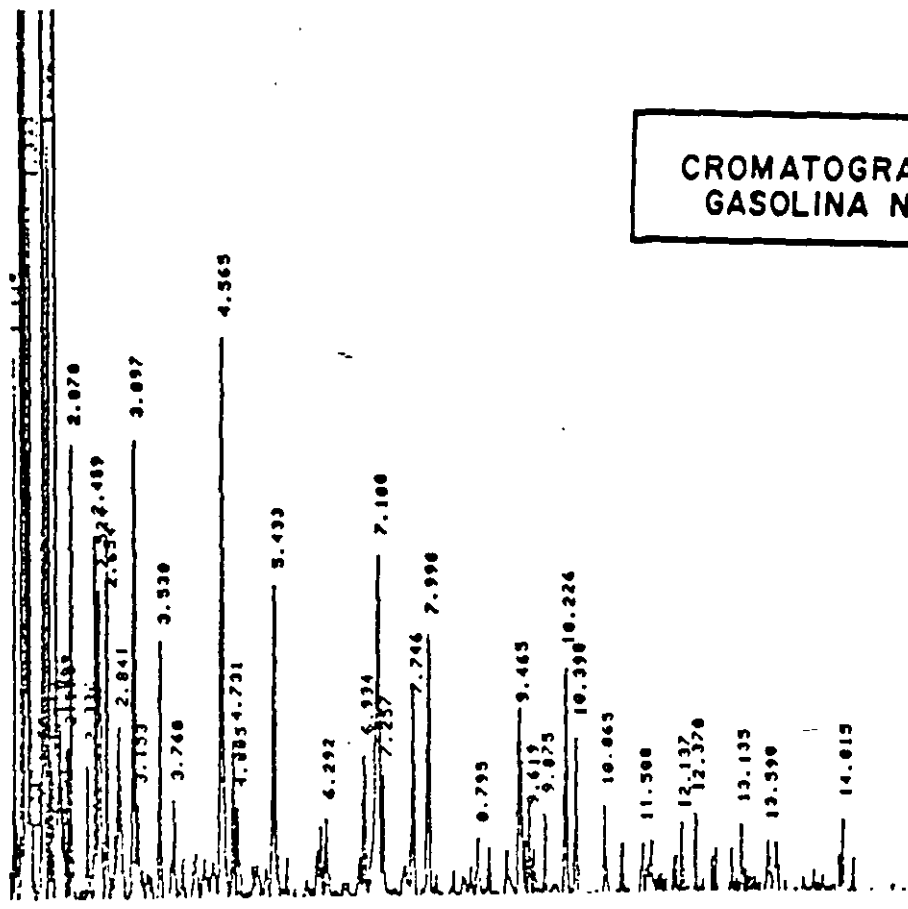


FIGURA I CROMATOGRAMA DE UNA MEZCLA DE HIDROCARBUROS.  
 (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON 1985)

1.43  
1.81

CROMATOGRAMA DE GASOLINA NOVA



CROMATOGRAMA DE DIESEL

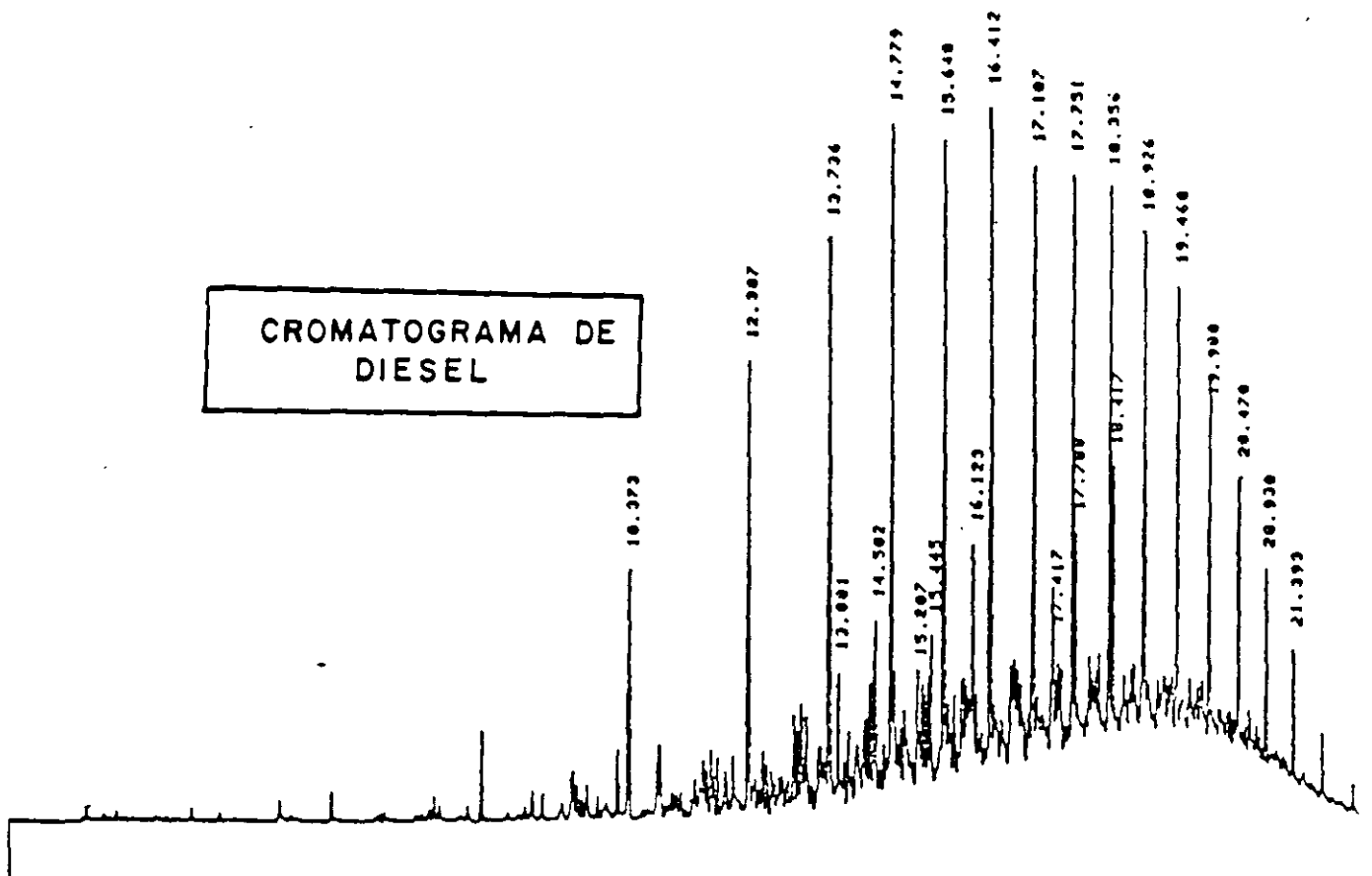
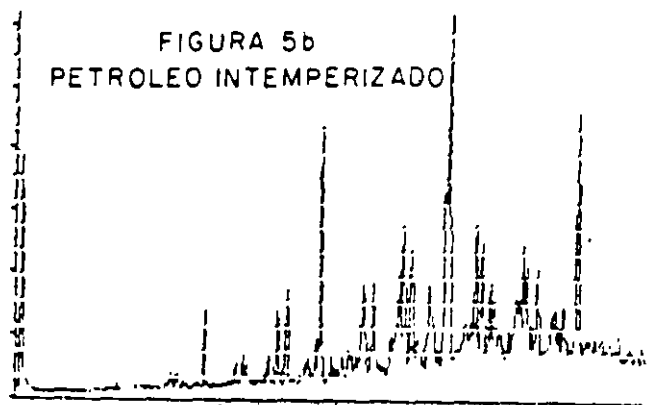
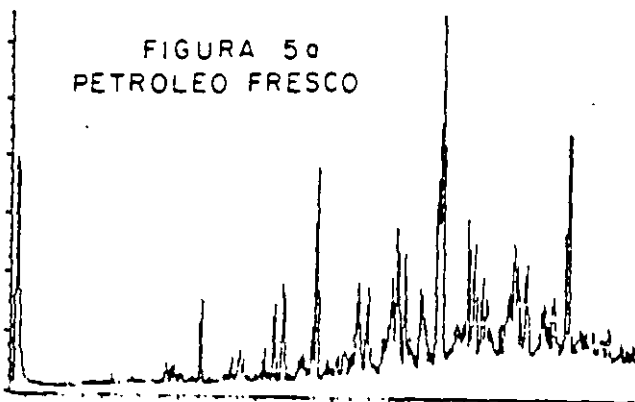
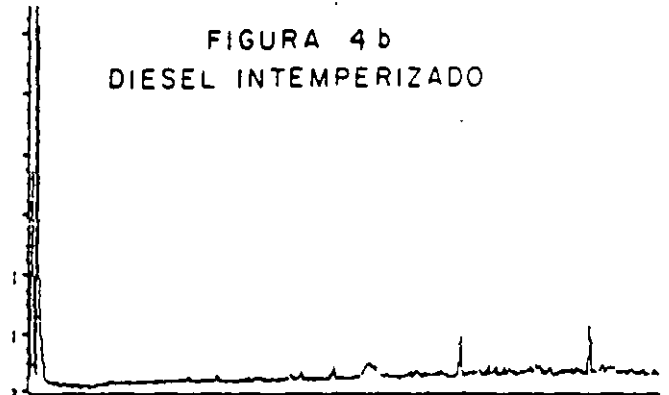
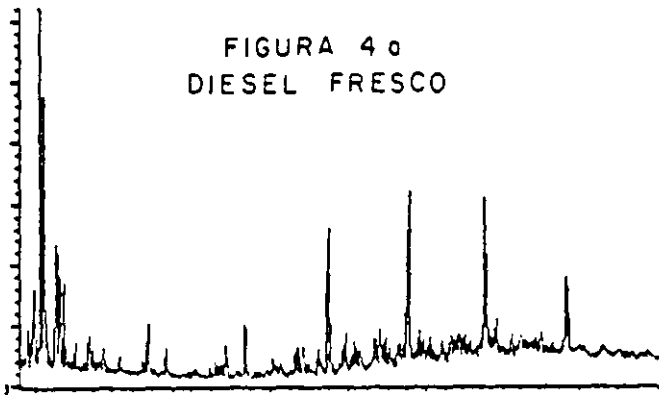
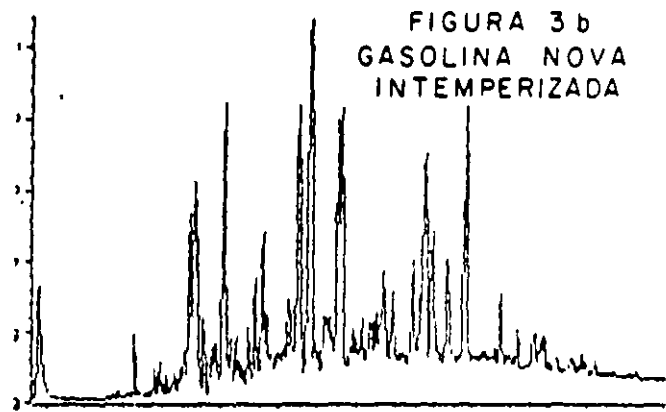
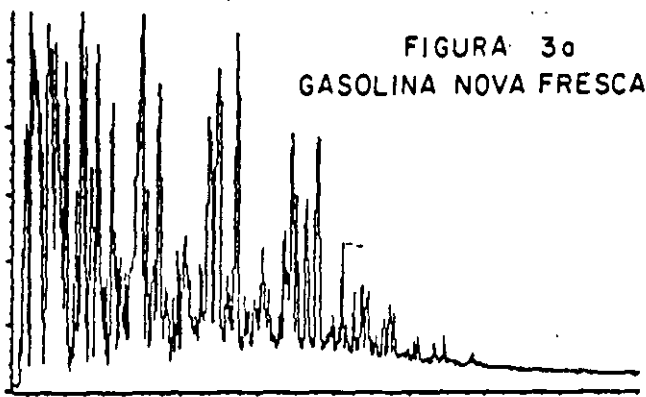


FIGURA 2 - CROMATOGRAMAS TÍPICOS DE GASOLINA NOVA Y DIESEL



# COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS A LA INTEMPERIE, RESPECTO AL TIEMPO

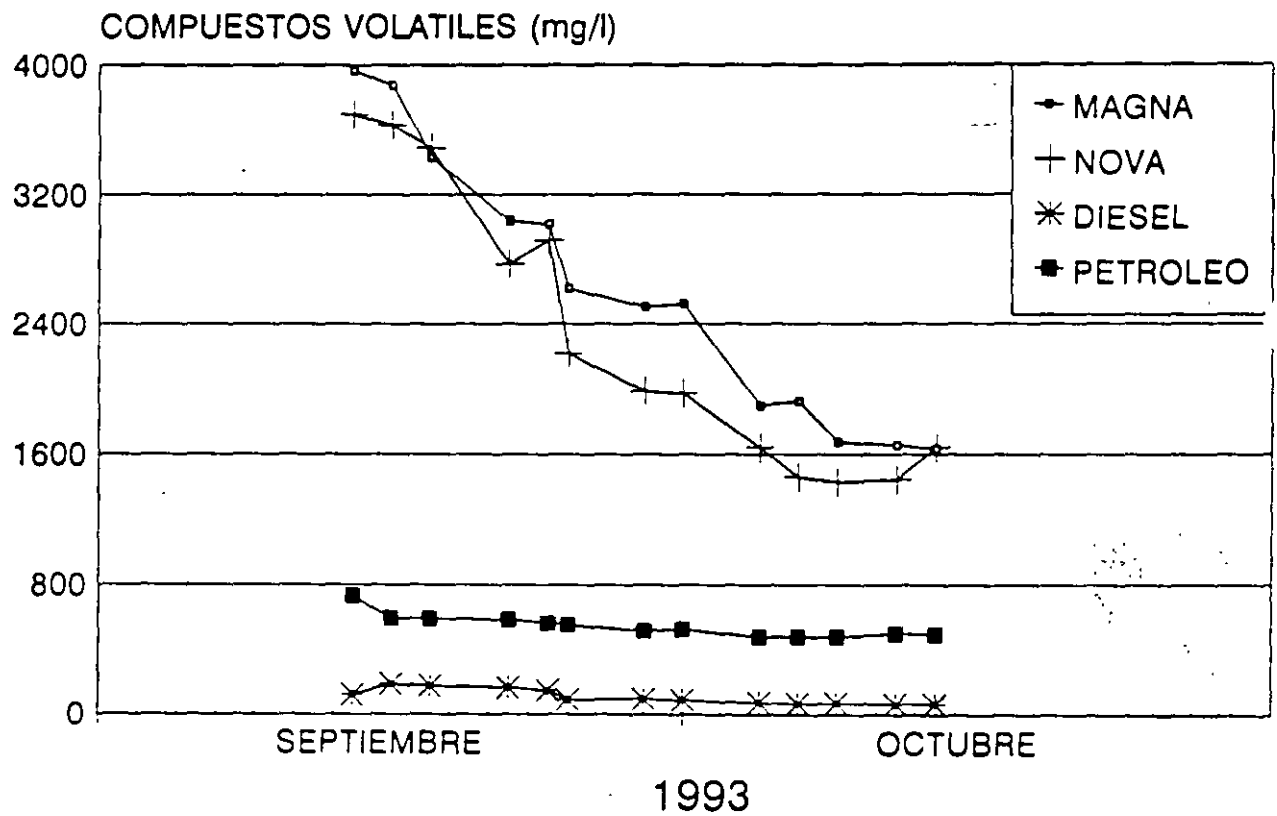


FIGURA 6

## **SANEAMIENTO DE ACUIFEROS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS**

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.  
RIO GUADALQUIVIR No. 3  
QUERETARO, QRO. 76020  
MEXICO

### **R E S U M E N**

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en 4 formas: líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; volátil en la zona no saturada; disuelto en agua y; líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por el material del medio o sedimentado en la base del acuífero. Los métodos apropiados para el saneamiento del subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo. El saneamiento del subsuelo puede iniciarse con la extracción del HC líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. Como segundo paso se puede considera la limpieza del suelo y acuífero contaminados, los cuales tienen una mayor complejidad.

Para la extracción inicial de los productos líquido y volátil, el diseño y operación es "relativamente" sencillo. La remediación o saneamiento total del suelo y acuífero incluye técnicas sofisticadas, de alto costo y largo tiempo de ejecución. Existen diversos métodos, destacando entre ellos la extracción del contaminante y la biodegradación. La extracción por bombeo del producto líquido, es común, la cual se extrae junto con agua del acuífero; una vez en la superficie el producto es almacenado en tanques y el agua extraída es tratada a fin de eliminar los volátiles que contenga. El volátil puede extraerse a través de pozos y, una vez

en la superficie, puede ser incorporado a la atmósfera, incinerado o capturado mediante filtros de carbón activado.

## ABSTRACT

Infiltrated hydrocarbons (HC) underground are found in 4 phases: (1) Liquid of lower density than water, floating over the water level; (2) volatile in the vadose zone; (3) dissolved in water; (4) liquid of higher density than water, found absorbed by the environment or accumulated at the base of the aquifer. The appropriate methods to clean underground polluted by HC depends of various factors. Some of them are: the phase in which the HC is found, its distribution and soil characteristics. Remediation usually begin with liquid and volatile extraction to reduce the risk. As a second step soil and aquifer cleaning is performed. To start extraction of HC, both liquid and volatile phases, is relatively simple. Total remediation of soil and aquifer includes sophisticated and expensive techniques performed for a long period of time. A common remediation method consists in extraction of liquid product and water by pumping. Once at the surface the product (liquid HC) is stored in tanks and water is treated to eliminate possible volatiles. The volatile phase can be extracted through wells. Once in surface those volatiles can be incorporated to the atmosphere, incinerated or captured by activated carbon filters.

## INTRODUCCION

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en varias formas tales como: (1) líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; (2) volátil en la zona no saturada; (3) disuelto en agua y; (4) líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por

las partículas del suelo o sedimentado en la base del acuífero. Una vez conocida su presencia en el subsuelo, (en extensión, concentración, tipo de hidrocarburos y fase en que se encuentra), junto con el conocimiento de la geología y geohidrología del lugar, se pueden establecer las políticas de saneamiento.

El o los métodos más apropiados para el saneamiento de un subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo.

En México, se puede dividir el saneamiento en 2 partes. La primera considera la extracción inicial del HC líquido y volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. La segunda parte se puede denominar la "limpieza total", del suelo y acuífero, la cual incluye técnicas sofisticadas de alto costo y largo tiempo de ejecución.

## **METODOS DE SANEAMIENTO**

Los principales métodos para el saneamiento del subsuelo y acuífero por hidrocarburos son: (1) extracción del HC líquido y volátil; (2) biodegradación insitu.

### EXTRACCION DE HC LIQUIDO Y VOLATIL

Una vez delimitada la zona invadida por HC y cuantificada su concentración, se procede a extraerlo. El producto líquido es bombeado a través de pozos. Este, puede ser extraído junto con el agua del acuífero y una vez en la superficie, es separado. En otros casos, el HC líquido que se encuentra en una capa flotando sobre el agua, de donde puede ser extraído mediante bombas especiales. Para



acelerar la acumulación del HC en el entorno del pozo, puede bombearse agua y formarse un cono de abatimiento, cuya pendiente facilita el movimiento de la capa de HC que flota sobre el nivel estático, hacia el pozo. El HC y agua extraídos son procesados en la superficie. (Figura 1)

La extracción de volátiles se puede realizar a través de pozos ubicados en la zona vadosa, donde se colocan extractores de aire. Pueden perforarse pozos para inyección de aire, que "empujen al volátil hacia su salida. La remoción de volátiles al inicio de la extracción es alta y va disminuyendo con el tiempo.

### BIODEGRADACION INSITU

Un método para el saneamiento de zonas afectadas por hidrocarburos es la bideogradación. Consiste en utilizar las bacterias que existen en todo suelo y que se alimentan de HC y oxígeno, formando bióxido de carbono y agua. Para acelerar este proceso, se pueden añadir nutrientes que aceleren la acción bacteriana, principalmente oxígeno, el cual se inyecta como gas o mediante agua. Debido al proceso de biodegradación mencionado, una zona invadida por hidrocarburos se caracteriza también por ausencia de oxígeno y abundancia de bióxido de carbono, parámetros que pueden monitorearse durante el saneamiento para determinar el grado de limpieza alcanzado.

### **EQUIPOS USUALES PARA EL SANAMIENTO**

Con el objeto de ilustrar tanto la forma en que se encuentra el HC el subsuelo, así como las técnicas más comunes para su extracción o saneamiento, a continuación se describen varios productos comunes en el mercado.

En la figura No. 2 se muestra un equipo Westinghouse para el tratamiento de hidrocarburos y agua subterránea extraídos del subsuelo. En el se observa un tanque separador de agua-hidrocarburos, un tanque para el almacenamiento del producto recuperado, un tanque de aereación, un compresor, un soplador acoplado a una torre desgasificadora y un panel de control.

En la figura No. 3 se incluye el sistema de ORS Environmental Equipment, para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátiles. En esta figura, se observa la presencia de un acuífero somero que es contaminado por fugas de un tanque de gasolina. El producto líquido se encuentra flotando sobre el nivel freático. También existen volátiles entre la superficie del terreno y el nivel freático. La extracción del hidrocarburo líquido se realiza mediante un sistema de bombas para la extracción, tanto del producto (HC líquido) como del agua. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada por una torre desgasificadora. El gas obtenido es tratado por oxidación catalítica o incinerado. En la misma figura, se ilustra la inyección de agua y nutrientes al subsuelo, lo que provoca biodegradación, además de "empujar" al producto hacia el pozo. Cuenta también con un sistema de extracción de volátiles, los que son conducidos a la planta de tratamiento de gases.

En la figura No. 4 se muestra la perforación de pozos direccionales para el saneamiento del subsuelo bajo infraestructura como edificios y tanques de almacenamiento.

En la figura No. 5 se incluye el sistema Environmental Instruments para la extracción y tratamiento del producto líquido y del volátil. Los volátiles son extraídos a través de un pozo y pueden ser conducidos a un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico. Un sistema de inyección de aire al subsuelo separa el volátil del agua, para posteriormente ser captado por un pozo. Mediante otro pozo, se extrae agua y producto (HC) líquido. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada a través de un separador de

agua/producto. Posteriormente el agua pasa a un proceso de aereación, donde el volátil es separado y conducido hacia un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico.

En la figura No. 6 se muestra un esquema del sistema SENECA para la extracción y tratamiento del producto líquido y volátil del subsuelo. En dicha figura se ilustran pozos de extracción, tanto de volátiles como de producto líquido. Por lo que respecta al producto líquido, este es extraído por un sistema múltiple de pozos y conducido a un tanque. Posteriormente pasa por un tanque de separación agua/producto. El agua obtenida es conducida a través de un desgasificador, en el que, por medio de un soplador, se produce un burbujeo que permite la separación del volátil del agua.

## CONCLUSIONES

El HC en el subsuelo y acuífero puede encontrarse en forma líquida, volátil o disuelta en agua. El saneamiento puede consistir en la extracción del HC (líquido o volátil), la cual puede realizarse a través de pozos. La biodegradación insitu es un método eficaz para la remoción de HC hasta niveles bajos, tanto en suelo como en el acuífero. Los principios en que se basa el saneamiento es aplicado en forma comercial por un gran número de compañías productoras de equipo.

## REFERENCIAS

CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.

CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 p.

HAYES, D., E. C. HERNRY AND S. M. TESTA. 1989. A Practical Approach to Shallow Petroleum Hydrocarbon Recovery.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume I. Lewis Publishers. 357 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Lewis Publishers. 354 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers. 227 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992. Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments. C. K. Sholey, Inc. 395 P.

NYER, E. K. 1993. Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation. Lewis Publishers 214 p.

RISER-ROBERTS, E. 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, C. K. Smoley, Inc. 264 p.

NWWA. 1991. Volatile Organic Compound Cleanups: An Anthology.

NWWA. 1991. Ground Water and Soil Venting.

ROY F. WESTON, INC. 1988. Remedial Technologies for Leaking Underground Storage Tanks. Lewis Publishers. 216 p.

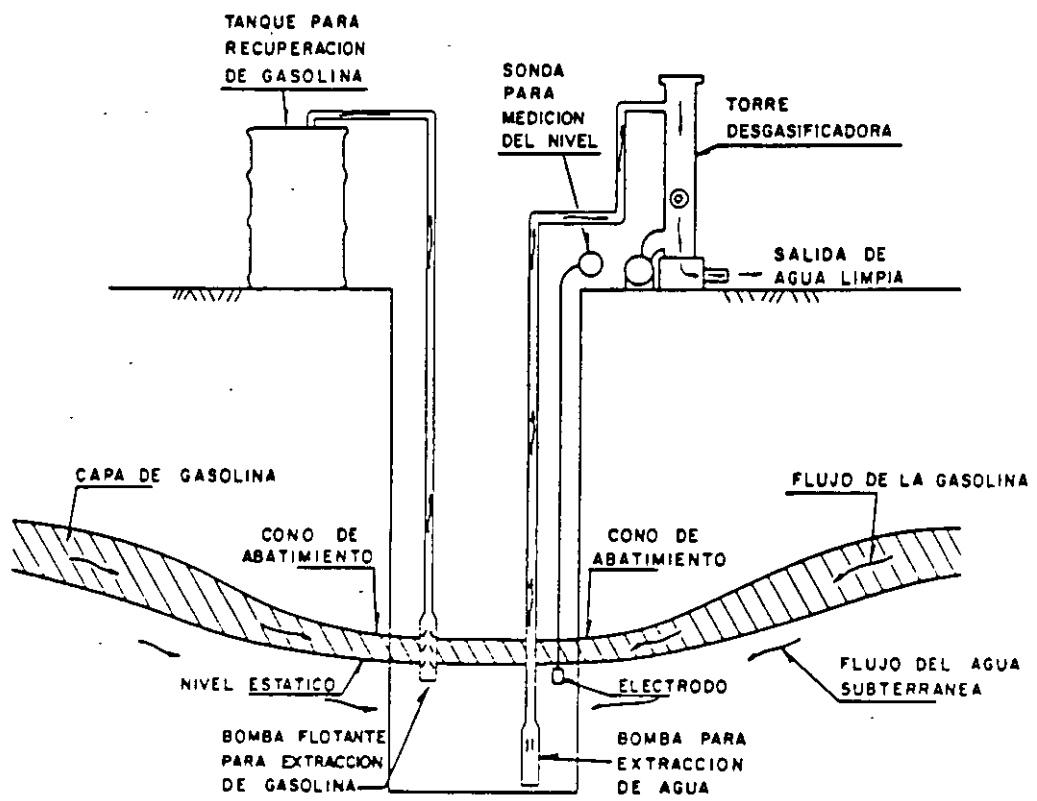


FIGURA 1.- EXTRACCION DE HIDROCARBUROS POR BOMBEO  
 Y TRATAMIENTO EN SUPERFICIE

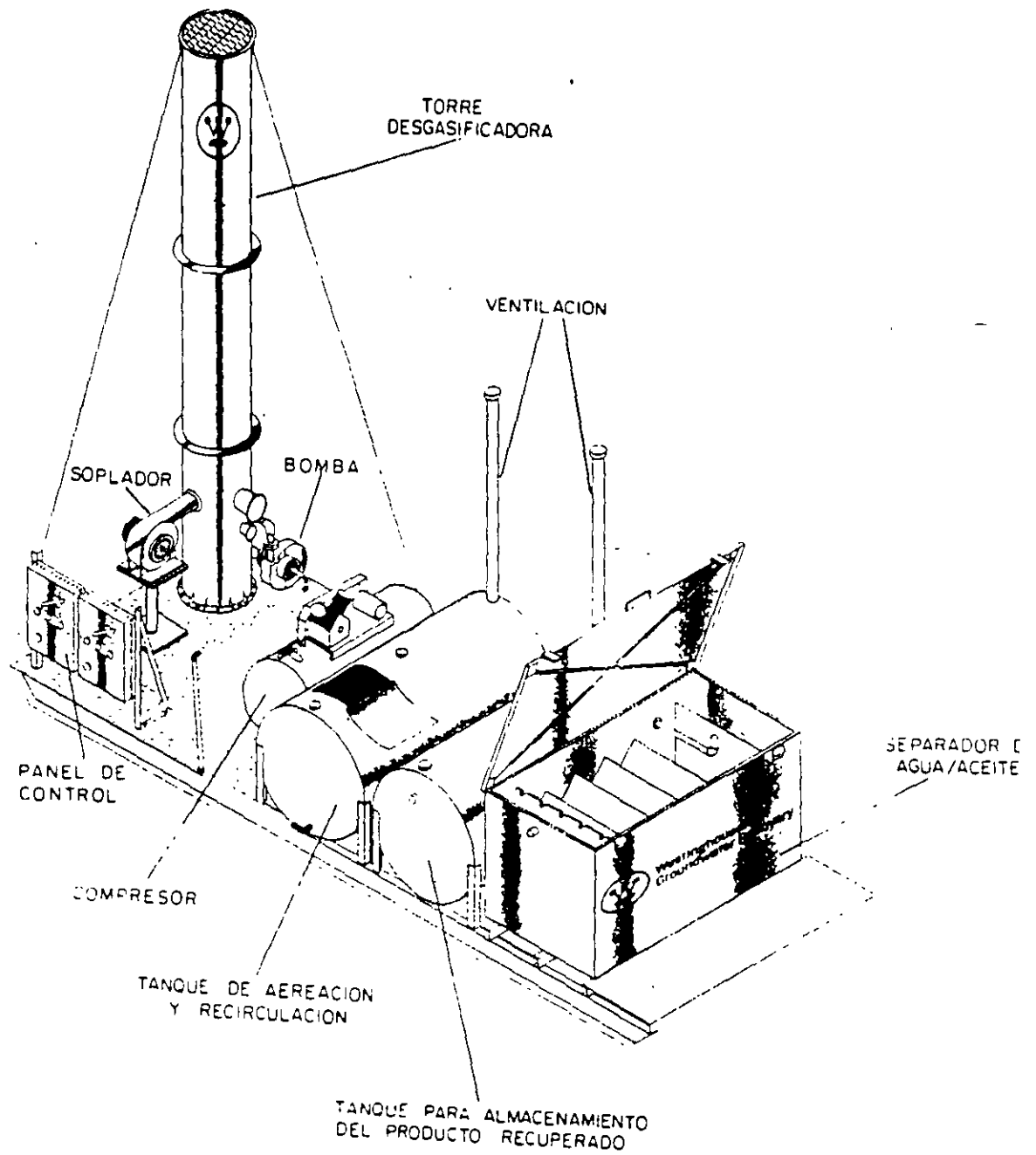
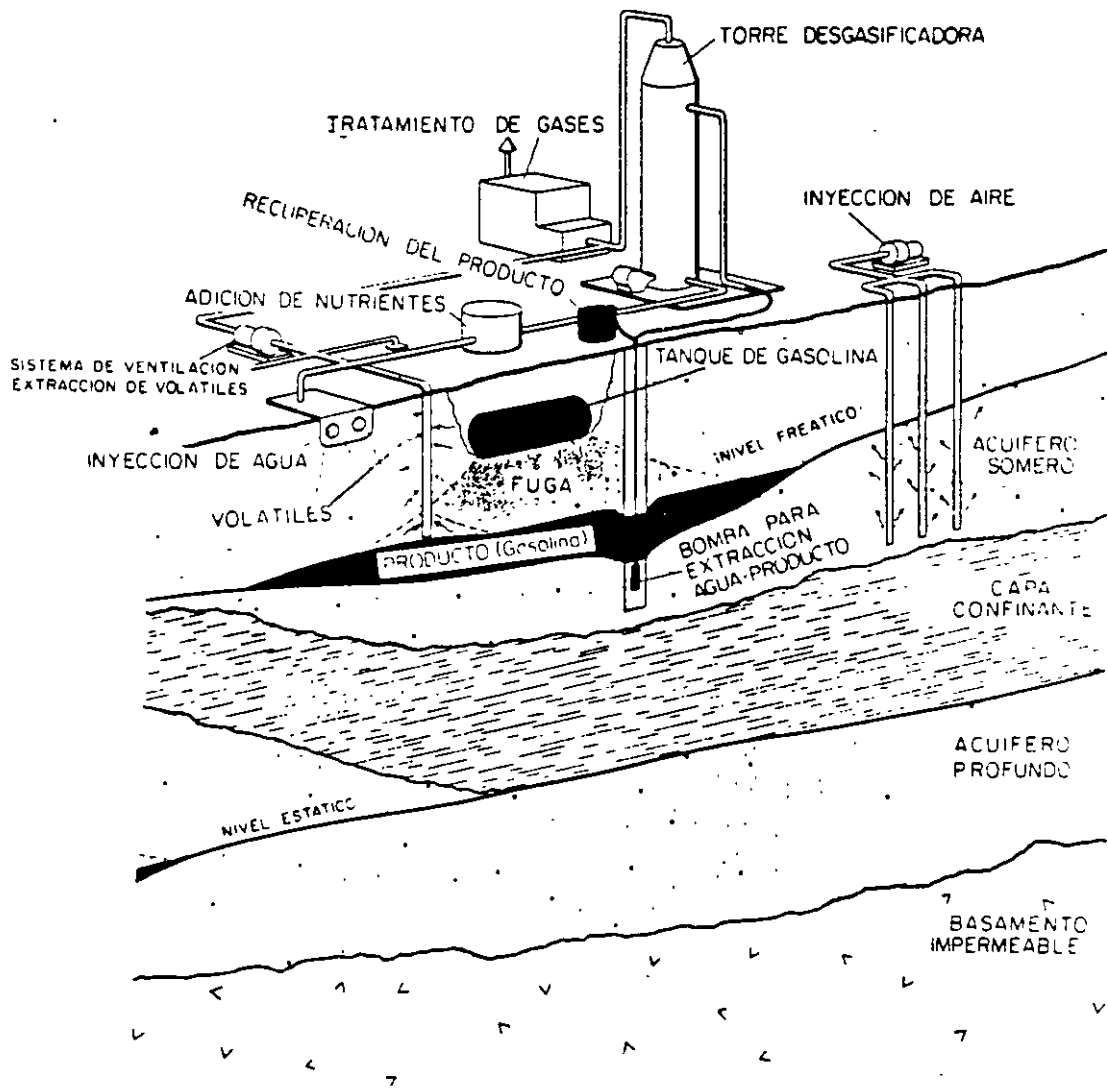


FIGURA 2 - EQUIPO WESTIGHOUSE PARA EL TRATAMIENTO DE  
HIDROCARBUROS Y AGUA



DE ORS ENVIRONMENTAL EQUIPMENT CATALOG

FIGURA 3.- SISTEMA ORS/ENVIRONMENTAL EQUIPMENT PARA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL



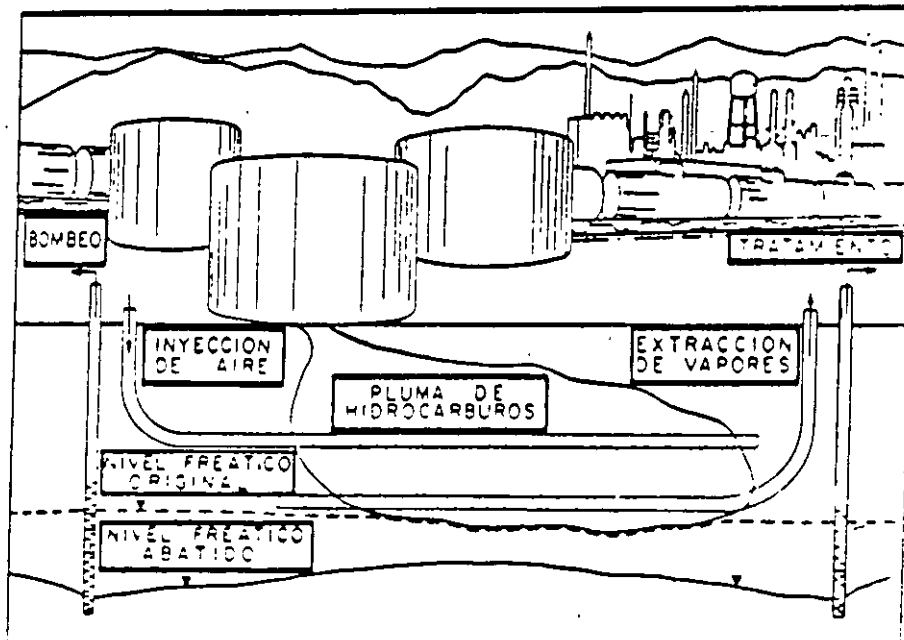


FIGURA 4 SANEAMIENTO DE HIDROCARBUROS DEL SUBSUELO  
 MEDIANTE POZOS DIRECCIONALES (DE ENGINEERING-SCIENCE, INC )

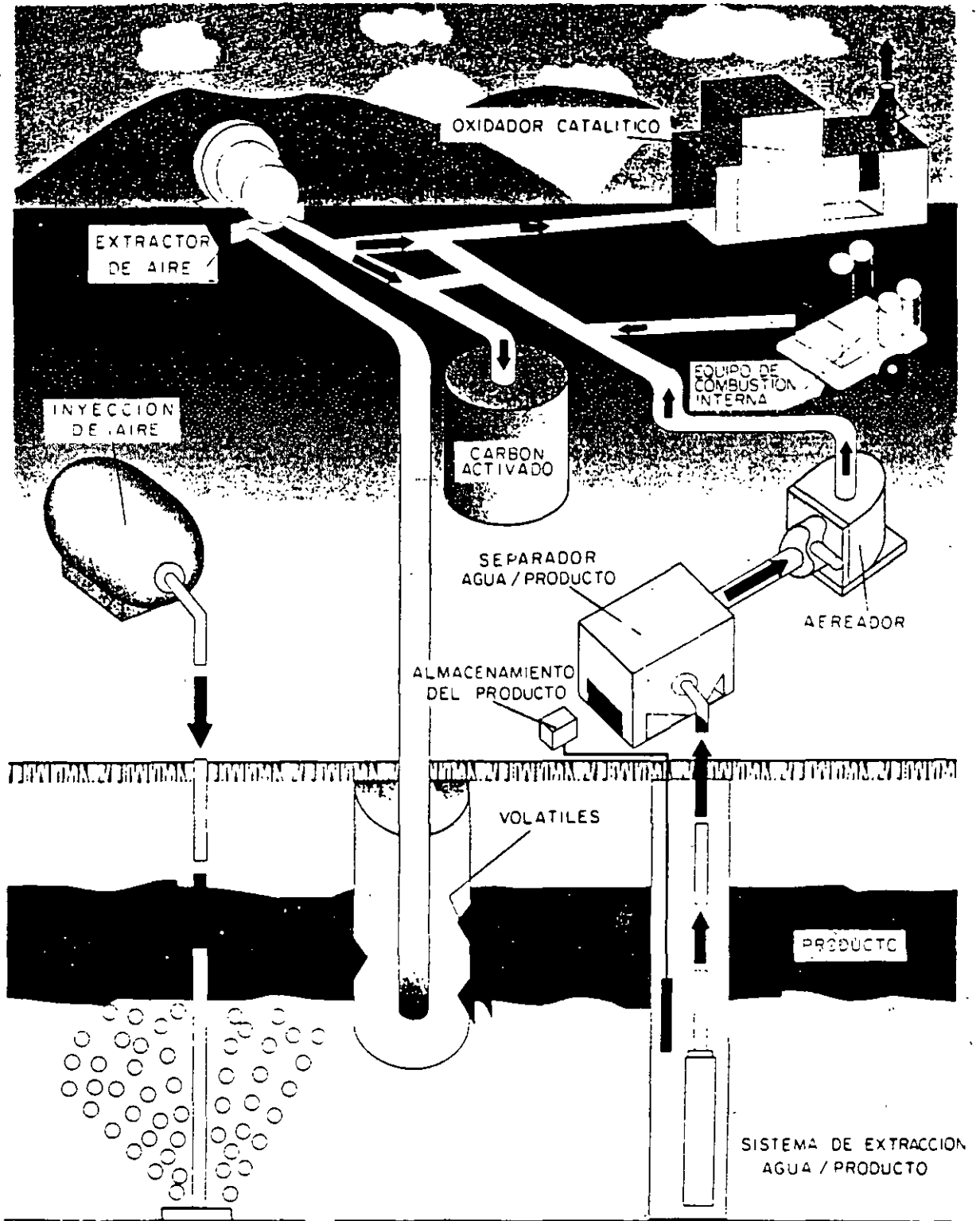


FIGURA 5. - SISTEMA ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.

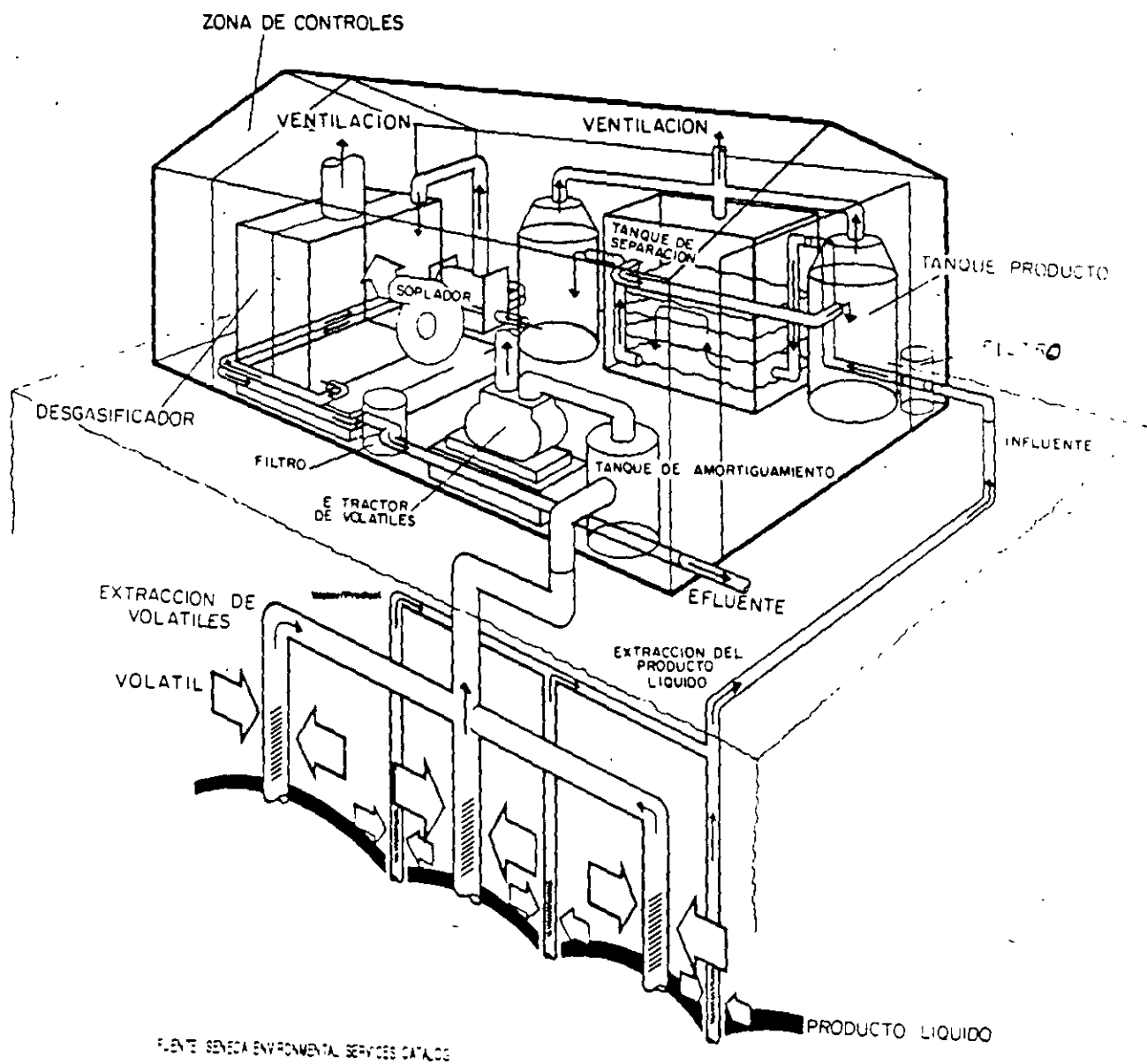
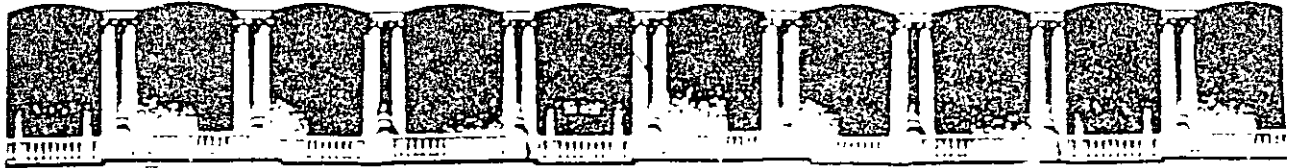


FIGURA 6.- SISTEMA SENECA PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

MÓDULO II:

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

TEMA :

***INTRODUCCIÓN***

PRESENTADO POR: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA

# Disponibilidad del Agua en México en Función de la Cantidad, Calidad y Usos

Blanca Jiménez Cisneros

---

## INTRODUCCIÓN

México dispone de 5125 m<sup>3</sup>/hab. por año y de acuerdo con Postel (1992) no se clasifica como un país con escasez (2000 m<sup>3</sup>/hab por año). Sin embargo, México como muchos otros países, sufre de escasez severa en varias cuencas hidrológicas debido a dos factores: a) el deterioro de la calidad, el cual limita el empleo del agua y, b) el defasamiento espacial y temporal entre la oferta y la demanda. En este trabajo aborda el primer problema y se plantea una metodología para calcular la disponibilidad en términos de su cantidad y la calidad.

El índice de disponibilidad (*ID*) consta de dos términos (a, b), donde el primero refleja la cantidad y el segundo el grado de tratamiento requerido por un agua para darle el uso deseado en función de su calidad. El parámetro b, se evalúa con ayuda de otro índice denominado Potencial de Uso (*PU*) que mide qué tanto y por qué se aleja el agua de la calidad deseada.

Al emplear el *ID* fácilmente se observa cómo se modifica la disponibilidad del agua obtenida a partir de los balances hidráulicos y se tiene una idea clara de las necesidades de tratamiento por región hidrológica para un uso dado. Adicionalmente, al calcular el índice de Potencial de Uso se logran identificar algunos problemas generados por los conflictos entre la cantidad y la calidad para ciertos fines.

Además, la metodología propuesta para el cálculo del *PU* tiene la ventaja de no requerir datos de parámetros predeterminados, iguales para todo el país o región, con periodos largos y uniformes de muestreo. El cálculo del índice es sencillo, lo que hace a la metodología muy útil para países en desarrollo.

## ANTECEDENTES

Para preservar el agua en cantidad y calidad es necesario conocer cuánta agua hay, cómo se usa y en qué estado se encuentra. De esta información derivan las políticas de administración, las necesidades de infraestructura de tratamiento y las de importación de agua de una cuenca a otra, cuando en la zona no hay suficiente o es de mala calidad.

Durante la década de los 60's se hicieron muchos esfuerzos para clasificar los cuerpos de agua de acuerdo con su calidad en una forma ágil y confiable. Este fue el origen de los denominados "Índices de Calidad" (Horton, 1965, Landwehr, 1979 y Crabtree *et al.*, 1987).

En general, estos índices se caracterizan por emplear un número limitado y específico de parámetros, combinándolos entre ellos sin ningún sustento físico, químico o biológico. La dificultad de aplicarlos en forma universal para representar problemas prácticos hizo que hoy en día estén casi abandonados. A pesar de ello, y sobre todo en países donde la falta de infraestructura y programas de saneamiento ha deteriorado la calidad de muchos cuerpos de agua, es todavía necesario contar con un método para evaluar la cantidad disponible de agua tomando en cuenta su calidad. Los métodos de administración del agua empleados en países avanzados requieren una gran cantidad de datos, la medición de los mismos parámetros en todo el territorio así como frecuencias uniformes de muestreo durante periodos prolongados. Emplean además complejos modelos matemáticos. Estos requerimientos son difíciles de cumplir en países en desarrollo, en los que se sigue acostumbrando establecer la disponibilidad del agua sólo en términos de su cantidad, sin tomar en cuenta que la calidad limita su empleo como desafortunadamente sucede en la práctica.

La necesidad de tener una idea clara de la disponibilidad efectiva del agua llevó a desarrollar un índice que tomara en cuenta la calidad a partir de la información disponible (Jiménez y Ramos, 1995). Este método es sencillo y ofrece un enfoque racional para el manejo del recurso de manera que en un futuro se puedan emplear modelos matemáticos más completos y de mayor precisión.

## CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD

El índice de disponibilidad para un determinado uso se define como

$$ID = (a, b) \quad (1)$$

donde

*a*: cantidad de agua renovable para una región hidrológica.

*b*: clasificación del agua según el tratamiento requerido para adecuar su calidad al uso que se le pretende dar.

Para calcular "*a*" se emplea la ecuación de balance que se basa en la figura 1

$$S(i) = \sum_k S_k(i-1) + T(i-1) + CP(i) - \sum_k D_k(i) - T(i) + \sum_k R_k(i) \quad (2)$$

donde

$(i)$ : designa la región en estudio;

$(i-1)$ : las regiones cuyas descargas ingresan a la región  $(i)$ ;

$S(i)$ : el excedente de volumen disponible en la región  $(i)$

$T(i-1)$ : Transformaciones certificadas de volúmenes de agua desde otras regiones a la región  $(i)$ ;

$CP(i)$ : el volumen que ingresa por cuenca propia a la región  $(i)$

$T(i)$ : Transferencias desde la región  $(i)$  hacia otras regiones debidos a compromisos contraídos;

$D_k(i)$ : las demandas para el uso  $k$  en la región  $(i)$ ;

$R_k(i)$ : los retornos correspondientes al uso  $k$  en la región  $(i)$ .

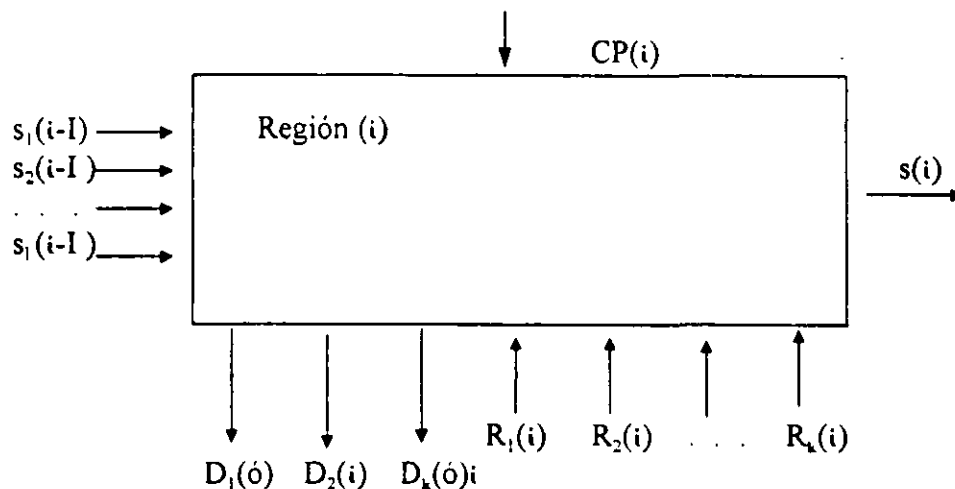


Figura 1. Diagrama para el balance hidráulico

En el manejo de la ecuación (2) se debe considerar que.

- ✓ Se aplica de aguas arriba a aguas abajo, de tal forma que en la primera región ( $i = 1$ ) se tiene que  $S(i - 1) = 0$
- ✓ Las demandas para generación hidroeléctrica no se incluyen, dado que para ese caso  $D_k(1) = R_k(1) \forall K$
- ✓ En el término  $CP(i)$  se incluye el escurrimiento superficial y la recarga de los acuíferos generada por la lluvia, cuando existen embalses en la región, se resta la evaporación neta (evaporación menos lluvia).
- ✓ En muchas ocasiones, los volúmenes de demanda y de retorno no se miden directamente por lo que se estiman a partir de las láminas de riego y dotaciones por habitante, en el primer caso, y de porcentajes de retorno, en el segundo.

De acuerdo con la ecuación (2) la disponibilidad relativa del agua, en términos de la cantidad, puede expresarse como:

$$Pa(i) = \frac{S(i) + \sum_k D_k(i)}{D_k(i)} \quad (3)$$

De tal forma que

Si  $Pa(i) \geq 1.4$  la disponibilidad es abundante y  $a = 1$

Si  $0.7 \leq Pa(i) < 1.4$  la disponibilidad está en equilibrio con las demandas y  $a = 2$

$Pa(i) < 0.7$  la disponibilidad es escasa y  $a = 3$

La ecuación de balance (2) se aplica para promedios anuales, y no considera las variaciones dentro del año ni la posibilidad de que se presenten periodos de sequía, por lo que los valores límite (1.4 y 0.7) podrían modificarse en función de la capacidad de almacenamiento disponible en la región y la variabilidad interanual de las lluvias.



Para calcular el término “*b* 1” del índice de disponibilidad *ID*2, primero se determina el índice de Potencial de Uso (*PU*)<sup>3</sup>, con ayuda de una simple hoja de cálculo.

En ella se tiene almacenados los valores de los diversos parámetros que la normatividad establece para definir la calidad requerida para un uso determinado. El cálculo del *PU* se basa en comparar los valores de cada parámetro *I* medido en una región *PM* (*I*) con lo establecido por la norma *PN* (*I*)<sup>4</sup>, para obtener un valor *RN* (*I*) el cual mide que tanto se aleja uno de otro de acuerdo con

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (4)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = PM(I) / PN(I) \quad (5)$$

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = PN(I) / PM(I) \quad (6)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (7)$$

$$PM(I) > 0 \text{ y } PN(I) \text{ debe ser ausente (cero)} \Rightarrow RN(I) = PM(I) \quad (8)$$

La Tabla 1, contiene algunos ejemplos de la aplicación del cálculo de *RN* (*I*).

Tabla 1. Ejemplos del cálculo de *RN* (*I*)

Parámetro	Valor promedio medido	Valor en norma <i>RN</i> ( <i>I</i> )	Condición aplicada	Valor de <i>RN</i> ( <i>I</i> )
As	0.02 mg/L	Máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	1
As	0.2 mg/L	máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	$\frac{PM(I)}{PN(I)} = \frac{0.2}{0.05} = 4$
O <sub>2</sub>	2 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	$\frac{PN(I)}{PM(I)} = \frac{4}{2} = 2$
O <sub>2</sub>	6 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	1
Grasas y aceites	10 mg/L	ausente	$PM(I) > 0 \text{ y } PN(I) = 0$	10

El  $PU$  se obtiene a partir de los valores de  $RN(I)$  calculados de acuerdo con

$$PU = \frac{1}{n} \sum_n RN(I) \quad (9)$$

donde

$n$  . número de parámetros medidos en una región

Cabe mencionar, que por un lado el método permite variar  $n$ , (número y tipo de parámetros) de manera que se consideren criterios federales, la legislación local, o bien, los parámetros de interés para un análisis específico y, por otro, que su valor no necesariamente es igual al total de parámetros que establece una norma.

Al calcular el  $PU$  se tienen dos posibilidades

- a)  $PU = 1$  Implica que a partir de la información disponible el agua es apta para el uso que se le pretende dar.
- b)  $PU > 1$  Indica que el agua no cumple con los criterios de calidad y mientras mayor sea su valor más se aleja de las condiciones deseadas.

Durante el cálculo del  $PU$ , el programa desarrollado destaca aquéllos parámetros por los cuales el  $PU$  se aleja de 1 así como los parámetros para los cuales  $RN(I)$  es  $>1$ .

Esto permite evaluar si existen problemas específicos, aún cuando el promedio sea cercano o igual a 1. Además, con esta información se puede establecer si es posible controlar el problema mediante tratamiento del agua. A partir de este razonamiento se asigna un valor al término " $b$ " como sigue

$b = 1$ , si el agua cumple con la calidad requerida tal como está ( $PU = 1$ ) y por tanto no requiere tratamiento.

$b = 2$ , si el tratamiento requerido es simple y económico (filtración por ejemplo), en función de los parámetros que hacen que el  $PU$  se aleje de 1.

$b = 3$ , si se requiere un proceso de tratamiento costoso (ósmosis inversa por ejemplo), en función de los parámetros que determinen que el  $PU$  sea  $>1$ .

Finalmente, se establece los valores posibles del  $ID$  en función de  $a$  y  $b$ , de acuerdo con la Tabla 2.

**Tabla 2. Índice de disponibilidad ( $ID$ )**  
basado en la cantidad, calidad y uso del agua

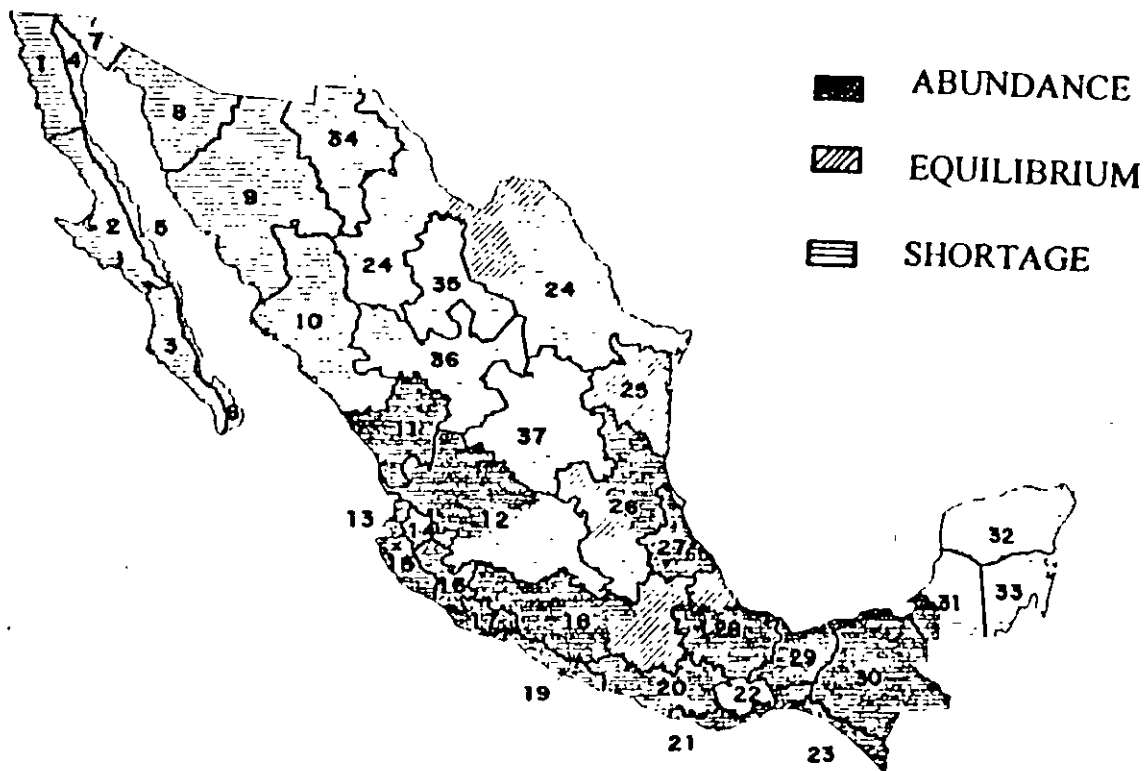
Cantidad (a)	Calidad (b)		
	Buena 1	Requiere trata- miento simple y económico 2	Requiere tratamiento costoso 3
1 (Abundante)	11	12	13
2 (Equilibrio)	21	22	23
3 (Escasez)	31	32	33

Las principales limitaciones en la calidad del agua corresponden a los casos situados en la última columna de la Tabla 2. Para el nivel (1,3) lo más fácil puede ser cambiar de fuente de abastecimiento, dado que hay abundancia de agua, mientras que para los niveles (2,3) y (3,3) se debe evaluar la factibilidad económica de aplicar un tratamiento costoso contra importar agua de otra cuenca.

## APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE MÉXICO

México se divide en 37 regiones hidrológicas en las cuales al utilizar la ecuación 2 se obtiene la distribución del recurso del Mapa 1. Este mapa muestra que en varias regiones del norte del país el agua es escasa mientras que al sur hay abundancia.

Para evaluar la calidad se calculó el Índice de Potencial de Uso,  $PU$ , para cada región empleando para ello los datos de la Red Nacional de Monitoreo y los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de diciembre de 1989) que, sin tener carácter obligatorio, se emplean en México para clasificar el posible uso del agua según su calidad. Estos criterios toman en cuenta los usos y número de parámetros de la Tabla 3.

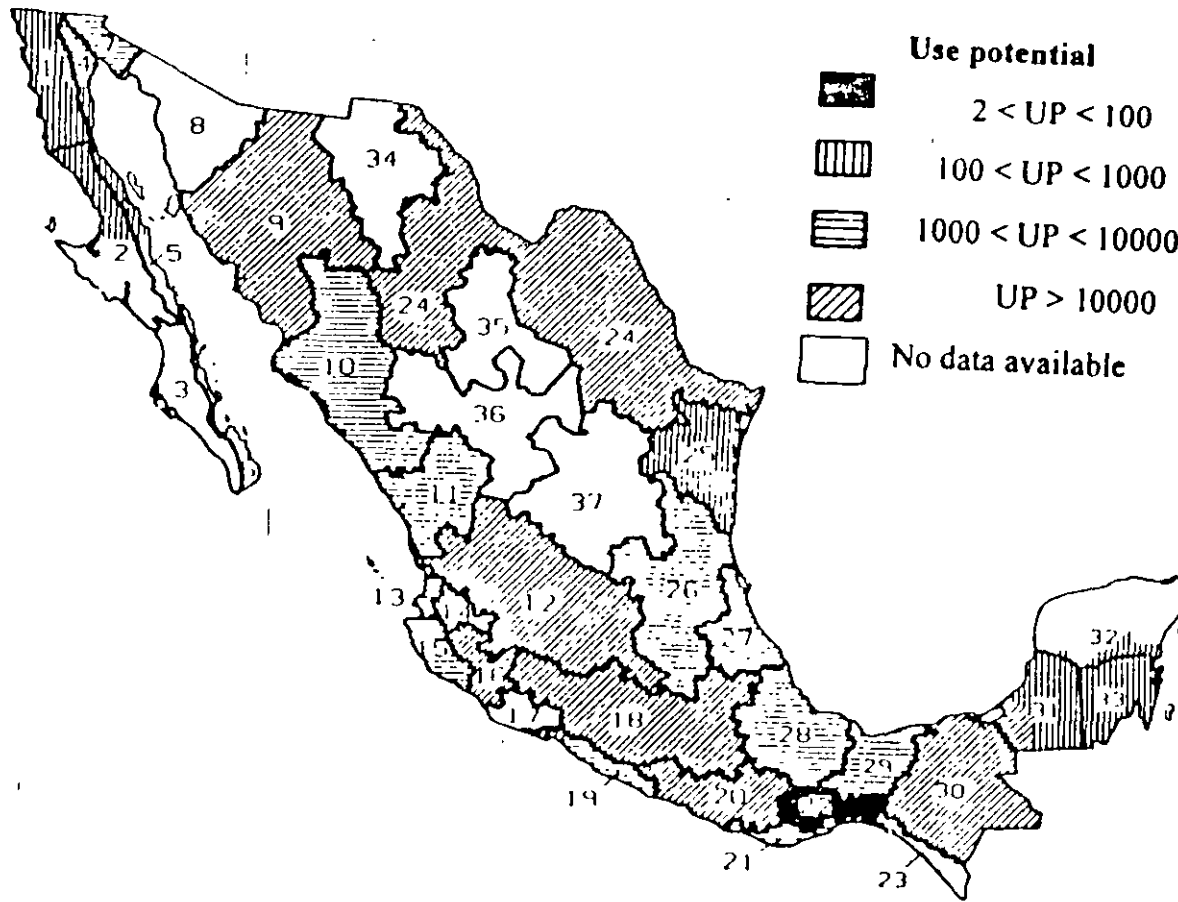


Map 1. Hydraulic Balance for Mexican Hydrological Regions

**Tabla 3. Usos y número de parámetros que se establecen en los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de la Federación del 13 de**

acuática	Agua marina	99
----------	-------------	----

Como ejemplo, el Mapa 2 muestra el valor del Potencial de Uso para abastecimiento en cuerpos de aguas superficiales. La Tabla 4 muestra los valores de "a" y "b" obtenidos en cada región a partir del Mapa 1 y de los análisis de los valores del *PU* para abastecimiento de agua potable. A continuación citaremos dos ejemplos de cálculo de "a" y "b". En la región 26 (Alto Pánuco), al calcular el *PU* se obtuvo un valor de 2 200 como resultado promedio de los valores de *RN (I)*. Entre los parámetros para los cuales *RN (I)* fue >1 destacan los coliformes fecales (CF), el mercurio (Hg) el aluminio (Al), los nitritos y el níquel (Ni) por no cumplir con el criterio de uso. La Tabla 5 muestra el valor del *RN* para cada uno de los compuestos. Del Mapa 2 se establece que en cuanto a cantidad esta región se clasifica como en "equilibrio", por tanto  $a=2$ , y al considerar que el tratamiento para potabilizar el agua dado los contaminantes presentados requeriría el empleo de procesos complejos se le asigna un valor a "b" de 3. Así, su uso queda limitado -a pesar de la disponibilidad en cantidad- por la posibilidad de pagar el costo de tratamiento para



Map 2. Use potential index for water supplies in surface water

Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones

Región	Cantidad	"a"	PU agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
01	Escasez	3	105	P04, SAAM	486	CF	3
02	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
03	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
04	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
05	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
06	Escasez	3	SD	---	6	CF	2
07	Escasez	3	2200	CF	SD	---	3
08	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
09	Escasez	3	50730	CF	SD	---	3
10	Escasez	3	1300	CF	SD	---	3
11	Abundante	1	3130	CF	155	CF, P04	3
12	Abundante	1	77 x 10 <sup>4</sup>	CF, P04	128	CF	3
13	Abundante	1	4180	CF, S04, SS	SD	---	3
14	Abundante	1	4220	CF	SD	---	3
15	Abundante	1	1250	CF	380	CF	3
16	Disponibili- dad	1	13100	CF	450	CF	3
17	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
18	Abundante	1	7 x 10 <sup>9</sup>	CF, NIT	10	CF	3
19	Abundante		9650	CF, CI	1	---	3
20	Abundante	1	72930	CF	1	---	2
21	Abundante	1	2800	CF, CI	SD	---	3
22	Escasez Equilibrio	3 1	11	CI	SD	---	1
23	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
24	Escasez	3	2 x 10 <sup>7</sup>	CF, P04	SD	---	3

**Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones**

Región	Cantidad	"a"	PU agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
	Equilibrio	2					
25	Equilibrio	2	190	CF, Ni, Al	SD	---	3
26	Equilibrio Escasez	2 3	17 x 10 <sup>2</sup>	CF, COL, Hg AL, NI, NI	SD	---	3

	Abundante	1					
32	Escasez	3	SD	---	300	CF	--
33	Escasez	3	106	CF	4	SO <sub>4</sub>	3
34	Escasez	3	SD	---	1	---	1
35	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
36	Escasez	3	SD	---	8	F	2
37	Escasez	3	SD	---	12	CF	2

Al: Aluminio

COL: Color

SD: Sin datos para  
calcularlo

As: Arsénico

F: Fluor

SD: Sólidos  
disueltos

B: Boro

NAT: Nitratos

SO<sub>4</sub>: Sulfatos

CF: Coliformes  
fecales

Ni: Níquel

SS: Sólidos  
suspendidos

Cl: Cloruros

NIT: Nitritos

CO: Conductividad

PO<sub>4</sub>: Fosfatos



**Tabla 5. Parámetros que rebasaron el Criterio Ecológico para uso de los cuerpos superficiales como fuente de abastecimiento.**

Parámetro	Valor del criterio mg/l	Número de veces en que se excede RN (l)
Coliformes fecales	1000 NMP/100 ml	13 900
Color aparente	75	3123
Grasas y aceites	0	10
SAAM	0.5	1.2
Aluminio	0.02	61
Fierro	0.3	2
Mercurio	0.001	500
Níquel	0.01	50

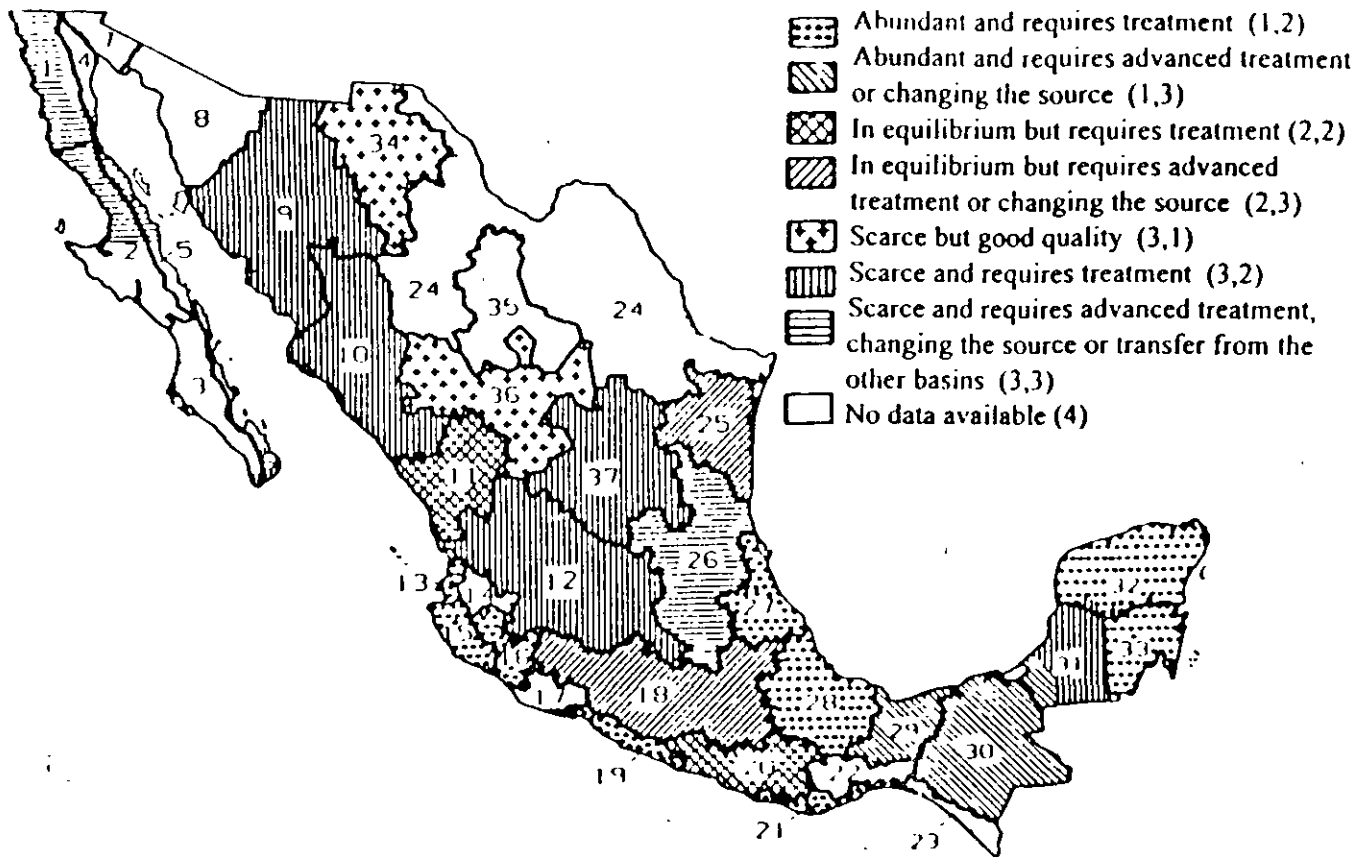
Otro ejemplo, lo constituye la región 16 (Armeria Coahuayana), donde el *PU* tuvo un valor de 13 100, siendo el único parámetro que excede el Criterio de Uso de los coliformes fecales (CF). En este caso, según la Tabla 4, la región tiene disponibilidad abundante de agua y por tanto  $a=1$  y dado que el tratamiento para control del problema es un simple sistema de desinfección (como puede ser la cloración) se le asigna a "b" un valor de 2.

En el Mapa 3 se muestra cómo cambia la disponibilidad del agua al considerar, tanto de la cantidad como la calidad para abastecimiento.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

De los mapas 1 y 3 se concluye, a primera vista que para algunas regiones del norte aún cuando no hay suficiente agua en algunas regiones ésta si es de calidad adecuada, mientras que en el sur -a pesar de que hay abundancia- su disponibilidad se limita por la necesidad del tratamiento.

Por otra parte, al analizar con mayor detalle la información obtenida durante el cálculo del *PU* se pudo establecer cuál es la problemática nacional en materia. La fig. 2 muestra los problemas más frecuentes en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos para suministro. En ambos casos el problema principal lo constituye la contaminación microbiológica. Además, se puede establecer que aunque difiere mucho la cantidad de datos disponibles de los cuerpos de agua superficiales en relación con los subterráneos, sistemáticamente los primeros son de calidad notoriamente inferior a los segundos. De hecho, son muy escasos los cuerpos superficiales aptos para abastecimiento de consumo humano e incluso su disponibilidad para uso en riego es limitada. Las Figs. 3 y 4 destacan



Map 3 Availability Index (AI) for drinking water sources based on quantity and quality of water

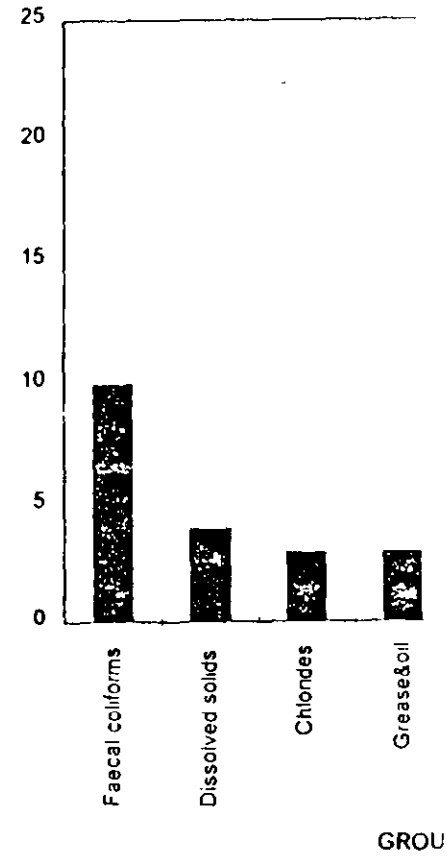
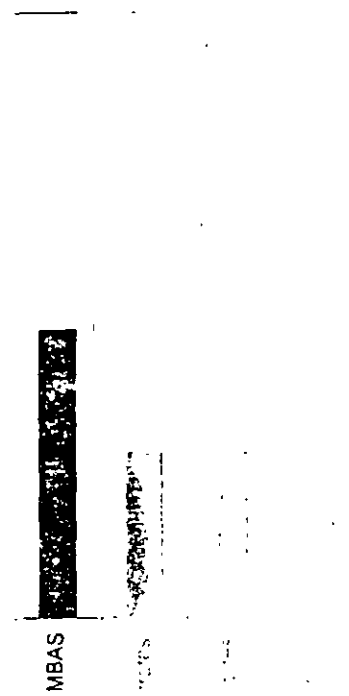
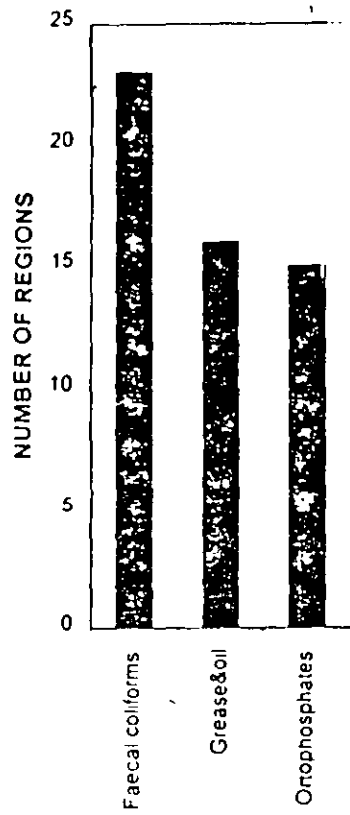


Figure 1: Most frequently detected in surface and groundwater sources for

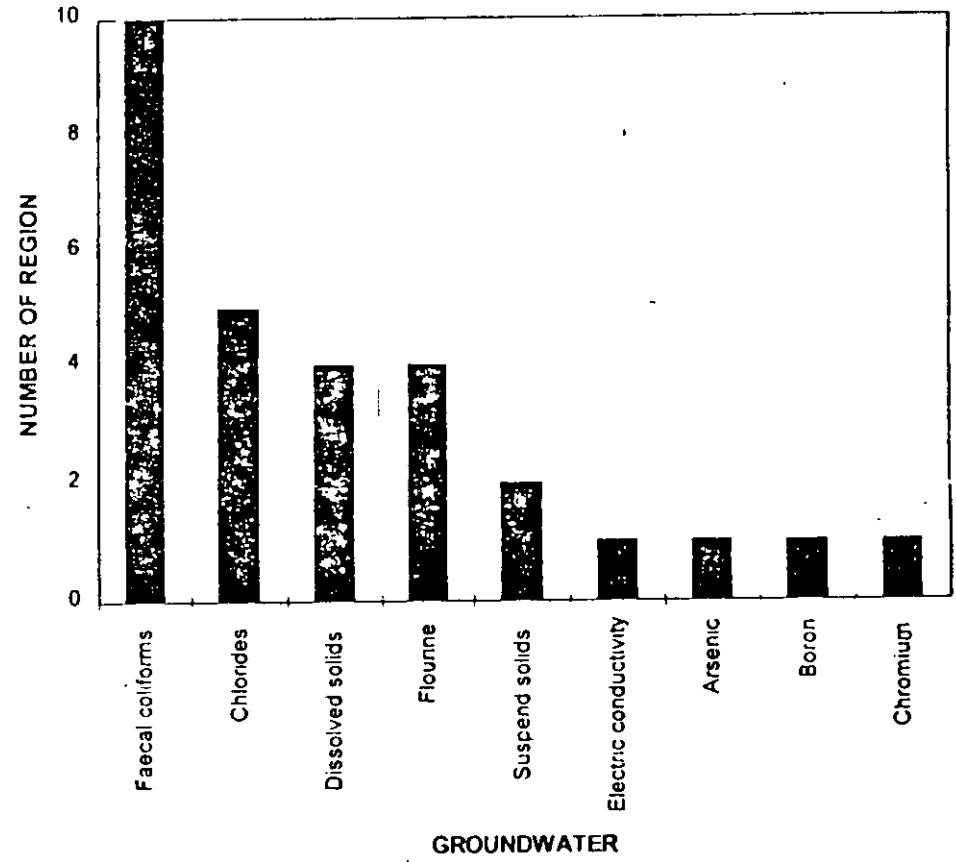
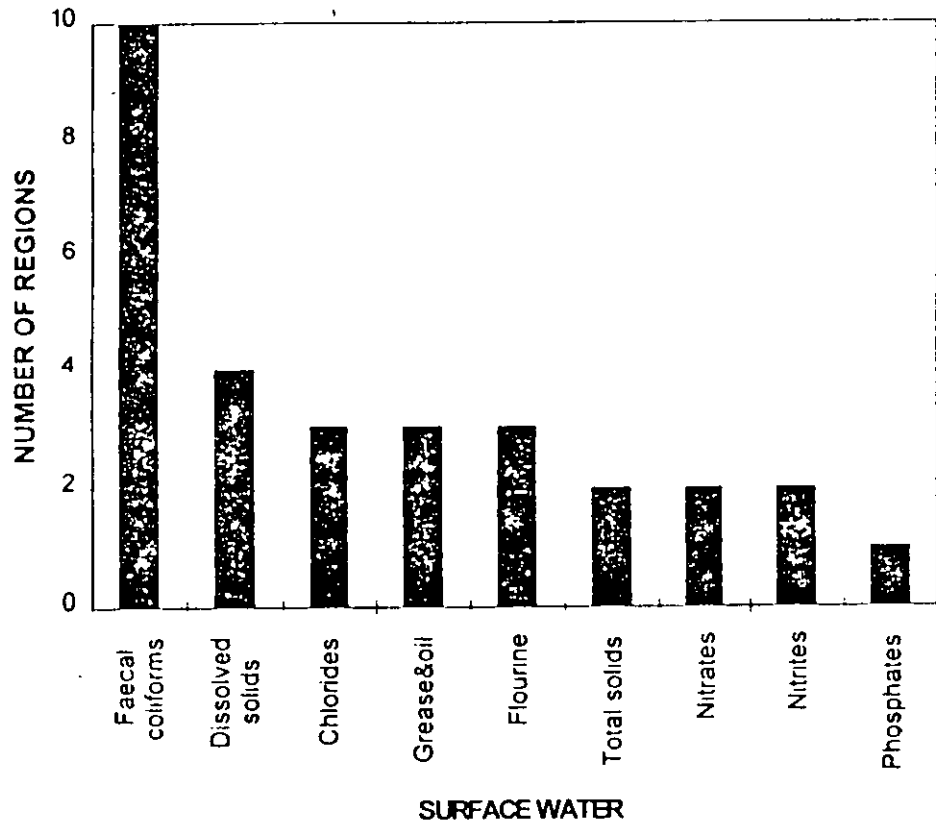


Figure 3. Parameters most frequently exceeded in surface and groundwater sources for irrigation

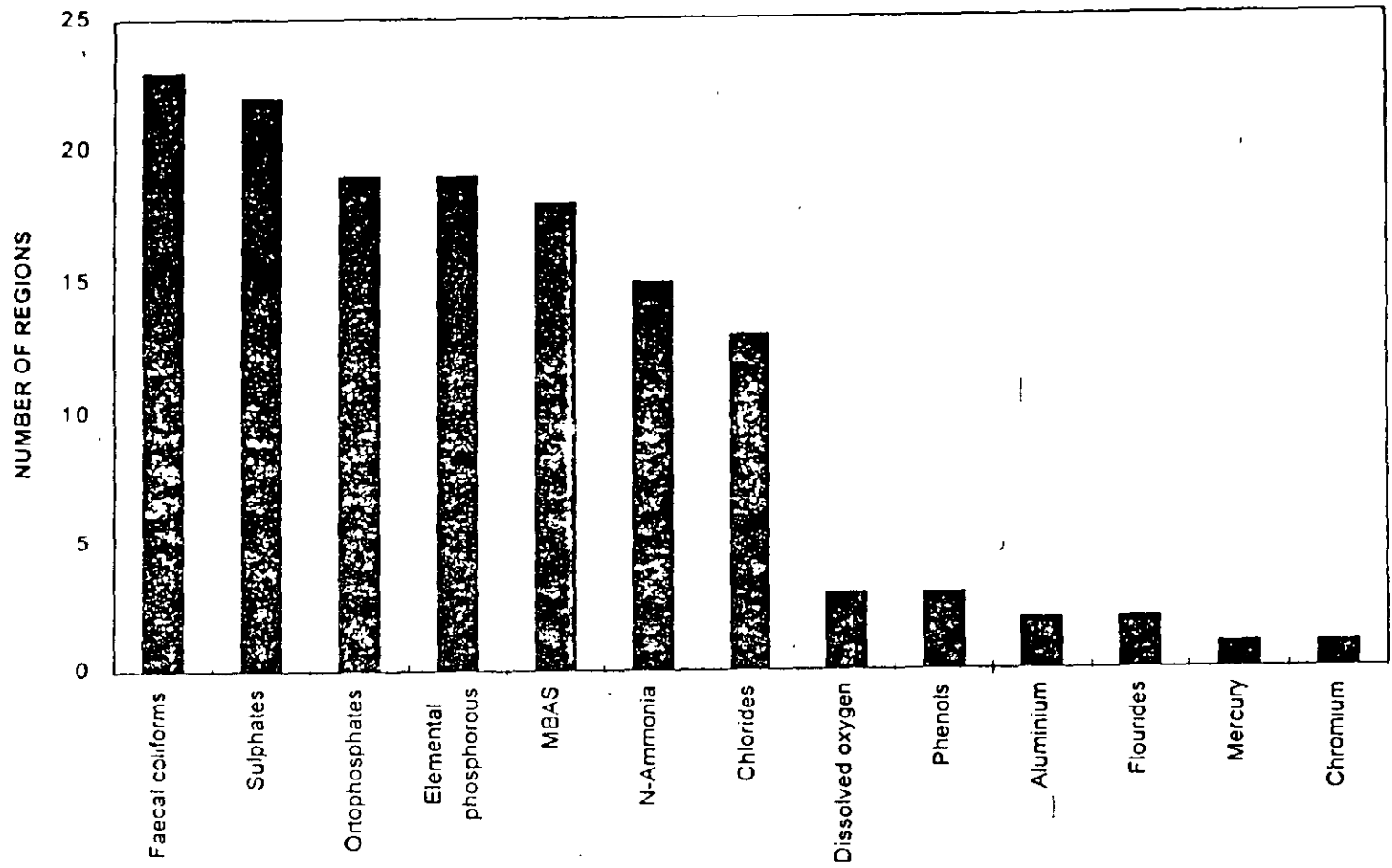


Figure 4. Parameters most frequently exceeded in surface water sources for aquatic life protection

los parámetros que limitan la disponibilidad del agua para uso agrícola y protección ecológica de la vida acuática; nuevamente el problema principal es de tipo microbiológico.

Para evaluar el problema del agua a nivel país se efectuó, a partir de los índices desarrollado y el análisis de los principales usos del agua por región, varios mapas que combinan diversa información. El Mapa 4 contiene las regiones con escasez de agua y, donde además existe problema de contaminación de las principales fuentes de abastecimiento para las cuales debe haber programas severos de control de la contaminación por descargas. También presenta los lugares con escasez en cantidad donde se emplea un gran volumen de agua para riego a partir de fuentes que también son empleadas con fines municipales. En esta situación, se propone motivar un ahorro de agua para fines agrícolas y liberar agua para el consumo humano. Así como, para las zonas donde hay industria y escasez, se recomienda desarrollar y/o implantar programas de reúso y reciclamiento del agua en esta actividad.

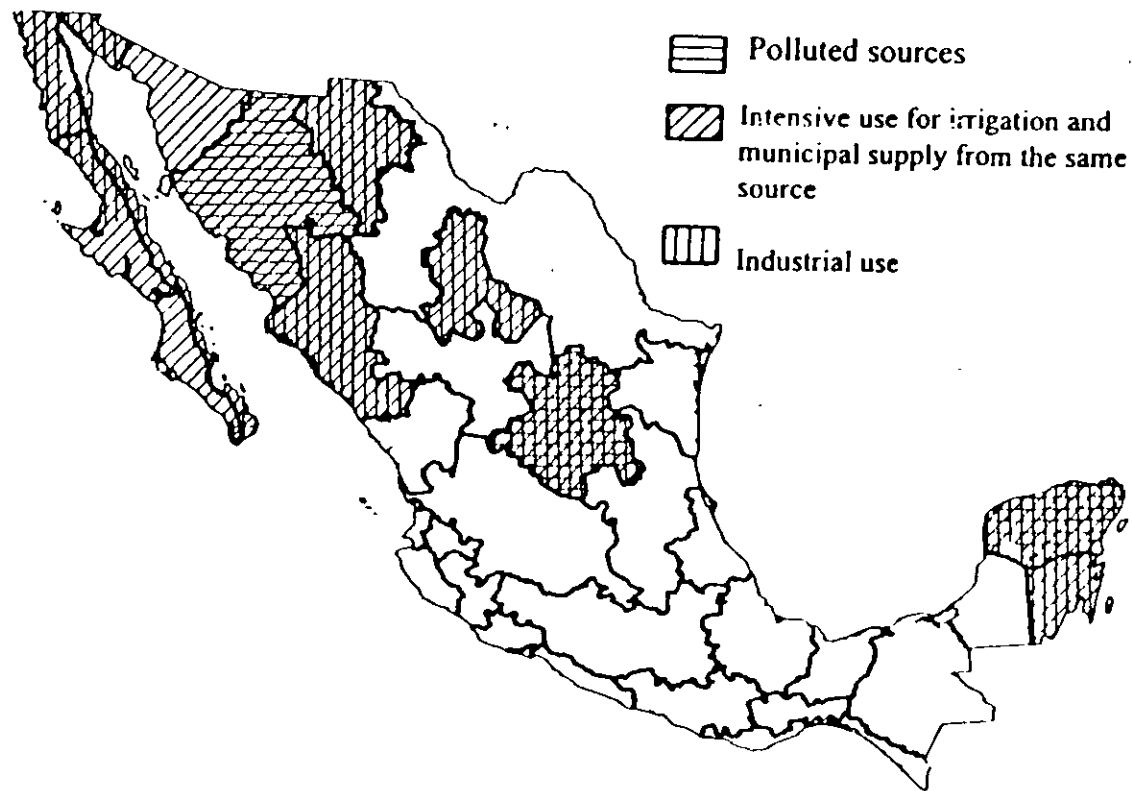
El Mapa 5 muestra la situación del agua subterránea en el país. Este mapa combina las zonas donde el abastecimiento doméstico es predominantemente de acuíferos contaminados y sobreexplotados, en los cuales se debería tomar medidas de control muy estrictas en lo que se refiere a la preservación de cantidad y calidad (control estricto de descargas y acuíferos y restricciones de permiso de explotación, etc).

Además, destaca las zonas donde se emplea agua subterránea para riego e industria y, donde el abastecimiento doméstico se hace a partir de las mismas fuentes o de cuerpos superficiales de mala calidad. Si lo anterior se conjunta con acuíferos sobreexplotados, se concluye la necesidad de desarrollar e implantar programas específicos de uso eficiente. En este mapa también se señalan las regiones donde se requiere conocer el balance hidráulico del acuífero.

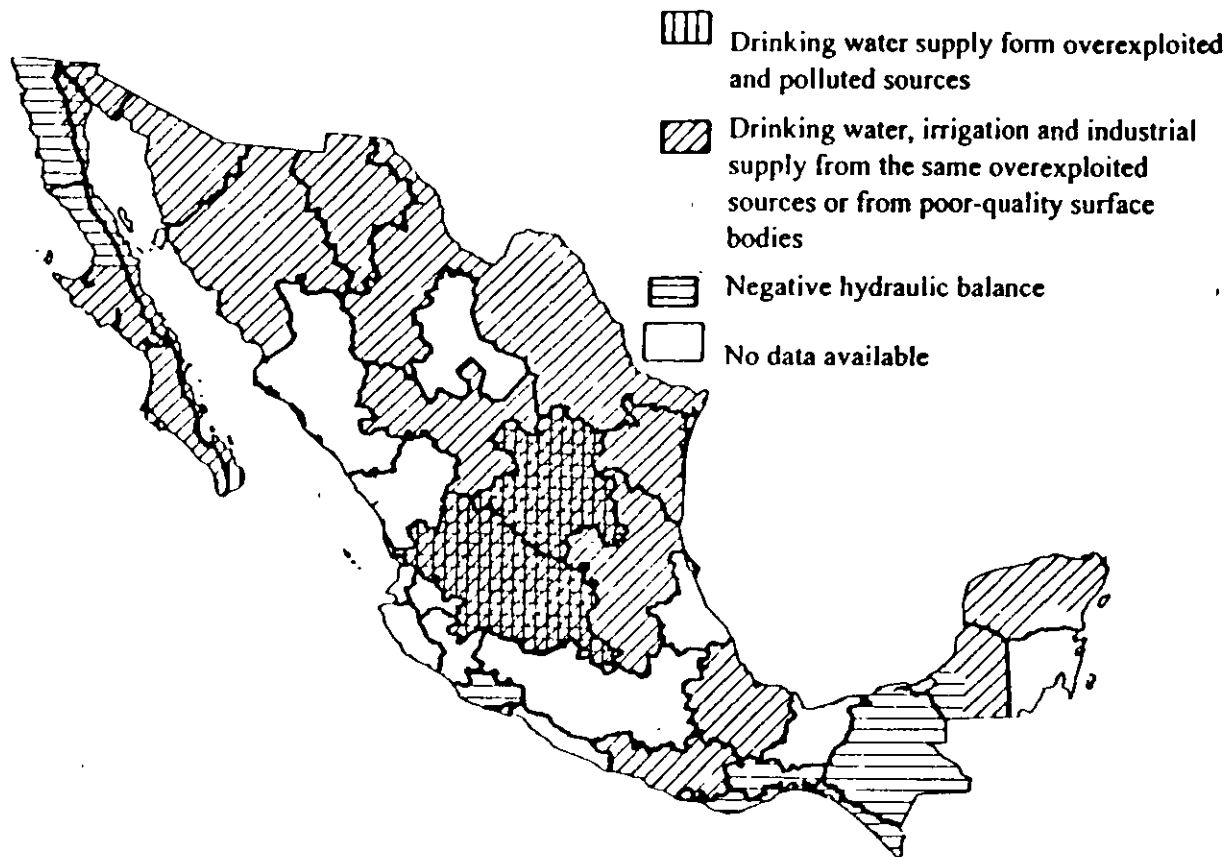
## CONCLUSIONES

En general, los resultados de este trabajo permiten un planteamiento del problema global de la cantidad y calidad del agua en México de manera que se puede contribuir a formular una política ordenada del aprovechamiento y uso racional del agua. En efecto, al establecer dónde y cuáles son los principales problemas de contaminación del agua así como cuáles son los conflictos cantidad-calidad-uso se puede definir una jerarquización para atender los problemas. Esta información no es posible obtenerla a partir de los balances hidráulicos regionales o de los mapas tradicionales de contaminación en (Demanda Biológica de Oxígeno pero si Demanda Química de Oxígeno), del *PU* y del *ID* se pueden derivar.

En particular, con la información analizada, se concluye que para México las medidas por adoptar en forma constante, efectiva y urgente para mejorar la calidad del agua para en consumo humano son: protección a las fuentes de abastecimiento y

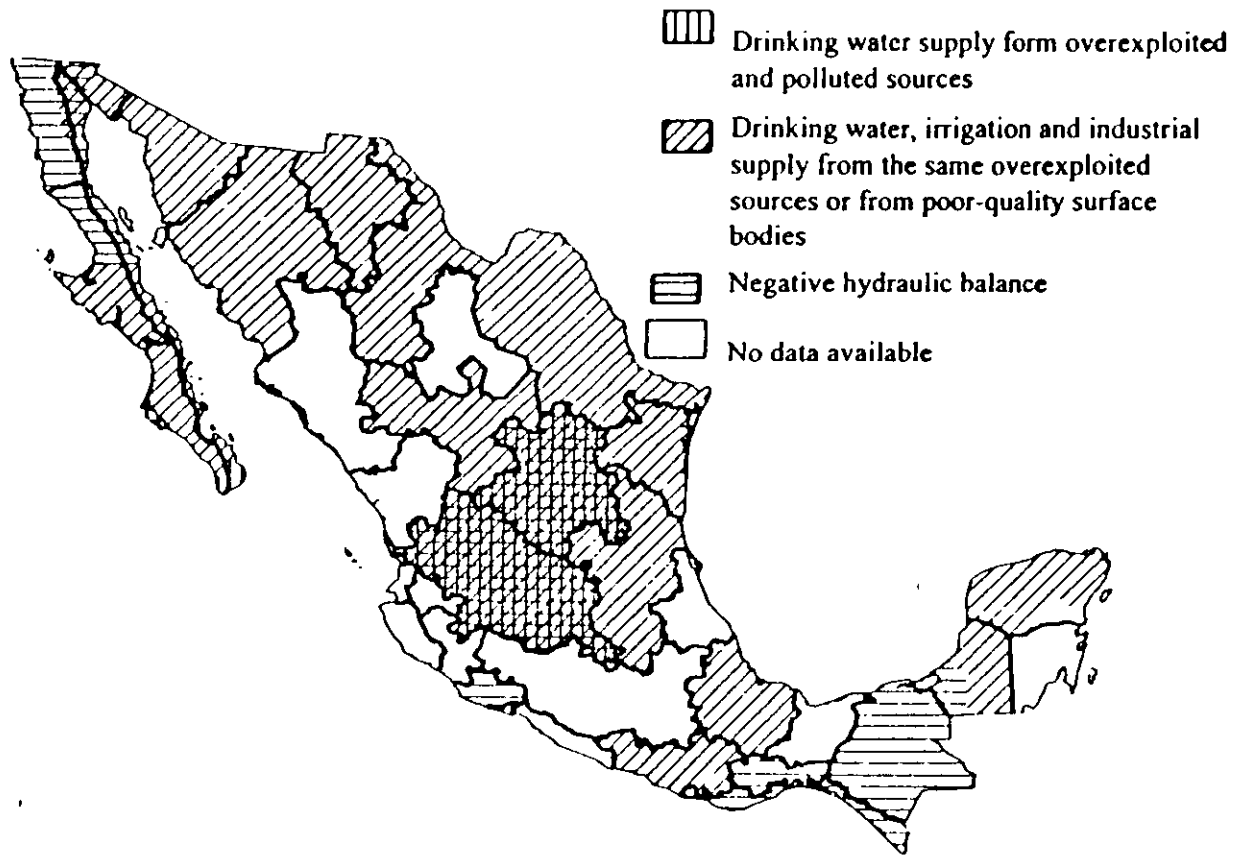


Map 4. Regions where conflicts arise due to shortage, quality problems and uses of water supplies



Map 5. Status of overexploited aquifers, taking into account water quality problems





22

Map 5. Status of overexploited aquifers, talking into account water quality problems

desinfección, para evitar los efectos negativos por el empleo de agua contaminada en riego se requiere información a los agricultores del estado del agua para que adopten medidas de protección durante el riego y en su vida diaria y de restricción de riego de cultivos de consumo crudo con este tipo de agua.

Al confirmar que son los acuíferos los cuerpos que tienen mejor calidad del agua, aunado a la visualización de los problemas de sobreexplotación que sufren en muchas regiones, se reconoce que se debe cambiar el patrón de consumo cuando se comparten la fuente de suministro el riego, la industria y los municipios. El objetivo es dejar el agua subterránea (de mejor calidad) para consumo humano. Es importante destacar que la agricultura (que tiene eficiencias de empleo del agua de 50% y que usa el 76% del agua extraída del subsuelo) y la industria (que tiene capacidad para pagar el acondicionamiento del agua) son quienes más debieran desarrollar programas de uso eficiente y de reúso.

Además conociendo los problemas del país, (elevado índice de enfermedades diarreicas) el índice desarrollado representa la situación general del país por lo que se concluye que las actividades debieran orientarse a atacar, en primer lugar el problema microbiológico de contaminación antes de atender otros problemas que al ir copiando normatividad y programas de otros países se han vuelto menester prioritario en el país.

Por último, en cuanto al método desarrollado se concluye que éste permite, a partir de la información disponible, establecer prioridades para un manejo integral del acuífero. Incluso puede ser fácilmente adaptado a las condiciones de otro país con sencillas modificaciones, para ello basta consultar la normatividad respectiva para introducirla en la base de datos, o incluso, en caso de no tener criterios para el uso, emplear los aquí propuestos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Horton, R.K. 1965. "An Index Number System for Rating Water Quality", *Journal of Water Pollution Central Federation*, Vol. 37.

Dinius, S. H. 1987. "Design of an index of water quality", *Water Resources Bulletin* Vol. 23 No. 5, pp. 833-843.

Landwehr, J.M. 1979. "A Statistical view of a class of Water Quality indices", *Water Resources Research*, Vol 15 no. 2, pp. 460-468..

Jiménez, B y Ramos J. 1995. "Estudio de la Disponibilidad de Agua en México en Función del Uso, Calidad y Cantidad", Vol 1 y 2 Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, proyecto 3320 Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

Crabtree R., Cluckie D., Forster C. 1987. "Percentile estimation for Water Quality Data". *Water Research* Vol. 21 No. 5 pp 583-590.

Postel S., 1992. "Last Oasis, Facing Water Scarcity" WW Norton & Company, 191 pp.

# Disponibilidad del Agua en México en Función de la Cantidad, Calidad y Usos

## Blanca Jiménez Cisneros

---

### INTRODUCCIÓN

México dispone de 5125 m<sup>3</sup>/hab. por año y de acuerdo con Postel (1992) no se clasifica como un país con escasez (2000 m<sup>3</sup>/hab por año). Sin embargo, México como muchos otros países, sufre de escasez severa en varias cuencas hidrológicas debido a dos factores: a) el deterioro de la calidad, el cual limita el empleo del agua y, b) el defasamiento espacial y temporal entre la oferta y la demanda. En este trabajo aborda el primer problema y se plantea una metodología para calcular la disponibilidad en términos de su cantidad y la calidad.

El índice de disponibilidad (*ID*) consta de dos términos (a, b), donde el primero refleja la cantidad y el segundo el grado de tratamiento requerido por un agua para darle el uso deseado en función de su calidad. El parámetro b, se evalúa con ayuda de otro índice denominado Potencial de Uso (*PU*) que mide qué tanto y por qué se aleja el agua de la calidad deseada.

Al emplear el *ID* fácilmente se observa cómo se modifica la disponibilidad del agua obtenida a partir de los balances hidráulicos y se tiene una idea clara de las necesidades de tratamiento por región hidrológica para un uso dado. Adicionalmente, al calcular el índice de Potencial de Uso se logran identificar algunos problemas generados por los conflictos entre la cantidad y la calidad para ciertos fines.

Además, la metodología propuesta para el cálculo del *PU* tiene la ventaja de no requerir datos de parámetros predeterminados, iguales para todo el país o región, con periodos largos y uniformes de muestreo. El cálculo del índice es sencillo, lo que hace a la metodología muy útil para países en desarrollo.

### ANTECEDENTES

Para preservar el agua en cantidad y calidad es necesario conocer cuánta agua hay, cómo se usa y en qué estado se encuentra. De esta información derivan las políticas de administración, las necesidades de infraestructura de tratamiento y las de importación de agua de una cuenca a otra, cuando en la zona no hay suficiente o es de mala calidad

Durante la década de los 60's se hicieron muchos esfuerzos para clasificar los cuerpos de agua de acuerdo con su calidad en una forma ágil y confiable. Este fue el origen de los denominados "Índices de Calidad" (Horton, 1965, Landwehr, 1979 y Crabtree *et al.*, 1987).

En general, estos índices se caracterizan por emplear un número limitado y específico de parámetros, combinándolos entre ellos sin ningún sustento físico, químico o biológico. La dificultad de aplicarlos en forma universal para representar problemas prácticos hizo que hoy en día estén casi abandonados. A pesar de ello, y sobre todo en países donde la falta de infraestructura y programas de saneamiento ha deteriorado la calidad de muchos cuerpos de agua, es todavía necesario contar con un método para evaluar la cantidad disponible de agua tomando en cuenta su calidad. Los métodos de administración del agua empleados en países avanzados requieren una gran cantidad de datos, la medición de los mismos parámetros en todo el territorio así como frecuencias uniformes de muestreo durante periodos prolongados. Emplean además complejos modelos matemáticos. Estos requerimientos son difíciles de cumplir en países en desarrollo, en los que se sigue acostumbrando establecer la disponibilidad del agua sólo en términos de su cantidad, sin tomar en cuenta que la calidad limita su empleo como desafortunadamente sucede en la práctica.

La necesidad de tener una idea clara de la disponibilidad efectiva del agua llevó a desarrollar un índice que tomara en cuenta la calidad a partir de la información disponible (Jiménez y Ramos, 1995). Este método es sencillo y ofrece un enfoque racional para el manejo del recurso de manera que en un futuro se puedan emplear modelos matemáticos más completos y de mayor precisión.

## CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD

El índice de disponibilidad para un determinado uso se define como

$$ID = (a, b) \quad (1)$$

donde

- a:** cantidad de agua renovable para una región hidrológica.
- b:** clasificación del agua según el tratamiento requerido para adecuar su calidad al uso que se le pretende dar.

Para calcular "a" se emplea la ecuación de balance que se basa en la figura 1

$$S(i) = \sum_j S_j(i-1) + T(i-1) + CP(i) - \sum_k D_k(i) - T(i) + \sum_k R_k(i) \quad (2)$$

donde

$(i)$ : designa la región en estudio,

$(i-1)$ : las regiones cuyas descargas ingresan a la región  $(i)$ ;

$S(i)$  el excedente de volumen disponible en la región  $(i)$

$T(i-1)$ : Transformaciones certificadas de volúmenes de agua desde otras regiones a la región  $(i)$ ;

$CP(i)$ : el volumen que ingresa por cuenca propia a la región  $(i)$

$T(i)$ : Transferencias desde la región  $(i)$  hacia otras regiones debidos a compromisos contraídos,

$D_k(i)$ : las demandas para el uso  $k$  en la región  $(i)$ ;

$R_k(i)$ : los retornos correspondientes al uso  $k$  en la región  $(i)$ .

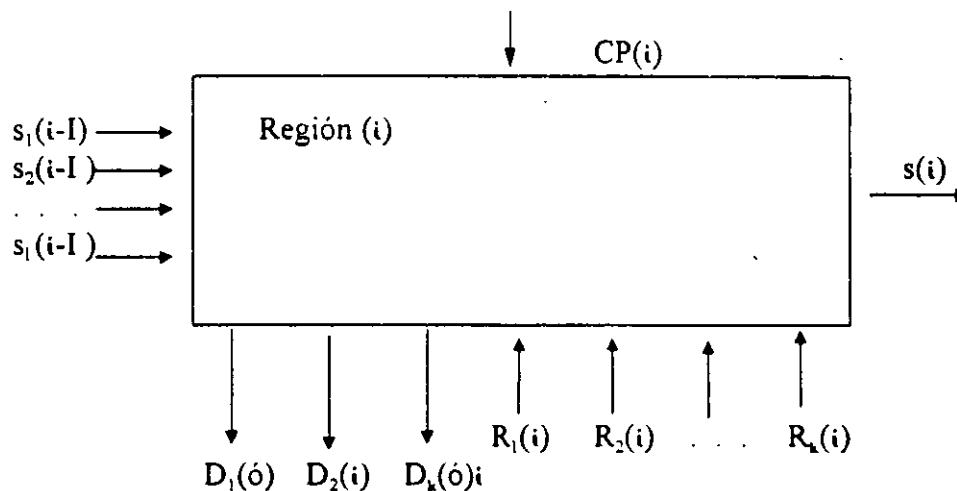


Figura 1. Diagrama para el balance hidráulico

En el manejo de la ecuación (2) se debe considerar que:

- ✓ Se aplica de aguas arriba a aguas abajo, de tal forma que en la primera región ( $i = 1$ ) se tiene que  $S(i - 1) = 0$
- ✓ Las demandas para generación hidroeléctrica no se incluyen, dado que para ese caso  $D_k(1) = R_k(1) \forall K$
- ✓ En el término  $CP(i)$  se incluye el escurrimiento superficial y la recarga de los acuíferos generada por la lluvia; cuando existen embalses en la región, se resta la evaporación neta (evaporación menos lluvia).
- ✓ En muchas ocasiones, los volúmenes de demanda y de retorno no se miden directamente por lo que se estiman a partir de las láminas de riego y dotaciones por habitante, en el primer caso, y de porcentajes de retorno, en el segundo.

De acuerdo con la ecuación (2) la disponibilidad relativa del agua, en términos de la cantidad, puede expresarse como:

$$Pa(i) = \frac{S(i) + \sum_k D_k(i)}{D_k(i)} \quad (3)$$

De tal forma que

Si  $Pa(i) \geq 1.4$  la disponibilidad es abundante y  $\alpha = 1$

Si  $0.7 \leq Pa(i) < 1.4$  la disponibilidad está en equilibrio con las demandas y  $\alpha = 2$

$Pa(i) < 0.7$  la disponibilidad es escasa y  $\alpha = 3$

La ecuación de balance (2) se aplica para promedios anuales, y no considera las variaciones dentro del año ni la posibilidad de que se presenten periodos de sequía, por lo que los valores límite (1.4 y 0.7) podrían modificarse en función de la capacidad de almacenamiento disponible en la región y la variabilidad interanual de las lluvias.

Para calcular el término "b1" del índice de disponibilidad *ID2*, primero se determina el índice de Potencial de Uso (*PU*)<sup>3</sup>, con ayuda de una simple hoja de cálculo.

En ella se tiene almacenados los valores de los diversos parámetros que la normatividad establece para definir la calidad requerida para un uso determinado. El cálculo del *PU* se basa en comparar los valores de cada parámetro *I* medido en una región *PM(I)* con lo establecido por la norma *PN(I)*<sup>4</sup>, para obtener un valor *RN(I)* el cual mide que tanto se aleja uno de otro de acuerdo con

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (4)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ establece un máximo admisible} \Rightarrow RN(I) = PM(I) / PN(I) \quad (5)$$

$$PM(I) \leq PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = PN(I) / PM(I) \quad (6)$$

$$PM(I) > PN(I) \text{ y } PN(I) \text{ es un mínimo admisible} \Rightarrow RN(I) = 1 \quad (7)$$

$$PM(I) > 0 \text{ y } PN(I) \text{ debe ser ausente (cero)} \Rightarrow RN(I) = PM(I) \quad (8)$$

La Tabla 1, contiene algunos ejemplos de la aplicación del cálculo de *RN(I)*.

Tabla 1. Ejemplos del calculo de *RN(I)*

Parámetro	Valor promedio medido	Valor en norma <i>RN(I)</i>	Condición aplicada	Valor de <i>RN(I)</i>
As	0.02 mg/L	Máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	1
As	0.2 mg/L	máximo de 0.05 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	$\frac{PM(I)}{PN(I)} = \frac{0.2}{0.05} = 4$
O <sub>2</sub>	2 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) \leq PN(I)$	$\frac{PN(I)}{PM(I)} = \frac{4}{2} = 2$
O <sub>2</sub>	6 mg/L	mínimo de 4 mg/L	$PM(I) > PN(I)$	1
Grasas y aceites	10 mg/L	ausente	$PM(I) > 0$ y $PN(I) = 0$	10



El  $PU$  se obtiene a partir de los valores de  $RN(I)$  calculados de acuerdo con

$$PU = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RN(I) \quad (9)$$

donde

$n$  . número de parámetros medidos en una región

Cabe mencionar, que por un lado el método permite variar  $n$ , (número y tipo de parámetros) de manera que se consideren criterios federales, la legislación local, o bien, los parámetros de interés para un análisis específico y, por otro, que su valor no necesariamente es igual al total de parámetros que establece una norma.

Al calcular el  $PU$  se tienen dos posibilidades

- a)  $PU = 1$  Implica que a partir de la información disponible el agua es apta para el uso que se le pretende dar.
- b)  $PU > 1$  Indica que el agua no cumple con los criterios de calidad y mientras mayor sea su valor más se aleja de las condiciones deseadas.

Durante el cálculo del  $PU$ , el programa desarrollado destaca aquéllos parámetros por los cuales el  $PU$  se aleja de 1 así como los parámetros para los cuales  $RN(I)$  es  $>1$ .

Esto permite evaluar si existen problemas específicos, aún cuando el promedio sea cercano o igual a 1. Además, con esta información se puede establecer si es posible controlar el problema mediante tratamiento del agua. A partir de este razonamiento se asigna un valor al término " $b$ " como sigue

$b = 1$ , si el agua cumple con la calidad requerida tal como está ( $PU = 1$ ) y por tanto no requiere tratamiento.

$b = 2$ , si el tratamiento requerido es simple y económico (filtración por ejemplo), en función de los parámetros que hacen que el  $PU$  se aleje de 1.

$b = 3$ , si se requiere un proceso de tratamiento costoso (ósmosis inversa por ejemplo), en función de los parámetros que determinen que el  $PU$  sea  $>1$ .

Finalmente, se establece los valores posibles del  $ID$  en función de  $a$  y  $b$ , de acuerdo con la Tabla 2.

**Tabla 2. Índice de disponibilidad ( $ID$ )**  
basado en la cantidad, calidad y uso del agua

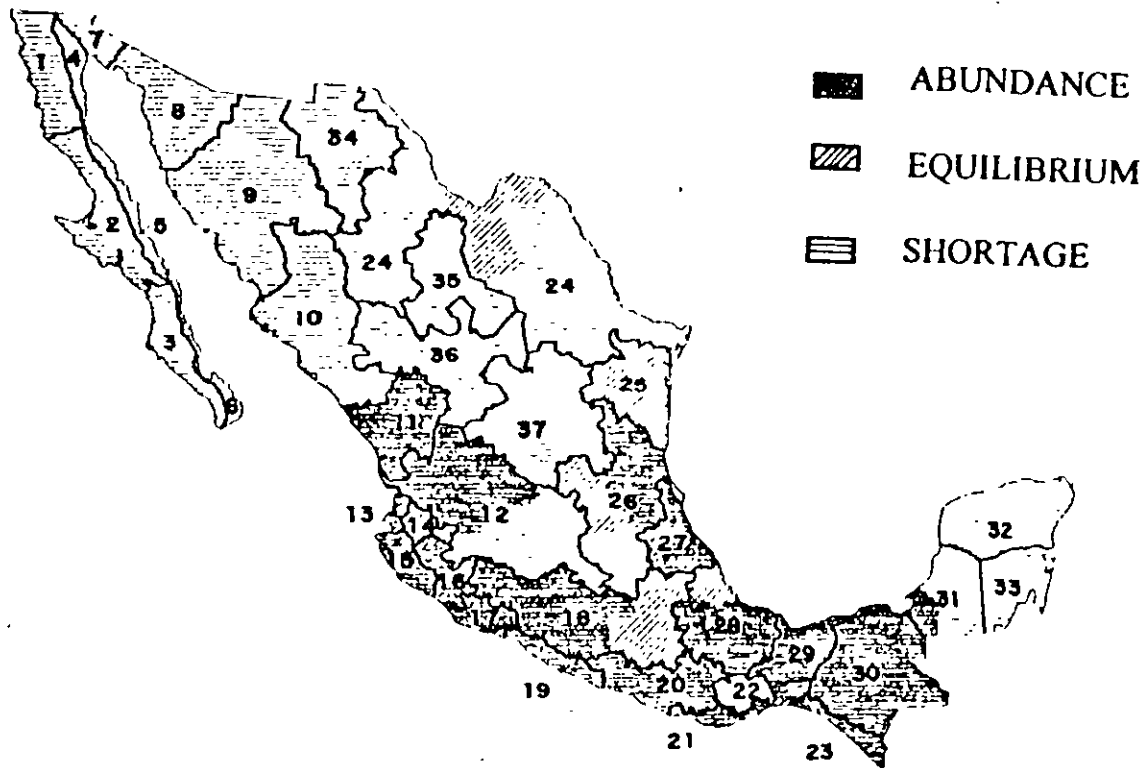
Cantidad (a)	Calidad (b)		
	Buena 1	Requiere trata- miento simple y económico 2	Requiere tratamiento costoso 3
1 (Abundante)	11	12	13
2 (Equilibrio)	21	22	23
3 (Escasez)	31	32	33

Las principales limitaciones en la calidad del agua corresponden a los casos situados en la última columna de la Tabla 2. Para el nivel (1,3) lo más fácil puede ser cambiar de fuente de abastecimiento, dado que hay abundancia de agua, mientras que para los niveles (2,3) y (3,3) se debe evaluar la factibilidad económica de aplicar un tratamiento costoso contra importar agua de otra cuenca.

## APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE MÉXICO

México se divide en 37 regiones hidrológicas en las cuales al utilizar la ecuación 2 se obtiene la distribución del recurso del Mapa 1. Este mapa muestra que en varias regiones del norte del país el agua es escasa mientras que al sur hay abundancia.

Para evaluar la calidad se calculó el Índice de Potencial de Uso,  $PU$ , para cada región empleando para ello los datos de la Red Nacional de Monitoreo y los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de diciembre de 1989) que, sin tener carácter obligatorio, se emplean en México para clasificar el posible uso del agua según su calidad. Estos criterios toman en cuenta los usos y número de parámetros de la Tabla 3.

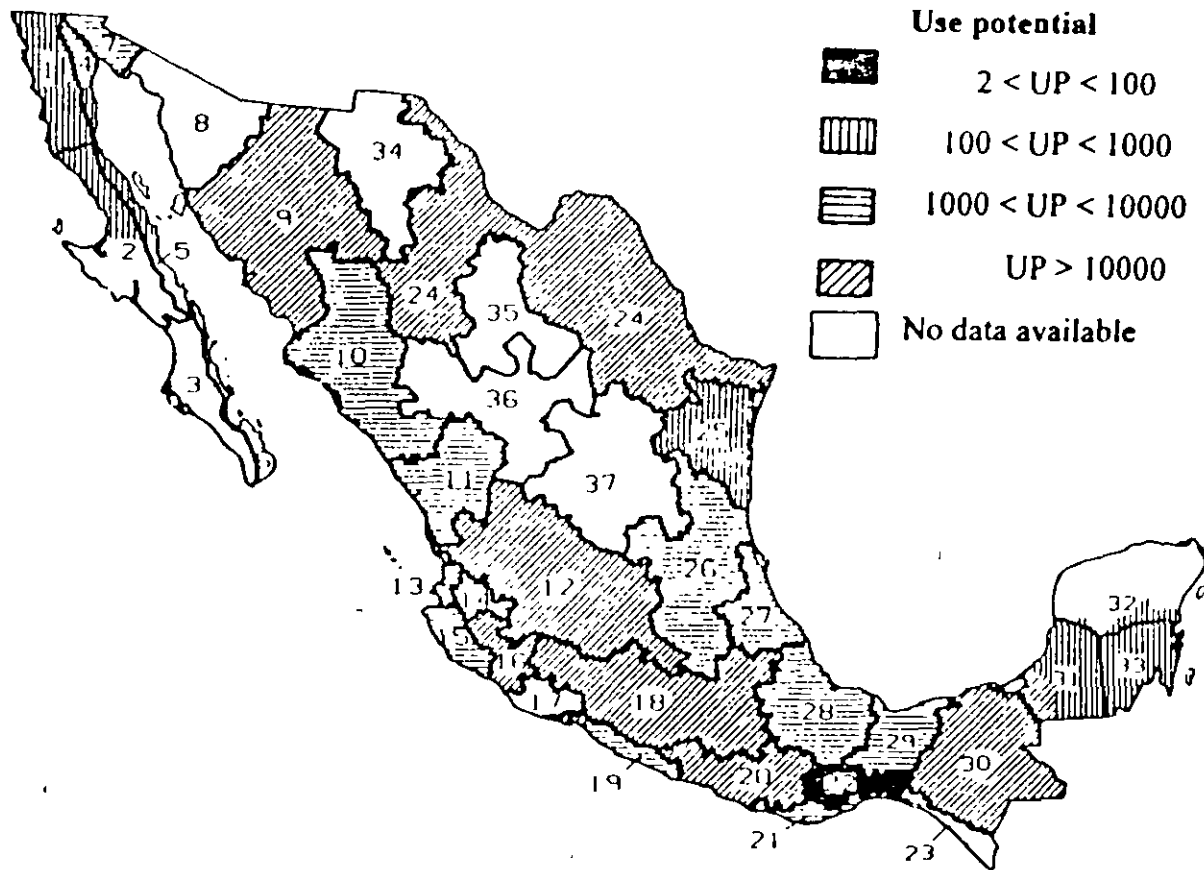


Map 1. Hydraulic Balance for Mexican Hydrological Regions

**Tabla 3. Usos y número de parámetros que se establecen en los Criterios Ecológicos de Uso del Agua (Diario Oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1989)**

U s o		No. de Parámetros
Fuente de abastecimiento de agua potable		113
Recreativo con contacto primario		14
Riego agrícola		33
Pecuario		20
Protección de la vida acuática	Dulce	106
	Agua marina	99

Como ejemplo, el Mapa 2 muestra el valor del Potencial de Uso para abastecimiento en cuerpos de aguas superficiales. La Tabla 4 muestra los valores de "a" y "b" obtenidos en cada región a partir del Mapa 1 y de los análisis de los valores del *PU* para abastecimiento de agua potable. A continuación citaremos dos ejemplos de cálculo de "a" y "b". En la región 26 (Alto Pánuco), al calcular el *PU* se obtuvo un valor de 2 200 como resultado promedio de los valores de *RN (I)*. Entre los parámetros para los cuales *RN (I)* fue >1 destacan los coliformes fecales (CF), el mercurio (Hg) el aluminio (Al), los nitritos y el níquel (Ni) por no cumplir con el criterio de uso. La Tabla 5 muestra el valor del *RN* para cada uno de los compuestos. Del Mapa 2 se establece que en cuanto a cantidad esta región se clasifica como en "equilibrio", por tanto  $a=2$ , y al considerar que el tratamiento para potabilizar el agua dado los contaminantes presentados requeriría el empleo de procesos complejos se le asigna un valor a "b" de 3. Así, su uso queda limitado -a pesar de la disponibilidad en cantidad- por la posibilidad de pagar el costo de tratamiento para adecuar la calidad.



Map 2. Use potential index for water supplies in surface water

Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones

Región	Cantidad	"a"	P U agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
01	Escasez	3	105	P04, SAAM	486	CF	3
02	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
03	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
04	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
05	Escasez	3	SD	---	SD	---	3
06	Escasez	3	SD	---	6	CF	2
07	Escasez	3	2200	CF	SD	---	3
08	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
09	Escasez	3	50730	CF	SD	---	3
10	Escasez	3	1300	CF	SD	---	3
11	Abundante	1	3130	CF	155	CF, P04	3
12	Abundante	1	77 x 104	CF, P04	128	CF	3
13	Abundante	1	4180	CF, S04, SS	SD	---	3
14	Abundante	1	4220	CF	SD	---	3
15	Abundante	1	1250	CF	380	CF	3
16	Disponibilidad	1	13100	CF	450	CF	3
17	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
18	Abundante	1	7 x 10 <sup>9</sup>	CF, NIT	10	CF	3
19	Abundante		9650	CF, CI	1	---	3
20	Abundante	1	72930	CF	1	---	2
21	Abundante	1	2800	CF, CI	SD	---	3
22	Escasez Equilibrio	3 1	11	CI	SD	---	1
23	Abundante	1	SD	---	SD	---	--
24	Escasez	3	2 x 10 <sup>7</sup>	CF, P04	SD	---	3

**Tabla 4. Usos que se da al agua en las diferentes regiones**

Región	Cantidad	"a"	P U agua consumo humano				"b"
			Superficial		Subterránea		
			valor	tipo	Valor	tipo	
	Equilibrio	2					
25	Equilibrio	2	190	CF, Ni, Al	SD	---	3
26	Equilibrio Escasez	2 3	17 x 10 <sup>2</sup>	CF, COL, Hg Al, NIT, Ni	SD	---	3
27	Abundante	1	6350	CF	SD	---	3
28	Abundante Escasez	1 3	5090	CF	SD	---	3
29	Abundante	1	1660	CF, NIT, NAT	SD	---	3
30	Abundante	1	78 x 10 <sup>6</sup>	CF, NIT	1	---	2
31	Escasez Abundante	3 1	250	CF, NIT	3	Cl, SD	3
32	Escasez	3	SD	---	300	CF	--
33	Escasez	3	106	CF	4	SO <sub>4</sub>	3
34	Escasez	3	SD	---	1	---	1
35	Escasez	3	SD	---	SD	---	--
36	Escasez	3	SD	---	8	F	2
37	Escasez	3	SD	---	12	CF	2

Al: Aluminio

COL: Color

SD: Sin datos para calcularlo

As: Arsénico

F: Fluor

SD: Sólidos disueltos

B: Boro

NAT: Nitratos

SO<sub>4</sub>: Sulfatos

CF: Coliformas fecales

Ni: Níquel

SS: Sólidos suspendidos

Cl: Cloruros

NIT: Nitritos

CO: Conductividad

PO<sub>4</sub>: Fosfatos

**Tabla 5. Parámetros que rebasaron el Criterio Ecológico para uso de los cuerpos superficiales como fuente de abastecimiento.**

Parámetro	Valor del criterio mg/l	Número de veces en que se excede RN (I)
Coliformes fecales	1000 NMP/100 ml	13 900
Color aparente	75	3123
Grasas y aceites	0	10
SAAM	0.5	1.2
Aluminio	0.02	61
Fierro	0.3	2
Mercurio	0 001	500
Niquel	0.01	50

Otro ejemplo, lo constituye la región 16 (Armeria Coahuayana), donde el *PU* tuvo un valor de 13 100, siendo el único parámetro que excede el Criterio de Uso de los coliformes fecales (CF). En este caso, según la Tabla 4, la región tiene disponibilidad abundante de agua y por tanto  $a=1$  y dado que el tratamiento para control del problema es un simple sistema de desinfección (como puede ser la cloración) se le asigna a "*b*" un valor de 2.

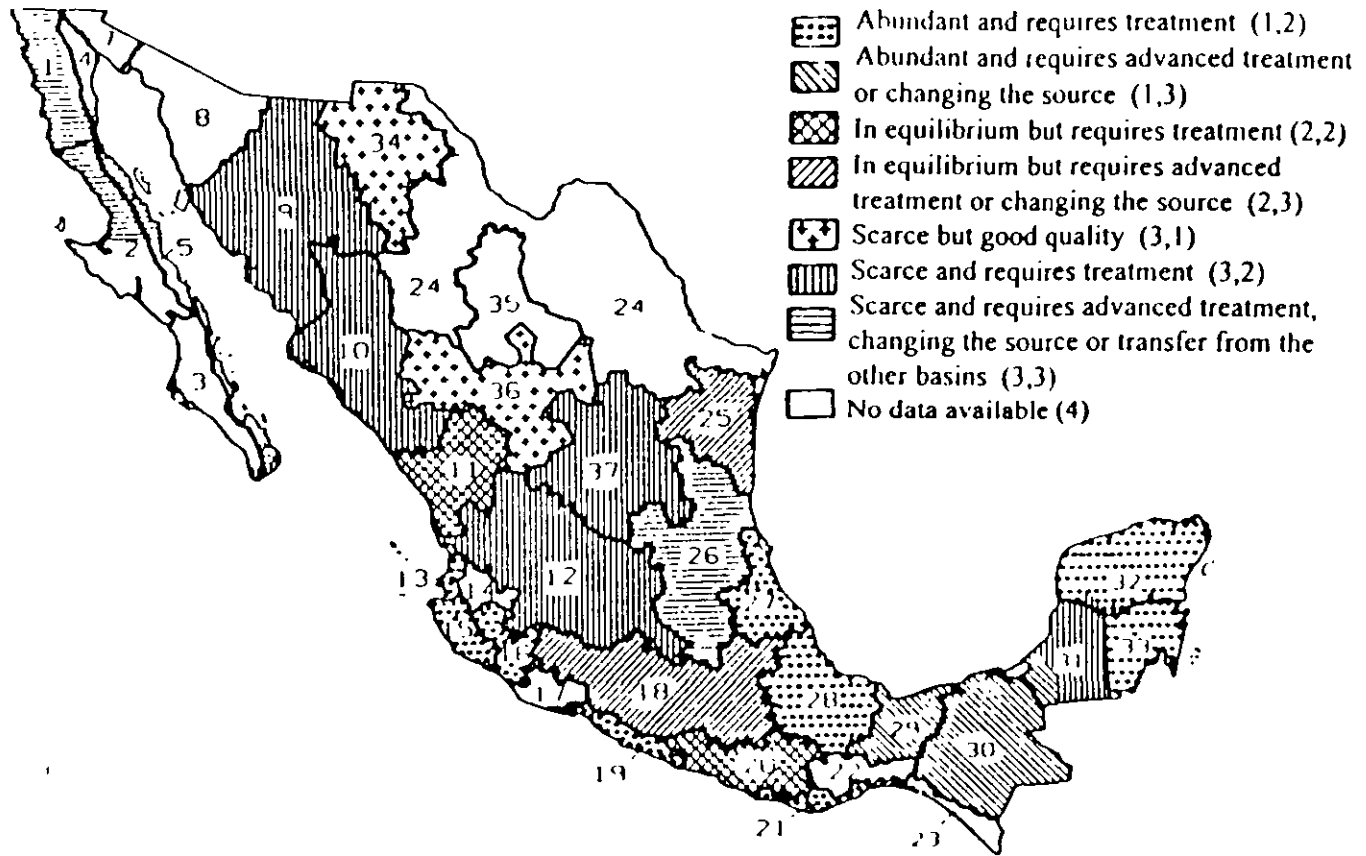
En el Mapa 3 se muestra cómo cambia la disponibilidad del agua al considerar, tanto de la cantidad como la calidad para abastecimiento.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

De los mapas 1 y 3 se concluye, a primera vista que para algunas regiones del norte aún cuando no hay suficiente agua en algunas regiones ésta si es de calidad adecuada, mientras que en el sur -a pesar de que hay abundancia- su disponibilidad se limita por la necesidad del tratamiento.

Por otra parte, al analizar con mayor detalle la información obtenida durante el cálculo del *PU* se pudo establecer cuál es la problemática nacional en materia. La fig. 2 muestra los problemas más frecuentes en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos para suministro. En ambos casos el problema principal lo constituye la contaminación microbiológica. Además, se puede establecer que aunque difiere mucho la cantidad de datos disponibles de los cuerpos de agua superficiales en relación con los subterráneos, sistemáticamente los primeros son de calidad notoriamente inferior a los segundos. De hecho, son muy escasos los cuerpos superficiales aptos para abastecimiento de consumo humano e incluso su disponibilidad para uso en riego es limitada. Las Figs. 3 y 4 destacan





Map 3. Availability Index (AI) for drinking water sources based on quantity and quality of water

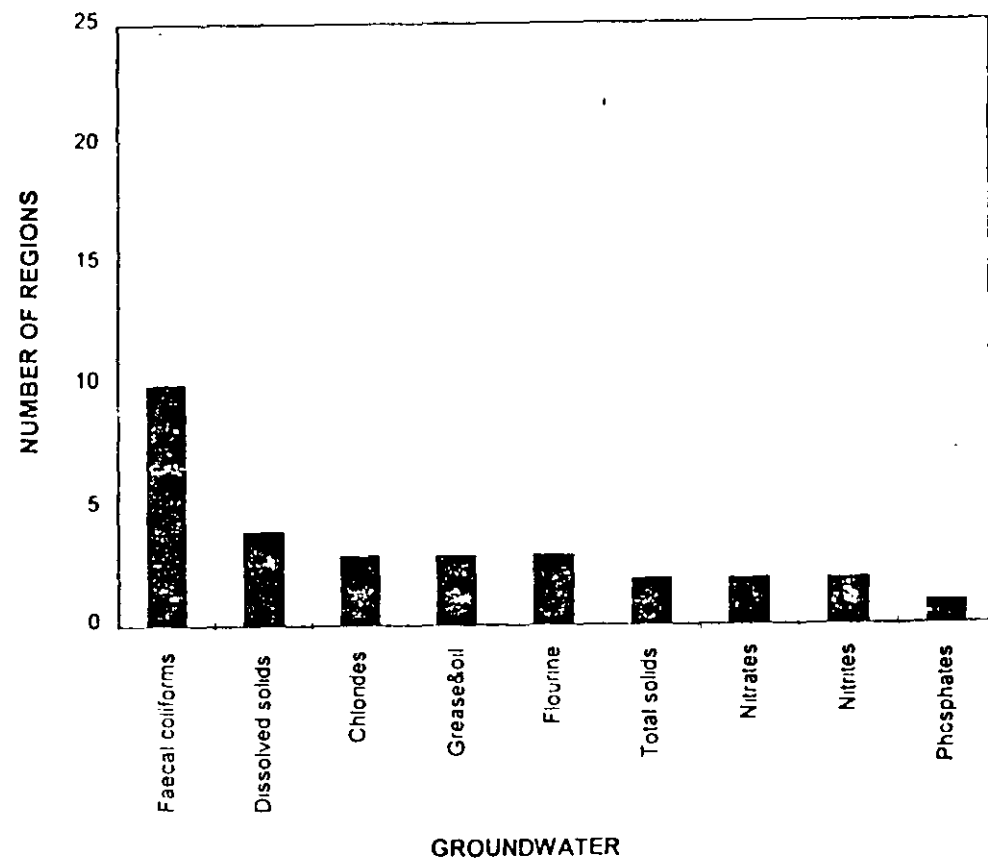
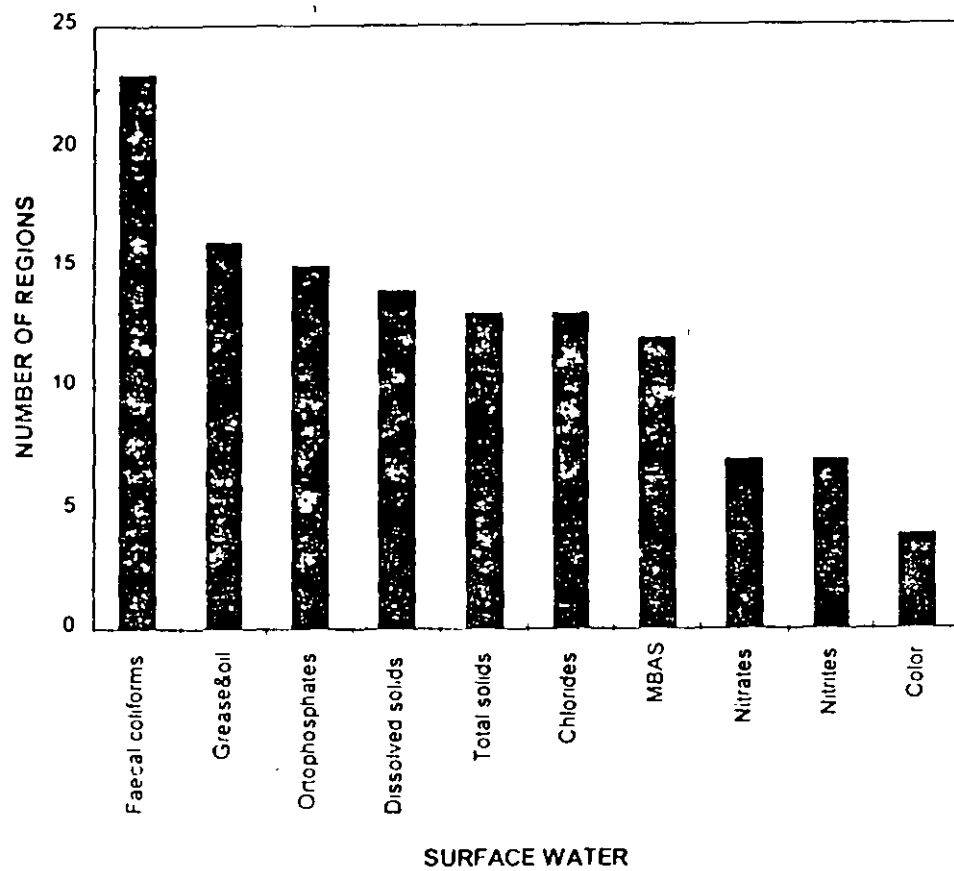


Figure 2. Parameters most frequently exceeded in surface and groundwater sources for drinking water

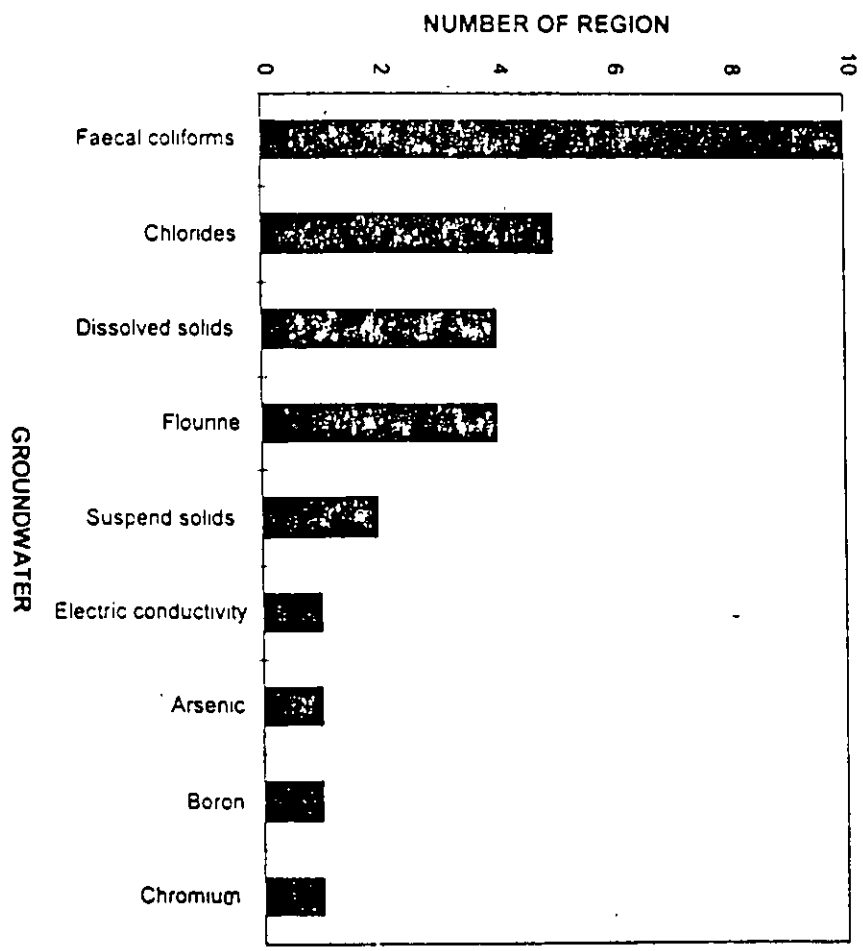
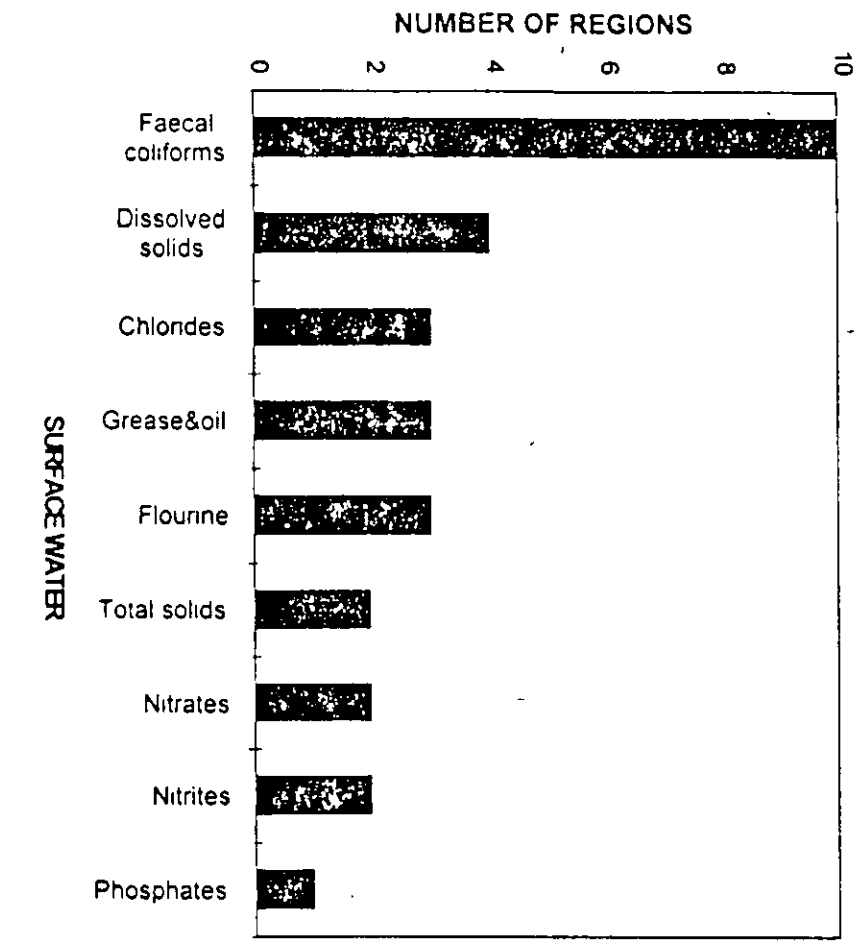
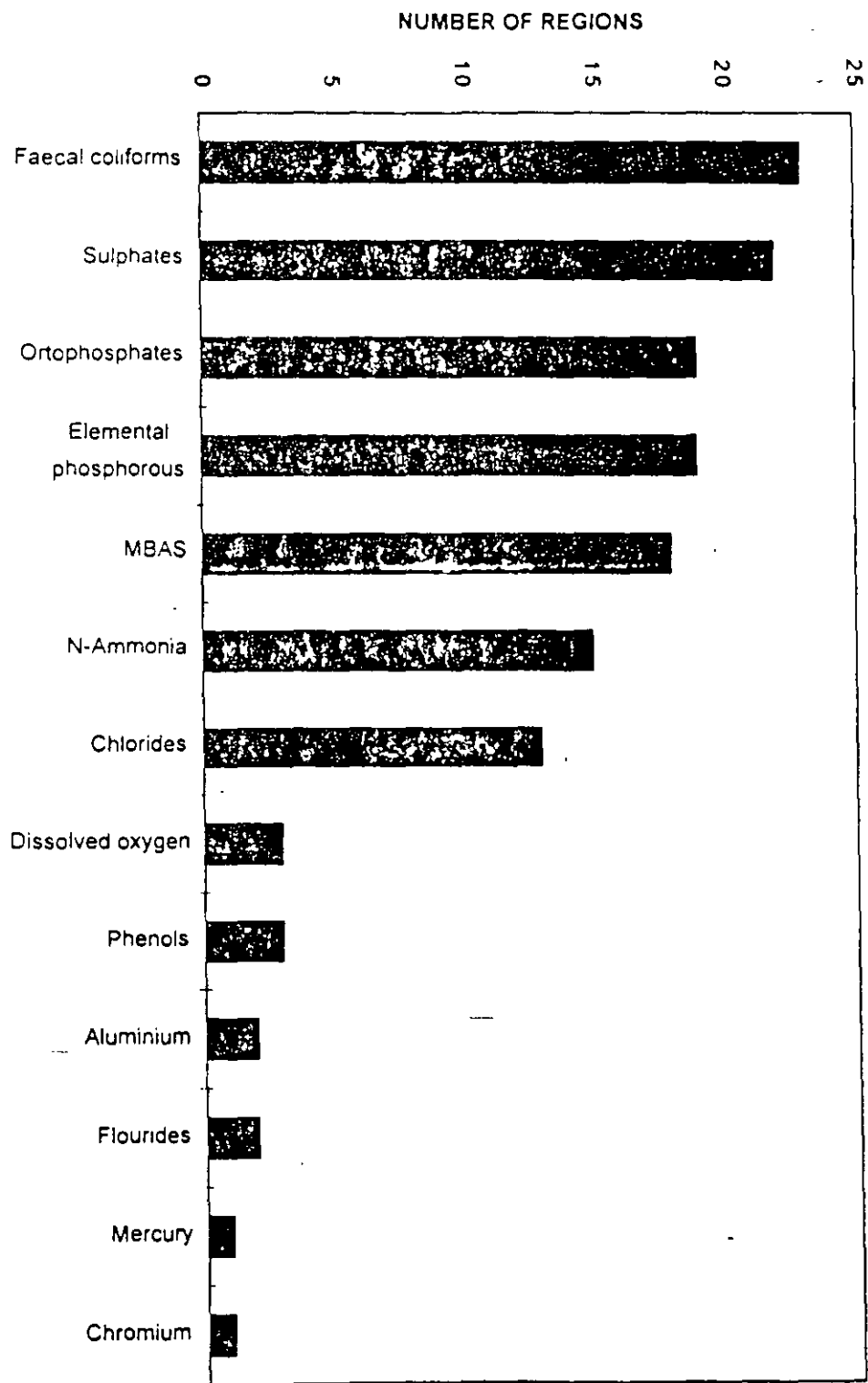


Figure 3. Parameters most frequently exceeded in surface and groundwater sources for irrigation

Figure 4. Parameters most frequently exceeded in surface water sources for aquatic life protection



los parámetros que limitan la disponibilidad del agua para uso agrícola y protección ecológica de la vida acuática; nuevamente el problema principal es de tipo microbiológico.

Para evaluar el problema del agua a nivel país se efectuó, a partir de los índices desarrollado y el análisis de los principales usos del agua por región, varios mapas que combinan diversa información. El Mapa 4 contiene las regiones con escasez de agua y, donde además existe problema de contaminación de las principales fuentes de abastecimiento para las cuales debe haber programas severos de control de la contaminación por descargas. También presenta los lugares con escasez en cantidad donde se emplea un gran volumen de agua para riego a partir de fuentes que también son empleadas con fines municipales. En esta situación, se propone motivar un ahorro de agua para fines agrícolas y liberar agua para el consumo humano. Así como, para las zonas donde hay industria y escasez, se recomienda desarrollar y/o implantar programas de reúso y reciclamiento del agua en esta actividad.

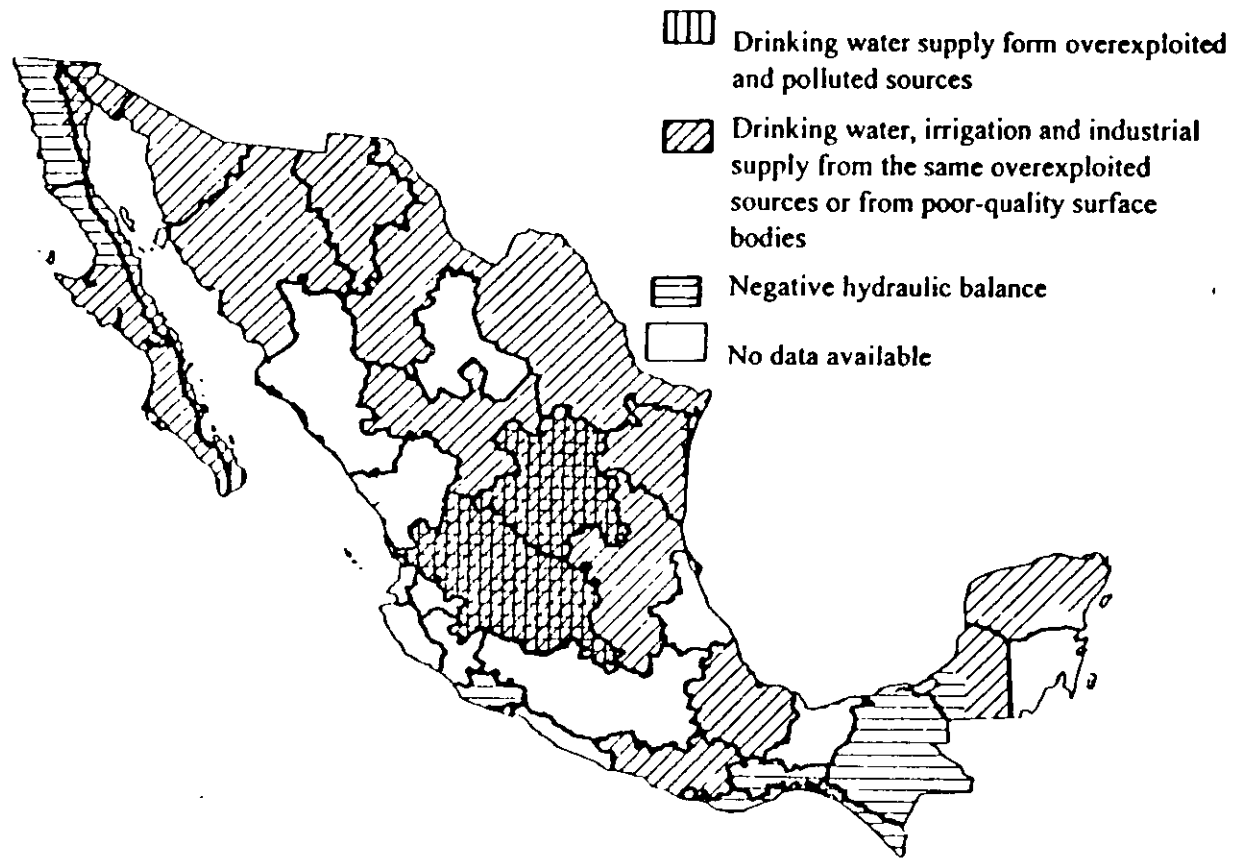
El Mapa 5 muestra la situación del agua subterránea en el país. Este mapa combina las zonas donde el abastecimiento doméstico es predominantemente de acuíferos contaminados y sobreexplotados, en los cuales se debería tomar medidas de control muy estrictas en lo que se refiere a la preservación de cantidad y calidad (control estricto de descargas y acuíferos y restricciones de permiso de explotación, etc).

Además, destaca las zonas donde se emplea agua subterránea para riego e industria y, donde el abastecimiento doméstico se hace a partir de las mismas fuentes o de cuerpos superficiales de mala calidad. Si lo anterior se conjunta con acuíferos sobreexplotados, se concluye la necesidad de desarrollar e implantar programas específicos de uso eficiente. En este mapa también se señalan las regiones donde se requiere conocer el balance hidráulico del acuífero.

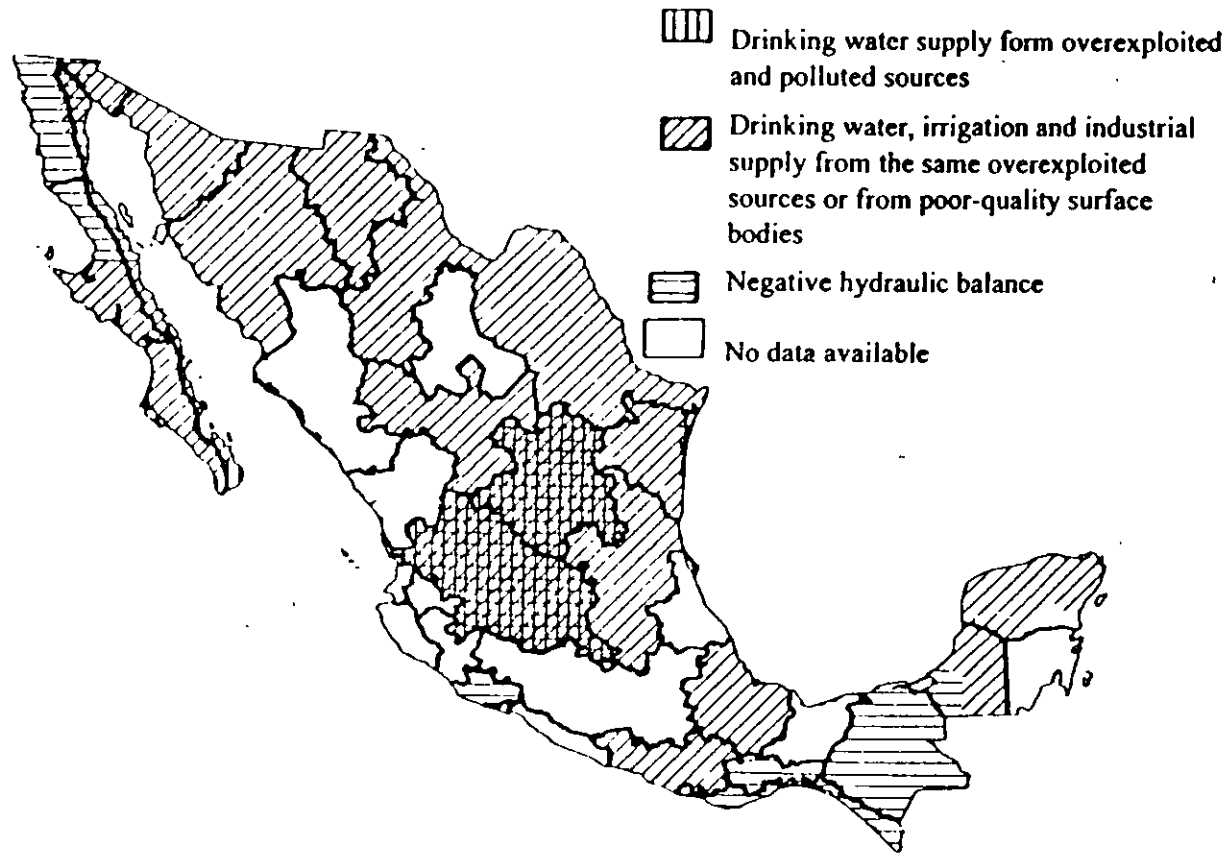
## CONCLUSIONES

En general, los resultados de este trabajo permiten un planteamiento del problema global de la cantidad y calidad del agua en México de manera que se puede contribuir a formular una política ordenada del aprovechamiento y uso racional del agua. En efecto, al establecer dónde y cuáles son los principales problemas de contaminación del agua así como cuáles son los conflictos cantidad-calidad-uso se puede definir una jerarquización para atender los problemas. Esta información no es posible obtenerla a partir de los balances hidráulicos regionales o de los mapas tradicionales de contaminación en (Demanda Biológica de Oxígeno pero si Demanda Química de Oxígeno), del *PU* y del *ID* se pueden derivar.

En particular, con la información analizada, se concluye que para México las medidas por adoptar en forma constante, efectiva y urgente para mejorar la calidad del agua para en consumo humano son: protección a las fuentes de abastecimiento y



Map 5. Status of overexploited aquifers, taking into account water quality problems



Map 5: Status of overexploited aquifers, taking into account water quality problems

desinfección; para evitar los efectos negativos por el empleo de agua contaminada en riego se requiere información a los agricultores del estado del agua para que adopten medidas de protección durante el riego y en su vida diaria y de restricción de riego de cultivos de consumo crudo con este tipo de agua.

Al confirmar que son los acuíferos los cuerpos que tienen mejor calidad del agua, aunado a la visualización de los problemas de sobreexplotación que sufren en muchas regiones, se reconoce que se debe cambiar el patrón de consumo cuando se comparten la fuente de suministro el riego, la industria y los municipios. El objetivo es dejar el agua subterránea (de mejor calidad) para consumo humano. Es importante destacar que la agricultura (que tiene eficiencias de empleo del agua de 50% y que usa el 76% del agua extraída del subsuelo) y la industria (que tiene capacidad para pagar el acondicionamiento del agua) son quienes más debieran desarrollar programas de uso eficiente y de reúso.

Además conociendo los problemas del país, (elevado índice de enfermedades diarreicas) el índice desarrollado representa la situación general del país por lo que se concluye que las actividades debieran orientarse a atacar, en primer lugar el problema microbiológico de contaminación antes de atender otros problemas que al ir copiando normatividad y programas de otros países se han vuelto menester prioritario en el país.

Por último, en cuanto al método desarrollado se concluye que éste permite, a partir de la información disponible, establecer prioridades para un manejo integral del acuífero. Incluso puede ser fácilmente adaptado a las condiciones de otro país con sencillas modificaciones, para ello basta consultar la normatividad respectiva para introducirla en la base de datos, o incluso, en caso de no tener criterios para el uso, emplear los aquí propuestos.

## BIBLIOGRAFÍA

Horton, R.K. 1965. "An Index Number System for Rating Water Quality", *Journal of Water Pollution Central Federation*, Vol. 37.

Dinius, S. H. 1987. "Design of an index of water quality", *Water Resources Bulletin* Vol. 23 No. 5, pp. 833-843.

Landwehr, J.M. 1979. "A Statistical view of a class of Water Quality indices", *Water Resources Research*, Vol. 15 no. 2, pp. 460-468.

Jiménez, B y Ramos J. 1995. "Estudio de la Disponibilidad de Agua en México en Función del Uso, Calidad y Cantidad", Vol. 1 y 2. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, proyecto 3320 Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.



Crabtree R., Cluckie D., Forster C. 1987 "Percentile estimation for Water Quality Data". *Water Research* Vol. 21 No. 5 pp. 583-590

Postel S., 1992. "Last Oasis, Facing Water Scarcity" WW. Norton & Company, 191 pp.



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS ABIERTOS

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

MÓDULO II:

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

TEMA :

***PIEZOMETRÍA Y BALANCE GEOHIDROLÓGICO  
ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO***

PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA

## RESUMEN EJECUTIVO

Se realizó la medición de niveles estáticos en 480 pozos piloto ubicados en la zona metropolitana de la Ciudad de México durante el presente año de 1995. Se construyeron configuraciones de la profundidad, elevación y evolución del nivel estático. El nivel estático se encuentra a profundidades que van de 30 a 180 metros. Los valores menores se encuentran hacia la parte central de los valles, mientras que los valores más altos se ubican hacia los flancos de las sierras que circundan al valle. La configuración de la elevación del nivel estático sobre el nivel del mar, permitió marcar la dirección del flujo subterráneo, observándose que el agua subterránea fluye de las elevaciones topográficas hacia la parte central de los valles. La distribución de la red de flujo, permitió diferenciar 3 subsistemas acuíferos correspondientes, el primero, a la Ciudad de México limitado al norte por la Sierra de Guadalupe, al oeste por la Sierra de las Cruces, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oriente por una línea entre el Peñón del Marqués y el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. El segundo subsistema acuífero corresponde al lago de Texcoco, ubicado al oriente del subsistema de la Ciudad de México y que se extiende al norte hasta el Cerro de Chiconautla al oriente hasta las estribaciones de la sierra nevada y al sur hasta la Sierra de Santa Catarina. El subsistema acuífero de Chalco presenta un flujo que va de las partes altas de las elevaciones topográficas hacia el centro del valle y está limitado al norte por las Sierras de Santa Catarina y el El Pino, al oriente por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oeste por un parteaguas subterráneo que permite separarlo del subsistema acuífero de la Ciudad de México.

La evolución del nivel estático en los últimos 10 años (1985-1995), presenta máximos de -15 metros, los que se registran hacia las partes centrales de los valles. El abatimiento disminuye hasta perderse en los flancos de las elevaciones topográficas.

La evolución del nivel estático para los últimos 2 años (1993-1995) va de 0 a -3 metros en la mayor parte de la zona estudiada. Una excepción es la zona poniente, que va de Azcapotzalco

hasta Tlalpan, área donde se presentaron recuperaciones de 1 a 2 metros para el periodo mencionado.

La cuantificación del acuífero se realizó tomando en cuenta la ecuación de balance que indica que las entradas de agua al acuífero son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

La recarga al acuífero por flujo subterráneo, proviene de las infiltraciones que se generan sobre los flancos de las sierras. Para su cálculo se trazó una red piezométrica y sobre ella celdas para la cuantificación de la cantidad de agua que entra al acuífero, utilizando la ecuación de Darcy. El caudal de entrada por flujo subterráneo, en el subsistema acuífero de la Ciudad de México asciende a 257 millones de metros cúbicos por año (Mm<sup>3</sup>/año), a 154.3 en el valle de Texcoco y a 135.7 Mm<sup>3</sup>/año en el valle de Chalco.

La salida de agua del acuífero se realiza a través de la extracción por bombeo que se lleva a cabo en prácticamente toda la zona. Existe control sobre las extracciones, las cuales ascendieron para el año de 1994 a 348 Mm<sup>3</sup>/año en el subsistema acuífero de la Ciudad de México, a 254 en Texcoco y a 168.57 Mm<sup>3</sup>/año en el valle de Chalco.

Cuando la extracción por bombeo es mayor que la recarga que recibe el acuífero (como es el caso que se presenta en la ZMCM), existe un cambio de almacenamiento negativo que se refleja en un abatimiento de la superficie piezométrica. Se calculó la evolución sufrida en los niveles de alrededor de 400 pozos piloto, obteniéndose un cambio de almacenamiento que ascendió a -12.82 Mm<sup>3</sup>/año para la Ciudad de México, -23 en Texcoco y -6.47 Mm<sup>3</sup>/año en el valle de Chalco.

Las características particulares del acuífero de la Ciudad de México, al estar cubierto por una capa de arcillas lacustres saturadas que funcionan como acuitardo, ocasionan un drenado vertical. Este, se produce desde el momento en que existen pozos que extraen agua del subsuelo, debido a que dicha extracción disminuye la presión hidrostática dentro del acuífero permitiendo un flujo vertical descendente. El drenado se calculó a partir de la ecuación de balance, la cual establece que:  $E_s + D_v = E_{xt} + A_s$ . En la Ciudad de México, la entrada de agua al acuífero por flujo subterráneo asciende a 257 Mm<sup>3</sup>/año; la extracción por bombeo fue de 348 y el cambio de almacenamiento ascendió a -12.87, de donde se dedujo el drenado vertical el cual fue de 78.18 millones e metros cúbicos anuales; en Texcoco la entrada por flujo subterráneo fue de 154.3 Mm<sup>3</sup>/año, la extracción por bombeo ascendió a 254 lo cual repercute en un cambio de almacenamiento negativo de 23 Mm<sup>3</sup>/año. De lo anterior se dedujo un drenado vertical

(infiltración) de 76.7 Mm<sup>3</sup>/año. En Chalco, la entrada por flujo subterráneo fue de 135.7 Mm<sup>3</sup>/año; la extracción por bombeo de 168.57 y el cambio de almacenamiento de -6.47 Mm<sup>3</sup>/año, por lo que la infiltración (drenado de las arcillas) resultó de 26.4 Mm<sup>3</sup>/año.

La sobreexplotación, en este caso, corresponde al volumen de agua que perdió el acuífero el cual está representado por el cambio de almacenamiento; más el volumen drenado verticalmente del acuitardo, que es también un volumen de agua perdido por el subsuelo. La relación de estos parámetros con la entrada por flujo subterráneo indica el porcentaje de sobreexplotación. Este, ascendió a 35% en la Ciudad de México, a 65% en el área de Texcoco y a 24% en el valle de Chalco.

La recarga artificial al acuífero se dividió de acuerdo al tipo de agua disponible en: recarga con agua residual tratada y recarga con agua pluvial.

Inicialmente, se consideró el volumen de agua residual tratada disponible. Existen 23 plantas de tratamiento en el Distrito Federal de las cuales 13 se encuentran ubicadas en sitios donde se puede realizar la recarga al acuífero a través de pozos. El proyecto aquí presentado incluye un caudal de inyección de 1057 lps a través de 37 pozos.

## CONCLUSIONES

La zona estudiada abarca alrededor de 2000 kilómetros cuadrados, incluyó a la Ciudad de México, y se extendió hacia el este hasta Chalco y Texcoco, y al norte hasta Chiconautla.

Se utilizó la información de 1489 pozos, de los cuales 677 son pozos municipales y particulares ubicados en la propiamente Ciudad de México; más 406 pozos del Valle de Texcoco que son utilizados principalmente en la agricultura; 47 pozos al norte del área de Chiconautla, utilizados principalmente en agua potable y 64 pozos al poniente del Caracol de Texcoco. En la porción noroccidental se obtuvieron también datos de 10 pozos de agua potable. Adicionalmente, en el área de Chalco se obtuvo información de 285 pozos que incluyen municipales y particulares.

La extracción de agua del acuífero provoca abatimientos en el nivel tanto estático como dinámico.

La zona con mayor afectación por abatimientos de la superficie piezométrica corresponde a la porción suroccidental, que va del Cerro de la Estrella a Tlalpan.

En los últimos 2 años se observó una recuperación de niveles en la zona poniente de la Ciudad de México.

Se obtuvieron los gastos para cada uno de los pozos, obteniéndose una extracción total en el área estudiada de 864.66 Mm<sup>3</sup>/año, que equivalen a un caudal instantáneo de 27.42 m<sup>3</sup>/seg.

La extracción en el subsistema acuífero Ciudad de México, fue de 390.75 Mm<sup>3</sup>/año; en Texcoco de 286.54 Mm<sup>3</sup>/año y en Chalco de 187.37 Mm<sup>3</sup>/año, equivalentes a 12.39, 9.09 y 5.94 m<sup>3</sup>/seg respectivamente.

La evolución o cambio de almacenamiento anual fue de -12.82 Mm<sup>3</sup>/año para la Ciudad de México; -23.00 Mm<sup>3</sup>/año en Texcoco y; de -6.47 Mm<sup>3</sup>/año para Chalco, correspondientes a -0.41, -0.73 y -0.21 m<sup>3</sup>/seg respectivamente.

La entrada por flujo subterráneo a la Ciudad de México ascendió a 257 Mm<sup>3</sup>/año equivalente a 8.15 m<sup>3</sup>/seg; en el área de Texcoco, ésta fue de 154.3 Mm<sup>3</sup>/año equivalente a 4.89 m<sup>3</sup>/seg y; por lo que se refiere a Chalco, ésta ascendió a 135.7 Mm<sup>3</sup>/año que equivale a 4.30 m<sup>3</sup>/seg.

Utilizando los datos de entrada por flujo subterráneo, extracción y cambio de almacenamiento mencionados en incisos, se dedujo la recarga por drenado de las arcillas, la cual resultó para la Ciudad de México de 78.18 Mm<sup>3</sup>/año; para Texcoco de 76.7 Mm<sup>3</sup>/año y; para Chalco de 26.4 Mm<sup>3</sup>/año, que equivalen a 2.48, 2.43 y 0.84 m<sup>3</sup>/seg respectivamente.

La sobreexplotación en la Ciudad de México fue del 35%, en Texcoco del 65% y en Chalco del 24%.

Para efectuar la recarga artificial al acuífero es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes: La existencia de sitios y zonas permeables y, la existencia de volúmenes de agua susceptibles de destinarse para la recarga.

La infiltración puede realizarse a través de pozos o de estanques.

Los volúmenes de agua disponibles para recarga corresponderán a aguas residuales renovadas, provenientes de futuras ampliaciones a planta de tratamiento o bien a eficientización de las mismas.

Otra fuente de agua para recarga es la lluvia, utilizando dispositivos de captación en cuencas sobre áreas tales como estacionamientos o techos de centros comerciales u otros, de tal manera que permitan su captación y tratamiento previamente a su inyección al subsuelo.

La capacidad del acuífero para recarga es muy grande, por lo que ésta se deberá medir en base a la disponibilidad de aguas para recarga.

En una alternativa preliminar se obtuvo la posibilidad de recargar 1057 lps a través de 37 pozos, 12 de los cuales ya se encuentran perforados.

La recarga de agua tratada a través de estanques, actualmente se realiza con un caudal de 600 lps y se tiene en proyecto la ampliación a 1000 lps, la cual será suministrada a partir de ampliaciones de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

Con agua de lluvia se seleccionaron 6 sitios al pie de la Sierra Nevada, donde podrían perforarse 6 pozos de recarga a través de los cuales se podrían inyectar 20 lps por pozo durante 6 meses del año, lo que da un caudal continuo de 60 lps.

## RECOMENDACIONES

Se hace notar que los datos arrojados en la cuantificación del acuífero pueden variar de un año a otro, de acuerdo tanto a la extracción por bombeo como al cambio de almacenamiento, los cuales son variables. Por ello, se recomienda efectuar balances geohidrológicos para los 10 años anteriores, utilizando una metodología consistente que permita comparar la forma como ha evolucionado el déficit del acuífero y poder simular su comportamiento a futuro.

En caso de que el suministro de agua a la ciudad lo permita, disminuir la extracción de agua en el área entre Tlalpan y Xochimilco, zona donde se ha venido incrementando en los últimos años el abatimiento de los niveles.

Aplicar un modelo matemático del acuífero, actualizando los datos de extracción, recarga y niveles, a fin de realizar una calibración adecuada y simular el comportamiento futuro bajo diferentes políticas de extracción.

Continuar con la medición piezométrica en pozos piloto cuando menos una vez por año.

Realizar estudios detallados de sitios para recarga artificial. Programas de recarga y diseños ejecutivos.

Sanear los flancos de las sierras que borden a la zona metropolitana, para procurar la recarga artificial con agua de lluvia, antes de que ésta se contamine a lo largo de los cauces actualmente contaminados.

Monitorear el acuífero para conocer los efectos de la actual recarga artificial a través del estanque de Santa Catarina.

Efectuar estudio de detalle para incrementar la infiltración de agua sobre los flancos de las sierras, mediante reforestación y construcción de presas de gaviones.



# ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO 1995

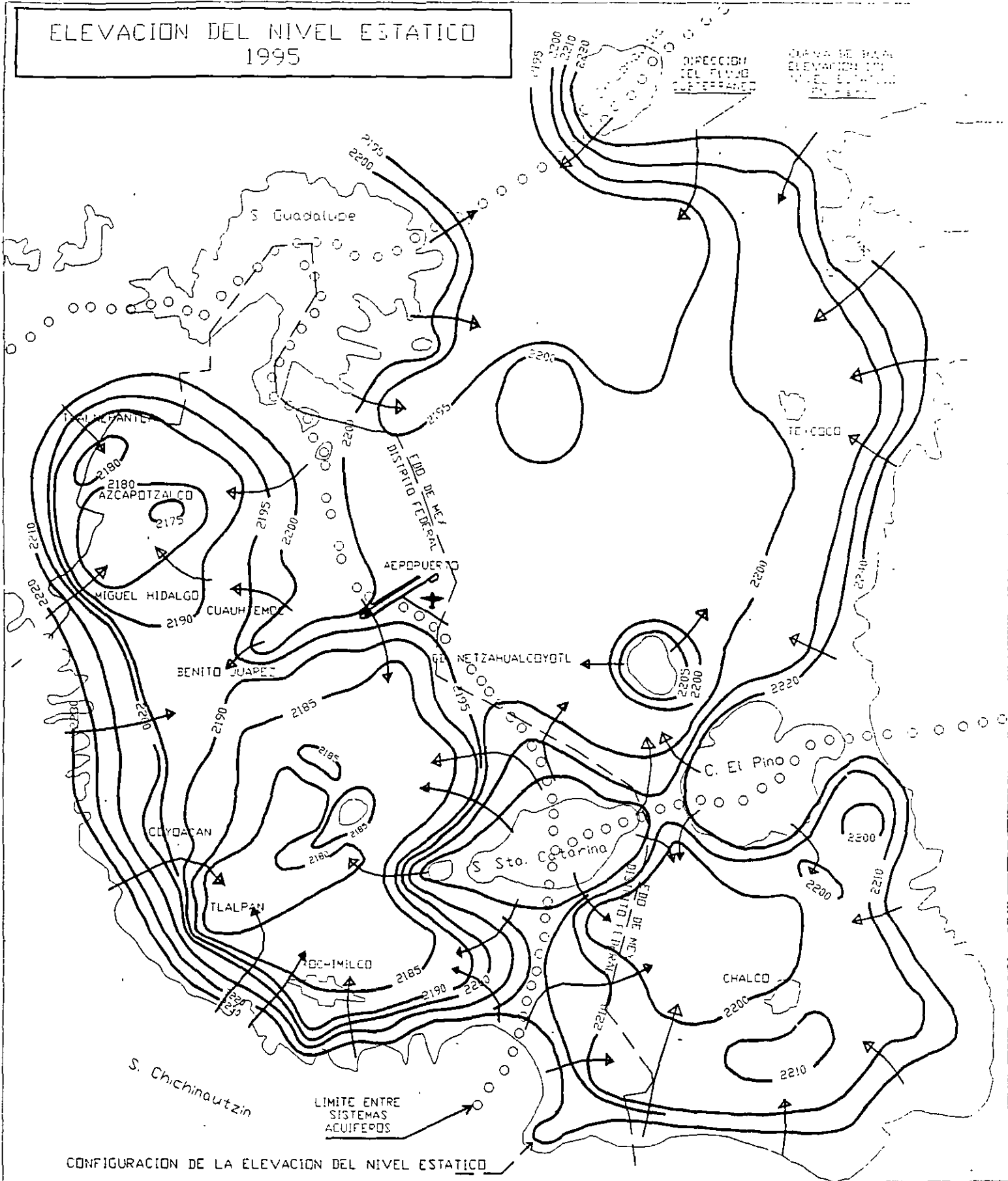


FIGURA 3.2

PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO  
1995

CURVA DE ISOBAL  
PROFUNDIDAD AL  
NIVEL ESTÁTICO  
EN METROS

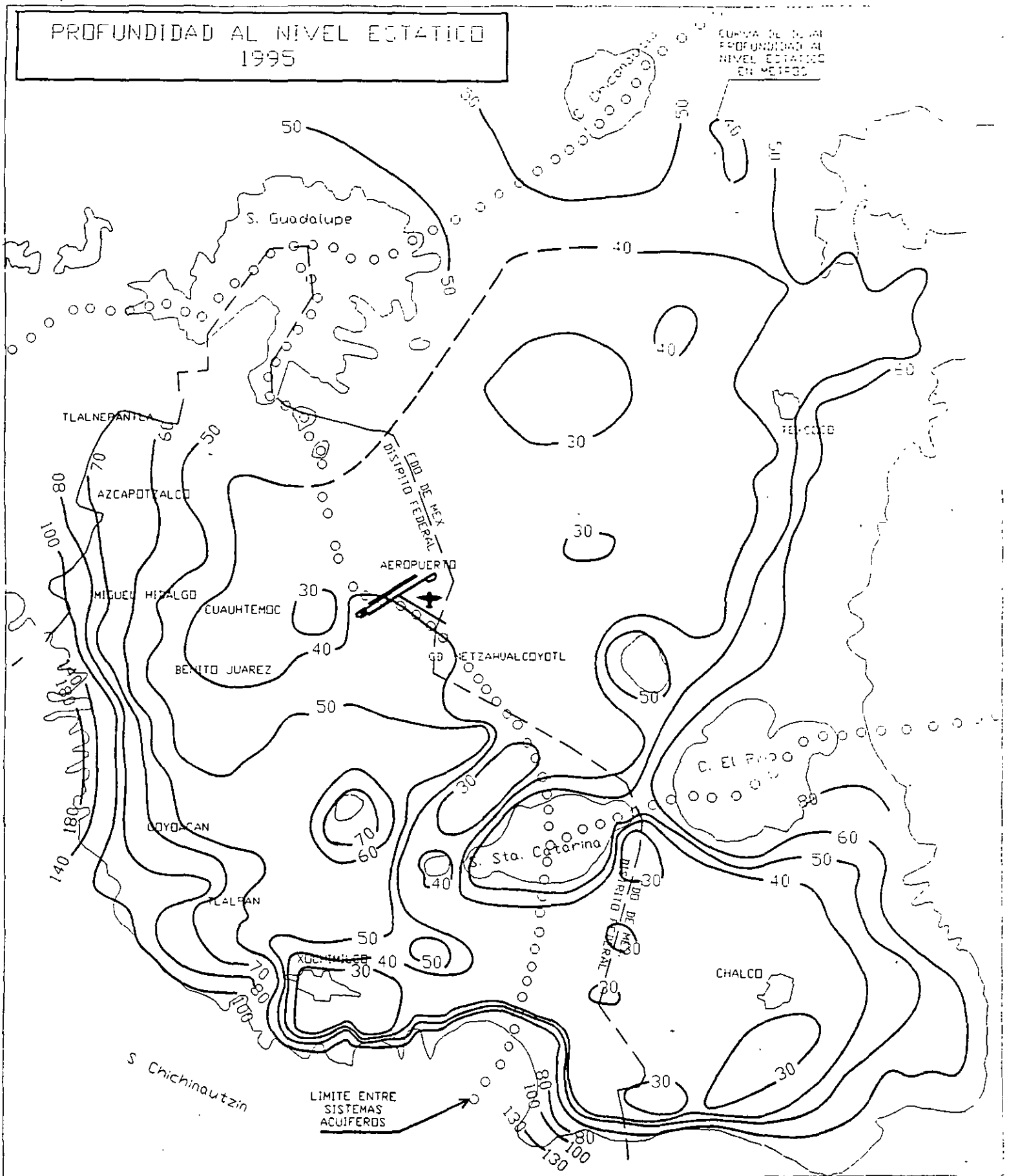


FIGURA 3.1

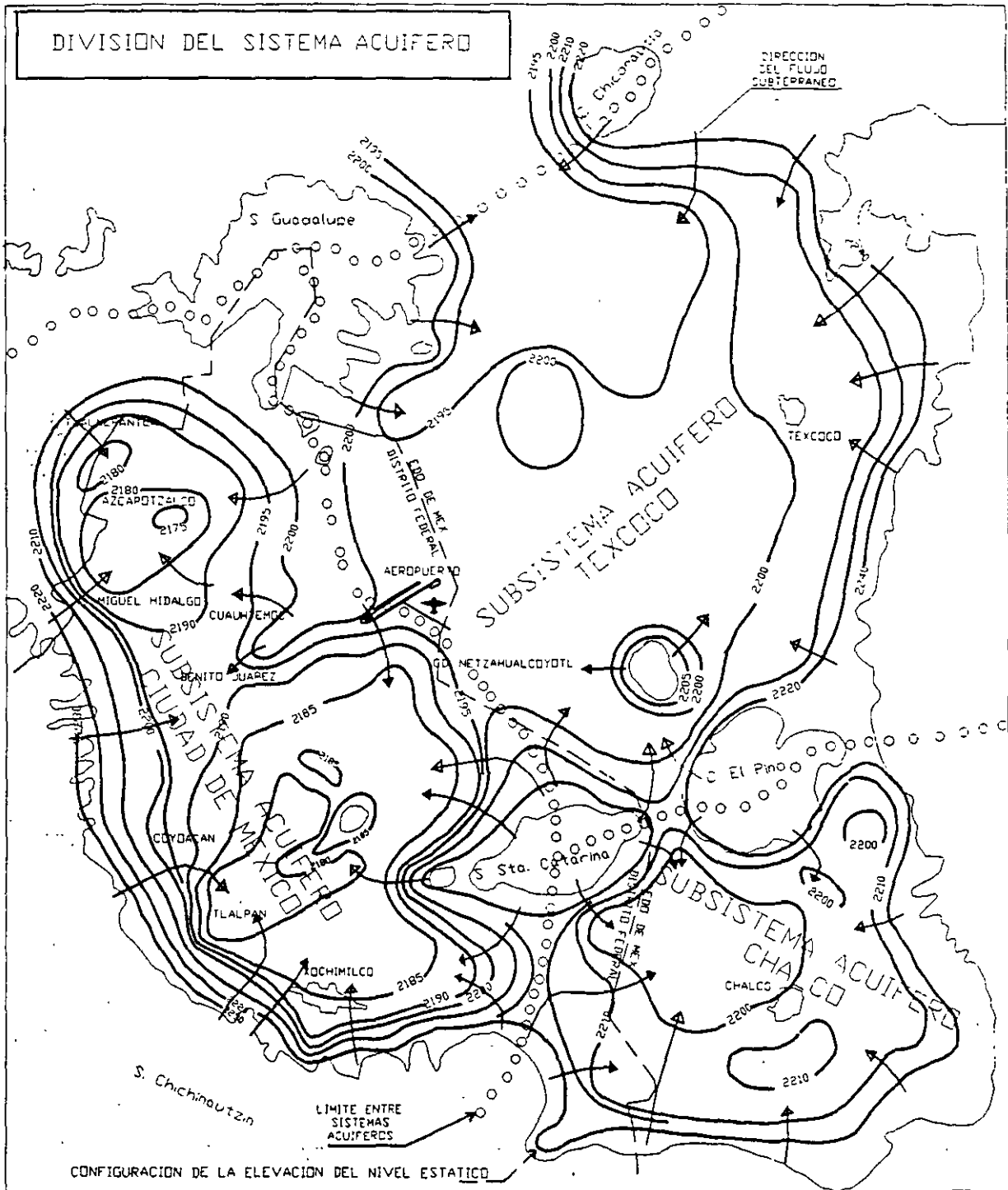


FIGURA 4.2

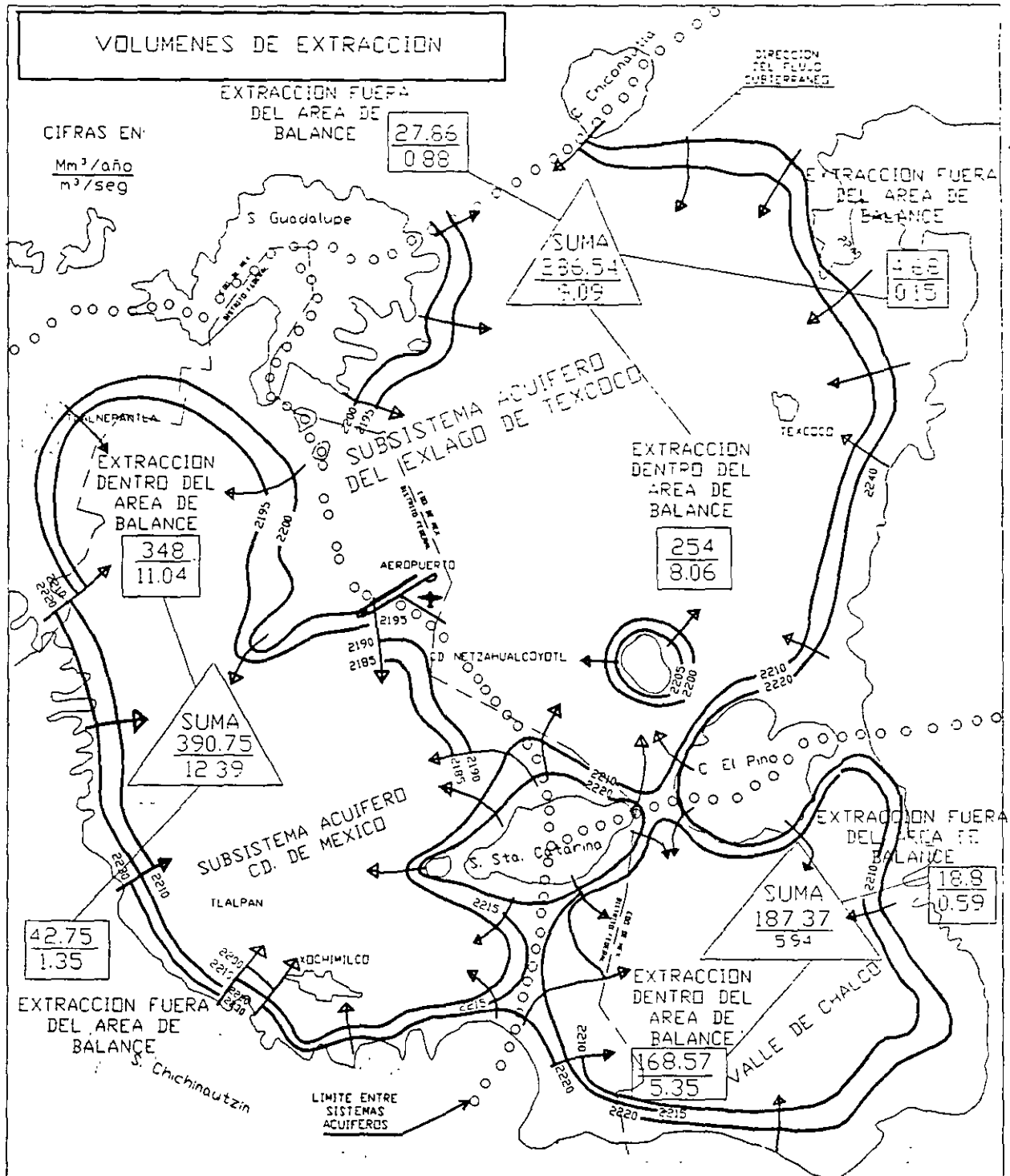


FIGURA 4.3

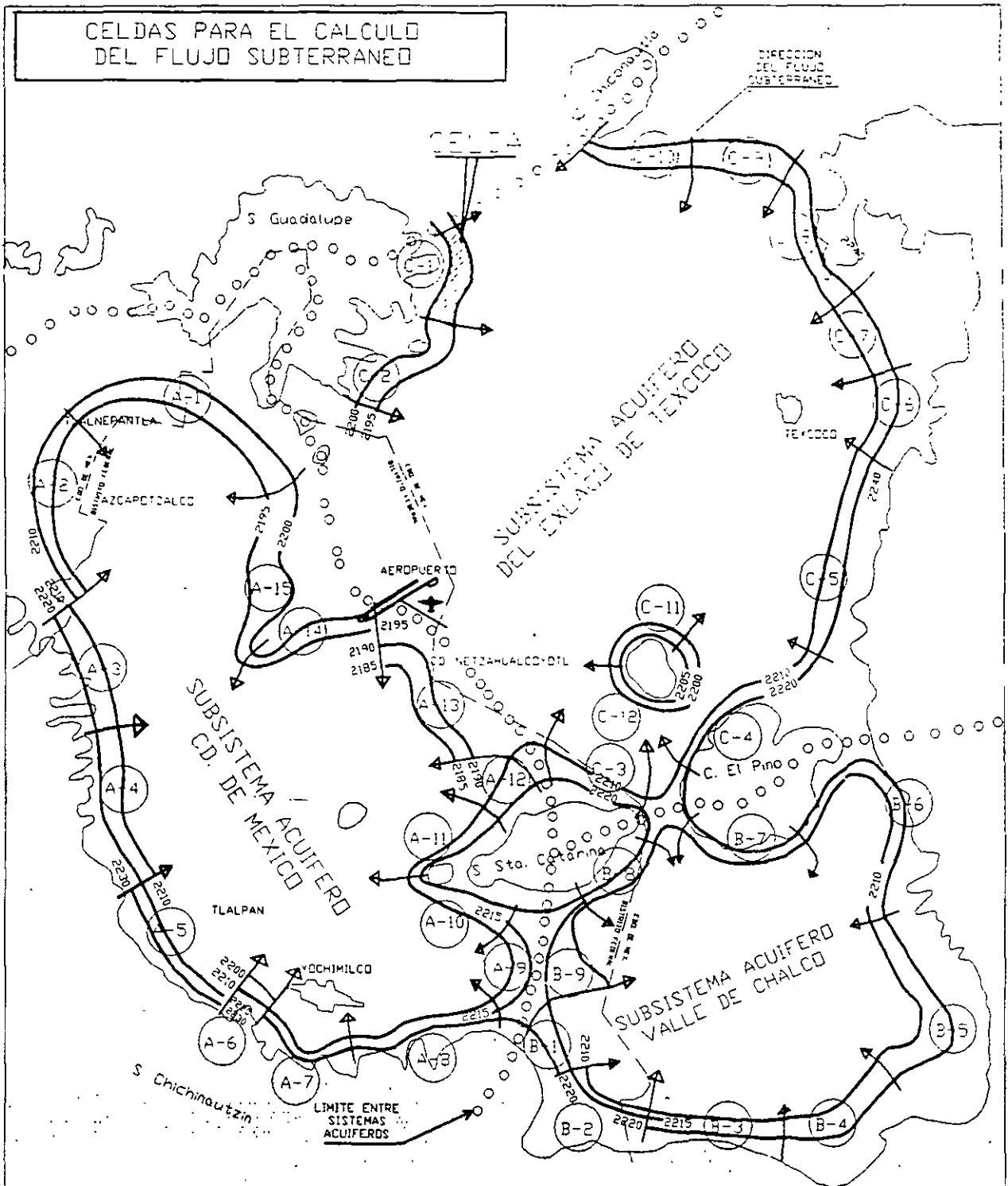


FIGURA 4.5

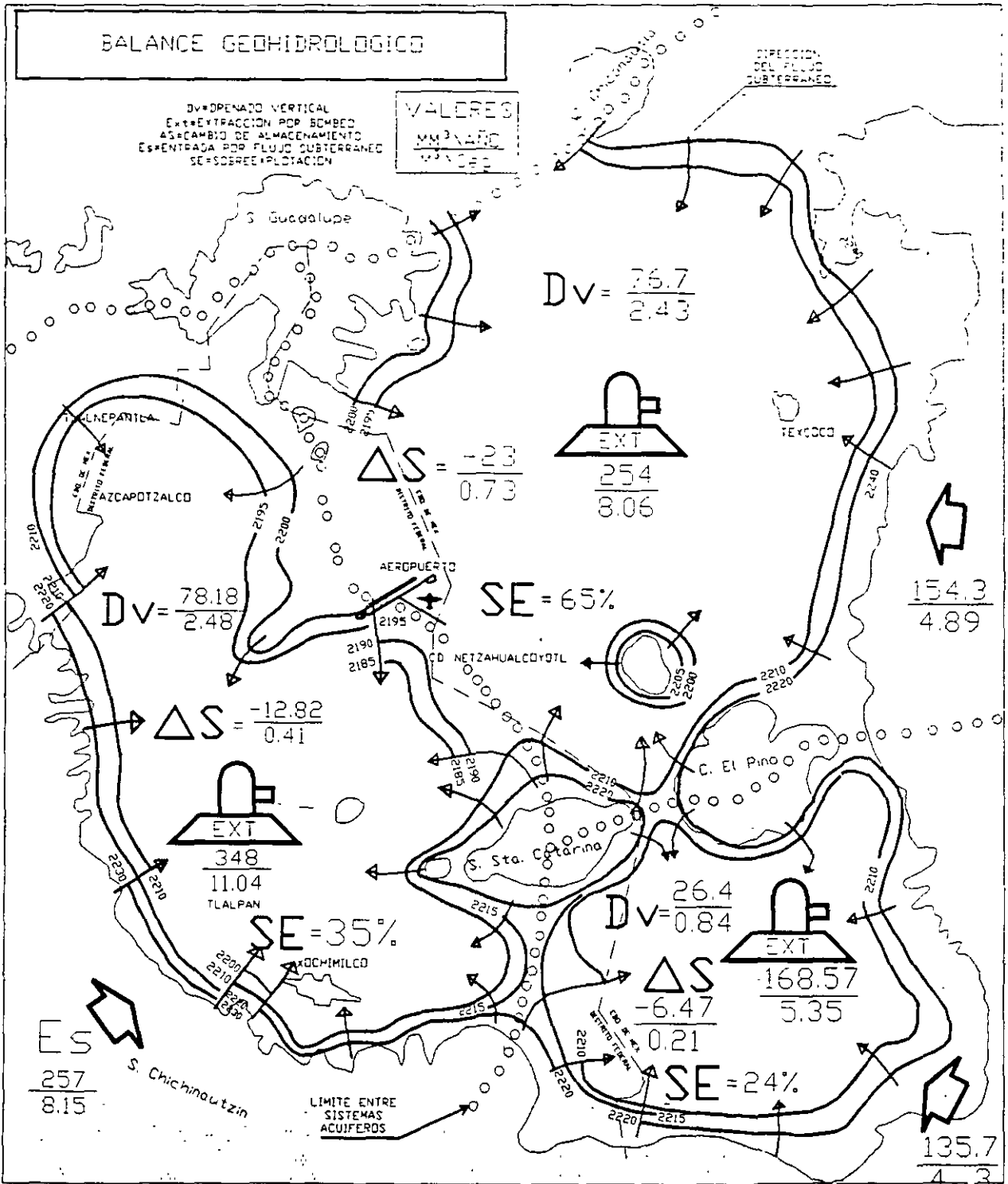


FIGURA 4 6

# Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del valle de México

Dirección General de Construcción y Operación  
Hidráulica—Secretaría General de Obras—IDDF  
Lesser y Asociados, S A de C V

*Una de las acciones del Programa de Uso Eficiente del Agua consiste en la recarga artificial al acuífero de la ciudad de México, lo que puede ofrecer beneficios considerables. Sin embargo, existen interrogantes sobre algunos de los efectos que pueda tener dicha recarga, por lo que se determinó que era indispensable llevar a cabo estudios que ayudaran a establecer un proyecto a gran escala. Bajo esta óptica, se formularon los lineamientos para un programa general de recarga al acuífero del valle de México mediante la experimentación en varios pozos, cuyos resultados iniciales se presentan en este trabajo.*

La ciudad de México requiere de grandes volúmenes de agua, que actualmente se obtienen tanto de pozos dentro de la ciudad misma, como importando agua de cuencas externas. Los pozos que explotan agua del subsuelo, extraen en conjunto volúmenes tales que sobrepasan la recarga natural del acuífero, lo que ocasiona una explotación reflejada en el abatimiento de los niveles del agua, los cuales alcanzan valores máximos en algunos sitios del orden de 3 metros por año. Los requerimientos de agua para la ciudad han obligado a continuar esta explotación.

Los abatimientos de los niveles del acuífero provocan la compactación de las arcillas y el hundimiento del terreno, lo que a su vez origina diversos problemas, principalmente en el drenaje ciudadano. En la actualidad, los asentamientos del terreno tienen un valor medio de 10 cm anuales, aunque existen valores extremos de 40 centímetros.

Paradójicamente a la explotación del acuífero, el sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de México no ha operado a su máxima capacidad en virtud de que el número de usuarios de este recurso tradicionalmente no ha sido importante. El reúso es una opción para resolver la problemática del abastecimiento de agua potable y representa un paso importante en la optimización del aprovechamiento de los recursos hidráulicos. A

su vez, la recarga artificial de acuíferos con aguas renovadas representa uno de los alcances más significativos de cualquier programa de reúso, ya que su finalidad es la de preservar los recursos acuíferos.

Por lo anterior, se ha deducido que la recarga artificial del acuífero mencionado presenta grandes beneficios; ya que, por una parte, se podrían atenuar los asentamientos del terreno y con ello, proteger en forma local o regional las obras hidráulicas de la superficie, como drenajes y un gran número de cimentaciones de obras civiles. Por otro lado, sería factible controlar el flujo subterráneo y, entre otras cosas, formar barreras. A la vez, se podría utilizar el acuífero como una zona de almacenamiento de agua para su uso futuro. Sin embargo, existen interrogantes sobre algunos de los efectos que podría causar la recarga y el riesgo potencial de afectar de manera importante e irreversiblemente la calidad del agua subterránea, por lo que se consideró indispensable llevar a cabo estudios que generaran la información necesaria para instrumentar un proyecto a gran escala. Tales estudios deben contemplar todos aquellos factores determinantes en los procesos que afectan la composición físico-química y bacteriológica, tanto del agua de recarga como de la almacenada en el acuífero, a fin de contar con elementos de análisis para evaluar el

impacto que tendría un proyecto de este tipo en la disponibilidad de agua potable en un acuífero sujeto a la recarga.

### Geología

La ciudad de México se emplaza dentro de una antigua cuenca lacustre cerrada en la que actualmente el drenaje se lleva a cabo de manera artificial hacia el norte. Los materiales que constituyen el subsuelo del valle corresponden a depósitos de aluviones y sedimentos lacustres cuaternarios. Los primeros provenían de las laderas y fueron transportados hacia el centro del valle por corrientes fluviales. Por su parte, los sedimentos lacustres en general sobreyacen a los aluviones y también se interdigitan con ellos a profundidad. En los flancos del valle limitándolo, básicamente hacia el poniente, sur y oriente, se encuentran elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas que en su mayor parte se comportan como permeables. En las estribaciones de la sierra de las Cruces se encuentra una serie de antiguos depósitos volcánicos y fluviales conocida como Formación Tarango, que produce las lomas del poniente y está constituida primordialmente por arenas, conglomerados, cenizas volcánicas, piroclásticos y aglomerados de mediana a baja permeabilidad. Los materiales volcánicos, en especial las lavas y piroclásticos de tipo basáltico, forman la parte sur del valle y hacia sus estribaciones se encuentran interdigitados con los materiales aluviales y lacustres.

### Geohidrología

Las rocas que constituyen el subsuelo del valle de

México pueden agruparse en tres tipos de acuerdo con sus características o capacidad para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento del agua subterránea: arcillas lacustres, rellenos aluviales, basaltos y piroclásticos (véanse ilustraciones 1 y 2).

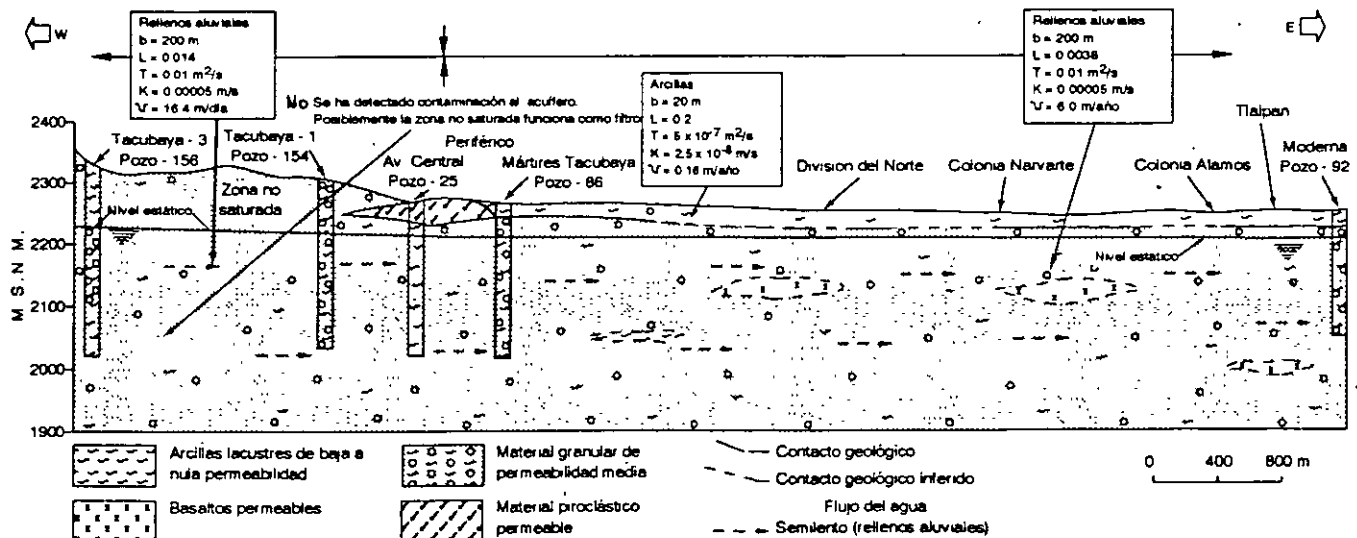
#### Arcillas lacustres

El primer grupo está formado por arcillas lacustres que cubren la mayor parte del valle. Corresponden a sedimentos finos de permeabilidad reducida, originados por los antiguos lagos del valle de México y tienen espesores que varían de 15 a 60 m. Estudios de mecánica de suelos han identificado, dentro de este grupo, a dos horizontes de arcillas denominadas Formación Arcillosa Superior y Formación Arcillosa Inferior, a las cuales las divide un horizonte arenoso denominado capa dura. Geohidrologicamente este grupo se clasifica como acuitardo. Se encuentra saturado, descansa sobre materiales granulares permeables hacia donde se drena. La pérdida de agua del acuitardo produce la compactación de las arcillas, lo cual es la causa de los hundimientos del terreno. Existen también grietas que se han formado en las arcillas, a través de las cuales se infiltra agua al acuífero a partir de la superficie.

#### Rellenos aluviales

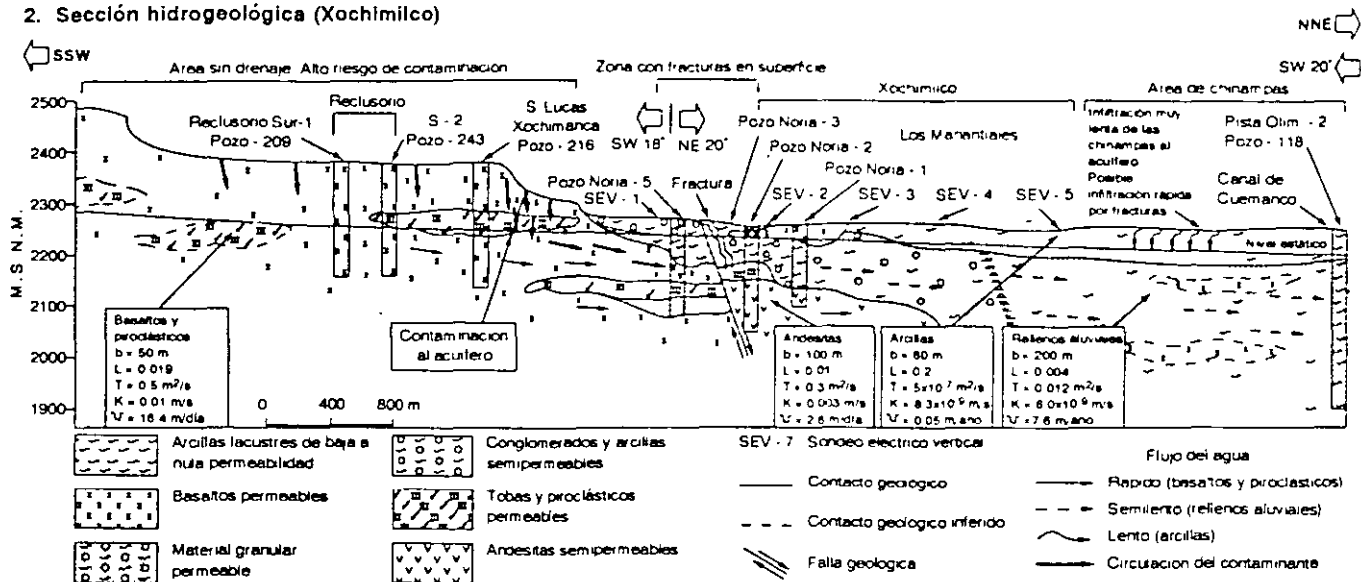
Las rocas o materiales del segundo grupo corresponden a los rellenos aluviales (gravas, arenas y arcillas). Subyacen a las arcillas lacustres y forman la mayor parte del acuífero de la ciudad; dentro de estos materiales se llegan a encontrar cuerpos tabulares de derrames lávicos de composición basáltica. Tienen

#### 1. Sección hidrogeológica (Nápoles)





2. Sección hidrogeológica (Xochimilco)



una transmisibilidad que varía de 0.001 a 0.012 m<sup>2</sup>/s; la velocidad del flujo de agua subterránea es de 2.5 a 39.4 m/año.

Basaltos y piroclásticos

El tercer grupo de materiales corresponde a basaltos y piroclásticos, los cuales tienen una alta permeabilidad y permiten el libre flujo del agua a través de ellos. Se encuentran generalmente en las elevaciones topográficas que constituyen las sierras del Chichinautzin y Santa Catarina, y en ocasiones, se prolongan en el subsuelo interdigitados con los aluviones. Su transmisibilidad es de 0.5 m<sup>2</sup>/s. La velocidad del flujo subterráneo, que varía de 2.3 a 16.4 m/día, depende de la transmisibilidad y del gradiente hidráulico (el cual en ciertos lugares es muy reducido).

Secciones

La sección de la ilustración 1 muestra la geología y geohidrología de la zona central de la ciudad de México. La mayor parte del subsuelo se encuentra constituido por materiales aluviales como arenas, arcillas y gravas, en ocasiones incluyendo tobas; en general, se considera que presentan una permeabilidad media. Llegan a incluir horizontes de materiales piroclásticos y derrames lávicos de composición tanto basáltica como andesítica.

Cubriendo a la mayor parte de la sección y con un espesor aparentemente de 20 m, se encuentra una capa de materiales arcillosos originados por el antiguo lago de México. Estas arcillas presentan de reducida a nula permeabilidad.

En la ilustración 2 se muestra la composición del sur de la ciudad de México. Corresponde a la estribación de la sierra del Chichinautzin, la que está compuesta por basaltos y materiales piroclásticos de alta permeabilidad, en los que la infiltración es tan alta que prácticamente no existe escorrentía superficial. Los pozos perforados en este tipo de rocas han alcanzado más de 200 m de profundidad. Geológicamente se considera que el espesor de los basaltos en la sierra puede alcanzar varios cientos de metros.

En la zona del valle se encuentran materiales granulares entre los que predominan los finos hacia la superficie; éstos corresponden a arcillas lacustres producto de la sedimentación en el antiguo lago de Xochimilco. Las arcillas tienen un espesor de hasta 60 m y se encuentran cubriendo a los materiales granulares; corresponden a arenas, arcillas y gravas que presentan una permeabilidad media. A la altura del pozo Noria 5, se detectó en la superficie una fractura que podría corresponder a una falla, inferida también por la variación litológica tan notable que presentan los pozos Noria 5 y Noria 2. Estas fracturas o fallas podrían corresponder a zonas de flujo preferente de agua subterránea. En la parte central de la sección, a la altura de los pozos mencionados, se encuentran rocas andesíticas constituyendo parte del subsuelo. Estos materiales se consideran de una permeabilidad media.

Requerimientos para la recarga

La recarga artificial al acuífero de la ciudad de México puede presentar condiciones favorables para la disminución de la subsidencia del terreno; para el

control del flujo subterráneo; para un mejor manejo del acuífero y para el almacenamiento de agua para uso futuro, con lo que a largo plazo se podría reducir la importación de agua de cuencas externas. Para efectuar la recarga es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- Existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero. Dichos puntos se pueden alcanzar por medio de pozos, estanques y galerías filtrantes, aunque estos dos últimos requieren de una gran superficie de terreno. Conviene anotar que las condiciones geológicas de la cuenca impiden la infiltración del agua a partir de la superficie prácticamente en toda la zona del antiguo lago, por lo que ésta sólo se puede realizar en los flancos de las sierras. Por su parte, los pozos sí son un medio adecuado, ya que permiten la recarga al acuífero a través de ellos y no requieren de gran extensión de terreno.
- Existencia de volúmenes de agua susceptibles de utilizarse para la recarga. Los volúmenes disponibles en la ciudad de México, corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento distribuidas prácticamente en toda la ciudad, que se deben someter a un tratamiento adicional para que alcancen la calidad deseable para recarga. Otra posible fuente sería el agua de lluvia.

### Sitios seleccionados para la recarga

Se visitaron todos los pozos cancelados o fuera de operación ubicados en la ciudad de México, y se seleccionaron 82 que presentaban condiciones favorables para utilizarlos como puntos para recarga. De éstos, se eligió en primer término el pozo San Luis 15 para un programa inmediato de experimentación.

#### Pozo de recarga San Luis 15

Se seleccionó el pozo San Luis 15 para realizar la recarga experimental al acuífero, debido a las siguientes características: (1) por encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco; (2) porque actualmente no se utiliza para agua potable y (3) por encontrarse lejano de otros pozos de agua potable, evitando de esta manera, el riesgo de una posible contaminación directa al efectuar la recarga.

El agua seleccionada para la recarga corresponde al efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis Tlaxialtemalco, dado que ésta cuenta con tratamiento a nivel terciario.

### Características

El pozo San Luis 15 se localiza en la porción sur de la zona urbana del Distrito Federal, junto al poblado de San Gregorio Atlapulco y a 4 km al oeste de la planta de San Luis Tlaxialtemalco (véase ilustración 3). Su nivel estático se encuentra a 30.06 m de profundidad y el nivel dinámico a 30.77 m. Tiene una profundidad total de 64 m y fue perforado con una máquina de percusión a una profundidad total de 66.85 m. Está ademado con tubería ciega hasta los 18 m de profundidad en un diámetro de 18 pulgadas; el resto del pozo se encuentra libre de tubería de ademe. Este pozo fue perforado en 1958 y en el aforo efectuado en esa época se midió un nivel estático de 16.8 m, un nivel dinámico a los 17.10 m con caudal de extracción de 100 Vs y un rendimiento específico de 333 Vs por metro de abatimiento. Dicho pozo se encuentra al pie de la sierra del Chichinautzin, la cual está constituida por materiales volcánicos, basálticos, entre los que predominan los derrames lávicos asociados con piroclásticos, que varían desde cenizas hasta escorias de gran tamaño.

El corte litológico de este pozo indica que en los primeros 9 m se encontraron fragmentos de material basáltico empacados en arcilla y de los 9 a los 66.85 m, basaltos, que varían en compacidad o forma de presentación. Los materiales basálticos que constituyen esta zona tienen un gran número de fracturas que le imprimen una alta permeabilidad, lo cual es notorio al observar los rendimientos específicos de los pozos que se encuentran en esta área.

La velocidad del agua en este tipo de materiales es difícil de cuantificar. La transmisibilidad es alta

### 3. Plano de localización



y el gradiente hidráulico muy bajo. Por ello, el agua tiene facilidad para circular rápidamente, pero el bajo gradiente ocasiona que ésta se encuentre casi estática. Considerando un espesor de basaltos de 150 m, un gradiente hidráulico de 0.015, una transmisibilidad de 0.05 m<sup>2</sup>/s y una permeabilidad de 0.0033 m/s, se obtiene que la velocidad de circulación del agua subterránea es de 4.3 m/día.

#### Calidad del agua de recarga

Se programa utilizar agua tratada proveniente de la planta de San Luis Tlaxialtemalco, cuyas normas establecidas para el efluente se presentan en el cuadro 1.

#### Caudal de inyección

Debido a que el pozo San Luis 15 se encuentra atravesando materiales basálticos de alta permeabilidad, puede permitir la infiltración de un caudal alto de agua. En la primera etapa del proyecto, se inyectará un caudal de 75 l/s que corresponde al gasto de operación actual de la planta de tratamiento. En el futuro se estudiará la conveniencia de incrementar dicho caudal.

#### Adaptación del pozo de recarga

Para la recarga a través del pozo San Luis 15, se ventilará el agua por gravedad desde la superficie y se harán mediciones piezométricas, de caudal y de calidad del agua. De acuerdo con las experiencias de recarga artificial que se realizan en la planta Fred Herbey de El Paso, EUA, es conveniente disponer el agua de recarga por medio de un tubo abajo del nivel estático, para evitar la aereación que provoca taponamiento del pozo. Tomando en cuenta lo anterior y el diámetro actual del pozo, se consideró que la forma más apropiada consistía en colocar tres tuberías de inyección de 4 pulgadas de diámetro cada una (véase ilustración 4), para permitir una recarga unitaria (por cada tubo de 4 pulgadas) cercana a los 25 l/s. Además, se tiene la ventaja de que para caudales menores se utilizan sólo una o dos tuberías, según se requiera.

La adaptación realizada consistió en la colocación de una válvula de 10 pulgadas de diámetro que se conecta por medio de una brida a la conducción proveniente de la planta de San Luis Tlaxialtemalco. La válvula mencionada tiene tres salidas de 4 pulgadas que conectan con un codo de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 32 m de longitud, colocada dentro del pozo.

### 1. Normas de calidad del efluente de la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco

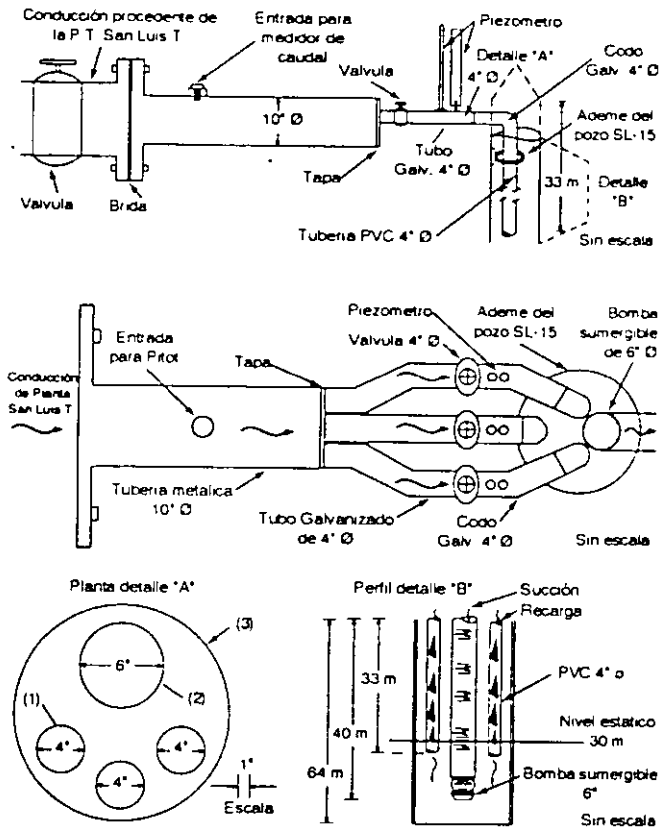
Parametro	Norma del efluente
<b>Físicos</b>	
pH	6.5
Color	6.0
Conductividad (mmhos/cm)	200.0
Sólidos totales	3000.0
S.T.F.	1500.0
S.T.V.	1000.0
S.D.T.	500.0
S.D.F.	1000.0
S.D.V.	500.0
S.S.T.	50.0
S.S.F.	500.0
S.S.V.	15.0
Sólidos sedimentales (ml/l)	1.0
<b>Químicos orgánicos</b>	
Alcalinidad total	500.0
Alcalinidad a la fenolftaleína	10.0
Carbonatos	10.0
<b>Dureza total</b>	
Bicarbonatos	0.0
Cloruros	500.0
Nitrogeno amoniacal	5.0
Nitrogeno total	10.0
Fosforo total	50.0
<b>Fosfatos totales</b>	
Boro	2.0
<b>Químicos orgánicos</b>	
D.B.D. soluble	20.0
D.Q.O. soluble	40.0
Grasas y aceites	50.0
S.A.A.M.	1.0
<b>Biológicos</b>	
Coliformes totales col/100 ml	4000.0
<b>Metales</b>	
Calcio soluble	150.0
Magnesio soluble	100.0
Sodio soluble	100.0
Potasio soluble	150.0
Calcio total	150.0
Magnesio total	100.0
Sodio total	100.0
Potasio total	150.0
Hierro soluble	0.05
Manganeso soluble	0.05
Plomo soluble	0.05
Cadmio soluble	0.01
Mercurio soluble	1.5 E-4
Arsénico soluble	1.7 E-4
Cromo soluble	0.5
Hierro total	0.30
Manganeso total	0.05
Plomo total	0.05
Cadmio total	0.01
Mercurio total	1.5 E-4
Arsénico total	1.75 E-4
Cromo total	0.05

Concentraciones en mg/l, excepto cuando se indican S.A.A.M. y pH sin unidades

#### Infraestructura para el monitoreo

Junto al pozo anterior, se perforaron tres pozos cuyo objetivo es contar con sitios "aguas abajo" del flujo subterráneo del pozo de recarga, a través de los cuales se puedan obtener muestras de agua

#### 4. Adaptación del pozo SL-15 para recarga



del acuífero, así como medir la posición y posibles fluctuaciones del nivel piezométrico al efectuar la recarga artificial.

#### Colmatación por la recarga

Uno de los problemas que se presenta durante la recarga artificial es la colmatación o taponamiento del pozo y de su entorno, producido por la acumulación de sólidos finos, y reacciones químicas. Para conocer el grado de colmatación en diferentes medios y bajo diferentes recargas y, determinar técnicas de limpieza y eliminación del taponamiento, paralelamente a los trabajos de recarga se construyeron módulos a escala para experimentación de la colmatación.

#### Conclusiones

- Las características geológicas y geohidrológicas del acuífero de la ciudad de México permiten su recarga.
- Los volúmenes susceptibles de ser utilizados para la recarga corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento.
- Se visitaron todos los pozos cancelados o fuera de operación de los cuales se encontraron 82

como sitios posible de ser incorporados a un programa de recarga. De ellos, se seleccionó el pozo San Luis 15, para un programa inicial a nivel experimental.

- El pozo San Luis 15 fue seleccionado para recarga por: (1) encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxiátemalco; (2) porque actualmente no se utiliza para agua potable y (3) por encontrarse lejano de otros pozos de agua potable.
- El agua para recarga proviene de la planta de San Luis Tlaxiátemalco, la cual se trata a nivel terciario y cumple con las normas para inyección.
- El Pozo San Luis 15 puede permitir una recarga de 75 l/s que corresponde al gasto de operación actual de la planta.
- La recarga es por gravedad y se dispone mediante tuberías abajo del nivel estático para disminuir la colmatación.
- Se encuentran tres pozos de monitoreo junto al pozo San Luis 15, los cuales se muestrean y analizan periódicamente.
- Se están realizando experimentaciones a escala para definir el grado de colmatación o taponamiento de los pozos durante la recarga, bajo diferentes gastos de inyección y en diferentes litologías.

#### Referencias

- Aller, Linda et al. *Handbook of suggested practices for the design and installation of ground-water monitoring wells*, National Water Well Association, 398 pp., 1989
- DDF *Proyecto de demostración de recarga de aguas residuales tratadas*, elaborado por PLANIMEX, Ingenieros Consultores, S. A para la DGCOH, 1982.
- DDF *Construcción y operación de un módulo experimental de recarga artificial en la zona de San Luis Tlaxiátemalco*, elaborado por Lesser y Asociados, S. A para la DGCOH, 1989.
- FAO. *Recarga de acuíferos. Apoyo de emergencia a la zona lacustre de Xochimilco-Tláhuac*, elaborado por el Ing. Juan Manuel Lesser, 1988
- Kerr, Robert S. *An introduction to the technology of subsurface wastewater injection*, US Environmental Protection Technology Series, 345 pp., 1981.
- PettyJohn, Wayne A. *Introduction to artificial ground-water recharge*, NWWA/EPA Series. 44 pp., 1981.
- Scalf, Marion R. et al. *Manual of ground-water sampling procedures*, NWWA/EPA Series. 93 pp., 1981.
- United Nations. *Ground-water storage and artificial recharge*, Natural resources/Water Series No. 2, 269 pp., 1975.

# Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México

Juan Manuel Lesser Illades  
Felipe Sánchez Díaz  
David González Posadas

Lesser y Asociados

*Bajo el Valle de México se encuentra uno de los acuíferos más importantes del país, tanto por su magnitud como por el destino de sus aguas. De él se extraen alrededor de 500 millones de m<sup>3</sup> anuales de agua mediante más de 100 pozos, tanto particulares como municipales. De acuerdo con su constitución y su funcionamiento hidrológico, el valle se divide en tres subsistemas acuíferos: el granular de la zona metropolitana de la ciudad, que incluye la Formación Tarango de las lomas del poniente y los materiales granulares permeables del valle; el localizado en el área de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, que incluye un paquete acuífero de basaltos y aluviones en su parte central, y de basaltos y piroclásticos en las sierras de Santa Catana y Chichinautzin; y el correspondiente al Lago de Texcoco donde se cuenta con escasa información; aparentemente, el agua se encuentra estática o con movimiento muy reducido hacia el oeste. La cuantificación del acuífero actualizada hasta octubre de 1987 arrojó los datos siguientes (expresados en millones de metros cúbicos por año): la entrada por flujo subterráneo fue de 384, la infiltración de 83, la salida subterránea por flujo hacia Azcapotzalco ascendió a 24, la extracción por bombeo fue de 476 y el cambio de almacenamiento fue negativo y llegó hasta 33. El abatimiento anual de los niveles estáticos varía de 0 a 3 m y los mayores se localizan en Azcapotzalco y Tlalpan, donde se han formado conos piezométricos. La sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado la deshidratación y compactación de las arcillas que cubren el valle y el asentamiento o hundimiento del terreno, que en ocasiones alcanza hasta 50 centímetros anuales.*

## Geohidrología de la ciudad de México

La ciudad de México está emplazada dentro de una antigua cuenca lacustre cerrada en la que actualmente el drenaje se lleva a cabo en forma artificial hacia el norte. Los materiales que constituyen el subsuelo corresponden a depósitos de aluviones y sedimentos lacustres. Los primeros provenían de las laderas y fueron transportados hacia el centro de la zona por corrientes fluviales; los segundos a veces sobreyacen a los aluviones y se interdigitan con ellos a profundidad. En los flancos del valle y limitándolo, principalmente hacia el sur, oriente y poniente, se encuentran elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas que en su mayor parte se comportan como permeables. Por su posición topográfica, estas rocas funcionan como zona de recarga natural del acuífero.

En las estribaciones de la Sierra de Las Cruces hay una serie de antiguos depósitos volcánicos y fluviales conocida como Formación Tarango, que constituye las lomas del poniente, donde primordialmente se encuentran arenas, conglomerados, cenizas volcánicas, piroclásticos y aglomerados de mediana a baja permeabilidad. Los materiales volcánicos, en especial las lavas y los piroclásticos de tipo basáltico, forman la parte sur de la zona, y hacia sus estribaciones están interdigitados con los materiales aluviales y lacustres.

## Funcionamiento del acuífero

El acuífero de la ciudad de México se recarga básicamente a partir de la infiltración de agua de lluvia que se precipita sobre los flancos de las sierras del poniente, sur y oriente, de donde fluye hacia

el centro. En los flancos de la Sierra de Santa Catarina, ubicada en la porción central sur del Distrito Federal, también existe una recarga hacia el valle. De acuerdo con la constitución del subsuelo y con el funcionamiento geohidrológico, el valle se puede dividir en tres subsistemas acuíferos

El primero de ubica en la zona metropolitana. En general, está constituido por materiales granulares de permeabilidad media y baja, y es recargado principalmente por la sierra del poniente y por los alrededores de la Delegación de Tlalpan. En el oriente, a la altura del aeropuerto, hay un flujo subterráneo que corre en dirección este-oeste, hacia el centro de la zona metropolitana. En la parte central de la ciudad existen un cono y un domo piezométrico; el primero corresponde a una salida de agua hacia el área de Azcapotzalco, provocada por la intensa explotación que se hace del acuífero en esa zona, el segundo, se localiza entre las delegaciones Venustiano Carranza y Cuauhtémoc, y aparentemente es el resultado de varios factores como el tipo y la distribución de materiales que constituyen el subsuelo; la extracción diferencial de agua subterránea; las fugas en las redes de distribución de agua potable y la presencia de grietas que facilitan el paso del agua al acuífero.

El segundo subsistema corresponde a la zona sur del Valle de México, entre Xochimilco, Tláhuac y Chalco. Es recargado por la infiltración del agua de lluvia en las estrificaciones de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, mismas que lo limitan al norte y al sur. El flujo subterráneo se establece hacia el centro de los valles de Xochimilco y Chalco, donde antiguamente ocasionaba un nivel freático somero. En la actualidad, el agua se extrae a través de pozos y el nivel ha ido descendiendo.

El último subsistema acuífero corresponde al área del Lago de Texcoco, donde la información geohidrológica es escasa. Existe una recarga procedente de la sierra del oriente, la cual fluye en dirección al vaso del Lago de Texcoco. No hay datos sobre el movimiento del lago, pero aparentemente el agua se encuentra estática. Los materiales que constituyen esta zona son de baja permeabilidad; no existen extracciones considerables y el gradiente es casi nulo. En la porción occidental del vaso, a la altura del Aeropuerto Benito Juárez, se vuelve a detectar el flujo subterráneo en dirección este-oeste, se incrementa el gradiente y se pasa al primero de los subsistemas comentados.

### **Profundidad del nivel estático**

Con los valores de profundidad del nivel estático

en 209 pozos particulares registrados en la zona metropolitana, así como en 249 del Departamento del Distrito Federal y en 242 pozos agrícolas de la porción oriental, se trazó una configuración de la profundidad del nivel estático para septiembre de 1987 (véase ilustración 1). En el poniente de la zona, la profundidad se incrementa hacia la sierra y se detectan valores entre 70 y 180 m. Hacia la parte central de la ciudad, el gradiente es muy suave; la profundidad varía de 20 m en el Aeropuerto Benito Juárez a 50 m en el flanco poniente de la ciudad.

En la porción suroccidental, entre Coyoacán y el Cerro de La Estrella, la profundidad del nivel del agua permanece muy similar, entre 40 y 50 metros.

En la zona sur, entre Xochimilco y Chalco, los niveles son someros; se encuentran profundidades de 10 m al suroeste de Chalco que llegan hasta 40 m en toda la parte plana y baja de la zona. Hacia las sierras, la profundidad al nivel del agua tiende a incrementarse y se registran valores de hasta 70 metros.

En los alrededores del Vaso de Texcoco, el nivel estático está muy cercano a la superficie, 5 m aproximados en la parte central del lago; se profundiza desde la parte central de dicho vaso hasta el aeropuerto, incluyendo ciudad Nezahualcóyotl, con profundidades someras de entre 5 y 20 metros.

### **Elevación del nivel estático**

Actualmente, se cuenta con una red de observaciones piezométricas para la ciudad de México que incluye 320 aprovechamientos; las configuraciones de la elevación del nivel estático abarcan de 1983 a 1987. Con objeto de mostrar la distribución de la superficie piezométrica y comparar su evolución respecto al tiempo, se presentan las configuraciones de octubre de 1985 y marzo de 1987 (véanse ilustraciones 2 y 3).

### **Zona metropolitana**

En la ciudad de México, el acuífero se recarga por el poniente, el sur y el oriente y presenta un flujo radial que, en forma general, tiende a circular hacia el valle. En la parte central norte de la ciudad destacan un cono y un domo piezométrico y en la porción suroccidental, un cono. El cono del norte se ha formado por la extracción de agua que se realiza en esa zona, donde existen numerosas industrias, entre otras, las instalaciones de la Refinería Azcapotzalco de Petróleos Mexicanos, que cuenta con varios pozos que extraen aproximadamente 300 l/s.

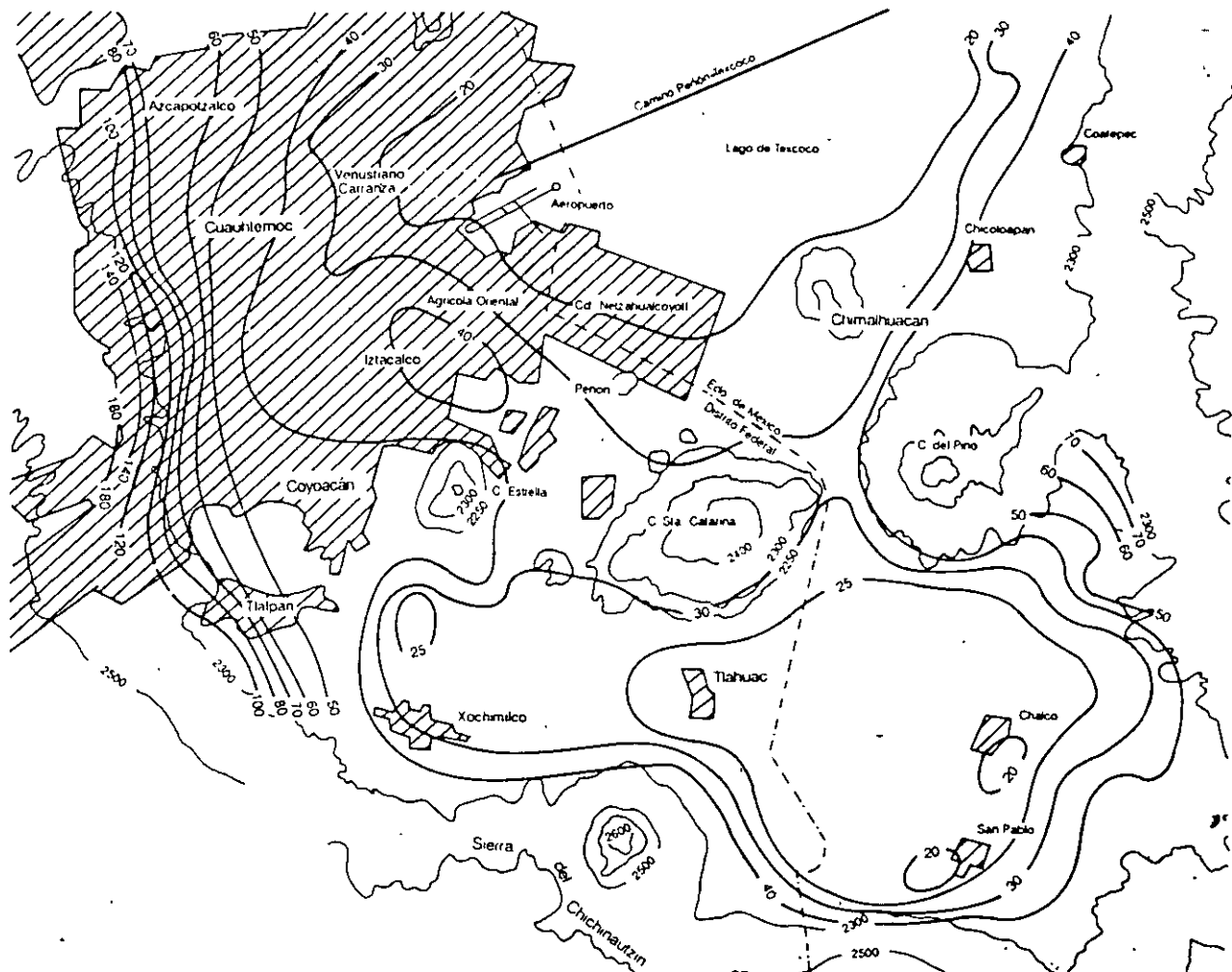
Los principales cambios en las configuraciones, de agosto de 1985 a marzo de 1987, se detectaron en el área de Tlalpan-Xotepingo, donde se observa la aparición de un nuevo cono piezométrico ocasionado por la extracción de agua subterránea en volúmenes mayores a la alimentación natural que recibe el acuífero. Esta área tiene las siguientes características geohidrológicas e hidrogeoquímicas (véase ilustración 4) que incluye la sección oeste-este a lo largo del cono y del domo piezométrico. En la parte A se muestran las características geohidrológicas del subsuelo, observándose que en la porción superior se encuentran arcillas lacustres de reducida permeabilidad, las que funcionan como un acuitardo. Debajo de las arcillas, hay materiales granulares de permeabilidad media, en los cuales se aloja el acuífero que es explotado por medio de pozos para el abastecimiento de la ciudad de

México. El espesor de las arcillas no se conoce con exactitud en toda su extensión, pero fluctúa entre 30 y 70 m. La posición de las superficies piezométricas del acuitardo y acuífero y el espesor de las arcillas pueden tener variaciones.

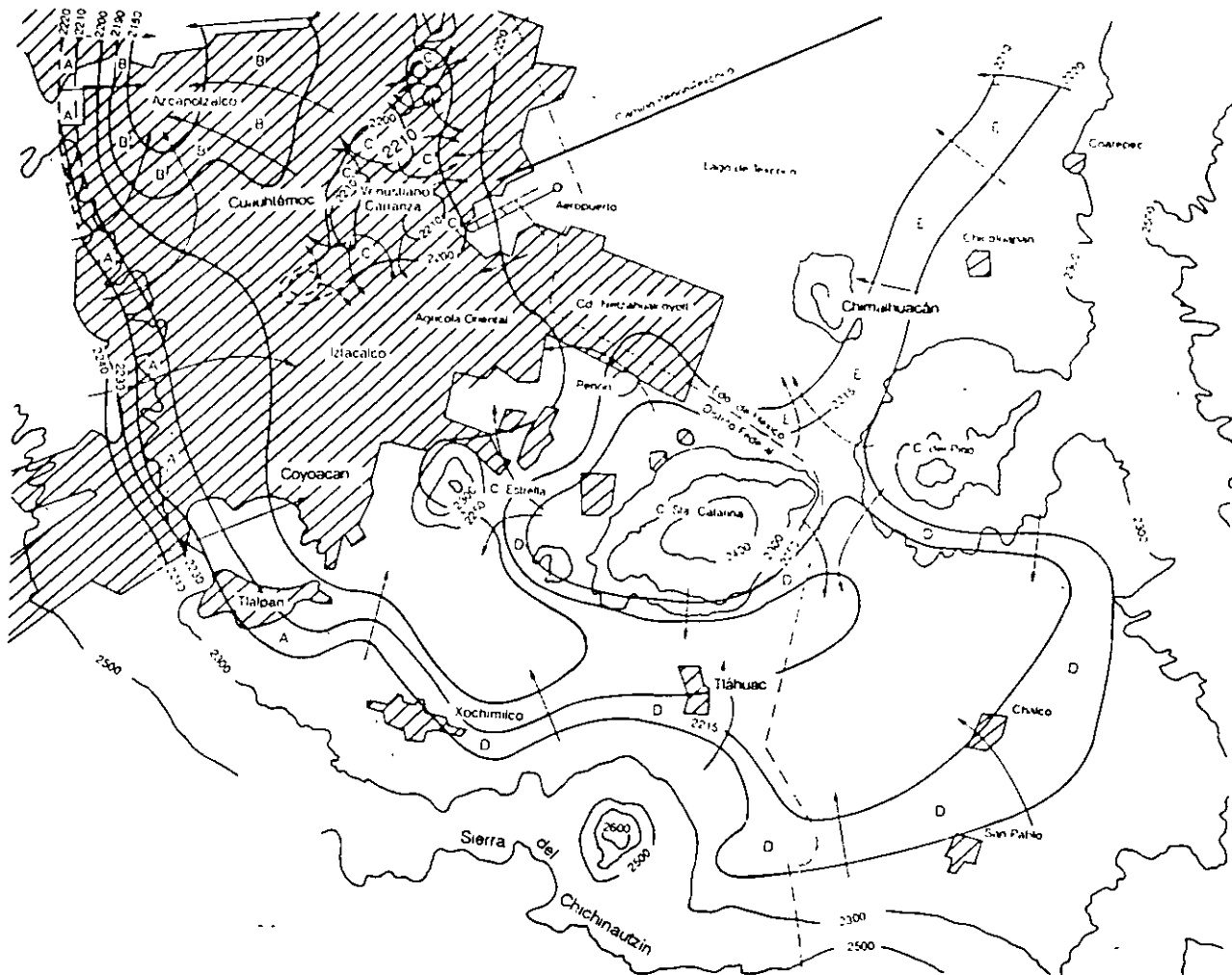
En la parte B, hacia la zona del cono piezométrico, el acuífero está sujeto a una fuerte extracción de agua subterránea; el abatimiento anual de la superficie piezométrica es de hasta 4 m y los asentamientos del terreno son moderados. Hacia la zona donde se ha detectado el domo piezométrico, la extracción es reducida, el abatimiento anual de la superficie piezométrica varía de 2 a 4 m, los asentamientos del terreno son muy reducidos. La transmisibilidad de las arcillas lacustres es de  $1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ , mientras que la de los materiales granulares es de  $6 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ .

En la parte C, se observan otros aspectos sobre el funcionamiento geohidrológico y geoquímico de la

1. Profundidad al nivel estático en metros (1987)



2. Elevación del nivel estático en metros (octubre-1985)



sección a lo largo del cono y el domo piezométrico. Se marcó el probable nivel freático de las arcillas (acuitardo) y la zona saturada dentro de ésta, que aportan agua al acuífero en forma de goteo

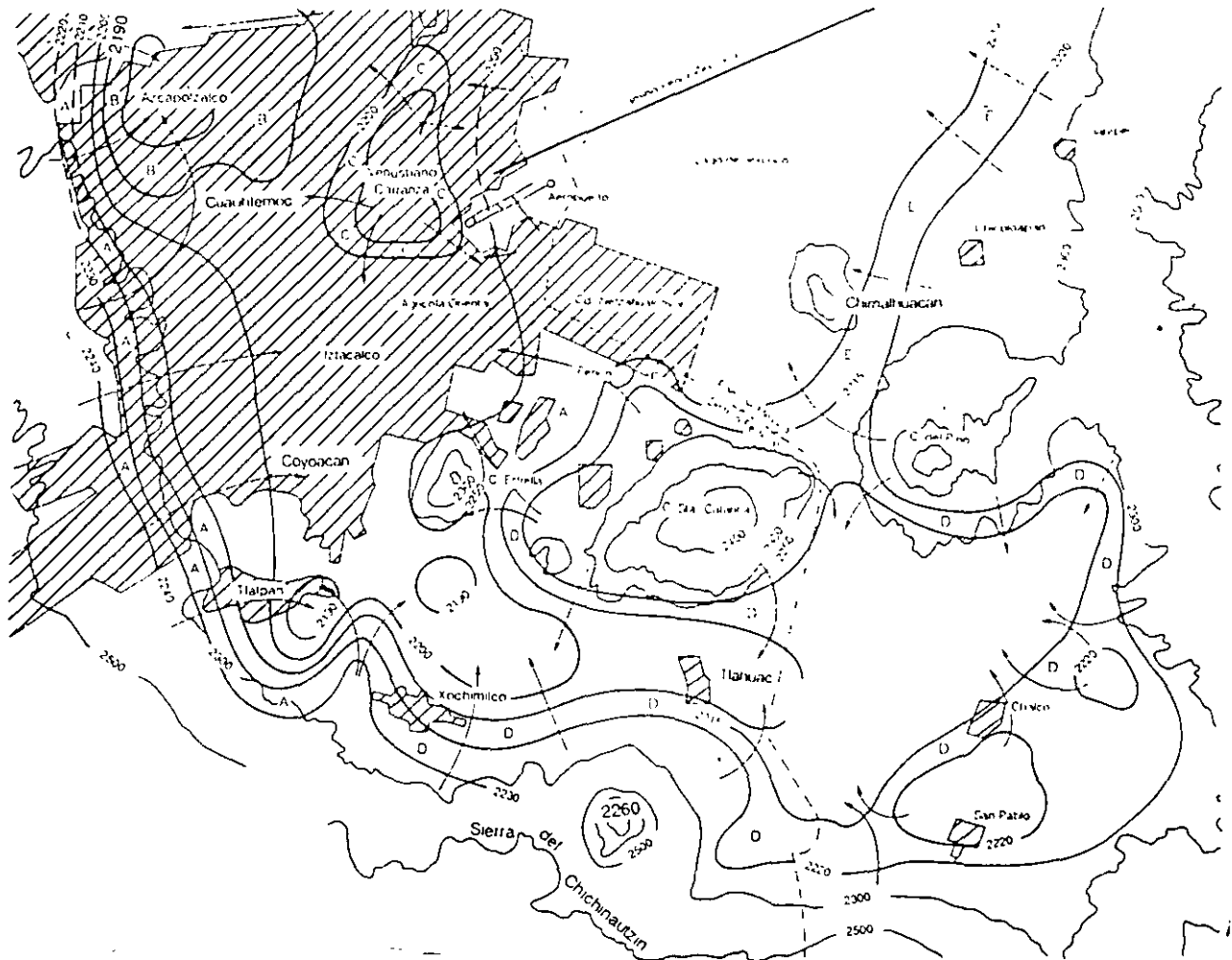
Conforme a los datos sobre la química del agua, los análisis efectuados de 1955 a 1987 indican un incremento salino del poniente al oriente, o sea, hacia el cono piezométrico y, posteriormente, una disminución de la salinidad hacia la zona donde se ubica el domo piezométrico. La única posibilidad para lograr una disminución salina a lo largo de un flujo subterráneo es mediante la dilución o mezcla con otro tipo de agua. Si la zona central del área metropolitana es recargada por el flujo proveniente del poniente, debería presentar entre 300 y 400 ppm de sales; ya que el agua aumenta su contenido salino conforme circula en el subsuelo. Sin embargo, la presencia en el domo de concentraciones salinas

bajas, menores de 200 ppm, indica la existencia de una recarga o alimentación al acuífero con agua de muy buena calidad

Por otra parte, el análisis de la variación respecto al tiempo de los diferentes parámetros químicos, indica que éstos se han mantenido constantes desde 1955 hasta 1987, con excepción de los cloruros, los cuales en la zona del domo, presentan un incremento paulatino. Aparentemente, la formación del domo piezométrico es el resultado de varios factores como el tipo y la distribución de materiales que constituyen el subsuelo; la extracción diferencial de agua subterránea; las fugas de las redes de distribución de agua potable y la presencia de grietas que facilitan el paso del agua al acuífero. La posible existencia de material con permeabilidad menor en el área del domo y mayor hacia los flancos, podría ser una causa de la distribución de la actual superficie



3. Elevación del nivel estático en metros (septiembre-1987)



piezométrica.

La extracción general de agua subterránea es menor en el área del domo piezométrico, aunque localmente el domo no se encuentra *circundado* por pozos con extracción fuerte. Al tratar de identificar una fuente de recarga con agua de buena calidad, surge la idea de la posible fuga de agua a partir de las redes de distribución; aunque hidráulicamente su funcionamiento no es sencillo, de plantear esto se explicaría la disminución salina. Además, es necesario determinar cuál es la fuente adicional de cloruros en el agua en la zona del domo. La única explicación que se ha podido dar es la recarga al acuífero por fugas en la red de distribución, la cual contiene el cloro que se añade al agua con objeto de desinfectarla. La constante incorporación de este elemento podría constituir la fuente adicional que se ha detectado en los análisis realizados en

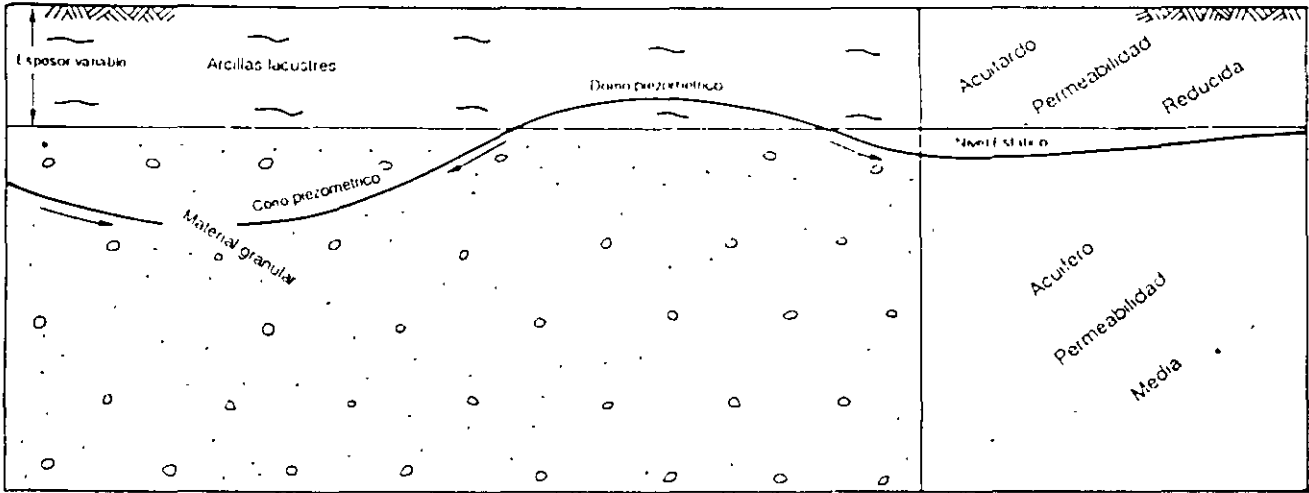
los últimos 20 años. Por otro lado, se sabe de la existencia de grietas dentro de las arcillas lacustres, que se han formado por el abatimiento de los niveles piezométricos y los asentamientos del terreno. Estas grietas podrían constituir conductos preferentes de circulación de agua a través de las arcillas hacia el acuífero.

En el Valle de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, el acuífero es recargado desde el noreste, norte y sur, su circulación es hacia el centro del valle, donde cambia su curso rumbo al poniente. Al norte de Xochimilco, este subsistema acuífero descarga hacia el subsistema de la zona metropolitana. El gradiente indica que el aporte de agua es mínimo, tal vez nulo, de un subsistema acuífero a otro.

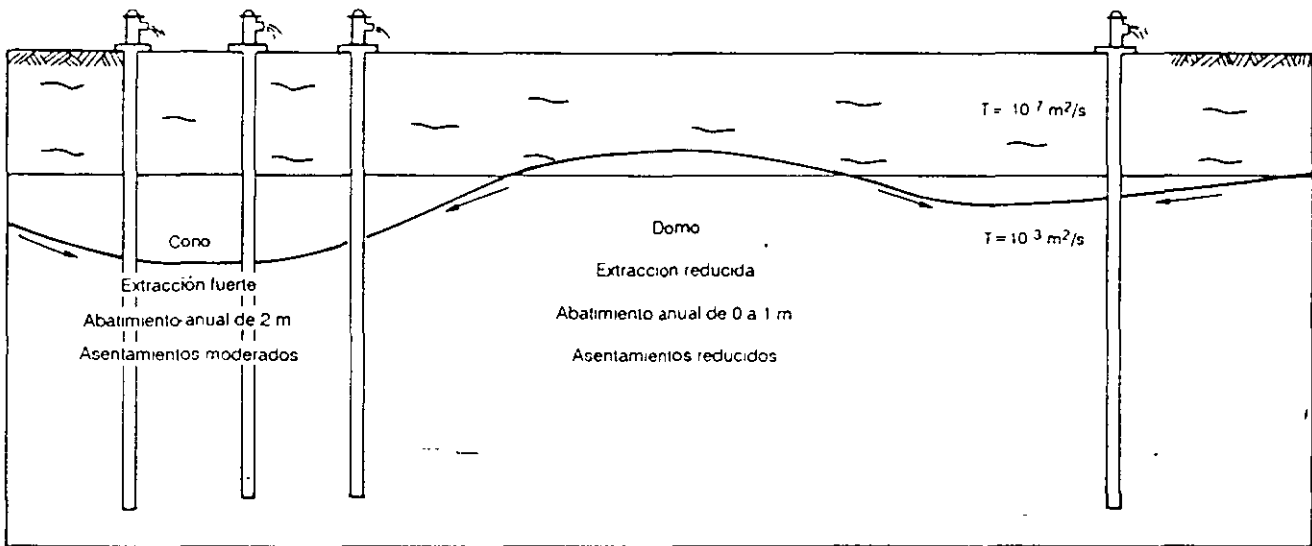
Por lo que se refiere al subsistema acuífero del Vaso del Lago de Texcoco, se detectó un flujo piezométrico del este al oeste. Existen datos

4. Sección W-E a lo largo del cono y domo piezométrico

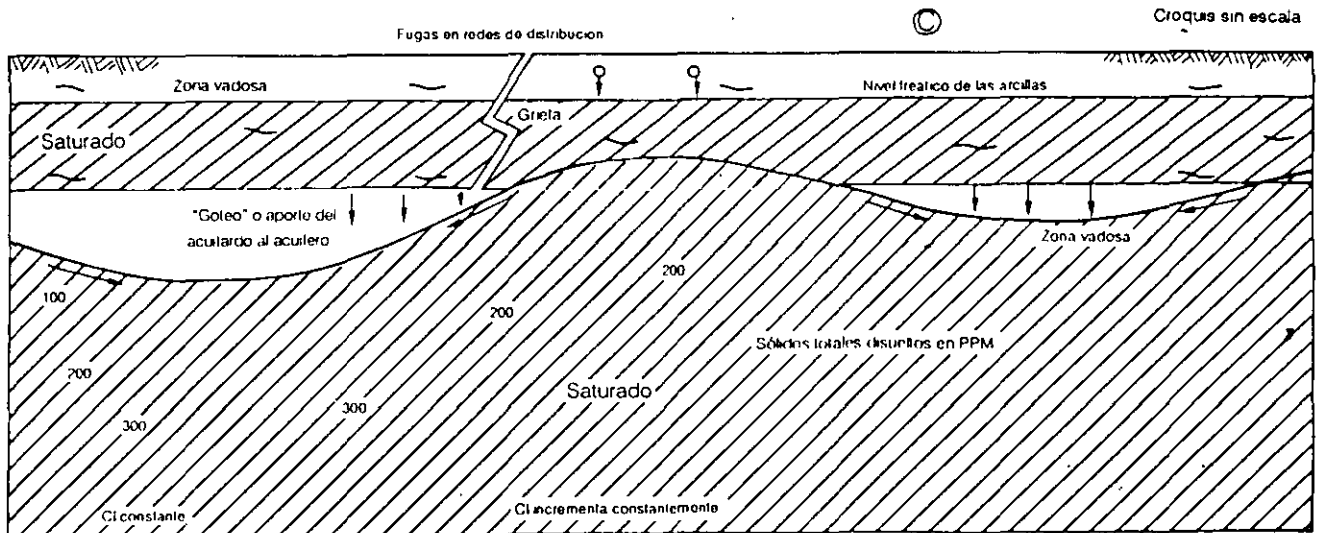
(A)



(B)



(C)



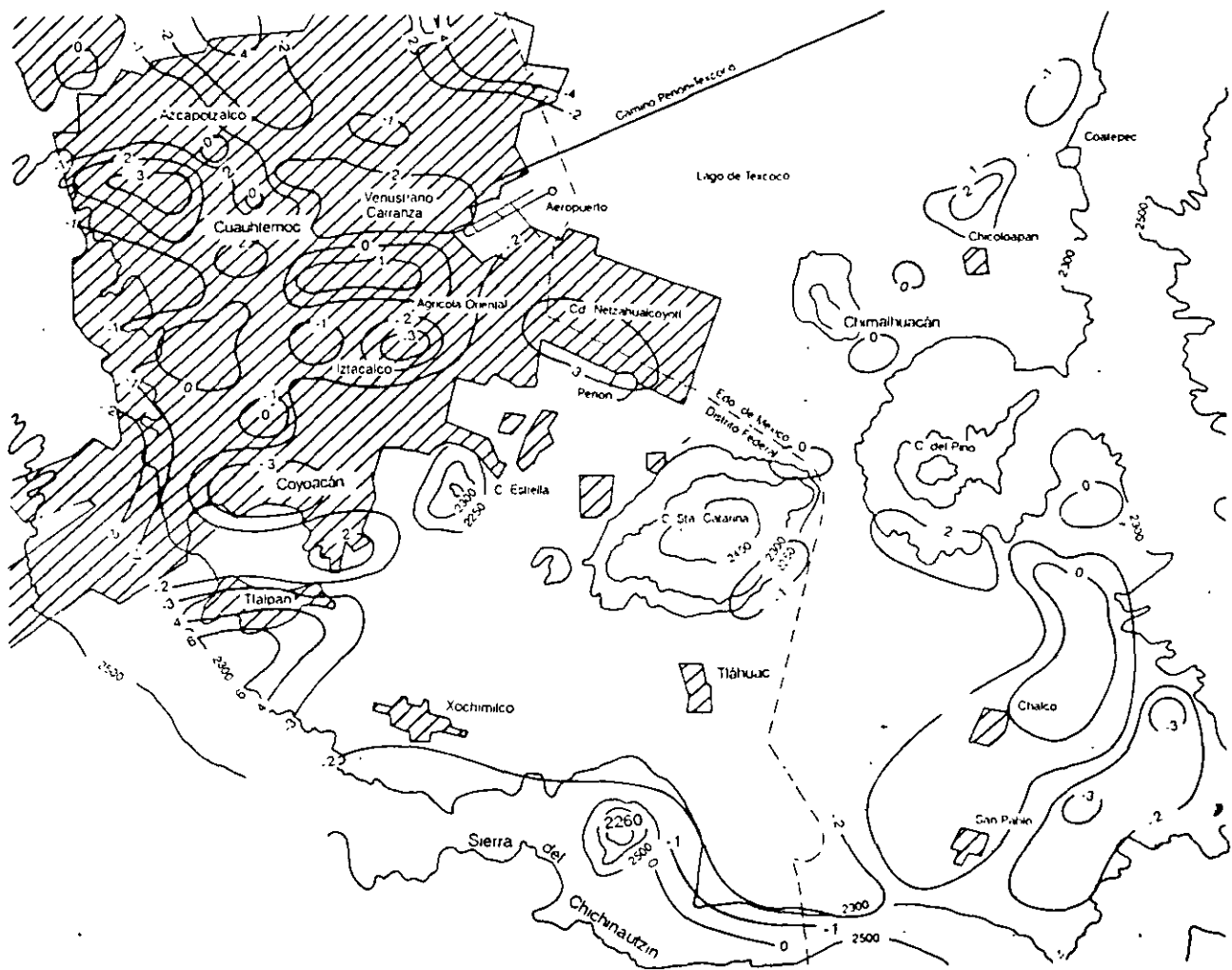
piezométricos en los alrededores de Chicoloapan; sin embargo, hacia el poniente la información geohidrológica es escasa. Se lograron detectar las curvas 2210 en la porción oriental y 2200 metros sobre el nivel del mar en la porción occidental, a la altura del Aeropuerto Internacional, o sea una variación de 10 m en una distancia de 13 km, lo que da un gradiente bajo, de 0.00076, a partir de lo cual se infiere que el agua en esta región tiene un movimiento muy reducido.

### Evolución del nivel estático

Con las medidas piezométricas obtenidas en mayo de 1985 y en marzo de 1987, correspondientes a un periodo de prácticamente dos años, se dedujo la evolución del nivel estático y se configuró la evolución de la superficie piezométrica (véase ilustración 5).

En el área de Azcapotzalco, la evolución varía de cero en algunos puntos locales aislados, a menos de 4 m en la porción norte y predominan valores de alrededor de menos 2 m. Esta evolución es el reflejo de la explotación general de agua subterránea en el valle, así como de la fuerte extracción local en la zona industrial de Azcapotzalco, que incluye, entre otras, a las instalaciones de la Refinería de Pemex. En el área de la Delegación Venustiano Carranza, donde se ha formado el domo piezométrico, la evolución del nivel estático para el periodo estudiado, es ligeramente menor que en el resto de la zona metropolitana, con valores que varían de 0 a menos 2 m. En el área de Tlalpan-Xotepingo, la evolución varía de menos 2 a menos 6 m, encontrándose valores de entre menos 4 y -6 en la porción extrema sur (al sur del Anillo Periférico), lo cual ha sido ocasionado por la fuerte extracción de agua subterránea.

### 5. Evolución del nivel estático en metros (mayo-1984 - marzo-1987)



### Extracción de agua subterránea

Se han actualizado las mediciones de las extracciones de agua subterránea que se realizan a través de los diversos pozos existentes, cuyo registro se ha efectuado por medio de tubos de Prandtl y medidores de volumen. La extracción para cada uno de los tres subsistemas acuíferos considerados es como sigue:

	Extracción
Subsistema acuífero	x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año
Zona metropolitana	243
Zona sur	195
Vaso del Lago de Texcoco	38

### Cuantificación preliminar del agua subterránea

Se efectuó una cuantificación del flujo subterráneo, basada en la configuración de la elevación del nivel estático de septiembre de 1987 (véase ilustración 3). Sobre el plano se marcaron las celdas y se calculó la cantidad de agua subterránea que pasa a través de ellas. El cálculo se efectuó a partir de la Ley de Darcy, la cual establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria del flujo. Matemáticamente, la Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera.

$$V = \frac{h}{L} = Ki$$

donde,  $V$  es la velocidad media del flujo;  $h$ , la pérdida de carga en la distancia  $L$ ;  $i$ , el gradiente hidráulico y  $K$ , el coeficiente de permeabilidad. Considerando tanto la ley de continuidad como la de Darcy, se tiene que el caudal  $Q$  es igual a:

$$Q = Tbi$$

donde,  $T$  es la transmisibilidad y  $b$ , el ancho medio del flujo entre las líneas de corriente de cada celda.

La cuantificación se dividió en los tres subsistemas acuíferos. Se marcaron con la letra A las celdas correspondientes al flujo de entrada de agua subterránea procedente del poniente y surponiente, así como una celda en la parte norte del Cerro de La Estrella. Las celdas marcadas con la letra B corresponden al cono piezométrico de Azcapotzalco y las celdas C, al domo piezométrico del centro de la ciudad.

### Zona metropolitana

El flujo subterráneo de entrada de las celdas A resultó de 172 millones de metros cúbicos anuales; la infiltración proveniente del domo piezométrico fue de 16 millones de m<sup>3</sup> y la salida subterránea hacia el cono de Azcapotzalco fue de 24 millones. Con los datos anteriores se estableció la ecuación de balance donde las entradas son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

$$E_s + I - S_s - E_x = \pm A_s \quad (1)$$

donde:  $E_s$  = Entradas subterráneas

$I$  = Infiltración vertical

$S_s$  = Salidas subterráneas (Hacia Azcapotzalco)

$E_x$  = Extracción por bombeo

$A_s$  = Cambio de almacenamiento

La infiltración vertical puede dividirse en:

- Infiltración en el área del domo a través de grietas o por el aporte por goteo del acuitardo al acuífero e
- Infiltración al acuífero en el resto de la zona metropolitana a través de las grietas.

Se deduce una infiltración de 70 millones de m<sup>3</sup> anuales de los cuales 16 corresponden a la zona del domo y 54 al resto del valle.

### Zona Xochimilco-Tláhuac-Chalco

Las celdas de entrada de agua subterránea se marcaron con la letra D y arrojaron un valor de 178 millones de m<sup>3</sup> anuales. La extracción por bombeo es de 195 millones de m<sup>3</sup> anuales lo que da un déficit de 17 millones, el cual es equilibrado por la infiltración vertical de agua de lluvia y por el cambio de almacenamiento que es negativo.

### Vaso del Lago de Texcoco

En esta porción se marcaron con la letra E cuatro celdas al pie de la sierra del noreste, las cuales dan un flujo de entrada de agua subterránea de 34 millones de m<sup>3</sup> anuales. Por otra parte, la extracción en la franja a lo largo de la carretera a Texcoco y en El Peñón de Los Baños, es de 38 millones, de donde se deduce que esta zona se encuentra cerca del equilibrio hidrodinámico.

## Conclusiones

- En la zona metropolitana, el subsuelo corresponde a material granular de permeabilidad media y baja, cuya recarga proviene de la Sierra de Las Cruces; se descarga por medio de bombeo.
- En el área de Xochimilco-Chalco predominan los materiales volcánicos, principalmente lavas y escorias basálticas que forman un acuífero de alta permeabilidad; éste se recarga en la Sierra del Chichinautzin, ubicada al sur y se descarga por el bombeo de pozos ubicados en especial al pie de la sierra.
- En el Ex-Vaso del Lago de Texcoco, la información es escasa. El flujo proviene del oriente y tiene un gradiente casi nulo, por lo que su movimiento es muy reducido.
- La cuantificación del agua subterránea en el Valle de México indica que existe sobreexplotación, aunque ésta no es de gran magnitud. Se midió un cambio de almacenamiento negativo de 33 millones de m<sup>3</sup> anuales, con un abatimiento de la superficie piezométrica entre 1 y 3 metros.
- En el esquema del flujo subterráneo, a la altura de la Delegación Venustiano Carranza, se aprecia un domo, que se forma con niveles (no freáticos) del acuífero; se considera que es ocasionado

por la conjunción de diversos factores como tipo y distribución de materiales en el subsuelo; extracción diferencial de agua subterránea e infiltración a partir de fugas de las redes de distribución de agua potable que se incorporan al acuífero a través de grietas.

<sup>1</sup> El presente trabajo es parte de las actividades geohidrológicas que la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal ha venido realizando en los últimos cinco años para el control del acuífero de la ciudad de México. Manuscrito actualizado a junio de 1988.

## Bibliografía

- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. *Informes de actividades geohidrológicas en el Valle de México*, elaborados por Lesser y Asociados, 1983-1987.
- Drever, J. I. *The Geochemistry of natural waters*, 2a edición, Prentice Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N. J. 07632, EUA, 1988.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry, *Groundwater*, Prentice Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N. J. 07632, EUA, 1979.
- Lesser, J. M., Sánchez, F., González, D. "Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México", *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, sept-dic., 1986.

# Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México

Juan Manuel Lesser Illades  
Felipe Sanchez Diaz  
David Gonzalez Posadas

Lesser y Asociados

*El agua que forma el acuífero de la ciudad de México proviene fundamentalmente de la lluvia, parte de la cual se infiltra y circula a través de las rocas, con lo que disuelve las sales existentes e incrementa su contenido salino conforme avanza. La cantidad y el tipo de sales disueltas están en relación directa con el tipo y solubilidad de las rocas con las cuales tiene contacto. En el Valle de México las rocas existentes, volcánicas y sedimentarias continentales y lacustres, proporcionan las sales que se encuentran disueltas en el acuífero. Se efectuó una interpretación hidrogeoquímica de este, analizando 240 pozos y con información de 30 años. Aunque la concentración salina del agua subterránea es en general baja, con sólidos totales disueltos entre 200 y 400 ppm existen puntos aislados con concentraciones mayores, principalmente al centro de la zona. Con el estudio se ratificaron importantes aspectos geohidrológicos, como la recarga de agua al acuífero en el centro del área metropolitana, se delimitaron zonas con agua incrustante y se analizó la variación de la calidad química del agua en relación con el tiempo.*

## Análisis químicos

La información procesada consistió en los análisis químicos de 240 pozos con información de 1984 y 1985, y de otros 100 con análisis anuales de 1955 a 1985, que incluyen las determinaciones de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, potencial hidrógeno, sólidos totales disueltos, alcalinidad total, hierro, manganeso, cuenta estándar, nitritos, nitratos, flúor, arsénico, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, plomo y selenio.

## Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos corresponden a la suma de elementos en solución que el agua ha incorporado en su trayectoria.

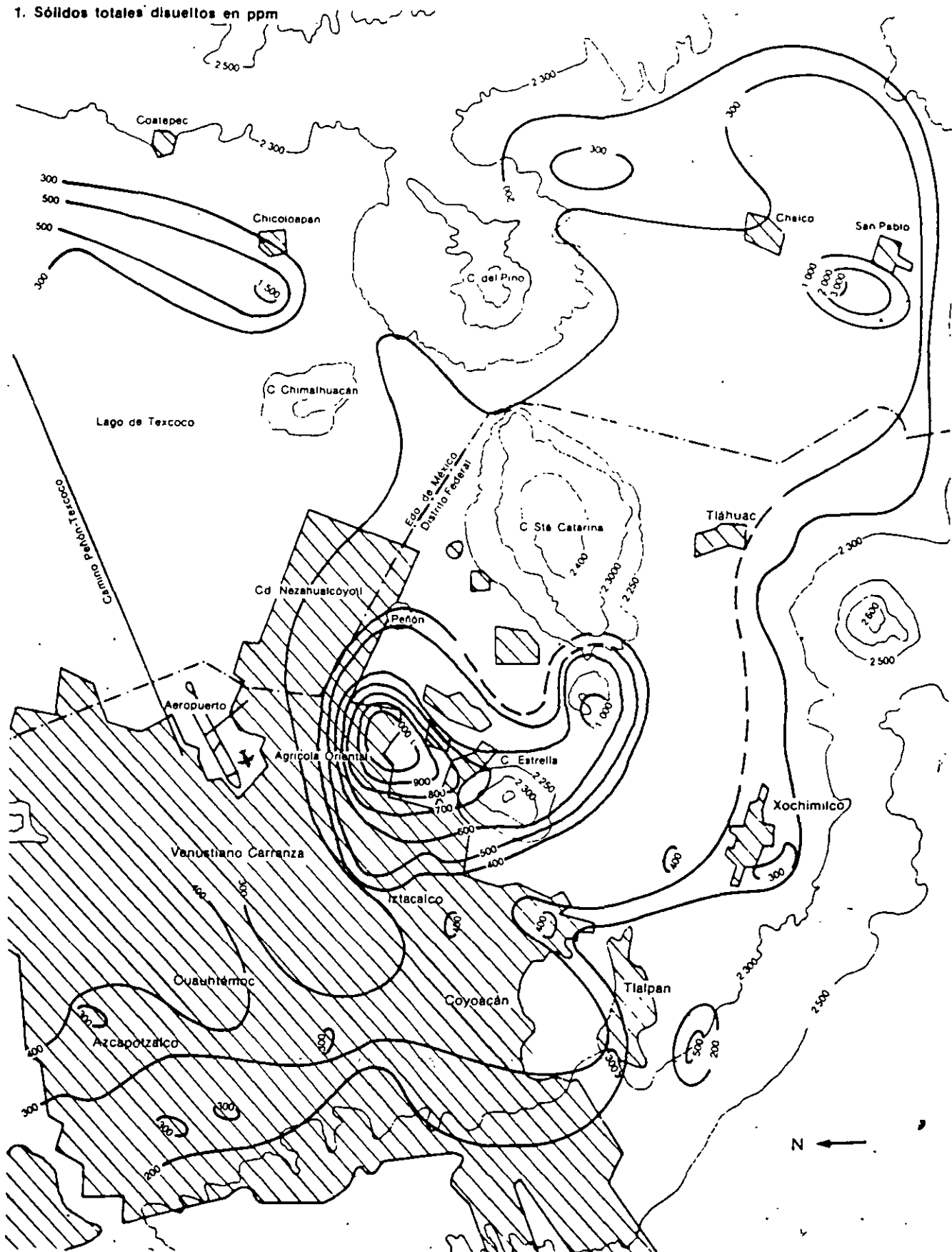
Cuando la lluvia se precipita sobre la corteza terrestre, arrastra una cierta cantidad de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfe-

ra, además de incorporar gases como el bióxido de carbono; por ello el agua contiene una determinada cantidad de sales disueltas, entre las que predominan el sodio y los bicarbonatos en concentraciones bajas. Al entrar en contacto con la superficie terrestre, el agua, que además posee ácido carbónico, disuelve las sales y minerales que forman las rocas, con lo que incrementa su contenido salino, el cual será mayor conforme el agua circule por el subsuelo o permanezca un mayor tiempo en contacto con las rocas, la cantidad y el tipo de elementos disueltos dependerá de la composición y solubilidad de éstas.

En la ilustración 1 se muestra la distribución de los sólidos totales disueltos en el agua subterránea de la ciudad de México, y se observa que los valores más bajos, menores de 200 ppm, se localizan al poniente, al sur y al surponiente del área, zonas que coinciden con las estribaciones de las sierras, lo que indica que estas áreas corresponden a zonas de recarga del acuífero.

El bajo contenido de sales encontrado en las

1. Sólidos totales disueltos en ppm



estribaciones serranas indica, por una parte, que el agua que recarga al acuífero corresponde a la infiltración de la lluvia, y por la otra, que no deben de existir rocas que incluyan minerales o sales de fácil disolución. Además, los materiales lavicos y piroclásticos que forman las estribaciones de las elevaciones topográficas tienen una permeabilidad alta que permite un flujo rápido, lo que impide que el agua tenga suficiente tiempo para incrementar su contenido salino, esto es especialmente visible en la Sierra del Chichinautzin.

El análisis de los datos manejados demostro que la concentración salina tiende a incrementarse hacia la parte central del área, lo que indica un flujo de agua en la misma dirección; por ejemplo, de las Lomas de Chapultepec hacia los alrededores de Azcapotzalco, este aumento es gradual.

En esta parte central homogénea se encuentra una zona con una composición química con sólidos totales entre 300 y 400 ppm, de donde se deduce que en el subsuelo no existen sales de fácil disolución. Un aspecto importante detectado en la distribución de estos sólidos, es la disminución en la concentración salina entre las delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza.

Como ya se mencionó, una de las bases de la hidrogeoquímica es que el agua incrementa su contenido salino conforme circula en el subsuelo y que no existen procesos naturales que provoquen el fenómeno inverso (salvo raras excepciones). Por lo tanto, la causa más común que origina la disminución del contenido salino es la dilución debida a una recarga o al aporte de agua con un menor contenido salino. Este efecto fue observado prácticamente en todas las distribuciones de hidrogeoquímica y ratificado por piezometría (Lesser y Sánchez, 1985).

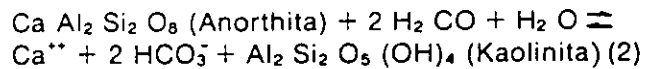
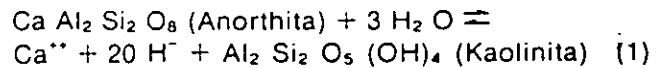
Pero, en contraste con lo anterior, el estudio demostró un incremento notable del contenido salino entre la colonia Agrícola Oriental, el Cerro de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina; en los pozos de la colonia mencionada se detectaron hasta 1200 ppm de sales disueltas —fueron los puntos con mayor salinidad del muestreo total y la fecha de la medición correspondió a julio de 1984. En esta zona el acuífero se localiza entre materiales granulares con algunos horizontes de basalto. Un efecto similar se presentó en la Sierra de Santa Catarina, donde se detectaron 1400 ppm de sólidos totales disueltos en el pozo SC-12. Esta alta salinidad es ocasionada por dos factores: la influencia de zonas volcánicas, algunas posiblemente activas, que han impregnado las rocas del subsuelo con emanaciones gaseosas y

emplazamientos de sales de tipo hidrotermal y la presencia de horizontes de sedimento lacustres con materia orgánica en descomposición. En la distribución destacan claramente las áreas de la Agrícola Oriental y Santa Catarina como focos locales de contaminación salina natural.

En la porción sur del valle, área de Xochimilco-Tlahuac-Chalco, los pozos presentan un bajo contenido salino, característico de agua de lluvia de reciente infiltración, que indica que este acuífero debe recargarse sobre la sierra. Aquí, las concentraciones salinas son de 200 a 300 ppm, con excepción de los pozos al norte y oriente de San Pablo Atlazalpan, donde se registraron valores de 3000 ppm de sólidos totales disueltos, considerándose que corresponden a puntos locales. El incremento salino que se marca en la configuración muestra una distribución general muy similar a la circulación del flujo subterráneo.

#### Calcio

El calcio es un ion divalente de carga positiva que forma parte de la mayoría de las rocas que constituyen la corteza terrestre, por lo que es común encontrarlo disuelto en el agua. Dentro del área estudiada se considera que este elemento proviene de la disolución de los feldspatos cálcicos que conforman las rocas volcánicas. A continuación se mencionan las reacciones químicas características de la disolución de la anorthita.

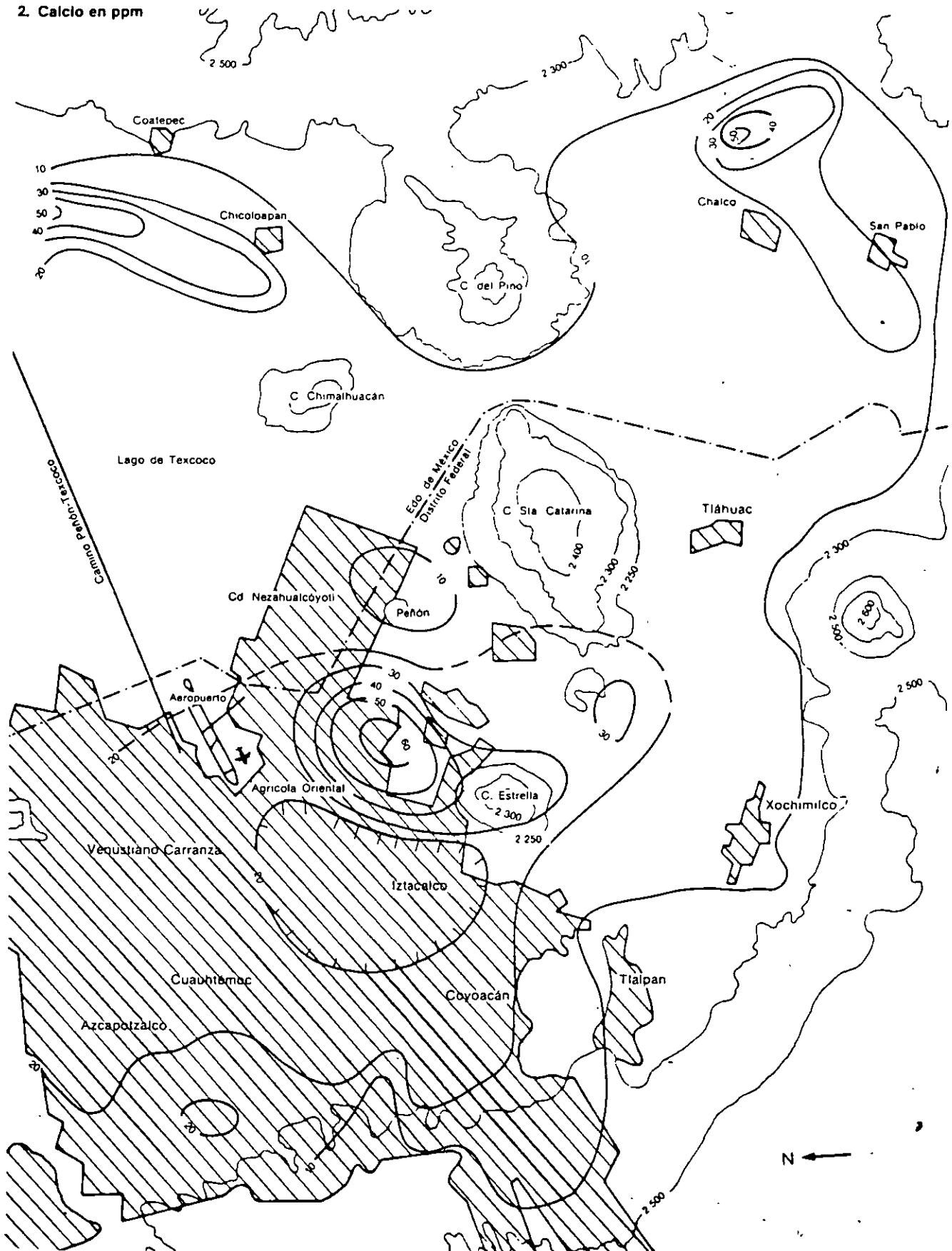


La distribución de este elemento se muestra en la ilustración 2; las concentraciones más bajas se localizan en las porciones poniente, sur y oriente de la ciudad de México, lo que ratifica la existencia de una importante zona de recarga hacia las sierras. En los pozos de la colonia Agrícola Oriental, se detectaron más de 60 ppm de este material. Al poniente de este sitio, entre las delegaciones de Iztacalco, Benito Juárez y Venustiano Carranza, se encontró una clara disminución en los valores, que corresponde al área donde se ha inferido la existencia de un aporte por infiltración vertical.

En la porción suroriental del valle de Xochimilco-Tlahuac-Chalco, la concentración de calcio en el agua es muy baja, alrededor de 15 ppm, con excepción de la parte localizada al sureste de



2. Calcio en ppm

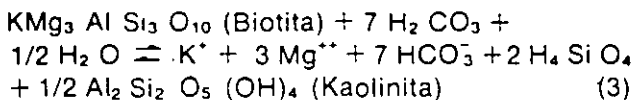


Chalco, donde existen algunos aprovechamientos que incrementan ligeramente su contenido salino a 20 ppm.

Existen tres áreas o subsistemas acuíferos en que se puede dividir a la zona estudiada: el primero corresponde a la zona metropolitana de la ciudad de México, donde las concentraciones de calcio varían de 10 ppm en las estribaciones de la sierra, hasta máximos de 60 ppm al centro, detectándose también una área de valores bajos entre las delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza. El segundo abarca el vaso del Lago de Texcoco donde el agua prácticamente no tiene movimiento y la información geoquímica es reducida. El tercero engloba la zona sur de la capital y presenta una concentración salina muy baja del agua, con cerca de 15 ppm de calcio.

### Magnesio

Los basaltos están constituidos por minerales ferromagnesianos entre los que se encuentran los piroxenos y los anfíboles, los cuales son atacados por el agua originando la presencia del magnesio en solución. Este elemento también proviene de la disolución de otros minerales, como la biotita, la cual se transforma en kaolinita como se muestra en la siguiente reacción.

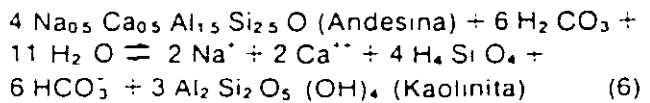
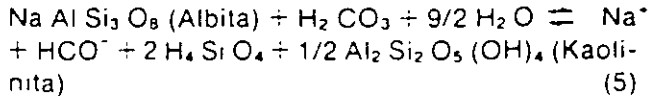
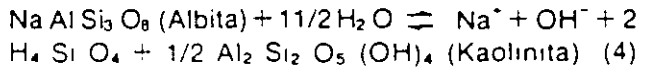


Los valores más bajos de magnesio, menores a 10 ppm, se localizan al pie de las sierras, así como en la porción nororiental del área de trabajo; esto corrobora la existencia de zonas de recarga hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas, y se incrementan hacia la porción central, con lo que se ratifica el flujo subterráneo. Entre las delegaciones Benito Juárez, Iztacalco y Venustiano Carranza, se presenta una disminución en las concentraciones, ocasionada por un aporte vertical de agua hacia el acuífero, el cual aparentemente corresponde a la infiltración de fugas de la red de distribución de agua potable.

### Sodio

El sodio, junto con el calcio y el magnesio, corresponde a los principales cationes encontrados en la naturaleza. En el área estudiada los tres provienen de la disolución de los minerales que forman las rocas, como los feldespatos sódicos, que son un constitu-

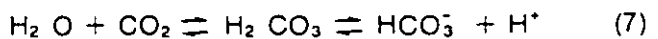
yente de las formaciones volcánicas. A continuación se muestra la reacción de la disolución de la albita y la andesina por el agua.



En la zona de trabajo las concentraciones más bajas, menores de 5 ppm, se encuentran al pie de las sierras que limitan al área en sus porciones oriental, sur y poniente, en tanto que las más altas, alrededor de 20 ppm, se localizan entre El Peñón del Marques y el Cerro de la Estrella.

### Bicarbonatos

A diferencia de los iones analizados, que provienen principalmente de la disolución de las rocas, el bicarbonato se produce a consecuencia de reacciones químicas debidas a la interacción entre el agua, los gases y las rocas. Así, una de las fuentes más comunes de este elemento es la incorporación de bióxido de carbono en el agua, lo cual forma ácido carbónico, que a su vez se disocia en bicarbonatos e hidrógeno como se muestra en la siguiente reacción:



Otras posibilidades para su formación corresponden a la disolución de los minerales de las rocas ígneas, como se indicó en las reacciones químicas anteriores aquí mostradas.

La concentración de bicarbonatos en el agua está sujeta a los cambios de temperatura y presión, así como a procesos biológicos y a la concentración total de sales en solución. Los valores menores de 100 ppm se presentan en las estribaciones de las sierras del poniente, sur y oriente, áreas de recarga por lluvia, en tanto que conforme el agua subterránea circula hacia el centro de la ciudad se incrementa su contenido de bicarbonatos. En la colonia Agrícola Oriental y en Santa Catarina vuelven a aparecer las anomalías comentadas para los elementos tratados anteriormente.

### Cloruros

Por lo general, los cloruros se encuentran en concentraciones bajas en terrenos volcánicos, como en el subsuelo de la ciudad de México, con excepción de algunos sitios donde hay horizontes salinos depositados en antiguas cuencas lacustres. Los valores bajos al poniente, sur y oriente ratifican que dichas regiones corresponden a zonas de recarga.

### Sulfatos

Los sulfatos forman parte de diferentes minerales que constituyen las rocas ígneas, sin embargo, las concentraciones provenientes de éstas, en general son bajas, otros posibles orígenes corresponden a la descomposición de materia orgánica en los sedimentos lacustres y a la disolución de horizontes de azufre que comúnmente se encuentran asociados a centros eruptivos, que al oxidarse pasan en solución al agua, formando sulfatos.

Respecto a la presencia de sulfatos en el acuífero capitalino se puede decir lo siguiente: las concentraciones más bajas, menores de 10 ppm, se encuentran en las estribaciones de las elevaciones topográficas hacia el poniente, oriente y sur, ratificando la existencia de zonas de recarga por agua de lluvia en esos lugares, hacia el centro de la zona metropolitana existe un incremento en las concentraciones producido principalmente por el flujo de agua subterránea; en los alrededores del Cerro de La Estrella hay concentraciones salinas altas, ocasionadas por la existencia de horizontes salinos dentro de los materiales granulares que constituyen el acuífero; al oriente de Chalco se encuentra una zona con magnitudes que alcanzan hasta 100 ppm posiblemente ocasionados por la utilización de agua en riego que produce evaporación y reconcentración de sales (véase ilustración 3).

### Fierro y manganeso

El fierro es un elemento común en rocas y suelos, de donde es fácilmente disuelto o acarreado por las aguas, en especial si son ácidas. Las aguas naturales en general presentan concentraciones inferiores a 1 ppm y rara vez sobrepasan los 5 ppm, pero aquellas con un pH bajo contienen más fierro que las alcalinas. Las concentraciones altas de este elemento se pueden deber, por otra parte, a la ausencia de oxígeno.

En el agua subterránea este material se disuelve y se convierte en bicarbonato ferroso ( $\text{HCO}_3$ )<sub>2</sub>, estado en el que no tiene coloración alguna. Cuando el líquido se extrae de un pozo, absorbe oxígeno del aire y el bicarbonato en solución se convierte en hidróxido ferrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  que es insoluble; en estas condiciones, parte del bióxido de carbono libre escapa y el pH se eleva. El hidróxido ferrico tiene un color café rojizo y se encuentra suspendido, o bien se precipita en concentraciones bajas (0.3 ppm), reacción que se lleva a cabo con gran facilidad. Aunque esta concentración ocasiona algunos problemas en el uso y aspecto del agua no llega a ser tóxica, pero si sobrepasa los 0.5 ppm produce incrustaciones visibles en los ademes y tuberías y disminuye el rendimiento de los pozos (véase ilustración 4).

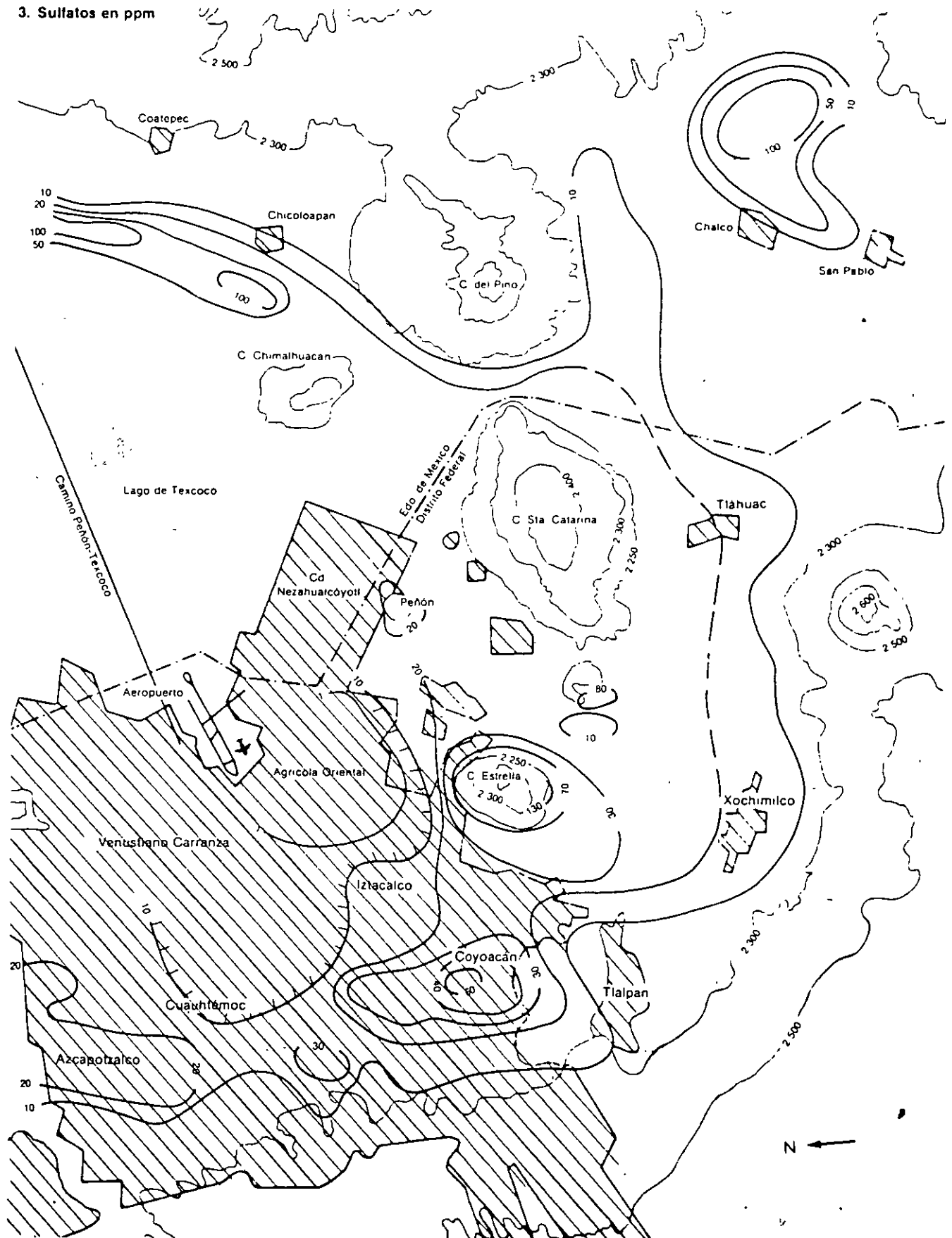
Existen otros compuestos del fierro que actúan como corrosivos incluso cuando no existe oxígeno, como en los acuíferos de cierta profundidad cuya agua ha circulado grandes distancias, como el óxido de fierro ( $\text{FeO}$ ), de color amarillo y con un pH bajo.

Por otra parte, hay bacterias como la *Crenotrix* o la *Gallionella* que utilizan a este mineral en solución como fuente de energía y dan origen a una tonalidad rojiza en el agua. Algunas colonias que crecen y se desarrollan en el interior de los pozos forman costras gelatinosas o lamosas que tapan las ranuras de los ademes y también disminuyen el rendimiento.

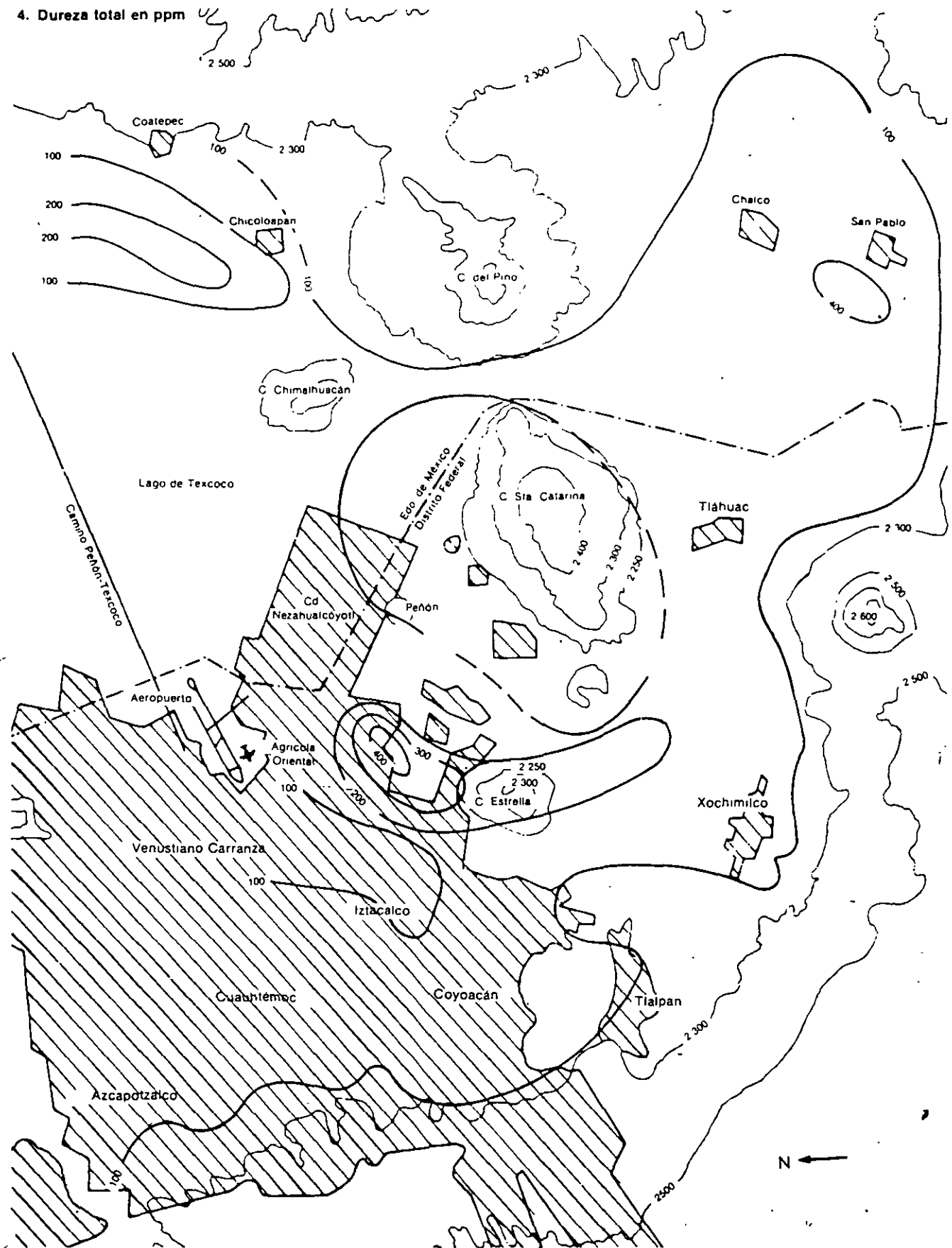
En los análisis químicos del agua se acostumbra reportar al fierro junto al manganeso por las semejanzas que hay entre ellos, pero tienen también grandes diferencias; el segundo también forma parte de rocas y suelos, pero además se encuentra en la materia orgánica ya que es uno de los nutrientes de las plantas. En las aguas naturales la concentración de manganeso es en general inferior a 0.02 ppm y puede circular grandes distancias porque no se oxida con facilidad. Está presente en las aguas que contienen fierro pero en una proporción menor.

En el área estudiada ambos elementos están prácticamente ausentes (véase la ilustración 5), aunque la proporción del fierro sobre la del manganeso es superior. Los puntos donde fueron detectados corresponden a los alrededores de la Delegación Azcapotzalco, a la parte comprendida entre la colonia Agrícola Oriental y la Sierra de Santa Catarina con una prolongación rumbo al poniente y a algunos pozos del sistema sur.

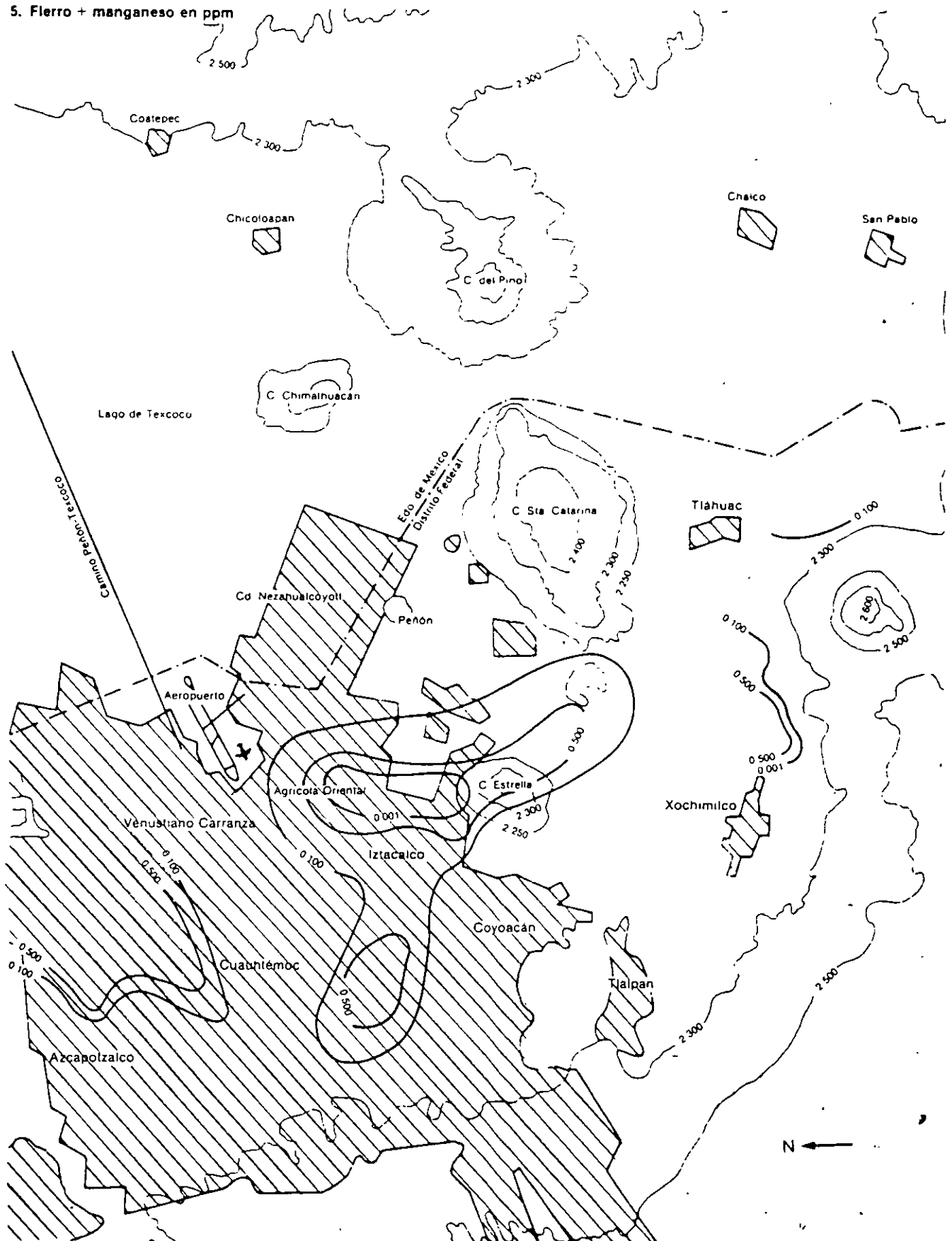
3. Sulfatos en ppm



4. Dureza total en ppm



5. Hierro + manganeso en ppm



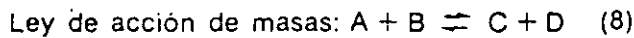
**Principales procesos químicos en el agua subterránea**

Los iones disueltos en el agua subterránea tienen propiedades para entrar en reacción formando compuestos o disociándose; las reacciones químicas producidas se acompañan de un cambio de energía, lo cual a su vez provoca otro tipo de reacciones químicas, en una cadena muy compleja, cuyo cálculo, sin embargo, ya se ha adaptado a programas de computadora que simplifican su aplicación.

**Metodología**

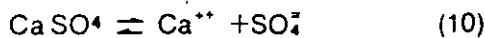
Se utilizaron aquellos recursos que sirven para evaluar las condiciones químicas del agua respecto al equilibrio químico, o sea su capacidad para precipitar o disolver una sal. El trabajo fue complejo y requirió de un largo tiempo, tanto por el índice de muestras de agua como por la cantidad de reacciones por estudiar; para realizarlo se utilizó el programa computarizado denominado WATEQ, que fue elaborado y publicado por el Departamento de Geología de los EUA (U.S. G.S.).

El equilibrio químico se basa en la ley de acción de masas, la cual indica que cuando en una reacción química los reactantes A + B son iguales a los productos C + D y la reacción es reversible, entonces la constante de actividad iónica  $K_{ai}$  es igual a las actividades de los productos entre la de los reactantes:



$$K_{ai} = \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad (9)$$

Los paréntesis indican la actividad del índice que encierran. Por ejemplo, en el caso de la anhidrita, ésta se disocia de acuerdo con la siguiente reacción:



Aplicando la ley de acción de masas la constante de actividad iónica es:

$$K_{ai} (\text{Anhidrita}) = \frac{[Ca^{++}][SO_4^{--}]}{[CaSO_4]} \quad (11)$$

La actividad de los compuestos es igual a 1, por lo que:

$$K_{ai} (\text{Anhidrita}) = [Ca^{++}][SO_4^{--}] \quad (12)$$

Las actividades iónicas se obtienen multiplicando el coeficiente de actividad " $\gamma$ " de cada elemento, por su concentración en moles por litro "m"

$$[Ca^{++}] = \gamma_{Ca} \cdot m_{Ca} \quad (13)$$

$$[SO_4^{--}] = \gamma_{SO_4} \cdot m_{SO_4} \quad (14)$$

El coeficiente de actividad iónica " $\gamma$ " se calculó mediante la fórmula de Debye-Huckel.

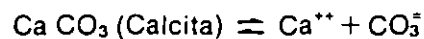
$$-\log \gamma_i = \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}} \quad (15)$$

donde  $Z$  es la carga del ión;  $A$  y  $B$  son constantes dependientes de la temperatura (en nuestro caso a 25° C,  $A = 0.05085$  y  $B = 0.3281 \times 10^{-8}$ );  $a$  es una constante relacionada con el tamaño y carga del ión, e  $I$  es la fuerza iónica calculada por la fórmula:

$$I = \sum \frac{m_i z_i^2}{2} \quad (16)$$

Para encontrar el grado de saturación del agua respecto al mineral estudiado se compara la constante de actividad iónica  $K_{ai}$ , con la constante de equilibrio  $K_e$ . Para valores de  $K_{ai}$  mayores que  $K_e$ , la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de  $K_{ai}$  menores que  $K_e$ , está insaturada; cuando las constantes son iguales entonces se dice que existe equilibrio químico. El hecho de que determinada agua se encuentre sobresaturada de un compuesto implica que existirá precipitación de éste y por lo tanto habrá incrustaciones en ademes y tuberías; cuando está insaturada, tiene la propiedad de disolver una mayor cantidad de sales y se comporta como corrosiva respecto a la sal o mineral estudiados.

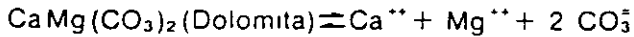
En párrafos anteriores se mostró la reacción química y la constante de actividad iónica de la anhidrita. A continuación se presentan las reacciones de disolución de la calcita, el yeso y la dolomita, por ser las que ocurren en la naturaleza con más frecuencia:



$$K_{ai} (\text{Calcita}) = [Ca^{++}][CO_3^{--}]$$



$$\text{Kai (Yeso)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{SO}_4^{--}] \quad (18)$$



$$\text{Kai (Dolomita)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{Mg}^{++}] [\text{CO}_3^{--}]^2 \quad (19)$$

Las constantes de equilibrio  $K_e$  de los minerales anteriores son las siguientes:

$$K_e \text{ (Yeso)} = 10^{-4.75} \quad (20)$$

$$K_e \text{ (Calcita)} = 10^{-8.47} \quad (21)$$

$$K_e \text{ (Dolomita)} = 10^{-17.02} \quad (22)$$

$$K_e \text{ (Anhidrita)} = 10^{-4.54} \quad (23)$$

## Resultados

El valor de la presión del bióxido de carbono ( $\text{PCO}_2$ ) en el agua que se encuentra en contacto con la atmósfera y en equilibrio es de  $0.316 \times 10^{-3}$ , pero los valores observados para el agua del acuífero de la ciudad de México fueron mayores que el punto de equilibrio, de donde se deduce la existencia de una fuente adicional de bióxido de carbono en el agua.

El grado de saturación de la anhidrita, calcita y yeso se obtuvo comparando el valor calculado para cada muestra (Kai) con la constante de equilibrio ( $K_e$ ). Para ello se dividió Kai/ $K_e$ , y si el cociente resultante es igual a la unidad, se dice que existe equilibrio químico. Si dicho cociente es menor que 1, el agua tiene capacidad para disolver una mayor cantidad de sales, se considera insaturada y se puede clasificar como agua corrosiva. Si el resultado es mayor de 1 entonces se encuentra sobresaturada, y por lo tanto, tiene la propiedad de precipitar la sal por lo que se denomina agua incrustante. Se calculó el grado de incrustación del agua respecto a la anhidrita y al yeso; los resultados indican que se está muy lejos del límite de equilibrio y por lo tanto es una agua con alta capacidad de disolución de anhidrita.

En la zona estudiada, el grado de incrustación del agua respecto a la calcita arrojó valores por arriba de 1000 milésimas (que en algunos casos llegan incluso a las 5000 milésimas) en las posiciones central y oriente de la ciudad, entre las delegaciones de Iztacalco e Iztapalapa, en el Cerro de La Estrella y en San Lorenzo Tezonco, por lo que dichas aguas incrustantes de calcita pueden provocar taponamientos en ademes, columnas de bombeo u otros materiales con los que

están en contacto. En el resto del área analizada los valores son menores de 1000 milésimas, excepto en algunas puntas locales (véase ilustración 6).

## Variación de la salinidad respecto al tiempo

### Información disponible

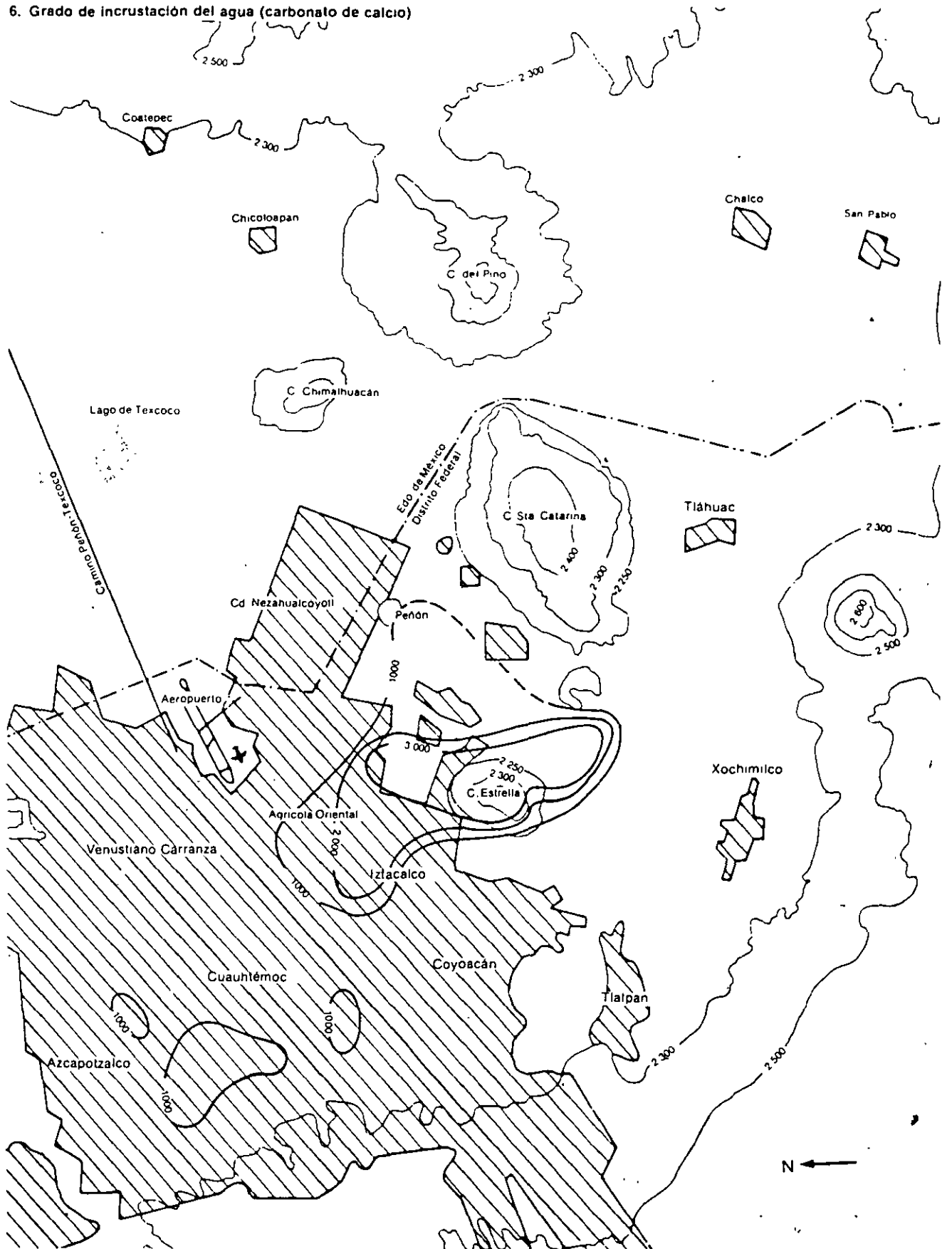
De los análisis químicos efectuados en los pozos municipales durante el periodo de 1955 a 1985 se seleccionaron los parámetros siguientes para su estudio detallado: sólidos totales disueltos, dureza total, cloruros, nitratos, fierro y manganeso. Los sólidos totales disueltos se eligieron porque indican el grado de salinidad del agua; la dureza total por ser un índice de calidad; los cloruros, debido a que se encuentran prácticamente ausentes en rocas volcánicas; los nitratos por indicar la contaminación orgánica; y el fierro y el manganeso, porque se han detectado en concentraciones nocivas en algunos puntos locales.

El estudio de la variación de la salinidad respecto al tiempo se efectuó en 100 pozos distribuidos en toda la zona metropolitana, de los cuales 30 no mostraron cambio alguno. A continuación se describen los principales efectos observados:

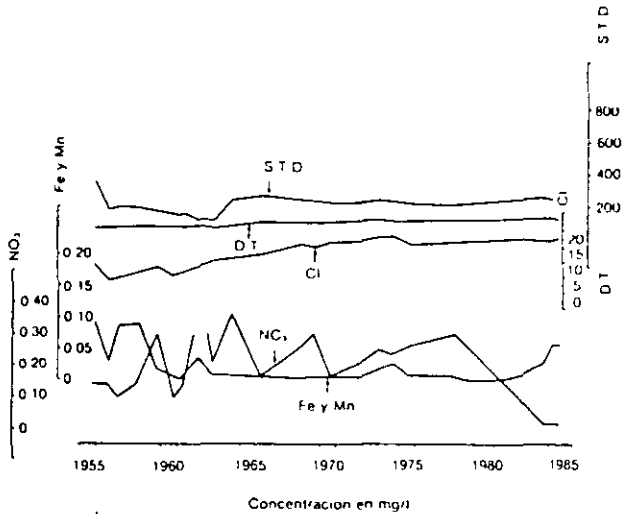
- Se notaron incrementos notables de cloruro en 17 pozos ubicados en el centro de la ciudad, y que coinciden con la zona donde se ha detectado una recarga al acuífero procedente de fugas de la red de distribución. El incremento se debe al cloro que se aplica al agua potable que se infiltra y alimenta al acuífero, como se muestra en el Pozo No. 15 (véase ilustración 7).
- En los 30 años analizados sólo se registró un aumento de fierro y manganeso en 5 pozos que corresponden a Santa Catarina y a la porción central de la zona urbana (Pozo 42, véase ilustración 8).
- El incremento de nitratos fue evidente en 29 de los 100 pozos graficados que se localizan principalmente en una franja al pie de los lomeríos del poniente de la ciudad. Se considera que ello se debe a la falta de saneamiento de los lomeríos (Pozo 26, véase ilustración 9).
- Los incrementos en casi todos los parámetros mencionados se dieron en 10 pozos; aquéllos más obvios presentan valores que varían entre 0.5 y 4.5 miligramos en el periodo de 30 años, lo que corresponde a un aumento anual entre 0.025 y 0.225 ppm (Pozo 83, véase ilustración 9).



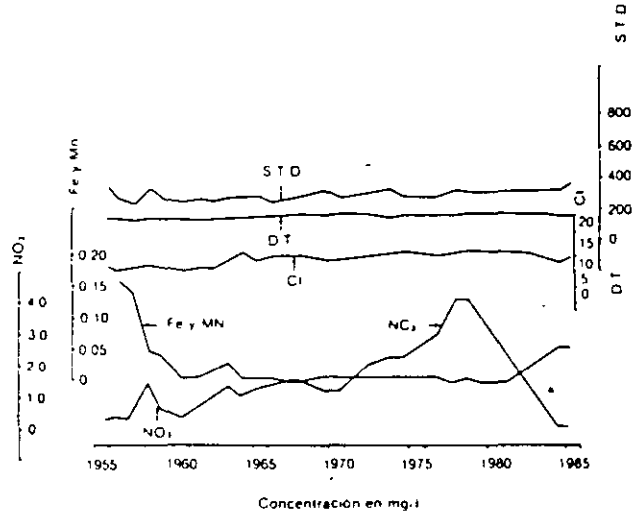
6. Grado de incrustación del agua (carbonato de calcio)



7. Pozo 15 (Albert y Berlin)



9. Pozo 26 (Axotla)



Familias de agua

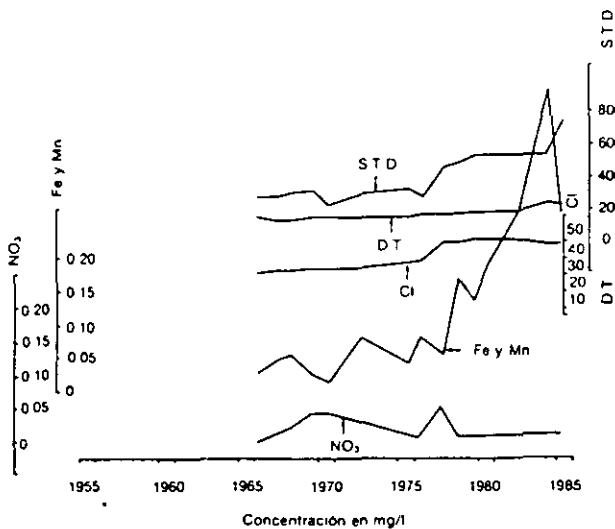
Se denomina familia de agua a la composición química representada por el principal catión y el principal anión en solución. Existen varios métodos para deducir la familia de agua a que pertenece una muestra. En este trabajo se utilizó el denominado de Piper o de Diagramas Triangulares, que consiste en graficar en dos triángulos equiláteros a los aniones y cationes principales y con cuya aplicación se obtuvieron las familias siguientes:

- Mixta sódico-bicarbonatada. Corresponde al agua de lluvia que ha disuelto poca cantidad de sales. El líquido circula a través de materiales de alta permeabilidad, como lavas y piroclásticos.

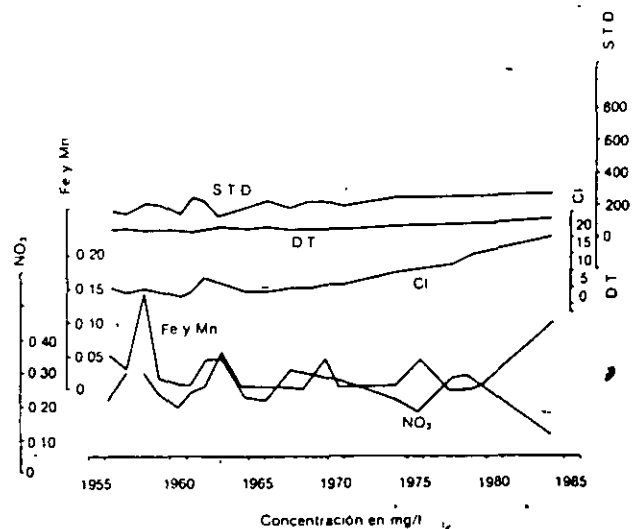
cos. que no permiten la incorporación de cantidades significativas de sales que pudieran modificar su composición química. Esta familia se encontró al poniente, tanto al pie de la Sierra de Las Cruces como en la parte baja.

- Mixta magnesiana-bicarbonatada. Se encontró en el acuífero de tipo basáltico al pie de la Sierra del Chichinautzin. El agua de lluvia, que es sódico-bicarbonatada, modifica ligeramente su composición química al disolver el calcio y el magnesio de los basaltos, para dar origen a la familia que aquí se trata. Se detectó principalmente en la zona de los pedregales, entre Contreras y Ciudad Universitaria, así como en el extremo sur del Distrito Federal entre Xochimilco y San Juan Ixtayopan.

8. Pozo 42 (Granjas Estrella)



10. Pozo 83 (Marina Nacional 1)



- Sódico-bicarbonatada. Este tipo se detectó en las porciones central y oriental de la ciudad, y se origina por dos factores. las arcillas del subsuelo producen un intercambio catiónico mediante el cual el calcio y el magnesio tienden a permanecer dentro de la estructura de la arcilla, mientras que el sodio se incorpora al agua en solución, y la presencia de horizontes de sales de bicarbonato de sodio, que son fácilmente disueltos por el agua en los pozos de la Agrícola Oriental y de Santa Catarina

### Conclusiones

La mayor parte del agua del acuífero contiene bajas concentraciones salinas, con excepción de zonas locales donde se detectan hasta 1,200 ppm, así como en el vaso del Lago de Texcoco donde se registran más de 20 000 ppm.

La alta salinidad es ocasionada por tres factores: a) Existencia de horizontes de sedimentos evaporíticos lacustres; b) influencia de zonas volcánicas, algunas posiblemente activas, que han impregnado las rocas de subsuelo, así como emanaciones gaseosas y el emplazamiento de sales de tipo hidrotermal; c) presencia de material orgánico en descomposición entre los sedimentos lacustres.

Los puntos que destacan como focos locales de contaminación natural en el acuífero corresponden a las áreas de la colonia Agrícola Oriental y de la Sierra de Santa Catarina, así como a la parte central del Vaso de Texcoco, aunque en esta porción la información es escasa.

La salinidad del agua en los últimos 20 años ha permanecido estable con excepción de algunos pozos en ciertas zonas. Se han encontrado incre-

mentos notables de cloruros en los pozos ubicados en la parte central de la ciudad, coincidiendo con la zona en donde se ha detectado un aporte de agua al acuífero procedente de las fugas de la red de distribución. El incremento salino aparentemente es debido al cloro que se añade al agua potable que se infiltra y alimenta al acuífero.

En los pozos localizados alrededor de la Sierra de Santa Catarina y en algunos de la porción central de la zona urbana se han detectado incrementos en hierro y manganeso, efecto que podría estar relacionado con el crecimiento de bacterias que incluyen al hierro dentro de su ciclo evolutivo.

La concentración salina es baja en los alrededores del área y se incrementa hacia la parte central, en forma similar a la dirección del flujo subterráneo. Una excepción se encuentra entre las Delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza, donde el agua disminuye su contenido salino por dilución con agua de fugas de la red de distribución.

Un incremento notable en nitratos ha sido detectado en pozos ubicados en una franja paralela al pie de la Sierra de Las Cruces, el cual es ocasionado por la falta de drenaje en los lomeríos de esa porción.

### Referencias

Lesser y Sanchez, *Informe sobre las actividades geohidrologicas en el Valle de México, 1985.*

Este artículo contiene en forma resumida los trabajos realizados en los dos últimos años por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal, al cual se agradecen las facilidades prestadas para su divulgación



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***SELECCIÓN DE SITIOS PARA DISPOSICIÓN  
DE DESECHOS SÓLIDOS***

**PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

## RELLENOS SANITARIOS

### I.- ESTUDIOS BASICOS PARA LA SELECCION DE SITIOS PARA DISPOSICION DE DESECHOS SOLIDOS

#### GEOLOGIA: TIPO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS

- ESTRUCTURAS
- FALLAS, GEOFISICA
- EROSION
- GEOFISICA

#### GEOHIDROLOGIA

- ROCAS PERMEABLES
- ROCAS IMPERMEABLES
- PROFUNDIDAD AL N.E.
- DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO
- PERMEABILIDAD DEL ACUIFERO

#### MECANICA DE SUELOS

- PERMEABILIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL

#### HIDROLOGIA SUPERFICIAL

- ARROYOS
- PRECIPITACION

#### CALCULO INFILTRACION

- PRECIPITACION
- PERMEABILIDAD
- PENDIENTE

#### DISEÑO PRELIMINAR

- TOPOGRAFIA
- DISEÑO DE LA BASE
- DISEÑO DE LA CUBIERTA
- RECOLECCION DE LIXIVIADOS
- VENTILACION
- PROTECCION SUPERFICIAL

#### SISTEMA DE MONITOREO

- DRENAJES DE LIXIVIADOS
- POZOS

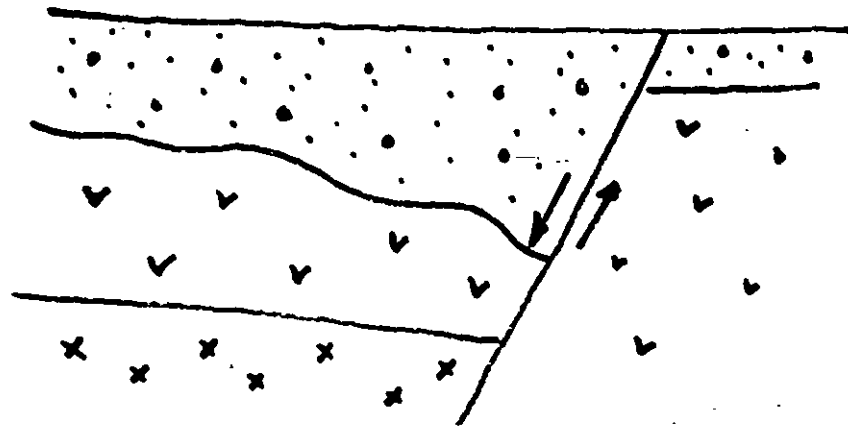
### II.- DISEÑO EJECUTIVO Y MANEJO DE RESIDUOS

### III.- OTROS ESTUDIOS

- ZONAS HABITADAS
- DIRECCION VIENTOS
- VIAS DE ACCESO

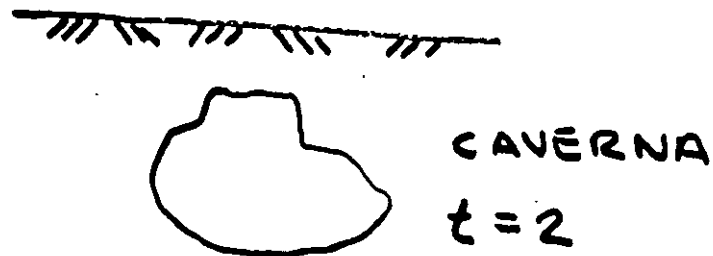
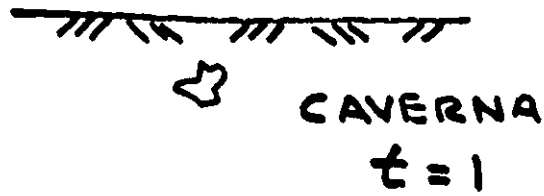
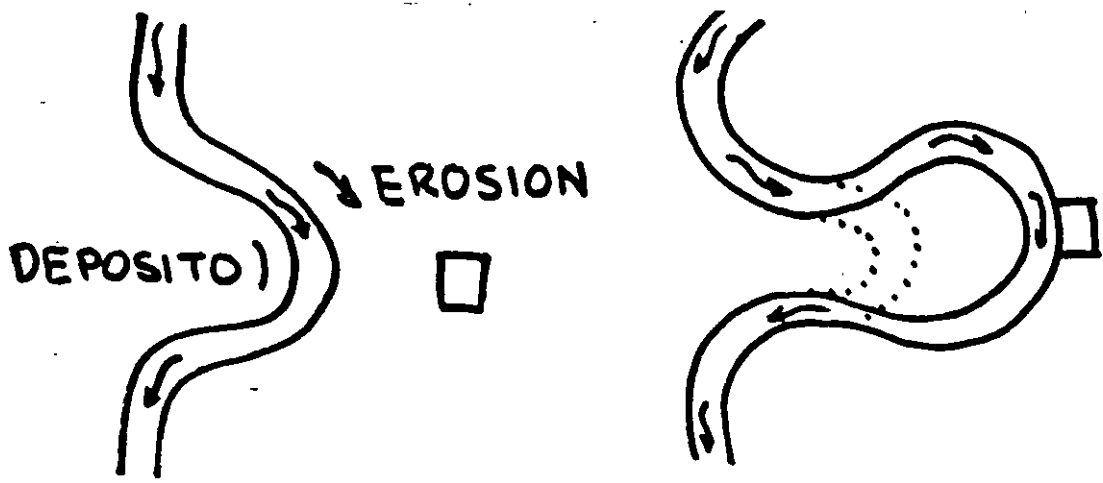
# 1.- MARCO GEOLOGICO

- GEOLOGIA DEL SUBSUELO
- SEDIMENTOLOGIA
- GEOLOGIA ESTRUCTURAL
- CORTES LITOLOGICOS
- GEOFISICA



## MOVIMIENTOS PROPIOS DE LA CORTEZA TERRESTRE

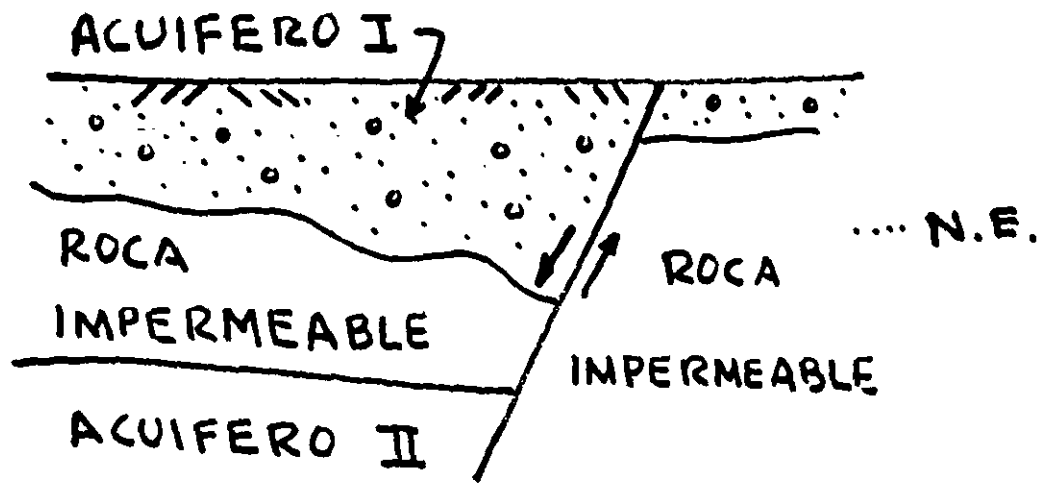
- SISMOS
- FALLAS ACTIVAS
- VULCANISMO
- EROSION
- MOVIMIENTOS DE TIERRA



TIEMPO GEOLOGICO  
EN QUE SE PODRIAN  
PRODUCIR CAMBIOS  
SOBRE EL TERRENO

## 2.- GEOHIDROLOGIA

### ROCAS PERMEABLES E IMPERMEABLES



### CARACTERISTICAS DE LAS ROCAS

- POROSIDAD
- PERMEABILIDAD
- FLUJO SUBTERRANEO

## 3.- MONITOREO

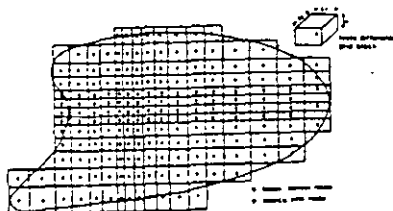
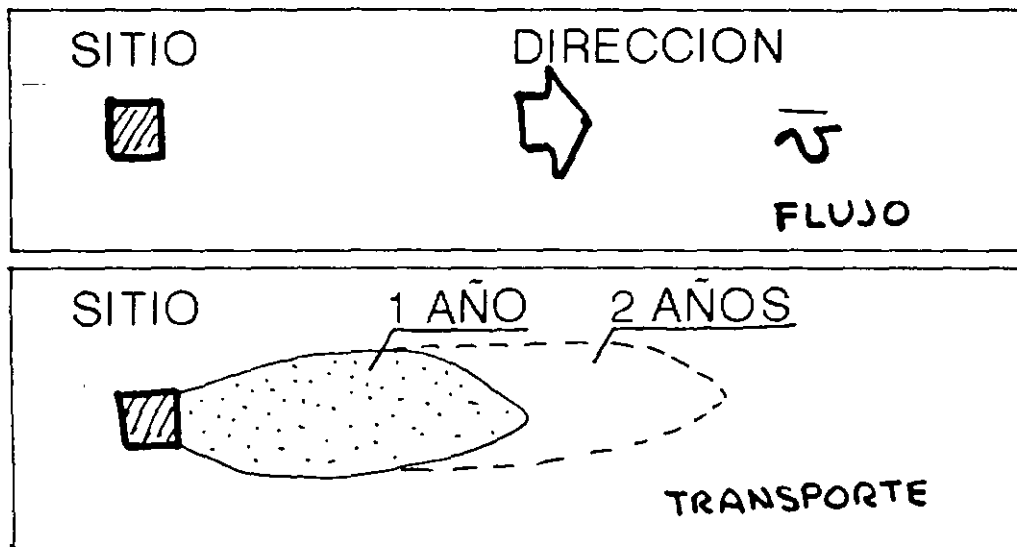
- CONDICIONES ANTERIORES A LA CONSTRUCCION DEL SITIO
- IDENTIFICACION DE LIXIVIADOS
- COMPOSICION DE ROCAS Y LIXIVIADOS
- PROCESOS FQB
- RETENCION, MOVILIDAD



# DETECCION DE LA PLUMA CONTAMINANTE

- PERMEABILIDAD
- DIRECCION DEL FLUJO
- REACCIONES QUIMICAS

## 4- MODELACION DE FLUJO Y TRANSPORTE



# OTROS ESTUDIOS

- DIRECCION DE VIENTOS
- CLIMATOLOGIA
- CORRIENTES SUPERFICIALES

PRINCIPLES OF GROUNDWATER FLOW 87

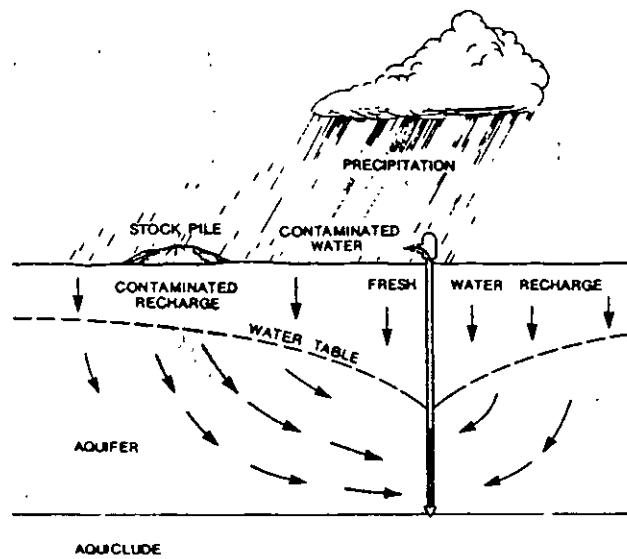


Figure 3-42. Influence of pumping on plume migration (adapted from Deutsch, U.S.G.S. 1963).

## DISEÑO

- TOPOGRAFIA DE LA BASE
- TOPOGRAFIA DE LA CUBIERTA
- DRENES EXTERIORES
- DRENES INTERIORES (LIQUIDOS Y GASES)
- ETC.

# RESUMEN

## 1-MARCO GEOHIDROLOGICO

GEOLOGIA, ROCAS PERMEABLES E IMPERMEABLES, PERMEABILIDAD, FLUJO SUBTERRANEO

2-IDENTIFICACION DE LIXIVIADOS Y SU COMPORTAMIENTO EN EL SUBSUELO  
MONITOREO, TIPO DE LIXIVIADOS, PROCESOS FQB, DETECCION DE LA PLUMA, MODELACION DE FLUJO Y TRANSPORTE

DISEÑO.- SE DEBE PARTIR DE QUE EL DISEÑO DEL SITIO NO PERMITIRA FUGAS DE LIXIVIADOS

MONITOREO.- EN CASO DE QUE EXISTIERAN LIXIVIADOS DEBE CONOCERSE SU COMPORTAMIENTO FQB Y MOVIMIENTO

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO.-

## **FACTORES QUE AFECTAN EL RELLENO**

TIPO DE BASURA

TIEMPO

TEMPERATURA AMBIENTE

HUMEDAD

OXIGENO

## **FACTORES QUE AFECTAN LA CANTIDAD DE LIXIVIADO**

PRECIPITACION

NIVEL ESTATICO SOMERO

CUBIERTA

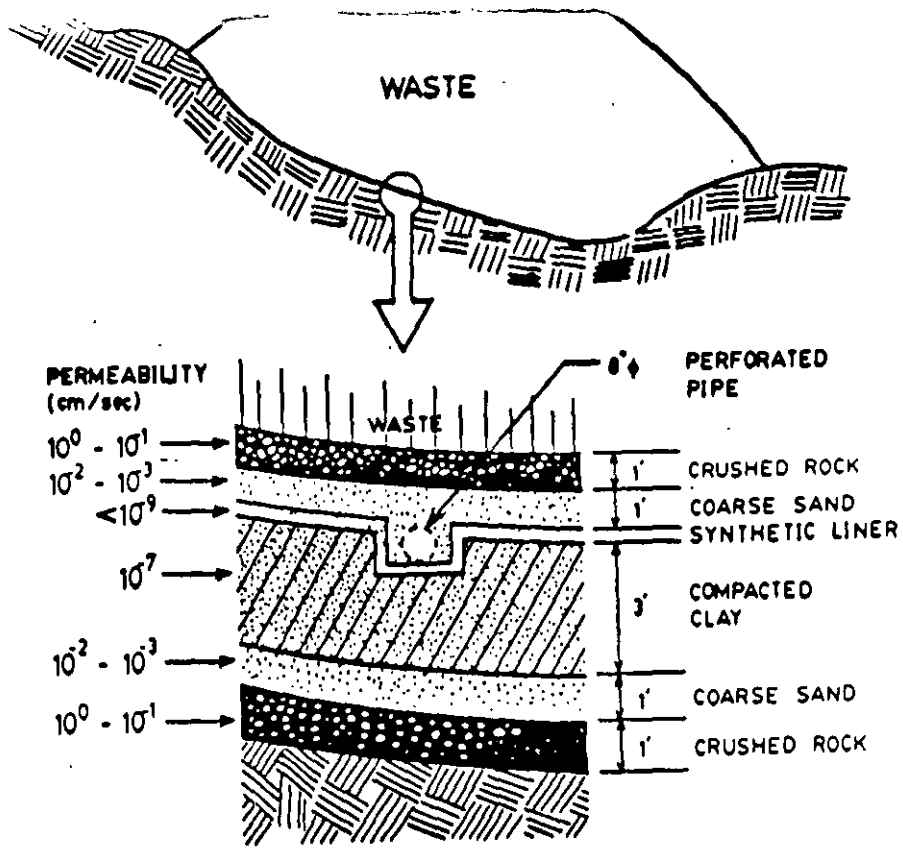


Figure 9-10. Typical landfill liner system.

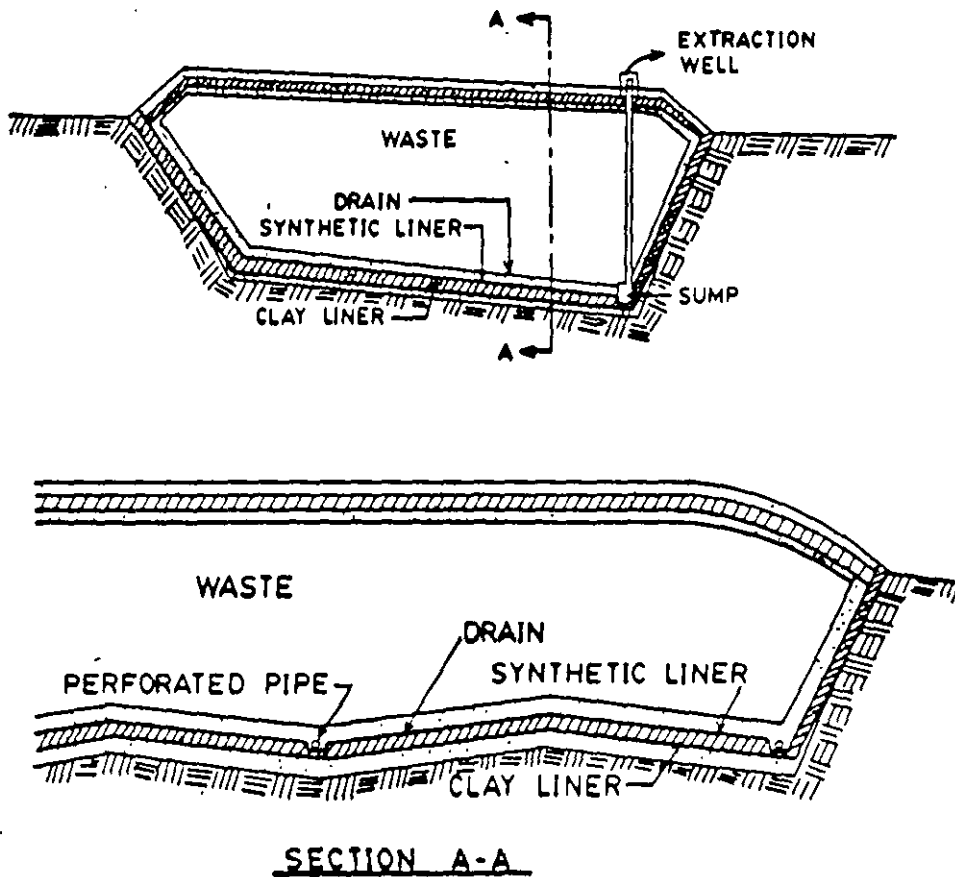


Figure 9-11. Schematic of hazardous waste landfill leachate collection system.

CONTROL OF SUBSURFACE MIGRATION

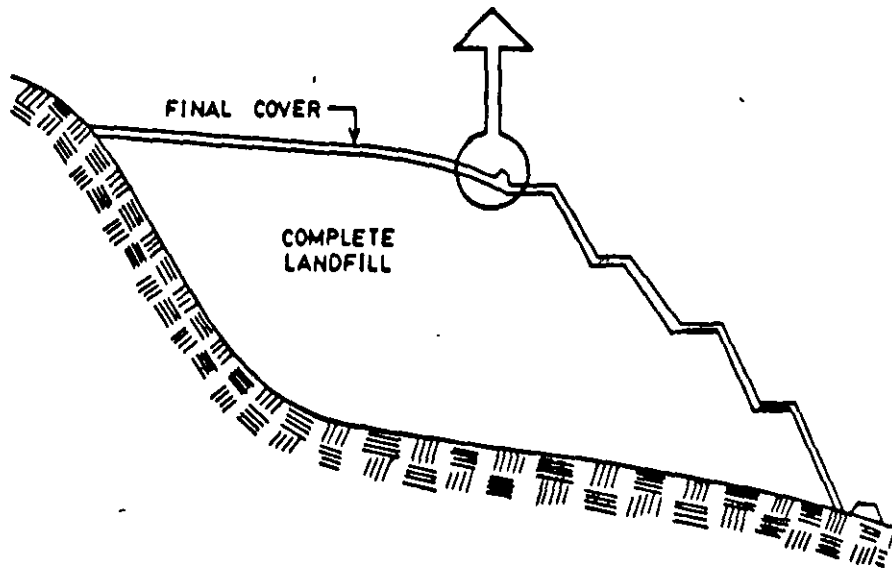
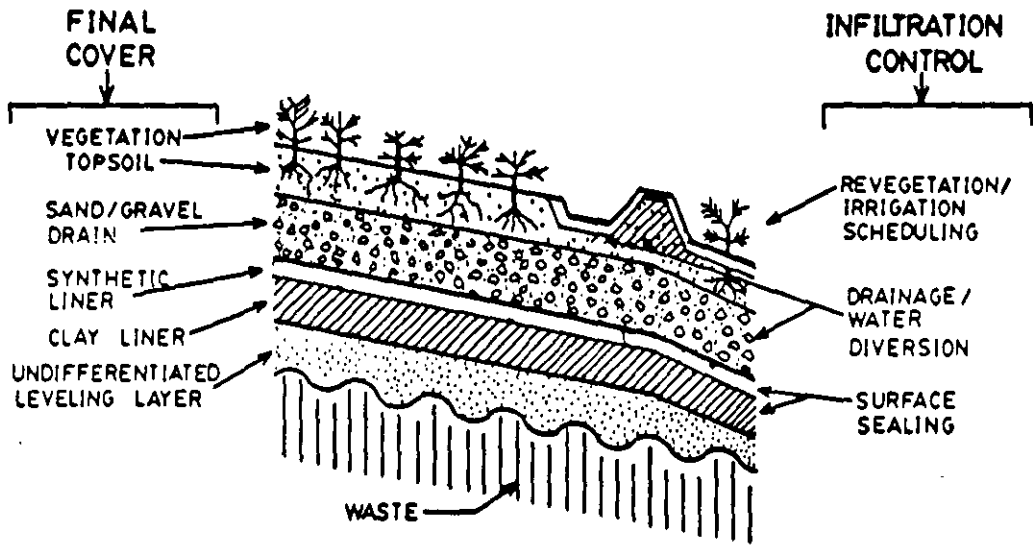
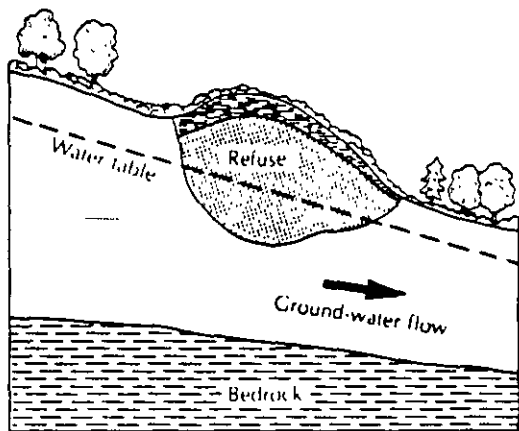
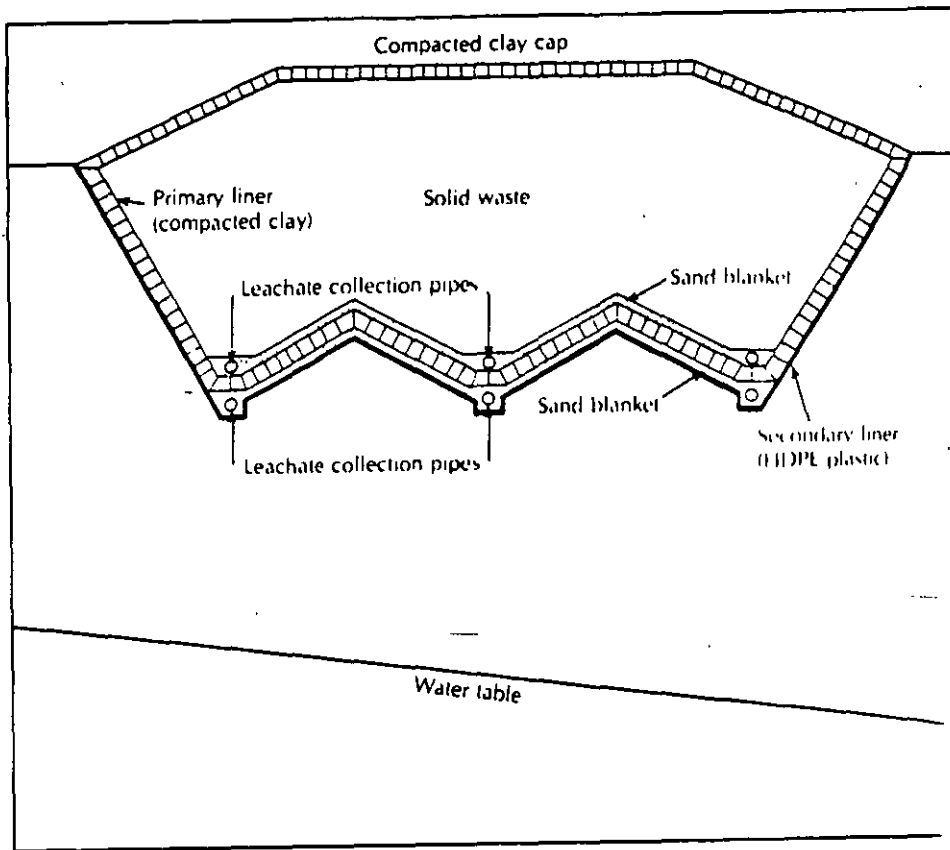
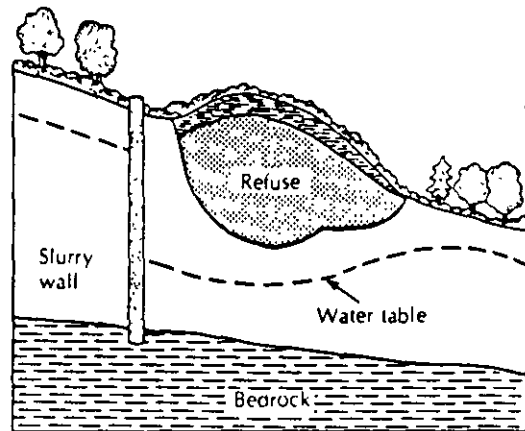


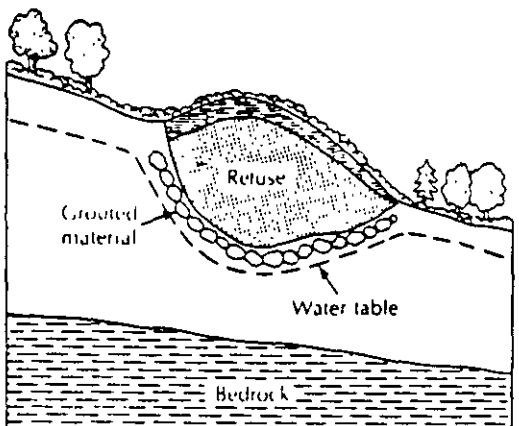
Figure 9-9. Infiltration control technologies.



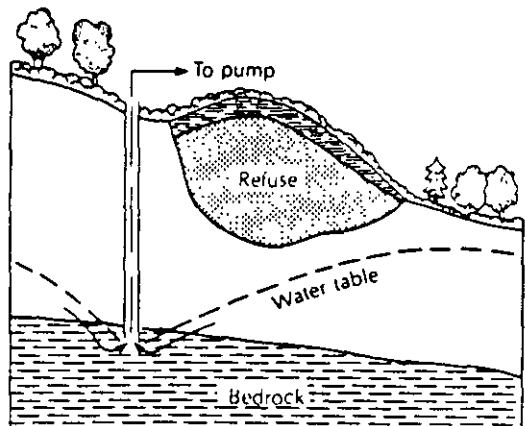
A No control measure



B Upgradient slurry wall to lower water table

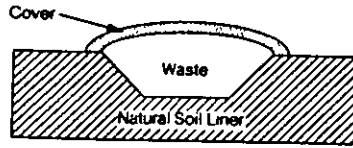


C Injection of grout to form a seal on sides and bottom

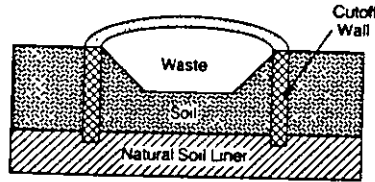


D Gradient control well to lower water table

(A) Waste Buried in a Natural Soil Liner



(B) Waste Buried Above a Natural Soil Liner



(A) Waste Buried in Unit with Engineered Liner

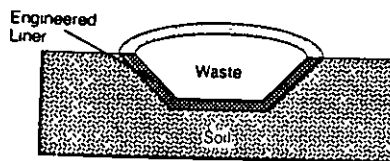


Fig. 5.3 Lining of waste disposal units with (a) natural soils, (b) vertical cutoff walls, and (c) engineered liners.

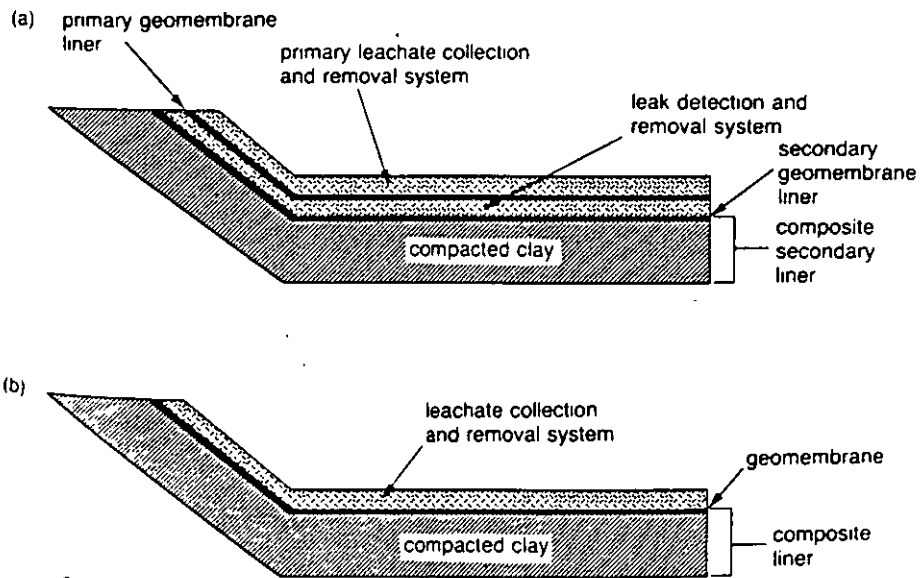


Fig. 5.4 Minimum liner requirements of the US Environmental Protection Agency (a) for hazardous waste landfills (b) for non-hazardous waste landfills



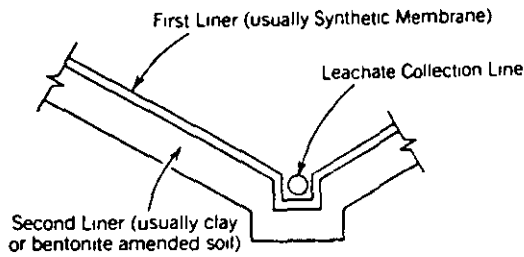


FIG. 1.3. Double liner.

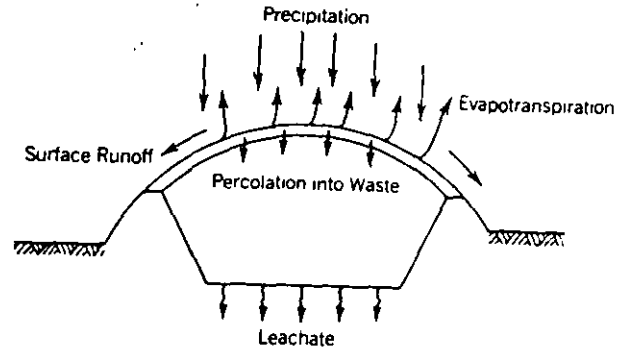


FIG. 3.1. How leachate is generated.

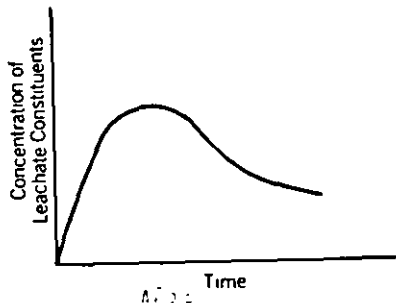


FIG. 3.2. Typical variation of leachate quality with time.

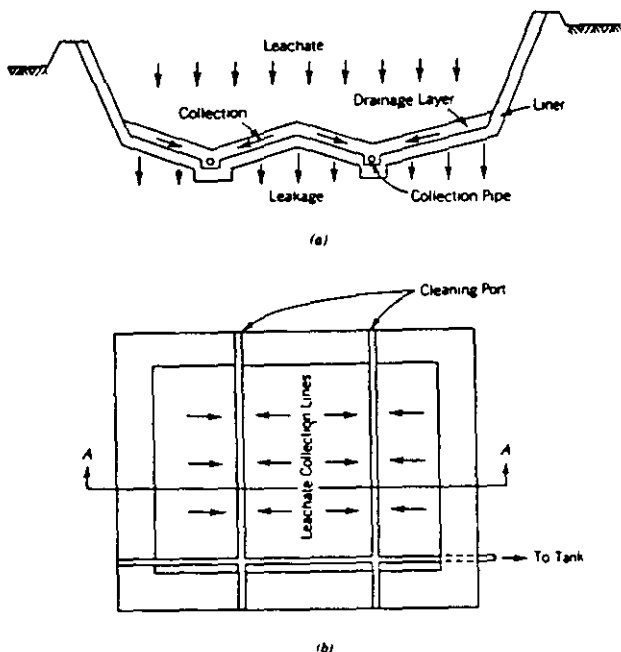


FIG. 6.1. Single lined containment landfill (a) cross section, (b) plan.

TABLE 3.14. Typical Leachate Quality of Municipal Waste\*

SI Number	Parameter	Overall Range (mg/liter except as indicated)
1	TDS	584-55,000
2	Specific conductance	480-72,500 $\mu\text{mho/cm}$
3	Total suspended solids	2-140,900
4	BOD	ND-195,000
5	COD	6.6-99,000
6	TOC	ND-40,000
7	pH	3.7-8.9 units
8	Total alkalinity	ND-15,050
9	Hardness	0.1-225,000
10	Chloride	2-11,375
11	Calcium	3.0-2,500
12	Sodium	12-6,010
13	Total Kjeldahl nitrogen	2-3,320
14	Iron	ND-4,000
15	Potassium	ND-3,200
16	Magnesium	4.0-780
17	Ammonia-nitrogen	ND-1,200
18	Sulfate	ND-1,850
19	Aluminum	ND-85
20	Zinc	ND-731
21	Manganese	ND-400
22	Total phosphorus	ND-234
23	Boron	0.87-13
24	Barium	ND-12.5
25	Nickel	ND-7.5
26	Nitrate-nitrogen	ND-250
27	Lead	ND-14.2
28	Chromium	ND-5.6
29	Antimony	ND-3.19
30	Copper	ND-9.0
31	Thallium	ND-0.78
32	Cyanide	ND-6
33	Arsenic	ND-70.2
34	Molybdenum	0.01-1.43
35	Tin	ND-0.16
36	Nitrite-nitrogen	ND-1.46
37	Selenium	ND-1.85
38	Cadmium	ND-0.4
39	Silver	ND-1.96
40	Beryllium	ND-0.36
41	Mercury	ND-3.0
42	Turbidity	40-500 Jackson units

Based on McGinley and Kmet (1984) and Lu et al. (1981)

\*Several bacteria and fungi species and several priority pollutants are found in the leachate.

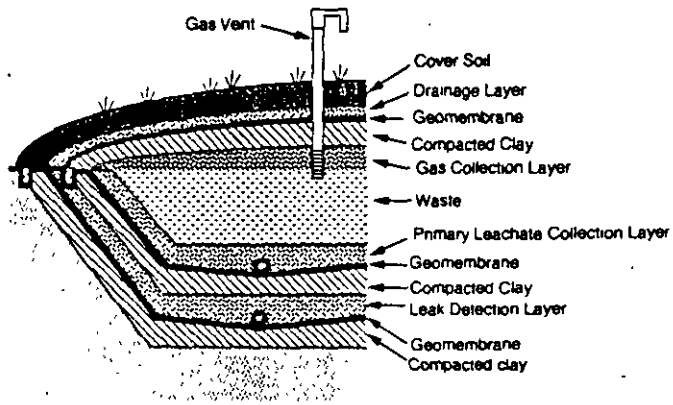


Fig. 5.6 Double composite liner system and multiple-component cover system in a waste containment unit.

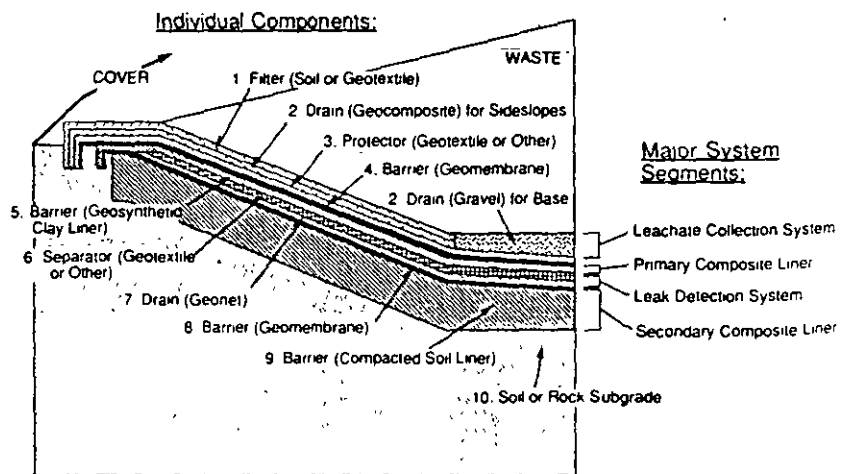


Fig. 5.7 Lining system recommended by Daniel and Koerner (1991).

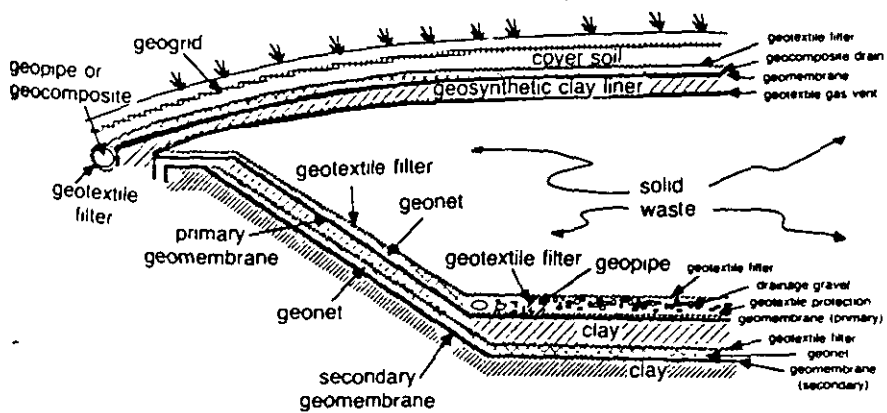


Fig. 8.2 Cross-section of solid waste landfill liner system and closure system illustrating the major use of geosynthetics.

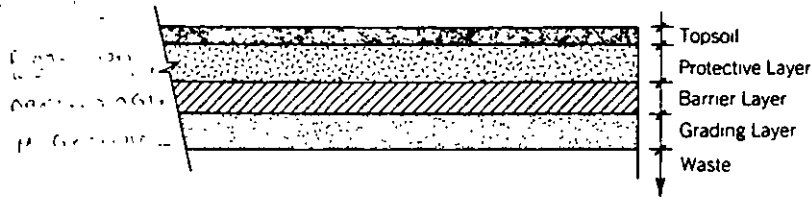


FIG. 8.23. Landfill final cover.

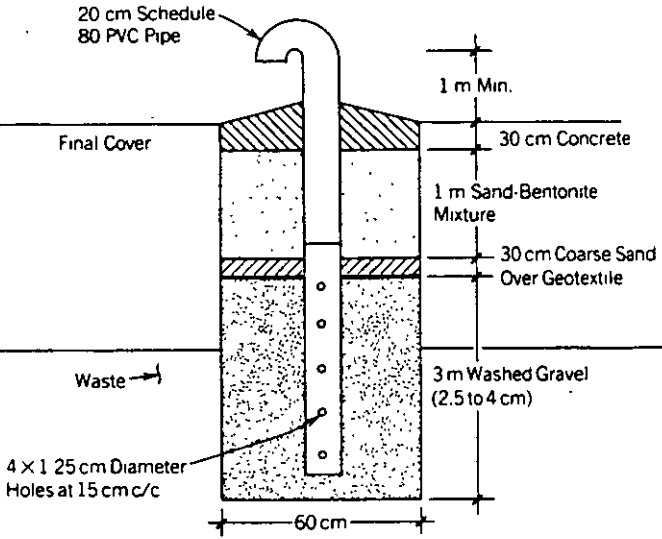


FIG. 8.24. Typical detail of an isolated gas vent.

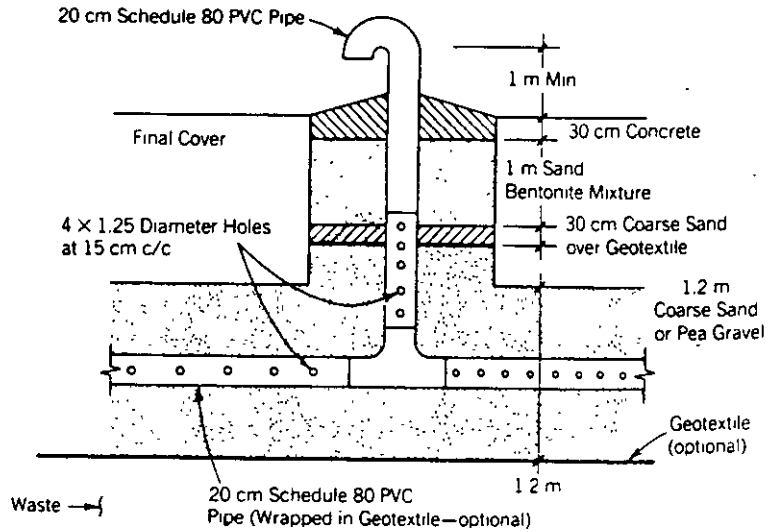


FIG. 8.25. Typical detail of a passive gas venting system with a header pipe.

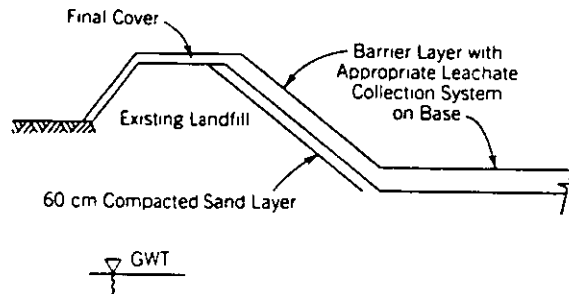
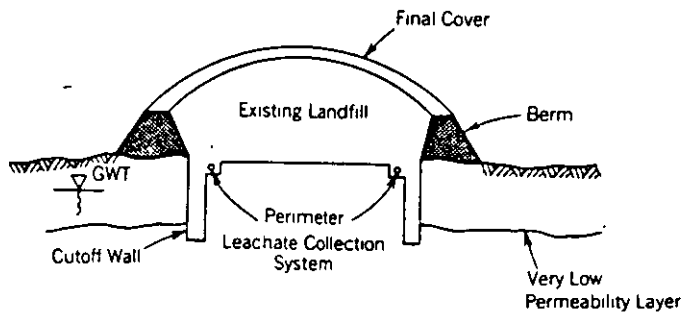


FIG. 8.33. Retrofitting of partially full existing landfill with a basal leachate collection system.

DESIGN OF LANDFILL ELEMENTS



34. Retrofitting of existing landfill with a perimeter leachate collection system.

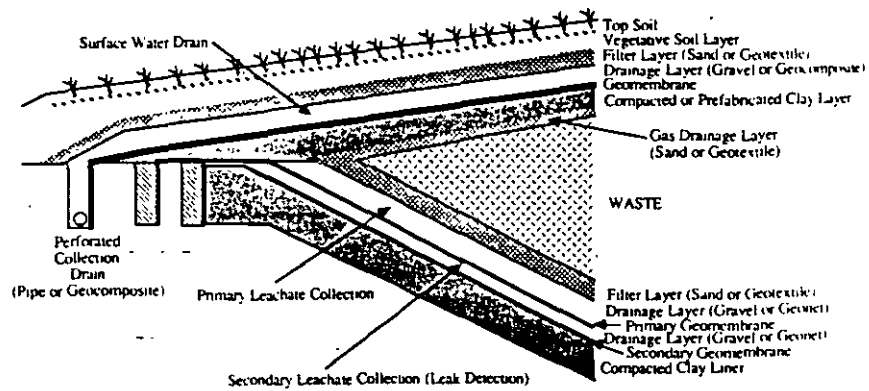


Fig. 9.1 Cross-section of solid waste facility illustrating various drainage layers involved in a liquid management program.

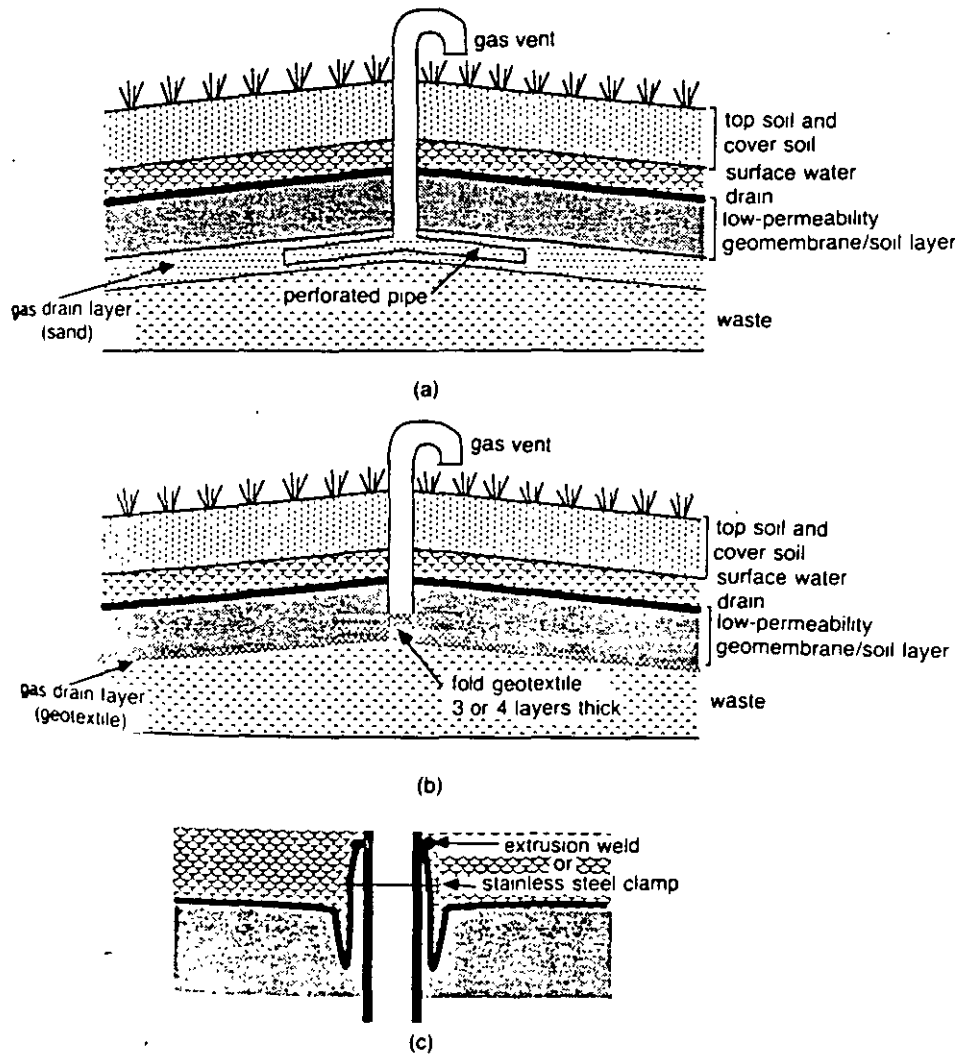


Fig. 9.9 Schemes for methane gas removal through final cover liner system: (a) natural soil vent system, after EPA (1989); (b) geotextile vent system; (c) suggested bellows at geomembrane penetration.

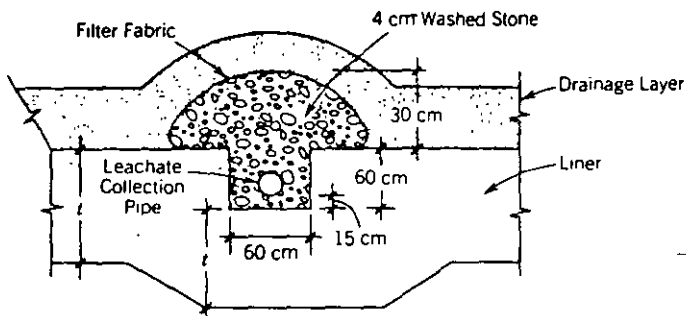


FIG. 8.1. Leachate collection trench detail

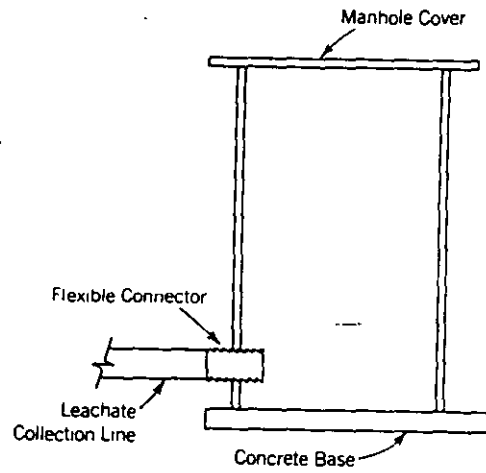


FIG. 8.5. Typical detail of landfill manhole.

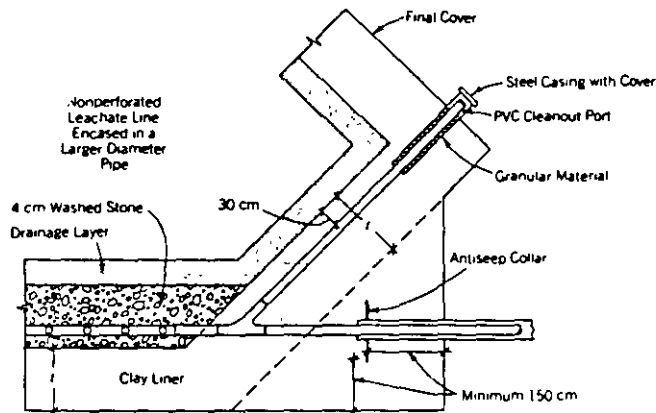


FIG. 8.2. Typical cleanout port

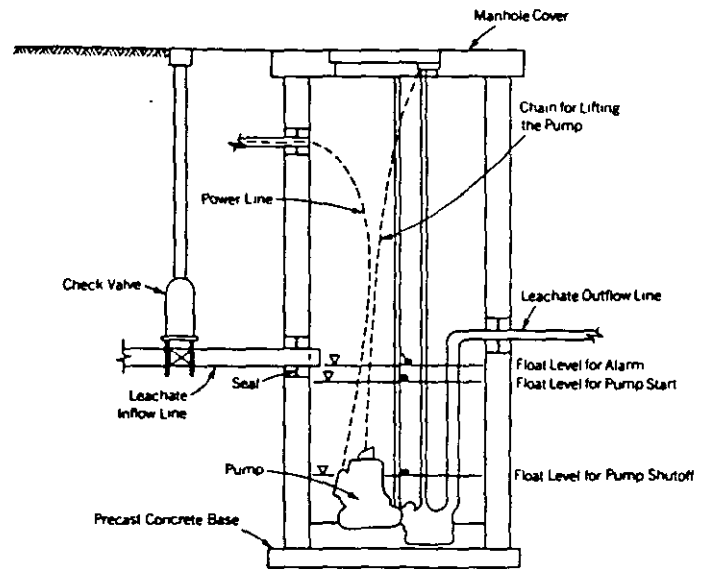


FIG. 8.7. Lift station

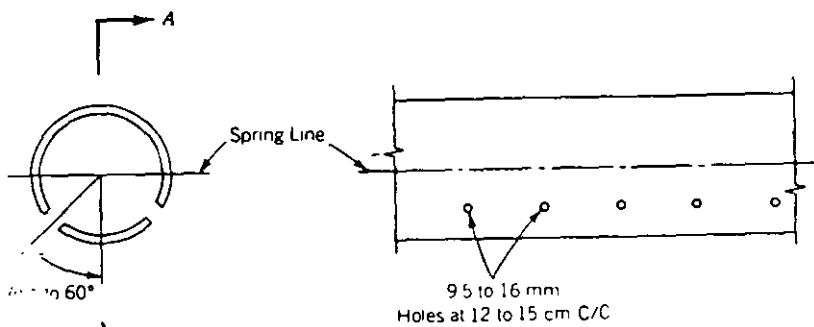


FIG. 8.6. Perforations in leachate collection pipes.

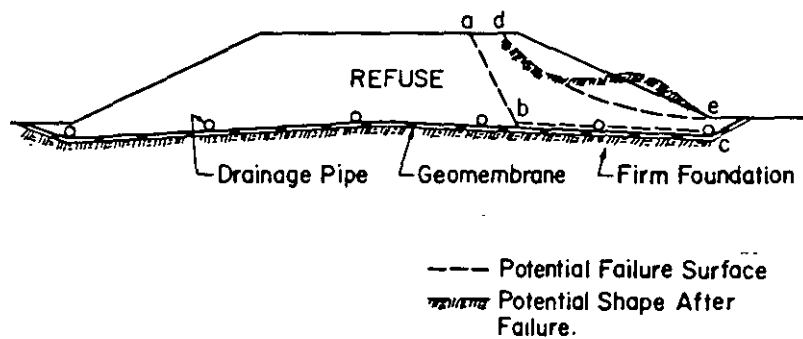


Fig. 11.1 Stability of a landfill on firm base.

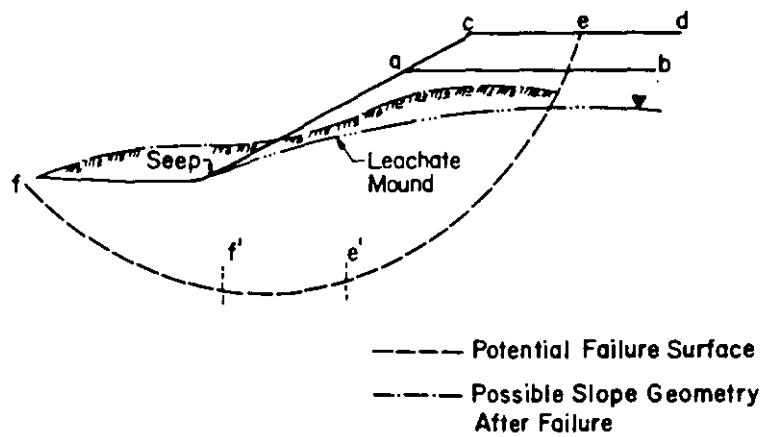


Fig. 11.2 Stability of a landfill expansion on soft base.

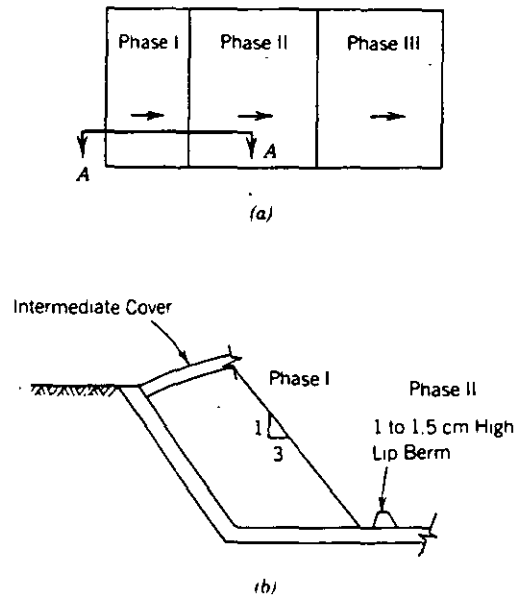


FIG. 11.3. Phasing plan for single stage landfill: (a) plan; (b) cross section A-A

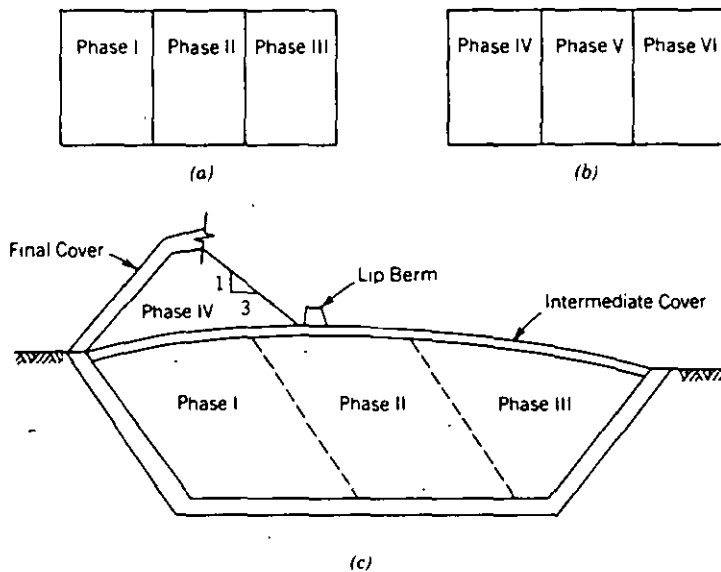


FIG. 11.4. Phasing plan for a multiphase landfill (a) lower phase; (b) upper phase; (c) cross section

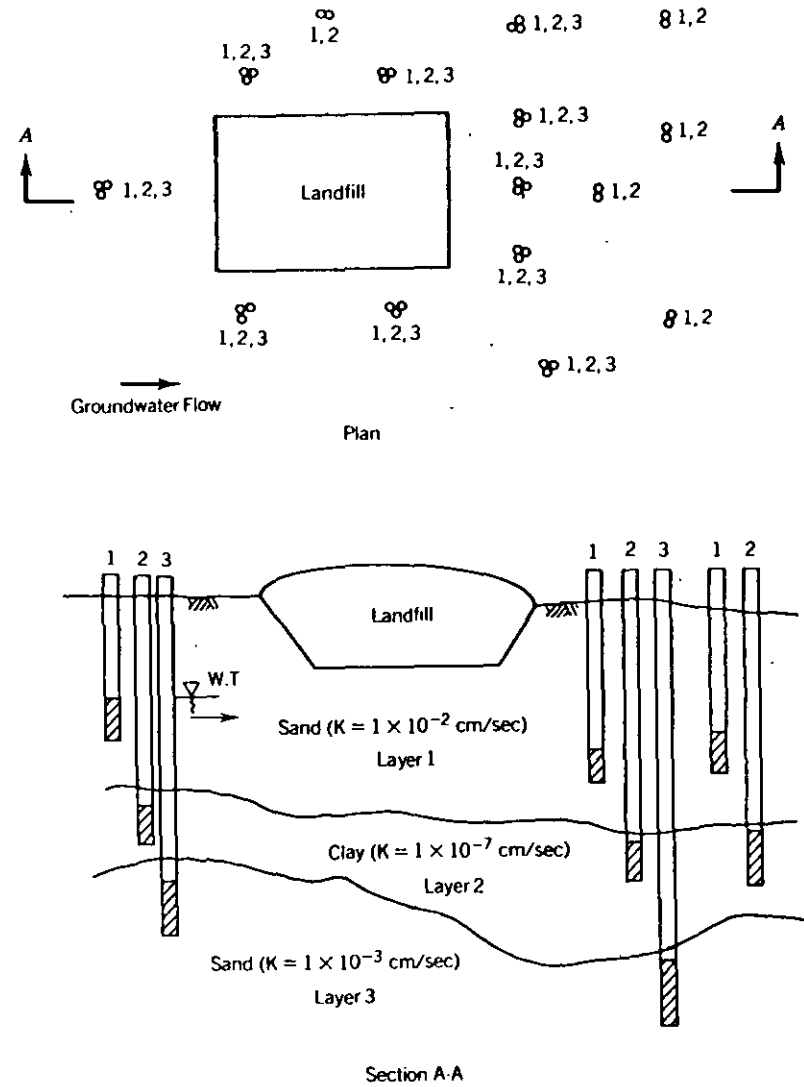
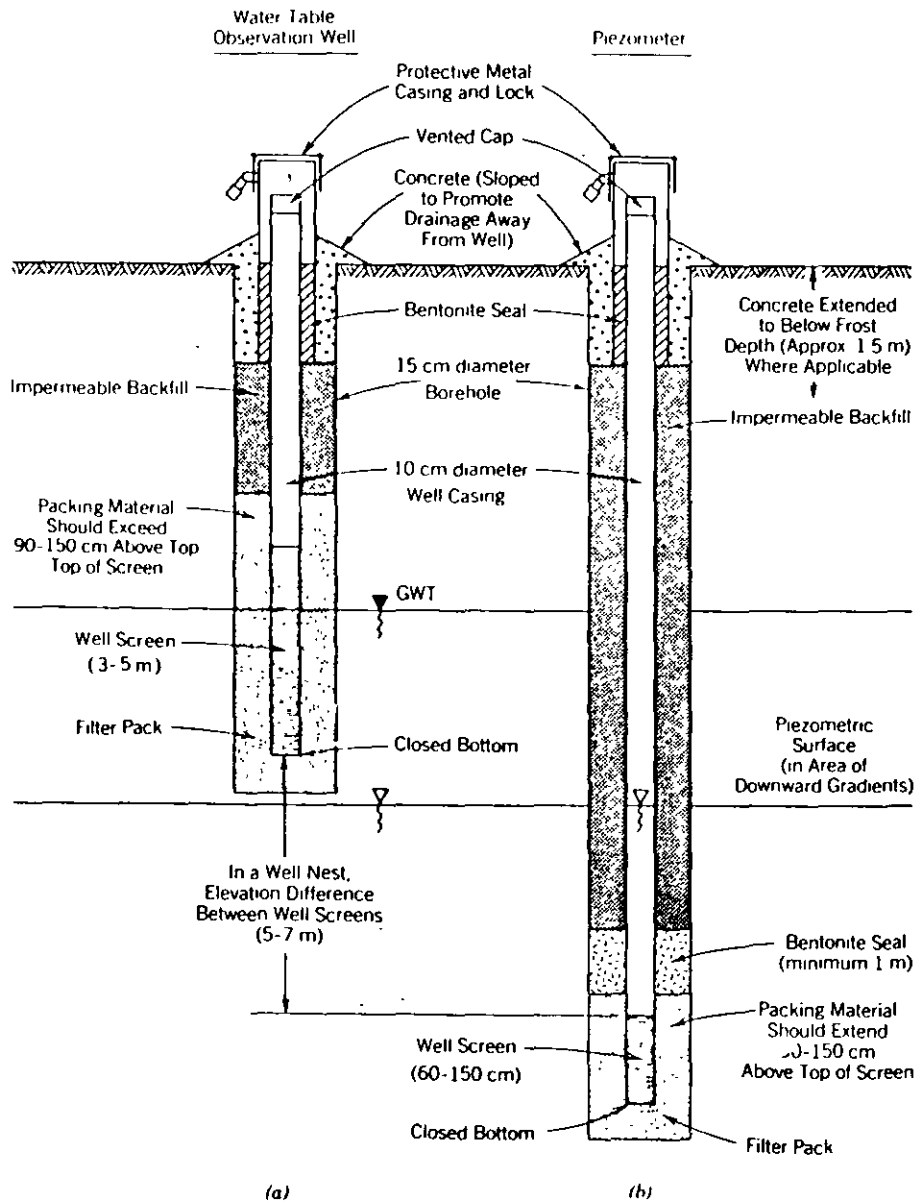
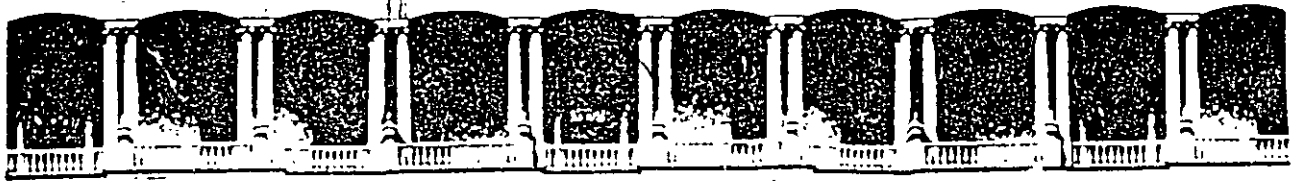


FIG. 10.11. Monitoring of an interbedded aquifer.

FIG. 10.13 Typical detail of a water table observation well and piezometer. Not to scale.





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO  
Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE***

**PRESENTADO POR: BIOL. HECTOR LESSER H.  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)**

---

## **TITULO PRIMERO**

### **Disposiciones Generales**

#### **CAPÍTULO I**

##### **Normas Preliminares**

**ARTICULO 1o.-** La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I.- Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.
- II.- Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación.
- III - La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente.
- IV - La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas
- V - El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas.
- VI - La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo
- VII - Garantizar la participación corresponsable de las personas en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.
- VIII El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución.
- IX - El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales en materia ambiental.
- X - El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan

En todo lo no previsto en la presente Ley, se aplicarán las disposiciones contenidas en otras leyes relacionadas con las materias que regula este ordenamiento.

**ARTICULO 20.-** Se consideran de utilidad pública.

- I.- El ordenamiento ecológico del territorio nacional en los casos previstos por ésta y las demás leyes aplicables;
- II.- El establecimiento, protección y preservación de las áreas naturales protegidas y de las zonas de restauración ecológica;
- III.- La formulación y ejecución de acciones de protección y preservación de la biodiversidad del territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, así como el aprovechamiento de material genético; y
- IV.- El establecimiento de zonas intermedias de salvaguardia, con motivo de la presencia de actividades consideradas como riesgosas.

**ARTICULO 30.-** Para los efectos de esta Ley se entiende por:

- I.- Ambiente: El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados;
- II.- Áreas naturales protegidas: Las zonas del territorio nacional y aquéllas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas y están sujetas al régimen previsto en la presente Ley.
- III.- Aprovechamiento sustentable: La utilización de los recursos naturales en forma que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman parte dichos recursos, por periodos indefinidos;
- IV.- Biodiversidad: La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte, comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas;
- V.- Biotecnología: Toda aplicación tecnológica que utilice recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos;
- VI.- Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico;
- VII.- Contaminante: Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural;
- VIII.- Contingencia ambiental: Situación de riesgo derivada de actividades humanas o fenómenos naturales, que puede poner en peligro la integridad de uno o varios ecosistemas;
- IX.- Control: Inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas en este ordenamiento;
- X.- Criterios ecológicos: Los lineamientos obligatorios contenidos en la presente Ley, para orientar las acciones de preservación y restauración del equilibrio ecológico, el aprovechamiento sustentable de los recursos

naturales y la protección al ambiente, que tendrán el carácter de instrumentos de la política ambiental:

- XI.- **Desarrollo Sustentable:** El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras;
- XII.- **Desequilibrio ecológico:** La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos;
- XIII.- **Ecosistema:** La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados
- XIV.- **Equilibrio ecológico:** La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.
- XV.- **Elemento natural:** Los elementos físicos, químicos y biológicos que se presentan en un tiempo y espacio determinado sin la inducción del hombre.
- XVI.- **Emergencia ecológica:** Situación derivada de actividades humanas o fenómenos naturales que al afectar severamente a sus elementos, pone en peligro a uno o varios ecosistemas;
- XVII. **Fauna silvestre:** Las especies animales que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo sus poblaciones menores que se encuentran bajo control del hombre, así como los animales domésticos que por abandono se tornen salvajes y por ello sean susceptibles de captura y apropiación
- XVII **Flora silvestre:** Las especies vegetales así como los hongos, que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo las poblaciones o especímenes de estas especies que se encuentran bajo control del hombre.
- XIX - **Impacto ambiental:** Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.
- XX - **Manifestación del impacto ambiental:** El documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo.
- XXI - **Material genético:** Todo material de origen vegetal, animal, microbiano o de otro tipo que contenga unidades funcionales de herencia.
- XXII **Material peligroso:** Elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas.
- XXII **Ordenamiento ecológico:** El instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos.
- XXI **Preservación:** El conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y hábitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en

V.- sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitat naturales.

XXV.Prevencción: El conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro del ambiente;

XXV Protección: El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente y controlar su deterioro:

I.-

XXV Recursos biológicos: Los recursos genéticos, los organismos o partes de ellos, las poblaciones, o cualquier

II.- otro componente biótico de los ecosistemas con valor o utilidad real o potencial para el ser humano.

XXV Recursos genéticos: El material genético de valor real o potencial:

III.-

XXI Recurso natural: El elemento natural susceptible de ser aprovechado en beneficio del hombre.

X.-

XXX.Región ecológica: La unidad del territorio nacional que comparte características ecológicas comunes.

XXX Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción,

I.- consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó;

XXX Residuos peligrosos. Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características

II.- corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente;

XXX Restauración: Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que

III - propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

XXX Secretaria La Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, y

IV -

XXX Vocacion natural: Condiciones que presenta un ecosistema para sostener una o varias actividades sin que se

V - produzcan desequilibrios ecológicos

## **CAPÍTULO II**

### **Distribución de Competencias y Coordinación**

**ARTICULO 40.-** La Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios ejercerán sus atribuciones en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, de conformidad con la distribución de competencias prevista en esta Ley y en otros ordenamientos legales

**ARTICULO 50.-** Son facultades de la Federación

I - La formulación y conducción de la política ambiental nacional.

II - La aplicación de los instrumentos de la política ambiental previstos en esta Ley en los términos en ella establecidos, así como la regulación de las acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción federal.

III - La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico en el territorio nacional o en las zonas sujetas a

la soberanía y jurisdicción de la nación, originados en el territorio o zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de otros Estados, o en zonas que estén más allá de la jurisdicción de cualquier Estado;

- IV.- La atención de los asuntos que, originados en el territorio nacional o las zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de la nación afecten el equilibrio ecológico del territorio o de las zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de otros Estados, o a las zonas que estén más allá de la jurisdicción de cualquier Estado;
- V.- La expedición de las normas oficiales mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento en las materias previstas en esta Ley;
- VI - La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como para la preservación de los recursos naturales, de conformidad con esta Ley, otros ordenamientos aplicables y sus disposiciones reglamentarias;
- VII - La participación en la prevención y el control de emergencias y contingencias ambientales, conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan;
- VIII. El establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas de competencia federal;
- IX - La formulación, aplicación y evaluación de los programas de ordenamiento ecológico general del territorio y de los programas de ordenamiento ecológico marino a que se refiere el artículo 19 BIS de esta Ley;
- X.- La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades a que se refiere el artículo 28 de esta Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes;
- XI - La regulación del aprovechamiento sustentable, la protección y la preservación de los recursos forestales, el suelo, las aguas nacionales, la biodiversidad, la flora, la fauna y los demás recursos naturales de su competencia;
- XII.- La regulación de la contaminación de la atmósfera, proveniente de todo tipo de fuentes emisoras, así como la prevención y el control en zonas o en caso de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal;
- XIII El fomento de la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes provenientes de cualquier tipo de fuente, en coordinación con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, así como el establecimiento de las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos;
- XIV La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente;
- XV - La regulación de la prevención de la contaminación ambiental originada por ruido, vibraciones, energía térmica, luminica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente;
- XVI La promoción de la participación de la sociedad en materia ambiental, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley;
- XVII La integración del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales y su puesta a disposición al público en los términos de la presente Ley;
- XVII La emisión de recomendaciones a autoridades Federales, Estatales y Municipales, con el propósito de

I.- promover el cumplimiento de la legislación ambiental;

XIX. La vigilancia y promoción, en el ámbito de su competencia, del cumplimiento de esta Ley y los demás ordenamientos que de ella se deriven;

XX.- La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más entidades federativas, y

XXI. Las demás que esta Ley u otras disposiciones legales atribuyan a la Federación.

**ARTICULO 60.-** Las atribuciones que esta Ley otorga a la Federación, serán ejercidas por el Poder Ejecutivo Federal a través de la Secretaría, salvo las que directamente correspondan al Presidente de la República por disposición expresa de la ley.

Cuando, por razón de la materia y de conformidad con la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal u otras disposiciones legales aplicables, se requiera de la intervención de otras dependencias, la Secretaría ejercerá sus atribuciones en coordinación con las mismas.

Las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal que ejerzan atribuciones que les confieren otros ordenamientos cuyas disposiciones se relacionen con el objeto de la presente Ley, ajustarán su ejercicio a los criterios para preservar el equilibrio ecológico, aprovechar sustentablemente los recursos naturales y proteger el ambiente en ella incluidos, así como a las disposiciones de los reglamentos, normas oficiales mexicanas, programas de ordenamiento ecológico y demás normatividad que de la misma se derive

**ARTICULO 70.-** Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades.

I.- La formulación, conducción y evaluación de la política ambiental estatal.

II - La aplicación de los instrumentos de política ambiental previstos en las leyes locales en la materia, así como la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realice en bienes y zonas de jurisdicción estatal, en las materias que no estén expresamente atribuidas a la Federación

III.- La prevención y control de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como por fuentes móviles que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia Federal.

IV.- La regulación de actividades que no sean consideradas altamente riesgosas para el ambiente, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 149 de la presente Ley.

V - El establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas previstas en la legislación local, con la participación de los gobiernos municipales.

VI - La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley

VII - La prevención y el control de la contaminación generada por la emisión de ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales al equilibrio ecológico o al ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como, en su caso, de fuentes móviles que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia Federal.

VIII La regulación del aprovechamiento sustentable y la prevención y control de la contaminación de las aguas de jurisdicción estatal, así como de las aguas nacionales que tengan asignadas.

- IX.- La formulación, expedición y ejecución de los programas de ordenamiento ecológico del territorio a que se refiere el artículo 20 BIS 2 de esta Ley, con la participación de los municipios respectivos;
- X.- La prevención y el control de la contaminación generada por el aprovechamiento de las sustancias no reservadas a la Federación, que constituyan depósitos de naturaleza similar a los componentes de los terrenos, tales como rocas o productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales para la construcción u ornamento de obras;
- XI.- La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico o el ambiente de dos o más municipios.
- XII.- La participación en emergencias y contingencias ambientales, conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan.
- XIII. La vigilancia del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Federación, en las - materias y supuestos a que se refieren las fracciones III, VI y VII de este artículo.
- XIV. La conducción de la política estatal de información y difusión en materia ambiental:
- XV.- La promoción de la participación de la sociedad en materia ambiental, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley;
- XVI. La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades que no se encuentren expresamente - reservadas a la Federación, por la presente Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 35 BIS 2 de la presente Ley.
- XVII El ejercicio de las funciones que en materia de preservación del equilibrio ecológico y protección al ambiente - les transfiera la Federación, conforme a lo dispuesto en el artículo 11 de este ordenamiento.
- XVII La formulación, ejecución y evaluación del programa estatal de protección al ambiente.
- I -
- XIX. La emisión de recomendaciones a las autoridades competentes en materia ambiental, con el propósito de - promover el cumplimiento de la legislación ambiental.
- XX - La atención coordinada con la Federación de asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más Entidades Federativas, cuando así lo consideren conveniente las Entidades Federativas respectivas y
- XXI La atención de los demás asuntos que en materia de preservación del equilibrio ecológico y protección al - ambiente les conceda esta Ley u otros ordenamientos en concordancia con ella y que no estén otorgados expresamente a la Federación

**ARTICULO 80.-** Corresponden a los Municipios de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades

- I - La formulación, conducción y evaluación de la política ambiental municipal.
- II - La aplicación de los instrumentos de política ambiental previstos en las leyes locales en la materia y la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en bienes y zonas de jurisdicción municipal, en las materias que no estén expresamente atribuidas a la Federación o a los Estados
- III - La aplicación de las disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas que funcionen como establecimientos mercantiles o de servicios, así como de emisiones de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes móviles que no sean consideradas



de jurisdicción federal, con la participación que de acuerdo con la legislación estatal corresponda al gobierno del estado;

- IV.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley;
- V.- La creación y administración de zonas de preservación ecológica de los centros de población, parques urbanos, jardines públicos y demás áreas análogas previstas por la legislación local;
- VI.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, radiaciones electromagnéticas y lumínica y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos mercantiles o de servicios, así como la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones que, en su caso, resulten aplicables a las fuentes móviles excepto las que conforme a esta Ley sean consideradas de jurisdicción federal;
- VII.- La aplicación de las disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación de las aguas que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población, así como de las aguas nacionales que tengan asignadas, con la participación que conforme a la legislación local en la materia corresponda a los gobiernos de los estados;
- VIII.- La formulación y expedición de los programas de ordenamiento ecológico local del territorio a que se refiere el artículo 20 BIS 4 de esta Ley, en los términos en ella previstos, así como el control y la vigilancia del uso y cambio de uso del suelo, establecidos en dichos programas;
- IX.- La preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en los centros de población, en relación con los efectos derivados de los servicios de alcantarillado, limpia, mercados centrales de abasto, panteones, rastros, tránsito y transporte locales, siempre y cuando no se trate de facultades otorgadas a la Federación o a los Estados en la presente Ley;
- X.- La participación en la atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más municipios y que generen efectos ambientales en su circunscripción territorial;
- XI.- La participación en emergencias y contingencias ambientales conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan;
- XII.- La vigilancia del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Federación, en las materias y supuestos a que se refieren las fracciones III, IV, VI y VII de este artículo;
- XIII.- La formulación y conducción de la política municipal de información y difusión en materia ambiental;
- XIV.- La participación en la evaluación del impacto ambiental de obras o actividades de competencia estatal, cuando las mismas se realicen en el ámbito de su circunscripción territorial;
- XV.- La formulación, ejecución y evaluación del programa municipal de protección al ambiente;
- XVI.- La atención de los demás asuntos que en materia de preservación del equilibrio ecológico y protección al ambiente les conceda esta Ley u otros ordenamientos en concordancia con ella y que no estén otorgados expresamente a la Federación o a los Estados;

**ARTICULO 96.-** Corresponden al Gobierno del Distrito Federal, en materia de preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, conforme a las disposiciones legales que expida la Asamblea Legislativa del

Distrito Federal, las facultades a que se refieren los artículos 7o. y 8o. de esta Ley.

**ARTICULO 10.-** Los Congresos de los Estados, con arreglo a sus respectivas Constituciones y la Asamblea Legislativa del Distrito Federal, expedirán las disposiciones legales que sean necesarias para regular las materias de su competencia previstas en esta Ley. Los ayuntamientos, por su parte, dictarán los bandos de policía y buen gobierno, los reglamentos, circulares y disposiciones administrativas que correspondan, para que en sus respectivas circunscripciones, se cumplan las previsiones del presente ordenamiento.

En el ejercicio de sus atribuciones, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, observarán las disposiciones de esta Ley y las que de ella se deriven.

**ARTICULO 11.-** La Federación, por conducto de la Secretaría, podrá suscribir convenios o acuerdos de coordinación con el objeto de que los Estados o el Distrito Federal asuman las siguientes funciones:

- I.- El manejo y vigilancia de las áreas naturales protegidas de competencia Federal.
- II.- El control de los residuos peligrosos considerados de baja peligrosidad conforme a las disposiciones del presente ordenamiento.
- III - La prevención y control de la contaminación de la atmósfera proveniente de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal;
- IV - El control de acciones para la protección, preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en la zona federal marítimo terrestre, así como en la zona federal de los cuerpos de agua considerados como nacionales.
- V.- La protección, preservación y restauración de los recursos naturales a que se refiere esta Ley, y de la flora y fauna silvestre, así como el control de su aprovechamiento sustentable.
- VII. La realización de acciones operativas tendientes a cumplir con los fines previstos en este ordenamiento, y

La realización de acciones para la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley

Asimismo, los Estados podrán suscribir con sus Municipios convenios de coordinación, previo acuerdo con la Federación, a efecto de que estos asuman la realización de las funciones anteriormente referidas

**ARTICULO 12.-** Los convenios o acuerdos de coordinación que suscriban la Federación con el Distrito Federal y los Estados, y estos con los Municipios para los propósitos a que se refiere el artículo anterior, deberán ajustarse a las siguientes bases

- I - Definirán con precisión las materias y actividades que constituyan el objeto del convenio o acuerdo.
- II - Deberá ser congruente el propósito de los convenios o acuerdos de coordinación con las disposiciones del Plan Nacional de Desarrollo y con la política ambiental nacional.
- III - Se describirán los bienes y recursos que aporten las partes esclareciendo cual será su destino específico y su forma de administración
- IV - Se especificará la vigencia del convenio o acuerdo, sus formas de terminación y de solución de controversias y, en su caso, de prórroga
- V - Definirán el órgano u órganos que llevarán a cabo las acciones que resulten de los convenios o acuerdos de coordinación, incluyendo las de evaluación y

**VI.-** Contendrán las demás estipulaciones que las partes consideren necesarias para el correcto cumplimiento del convenio o acuerdo.

Los convenios a que se refiere el presente artículo, deberán ser publicados en el Diario Oficial de la Federación y en el órgano oficial del gobierno local respectivo

**ARTICULO 13.-** Los Estados podrán suscribir entre sí y con el Gobierno del Distrito Federal, en su caso, convenios o acuerdos de coordinación y colaboración administrativa, con el propósito de atender y resolver problemas ambientales comunes y ejercer sus atribuciones a través de las instancias que al efecto determinen, atendiendo a lo dispuesto en las leyes locales que resulten aplicables. Las mismas facultades podrán ejercer los municipios entre sí, aunque pertenezcan a entidades federativas diferentes, de conformidad con lo que establezcan las leyes señaladas.

**ARTICULO 14.-** Las dependencias y entidades de la Administración Pública se coordinarán con la Secretaría para la realización de las acciones conducentes, cuando exista peligro para el equilibrio ecológico de alguna zona o región del país, como consecuencia de desastres producidos por fenómenos naturales, o por caso fortuito o fuerza mayor.

**ARTICULO 14 BIS.-** Las autoridades ambientales de la Federación y de las entidades federativas integrarán un órgano que se reunirá periódicamente con el propósito de coordinar sus esfuerzos en materia ambiental, analizar e intercambiar opiniones en relación con las acciones y programas en la materia, evaluar y dar seguimiento a las mismas, así como convenir las acciones y formular las recomendaciones pertinentes, particularmente en lo que se refiere a los objetivos y principios establecidos en los artículos primero y décimo quinto de esta Ley

### **CAPÍTULO III**

#### **Política Ambiental**

**ARTICULO 15.-** Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios

- I.- Los ecosistemas son patrimonio común de la sociedad y de su equilibrio dependen la vida y las posibilidades productivas del país
- II.- Los ecosistemas y sus elementos deben ser aprovechados de manera que se asegure una productividad óptima y sostenida, compatible con su equilibrio e integridad.
- III - Las autoridades y los particulares deben asumir la responsabilidad de la protección del equilibrio ecológico.
- IV - Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo debe incentivarse a quien proteja el ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales
- V - La responsabilidad respecto al equilibrio ecológico comprende tanto las condiciones presentes como las que determinarán la calidad de la vida de las futuras generaciones
- VI - La prevención de las causas que los generan es el medio más eficaz para evitar los desequilibrios ecológicos.
- VII - El aprovechamiento de los recursos naturales renovables debe realizarse de manera que se asegure el mantenimiento de su diversidad y renovabilidad.

- VIII. Los recursos naturales no renovables deben utilizarse de modo que se evite el peligro de su agotamiento y la generación de efectos ecológicos adversos:
- 
- IX.- La coordinación entre las dependencias y entidades de la administración pública y entre los distintos niveles de gobierno y la concertación con la sociedad, son indispensables para la eficacia de las acciones ecológicas;
- X - El sujeto principal de la concertación ecológica son no solamente los individuos, sino también los grupos y organizaciones sociales. El propósito de la concertación de acciones ecológicas es reorientar la relación entre la sociedad y la naturaleza: -
- XI.- En el ejercicio de las atribuciones que las leyes confieren al Estado, para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y, en general, inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se considerarán los criterios de preservación y restauración del equilibrio ecológico.
- XII.- Toda persona tiene derecho a disfrutar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. Las autoridades en los términos de ésta y otras leyes, tomarán las medidas para garantizar ese derecho
- XIII. Garantizar el derecho de las comunidades, incluyendo a los pueblos indígenas, a la protección, preservación, uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la salvaguarda y uso de la biodiversidad, de acuerdo a lo que determine la presente Ley y otros ordenamientos aplicables
- XIV La erradicación de la pobreza es necesaria para el desarrollo sustentable.
- 
- XV - Las mujeres cumplen una importante función en la protección, preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y en el desarrollo. Su completa participación es esencial para lograr el desarrollo sustentable.
- XVI. Es interés de la nación que las actividades que se lleven a cabo dentro del territorio nacional y en aquellas zonas donde ejerce su soberanía y jurisdicción, no afecten el equilibrio ecológico de otros países o de zonas de jurisdicción internacional.
- XVII Las autoridades competentes en igualdad de circunstancias ante las demás naciones, promoverán la preservación y restauración del equilibrio de los ecosistemas regionales y globales. y
- 
- XVII A través de la cuantificación del costo de la contaminación del ambiente y del agotamiento de los recursos naturales provocados por las actividades económicas en un año determinado, se calculará el Producto Interno Neto Ecológico. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática integrará el Producto Interno Neto Ecológico al Sistema de Cuentas Nacionales

**ARTICULO 16.-** Las entidades federativas y los municipios en el ámbito de sus competencias observarán y aplicarán los principios a que se refieren las fracciones I a XV del artículo anterior

## **CAPÍTULO IV**

### **Instrumentos de la Política Ambiental**

#### **SECCIÓN I**

##### **Planeación Ambiental**

**ARTICULO 17.-** En la planeación nacional del desarrollo se deberá incorporar la política ambiental y el ordenamiento ecológico que se establezcan de conformidad con esta Ley y las demás disposiciones en la materia

En la planeación y realización de las acciones a cargo de las dependencias y entidades de la administración pública federal, conforme a sus respectivas esferas de competencia, así como en el ejercicio de las atribuciones que las leyes confieran al Gobierno Federal para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y en general inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se observarán los lineamientos de política ambiental que establezcan el Plan Nacional de Desarrollo y los programas correspondientes.

**ARTICULO 18.-** El Gobierno Federal promoverá la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de los programas que tengan por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, según lo establecido en esta Ley y las demás aplicables.

## **SECCIÓN II**

### **Ordenamiento Ecológico del Territorio**

**ARTICULO 19.-** En la formulación del ordenamiento ecológico se deberán considerar los siguientes criterios

- I.- La naturaleza y características de los ecosistemas existentes en el territorio nacional y en las zonas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción;
- II.- La vocación de cada zona o región, en función de sus recursos naturales, la distribución de la población y las actividades económicas predominantes;
- III.- Los desequilibrios existentes en los ecosistemas por efecto de los asentamientos humanos, de las actividades económicas o de otras actividades humanas o fenómenos naturales;
- IV.- El equilibrio que debe existir entre los asentamientos humanos y sus condiciones ambientales, y
- V.- El impacto ambiental de nuevos asentamientos humanos, vías de comunicación y demás obras o actividades

**ARTICULO 19 BIS.-** El ordenamiento ecológico del territorio nacional y de las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, se llevará a cabo a través de los programas de ordenamiento ecológico

- I - General del Territorio.
- II - Regionales
- III - Locales
- IV - Marinos

**ARTICULO 20.-** El programa de ordenamiento ecológico general del territorio será formulado por la Secretaría, en el marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática y tendrá por objeto determinar

- I - La regionalización ecológica del territorio nacional y de las zonas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción a partir del diagnóstico de las características, disponibilidad y demanda de los recursos naturales, así como de las actividades productivas que en ellas se desarrollen y de la ubicación y situación de los asentamientos humanos existentes
- II - Los lineamientos y estrategias ecológicas para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, así como para la localización de actividades productivas y de los asentamientos humanos

**ARTICULO 20 BIS.-** La formulación, expedición, ejecución y evaluación del ordenamiento ecológico general del territorio se llevará a cabo de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Planeación. Asimismo, la Secretaría deberá

promover la participación de grupos y organizaciones sociales y empresariales, instituciones académicas y de investigación, y demás personas interesadas, de acuerdo con lo establecido en esta Ley, así como en las demás disposiciones que resulten aplicables.

**ARTICULO 20 BIS 1.-** La Secretaría deberá apoyar técnicamente la formulación y ejecución de los programas de ordenamiento ecológico regional y local, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley.

Las entidades federativas y los municipios podrán participar en las consultas y emitir las recomendaciones que estimen pertinentes para la formulación de los programas de ordenamiento ecológico general del territorio y de ordenamiento ecológico marino.

**ARTICULO 20 BIS 2.-** Los Gobiernos de los Estados y del Distrito Federal, en los términos de las leyes locales aplicables, podrán formular y expedir programas de ordenamiento ecológico regional, que abarquen la totalidad o una parte del territorio de una entidad federativa

Cuando una región ecológica se ubique en el territorio de dos o más entidades federativas, el Gobierno Federal, el de los Estados y Municipios respectivos, y en su caso el del Distrito Federal, en el ámbito de sus competencias, podrán formular un programa de ordenamiento ecológico regional. Para tal efecto, la Federación celebrará los acuerdos o convenios de coordinación procedentes con los gobiernos locales involucrados

**ARTICULO 20 BIS 3.-** Los programas de ordenamiento ecológico regional a que se refiere el artículo 20 BIS 2 deberán contener, por lo menos:

- I - La determinación del área o región a ordenar, describiendo sus atributos físicos, bióticos y socioeconómicos, así como el diagnóstico de sus condiciones ambientales y las tecnologías utilizadas por los habitantes del área.
- II - La determinación de los criterios de regulación ecológica para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que se localicen en la región de que se trate, así como para la realización de actividades productivas y la ubicación de asentamientos humanos, y
- III - Los lineamientos para su ejecución, evaluación, seguimiento y modificación.

**ARTICULO 20 BIS 4.-** Los programas de ordenamiento ecológico local serán expedidos por las autoridades municipales, y en su caso del Distrito Federal, de conformidad con las leyes locales en materia ambiental y tendrán por objeto:

- I - Determinar las distintas áreas ecológicas que se localicen en la zona o región de que se trate describiendo sus atributos físicos, bióticos y socioeconómicos, así como el diagnóstico de sus condiciones ambientales y de las tecnologías utilizadas por los habitantes del área de que se trate.
- II - Regular, fuera de los centros de población, los usos del suelo con el propósito de proteger el ambiente y preservar, restaurar y aprovechar de manera sustentable los recursos naturales respectivos, fundamentalmente en la realización de actividades productivas y la localización de asentamientos humanos, y
- III - Establecer los criterios de regulación ecológica para la protección, preservación, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales dentro de los centros de población, a fin de que sean considerados en los planes o programas de desarrollo urbano correspondientes

**ARTICULO 20 BIS 5.-** Los procedimientos bajo los cuales serán formulados, aprobados, expedidos, evaluados y modificados los programas de ordenamiento ecológico local, serán determinados en las leyes estatales o del Distrito Federal en la materia, conforme a las siguientes bases:

- I - Existirá congruencia entre los programas de ordenamiento ecológico marinos, en su caso, y general del

territorio y regionales, con los programas de ordenamiento ecológico local;

- II.- Los programas de ordenamiento ecológico local cubrirán una extensión geográfica cuyas dimensiones permitan regular el uso del suelo, de conformidad con lo previsto en esta Ley;
- III.- Las previsiones contenidas en los programas de ordenamiento ecológico local del territorio, mediante las cuales se regulen los usos del suelo, se referirán únicamente a las áreas localizadas fuera de los límites de los centros de población. Cuando en dichas áreas se pretenda la ampliación de un centro de población o la realización de proyectos de desarrollo urbano, se estará a lo que establezca el programa de ordenamiento ecológico respectivo, el cual sólo podrá modificarse mediante el procedimiento que establezca la legislación local en la materia.
- IV.- Las autoridades locales harán compatibles el ordenamiento ecológico del territorio y la ordenación y regulación de los asentamientos humanos, incorporando las previsiones correspondientes en los programas de ordenamiento ecológico local, así como en los planes o programas de desarrollo urbano que resulten aplicables.  
  
Asimismo, los programas de ordenamiento ecológico local preverán los mecanismos de coordinación, entre las distintas autoridades involucradas, en la formulación y ejecución de los programas
- V.- Cuando un programa de ordenamiento ecológico local incluya un área natural protegida, competencia de la Federación, o parte de ella, el programa será elaborado y aprobado en forma conjunta por la Secretaría y los Gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, según corresponda.
- VI.- Los programas de ordenamiento ecológico local regularán los usos del suelo, incluyendo a ejidos, comunidades y pequeñas propiedades, expresando las motivaciones que lo justifiquen.
- VII.- Para la elaboración de los programas de ordenamiento ecológico local, las leyes en la materia establecerán los mecanismos que garanticen la participación de los particulares, los grupos y organizaciones sociales empresariales y demás interesados. Dichos mecanismos incluirán, por lo menos, procedimientos de difusión y consulta pública de los programas respectivos.  
  
Las leyes locales en la materia establecerán las formas y los procedimientos para que los particulares participen en la ejecución, vigilancia y evaluación de los programas de ordenamiento ecológico a que se refiere este precepto.
- VIII.- El Gobierno Federal podrá participar en la consulta a que se refiere la fracción anterior y emitirá las recomendaciones que estime pertinentes.

**ARTICULO 20 BIS 6.-** La Secretaría podrá formular, expedir y ejecutar, en coordinación con las Dependencias competentes, programas de ordenamiento ecológico marino. Estos programas tendrán por objeto el establecer los lineamientos y previsiones a que deberá sujetarse la preservación, restauración, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales existentes en áreas o superficies específicas ubicadas en zonas marinas mexicanas, incluyendo las zonas federales adyacentes.

**ARTICULO 20 BIS 7.-** Los programas de ordenamiento ecológico marino deberán contener, por lo menos

- I - La delimitación precisa del área que abarcará el programa;
- II - La determinación de las zonas ecológicas a partir de las características, disponibilidad y demanda de los recursos naturales en ellas comprendidas, así como el tipo de actividades productivas que en las mismas se

desarrollen, y

III.- Los lineamientos, estrategias y demás previsiones para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, así como la realización de actividades productivas y demás obras o actividades que puedan afectar los ecosistemas respectivos.

En la determinación de tales previsiones deberán considerarse los criterios establecidos en esta Ley, las disposiciones que de ella se deriven, los tratados internacionales de los que México sea parte, y demás ordenamientos que regulen la materia.

### SECCIÓN III

#### Instrumentos Económicos

**ARTICULO 21.-** La Federación, los Estados y el Distrito Federal, en el ámbito de sus respectivas competencias, diseñarán, desarrollarán y aplicarán instrumentos económicos que incentiven el cumplimiento de los objetivos de la política ambiental, y mediante los cuales se buscará.

- I - Promover un cambio en la conducta de las personas que realicen actividades industriales, comerciales y de servicios, de tal manera que sus intereses sean compatibles con los intereses colectivos de protección ambiental y de desarrollo sustentable;
- II - Fomentar la incorporación de información confiable y suficiente sobre las consecuencias, beneficios y costos ambientales al sistema de precios de la economía.
- III.- Otorgar incentivos a quien realice acciones para la protección, preservación o restauración del equilibrio ecológico. Asimismo, deberán procurar que quienes dañen el ambiente, hagan un uso indebido de recursos naturales o alteren los ecosistemas, asuman los costos respectivos;
- IV.- Promover una mayor equidad social en la distribución de costos y beneficios asociados a los objetivos de la política ambiental, y
- V.- Procurar su utilización conjunta con otros instrumentos de política ambiental, en especial cuando se trate de observar umbrales o límites en la utilización de ecosistemas, de tal manera que se garantice su integridad y equilibrio, la salud y el bienestar de la población

**ARTICULO 22.-** Se consideran instrumentos económicos los mecanismos normativos y administrativos de carácter fiscal, financiero o de mercado, mediante los cuales las personas asumen los beneficios y costos ambientales que generen sus actividades económicas, incentivándolas a realizar acciones que favorezcan el ambiente

Se consideran instrumentos económicos de carácter fiscal, los estímulos fiscales que incentiven el cumplimiento de los objetivos de la política ambiental. En ningún caso, estos instrumentos se establecerán con fines exclusivamente recaudatorios

Son instrumentos financieros los créditos, las fianzas, los seguros de responsabilidad civil, los fondos y los fideicomisos, cuando sus objetivos estén dirigidos a la preservación, protección, restauración o aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y el ambiente, así como al financiamiento de programas, proyectos, estudios e investigación científica y tecnológica para la preservación del equilibrio ecológico y protección al ambiente

Son instrumentos de mercado las concesiones, autorizaciones, licencias y permisos que corresponden a volúmenes preestablecidos de emisiones de contaminantes en el aire, agua o suelo, o bien, que establecen los límites de aprovechamiento de recursos naturales, o de construcción en áreas naturales protegidas o en zonas cuya



preservación y protección se considere relevante desde el punto de vista ambiental.

Las prerrogativas derivadas de los instrumentos económicos de mercado serán transferibles, no gravables y quedarán sujetos al interés público y al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

**ARTICULO 22 BIS.-** Se consideran prioritarias, para efectos del otorgamiento de los estímulos fiscales que se establezcan conforme a la Ley de Ingresos de la Federación, las actividades relacionadas con:

La investigación, incorporación o utilización de mecanismos, equipos y tecnologías que tengan por objeto evitar, reducir o controlar la contaminación o deterioro ambiental, así como el uso eficiente de recursos naturales y de energía;

I.- La investigación e incorporación de sistemas de ahorro de energía y de utilización de fuentes de energía menos contaminantes.

III.- El ahorro y aprovechamiento sustentable y la prevención de la contaminación del agua;

IV.- La ubicación y reubicación de instalaciones industriales, comerciales y de servicios en áreas ambientalmente adecuadas;

V.- El establecimiento, manejo y vigilancia de áreas naturales protegidas, y

VI.- En general, aquéllas actividades relacionadas con la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente

#### **SECCIÓN IV**

##### **Regulación Ambiental de los**

##### **Asentamientos Humanos**

**ARTICULO 23.-** Para contribuir al logro de los objetivos de la política ambiental, la planeación del desarrollo urbano y la vivienda, además de cumplir con lo dispuesto en el artículo 27 constitucional en materia de asentamientos humanos, considerará los siguientes criterios

I - Los planes o programas de desarrollo urbano deberán tomar en cuenta los lineamientos y estrategias contenidas en los programas de ordenamiento ecológico del territorio.

II - En la determinación de los usos del suelo se buscará lograr una diversidad y eficiencia de los mismos y se evitara el desarrollo de esquemas segregados o unifuncionales, así como las tendencias a la suburbanización extensiva

III - En la determinación de las áreas para el crecimiento de los centros de población, se fomentará la mezcla de los usos habitacionales con los productivos que no representen riesgos o daños a la salud de la población y se evitara que se afecten áreas con alto valor ambiental

IV - Se deberá privilegiar el establecimiento de sistemas de transporte colectivo y otros medios de alta eficiencia energética y ambiental

V - Se establecerán y manejarán en forma prioritaria las áreas de conservación ecológica en torno a los asentamientos humanos

VI - Las autoridades de la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, en la esfera de su competencia, promoverán la utilización de instrumentos económicos, fiscales y financieros de política urbana

y ambiental, para inducir conductas compatibles con la protección y restauración del medio ambiente y con un desarrollo urbano sustentable:

VII.-El aprovechamiento del agua para usos urbanos deberá incorporar de manera equitativa los costos de su tratamiento, considerando la afectación a la calidad del recurso y la cantidad que se utilice:

VIII. En la determinación de áreas para actividades altamente riesgosas, se establecerán las zonas intermedias de salvaguarda en las que no se permitirán los usos habitacionales, comerciales u otros que pongan en riesgo a la población, y

IX - La política ecológica debe buscar la corrección de aquellos desequilibrios que deterioren la calidad de vida de la población y, a la vez, prever las tendencias de crecimiento del asentamiento humano, para mantener una relación suficiente entre la base de recursos y la población, y cuidar de los factores ecológicos y ambientales que son parte integrante de la calidad de la vida

**ARTICULO 24.-** Se deroga

**ARTICULO 25.-** Se deroga

**ARTICULO 26.-** Se deroga

**ARTICULO 27.-** Se deroga

## **SECCION V**

### **Evaluación del Impacto Ambiental**

**ARTICULO 28.-** La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente. Para ello, en los casos que determine el Reglamento que al efecto se expida, quienes pretendan llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría:

I - Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carbo ductos y poliductos.

II - Industria del petróleo, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica.

III - Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de las Leyes Minera y Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear.

IV - Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos.

V - Aprovechamientos forestales en selvas tropicales y especies de difícil regeneración

VI - Plantaciones forestales.

VII - Cambios de uso del suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas

VIII - Parques industriales donde se prevén la realización de actividades altamente riesgosas.

**IX.- Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros:**

**X.- Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales:**

**XI.- Obras en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación:**

**XII.- Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que puedan poner en peligro la preservación de una o más especies o causar daños a los ecosistemas, y**

**XIII. Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal, que puedan causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección del ambiente**

El Reglamento de la presente Ley determinará las obras o actividades a que se refiere este artículo, que por su ubicación, dimensiones, características o alcances no produzcan impactos ambientales significativos, no causen o puedan causar desequilibrios ecológicos, ni rebasen los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas referidas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, y que por lo tanto no deban sujetarse al procedimiento de evaluación de impacto ambiental previsto en este ordenamiento

Para los efectos a que se refiere la fracción XIII del presente artículo, la Secretaría notificará a los interesados su determinación para que sometan al procedimiento de evaluación de impacto ambiental la obra o actividad que corresponda, explicando las razones que lo justifiquen, con el propósito de que aquéllos presenten los informes, dictámenes y consideraciones que juzguen convenientes, en un plazo no mayor a diez días. Una vez recibida la documentación de los interesados, la Secretaría, en un plazo no mayor a treinta días, les comunicará si procede o no la presentación de una manifestación de impacto ambiental, así como la modalidad y el plazo para hacerlo. Transcurrido el plazo señalado, sin que la Secretaría emita la comunicación correspondiente, se entenderá que no es necesaria la presentación de una manifestación de impacto ambiental.

**ARTICULO 29.-** Los efectos negativos que sobre el ambiente, los recursos naturales, la flora y la fauna silvestre y demás recursos a que se refiere esta Ley, pudieran causar las obras o actividades de competencia federal que no requieran someterse al procedimiento de evaluación de impacto ambiental a que se refiere la presente sección, estarán sujetas en lo conducente a las disposiciones de la misma, sus reglamentos, las normas oficiales mexicanas en materia ambiental, la legislación sobre recursos naturales que resulte aplicable, así como a través de los permisos, licencias, autorizaciones y concesiones que conforme a dicha normatividad se requiera

**ARTICULO 30.-** Para obtener la autorización a que se refiere el artículo 28 de esta Ley, los interesados deberán presentar a la Secretaría una manifestación de impacto ambiental, la cual deberá contener, por lo menos, una descripción de los posibles efectos en el o los ecosistemas que pudieran ser afectados por la obra o actividad de que se trate, considerando el conjunto de los elementos que conforman dichos ecosistemas, así como las medidas preventivas, de mitigación y las demás necesarias para evitar y reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente

Cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la presente Ley, la manifestación deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente

Si después de la presentación de una manifestación de impacto ambiental se realizan modificaciones al proyecto de la obra o actividad respectiva, los interesados deberán hacerlas del conocimiento de la Secretaría, a fin de que esta, en un plazo no mayor de 10 días les notifique si es necesaria la presentación de información adicional para evaluar los efectos al ambiente que pudiesen ocasionar tales modificaciones, en términos de lo dispuesto en esta Ley

Los contenidos del informe preventivo, así como las características y las modalidades de las manifestaciones de

impacto ambiental y los estudios de riesgo serán establecidos por el Reglamento de la presente Ley

**ARTICULO 31.-** La realización de las obras y actividades a que se refieren las fracciones I a XII del artículo 28, requerirán la presentación de un informe preventivo y no una manifestación de impacto ambiental, cuando:

- I.- Existan normas oficiales mexicanas u otras disposiciones que regulen las emisiones, las descargas, el aprovechamiento de recursos naturales y, en general, todos los impactos ambientales relevantes que puedan producir las obras o actividades;
- II.- Las obras o actividades de que se trate estén expresamente previstas por un plan parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que haya sido evaluado por la Secretaría en los términos del artículo siguiente, o
- III.- Se trate de instalaciones ubicadas en parques industriales autorizados en los términos de la presente sección

En los casos anteriores, la Secretaría, una vez analizado el informe preventivo, determinará, en un plazo no mayor de veinte días, si se requiere la presentación de una manifestación de impacto ambiental en alguna de las modalidades previstas en el reglamento de la presente Ley, o si se está en alguno de los supuestos señalados

La Secretaría publicará en su Gaceta Ecológica, el listado de los informes preventivos que le sean presentados en los términos de este artículo, los cuales estarán a disposición del público.

**ARTICULO 32.-** En el caso de que un plan o programa parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico del territorio incluyan obras o actividades de las señaladas en el artículo 28 de esta Ley, las autoridades competentes de los Estados, el Distrito Federal o los Municipios, podrán presentar dichos planes o programas a la Secretaría, con el propósito de que ésta emita la autorización que en materia de impacto ambiental corresponda, respecto del conjunto de obras o actividades que se prevean realizar en un área determinada, en los términos previstos en el artículo 31 de esta Ley

**ARTICULO 33.-** Tratándose de las obras y actividades a que se refieren las fracciones IV, VIII, IX y XI del artículo 28, la Secretaría notificará a los gobiernos estatales y municipales o del Distrito Federal, según corresponda, que ha recibido la manifestación de impacto ambiental respectiva, a fin de que estos manifiesten lo que a su derecho convenga

La autorización que expida la Secretaría no obligará en forma alguna a las autoridades locales para expedir las autorizaciones que les corresponda en el ámbito de sus respectivas competencias

**ARTICULO 34.-** Una vez que la Secretaría reciba una manifestación de impacto ambiental e integre el expediente a que se refiere el artículo 35, pondrá esta a disposición del público, con el fin de que pueda ser consultada por cualquier persona

Los promoventes de la obra o actividad podrán requerir que se mantenga en reserva la información que haya sido integrada al expediente y que, de hacerse pública, pudiera afectar derechos de propiedad industrial y la confidencialidad de la información comercial que aporte el interesado

La Secretaría, a solicitud de cualquier persona de la comunidad de que se trate, podrá llevar a cabo una consulta pública, conforme a las siguientes bases:

- I - La Secretaría publicará la solicitud de autorización en materia de impacto ambiental en su Gaceta Ecológica. Asimismo, el promovente deberá publicar a su costa, un extracto del proyecto de la obra o actividad en un periódico de amplia circulación en la entidad federativa de que se trate, dentro del plazo de cinco días contado a partir de la fecha en que se presente la manifestación de impacto ambiental a la Secretaría
- II - Cualquier ciudadano, dentro del plazo de diez días contados a partir de la publicación del extracto del proyecto en los términos antes referidos, podrá solicitar a la Secretaría ponga a disposición del público en la entidad

federativa que corresponda, la manifestación de impacto ambiental;

III.- Cuando se trate de obras o actividades que puedan generar desequilibrios ecológicos graves o daños a la salud pública o a los ecosistemas, de conformidad con lo que señale el reglamento de la presente Ley, la Secretaría, en coordinación con las autoridades locales, podrá organizar una reunión pública de información en la que el promovente explicará los aspectos técnicos ambientales de la obra o actividad de que se trate;

IV.- Cualquier interesado, dentro del plazo de veinte días contados a partir de que la Secretaría ponga a disposición del público la manifestación de impacto ambiental en los términos de la fracción I, podrá proponer el establecimiento de medidas de prevención y mitigación adicionales, así como las observaciones que considere pertinentes, y

V.- La Secretaría agregará las observaciones realizadas por los interesados al expediente respectivo y consignará, en la resolución que emita, el proceso de consulta pública realizado y los resultados de las observaciones y propuestas que por escrito se hayan formulado;

**ARTICULO 35 .-** Una vez presentada la manifestación de impacto ambiental, la Secretaría iniciará el procedimiento de evaluación, para lo cual revisará que la solicitud se ajuste a las formalidades previstas en esta Ley, su Reglamento y las normas oficiales mexicanas aplicables, e integrará el expediente respectivo en un plazo no mayor de diez días.

Para la autorización de las obras y actividades a que se refiere el artículo 28, la Secretaría se sujetará a lo que establezcan los ordenamientos antes señalados, así como los programas de desarrollo urbano y de ordenamiento ecológico del territorio, las declaratorias de áreas naturales protegidas y las demás disposiciones jurídicas que resulten aplicables.

Asimismo, para la autorización a que se refiere este artículo, la Secretaría deberá evaluar los posibles efectos de dichas obras o actividades en el o los ecosistemas de que se trate, considerando el conjunto de elementos que los conforman y no únicamente los recursos que, en su caso, serían sujetos de aprovechamiento o afectación

Una vez evaluada la manifestación de impacto ambiental, la Secretaría emitirá, debidamente fundada y motivada, la resolución correspondiente en la que podrá:

I.- Autorizar la realización de la obra o actividad de que se trate en los términos solicitados;

II.- Autorizar de manera condicionada la obra o actividad de que se trate a la modificación del proyecto o al establecimiento de medidas adicionales de prevención y mitigación, a fin de que se eviten, atenuen o compensen los impactos ambientales adversos susceptibles de ser producidos en la construcción, operación normal y en caso de accidente. Cuando se trate de autorizaciones condicionadas, la Secretaría señalará los requerimientos que deban observarse en la realización de la obra o actividad prevista, o

III.- Negar la autorización solicitada cuando:

a) Se contravenga lo establecido en esta Ley, sus reglamentos, las normas oficiales mexicanas y demás disposiciones aplicables

b) La obra o actividad de que se trate pueda propiciar que una o más especies sean declaradas como amenazadas o en peligro de extinción o cuando se atente a una de dichas especies, o

c) Exista falsedad en la información proporcionada por los promoventes, respecto de los impactos ambientales de la obra o actividad de que se trate.

La Secretaría podrá exigir el otorgamiento de seguros o garantías respecto del cumplimiento de las condiciones establecidas en la autorización, en aquellos casos expresamente señalados en el reglamento de la presente Ley.

cuando durante la realización de las obras puedan producirse daños graves a los ecosistemas.

La resolución de la Secretaría sólo se referirá a los aspectos ambientales de las obras y actividades de que se trate.

**ARTICULO 35 BIS .-** La Secretaría dentro del plazo de sesenta días contados a partir de la recepción de la manifestación de impacto ambiental deberá emitir la resolución correspondiente.

La Secretaría podrá solicitar aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones al contenido de la manifestación de impacto ambiental que le sea presentada, suspendiéndose el término que restare para concluir el procedimiento. En ningún caso la suspensión podrá exceder el plazo de sesenta días, contados a partir de que ésta sea declarada por la Secretaría, y siempre y cuando le sea entregada la información requerida.

Excepcionalmente, cuando por la complejidad y las dimensiones de una obra o actividad la Secretaría requiera de un plazo mayor para su evaluación, éste se podrá ampliar hasta por sesenta días adicionales, siempre que se justifique conforme a lo dispuesto en el reglamento de la presente Ley

**ARTICULO 35 BIS 1.-** Las personas que presten servicios de impacto ambiental, serán responsables ante la Secretaría de los informes preventivos, manifestaciones de impacto ambiental y estudios de riesgo que elaboren, quienes declararán bajo protesta de decir verdad que en ellos se incorporan las mejores técnicas y metodologías existentes, así como la información y medidas de prevención y mitigación más efectivas.

Asimismo, los informes preventivos, las manifestaciones de impacto ambiental y los estudios de riesgo podrán ser presentados por los interesados, instituciones de investigación, colegios o asociaciones profesionales, en este caso la responsabilidad respecto del contenido del documento corresponderá a quien lo suscriba.

**ARTICULO 35 BIS 2.-** El impacto ambiental que pudiesen ocasionar las obras o actividades no comprendidas en el artículo 28 será evaluado por las autoridades del Distrito Federal o de los Estados, con la participación de los municipios respectivos, cuando por su ubicación, dimensiones o características produzcan impactos ambientales significativos sobre el medio ambiente, y estén expresamente señalados en la legislación ambiental estatal. En estos casos, la evaluación de impacto ambiental se podrá efectuar dentro de los procedimientos de autorización de uso del suelo, construcciones, fraccionamientos, u otros que establezcan las leyes estatales y las disposiciones que de ella se deriven. Dichos ordenamientos proveerán lo necesario a fin de hacer compatibles la política ambiental con la de desarrollo urbano y de evitar la duplicidad innecesaria de procedimientos administrativos en la materia.

**ARTICULO 35 BIS 3.-** Cuando las obras o actividades señaladas en el artículo 28 de esta Ley requieran además de la autorización en materia de impacto ambiental, contar con autorización de inicio de obra, se deberá verificar que el responsable cuente con la autorización de impacto ambiental expedida en términos de lo dispuesto en este ordenamiento.

Asimismo, la Secretaría a solicitud del promovente integrará a la autorización en materia de impacto ambiental, los demás permisos, licencias y autorizaciones de su competencia, que se requieran para la realización de las obras y actividades a que se refiere este artículo.

## **SECCIÓN VI**

### **Normas Oficiales Mexicanas en Materia Ambiental**

**ARTICULO 36.-** Para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas, la Secretaría emitirá normas oficiales mexicanas en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que tengan por objeto:

- 1.- Establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en regiones, zonas, cuencas o ecosistemas, en aprovechamiento de recursos naturales, en el desarrollo de actividades económicas, en el uso y destino de bienes, en insusos y en

procesos:

- II.- Considerar las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la preservación o restauración de los recursos naturales y la protección al ambiente:
- III.- Estimular o inducir a los agentes económicos para reorientar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable:
- IV.- Otorgar certidumbre a largo plazo a la inversión e inducir a los agentes económicos a asumir los costos de la afectación ambiental que ocasionen, y
- V.- Fomentar actividades productivas en un marco de eficiencia y sustentabilidad.

La expedición y modificación de las normas oficiales mexicanas en materia ambiental, se sujetará al procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización

**ARTICULO 37.-** En la formulación de normas oficiales mexicanas en materia ambiental deberá considerarse que el cumplimiento de sus previsiones deberá realizarse de conformidad con las características de cada proceso productivo o actividad sujeta a regulación, sin que ello implique el uso obligatorio de tecnologías específicas

Cuando las normas oficiales mexicanas en materia ambiental establezcan el uso de equipos, procesos o tecnologías específicas, los destinatarios de las mismas podrán proponer a la Secretaría para su aprobación, los equipos, procesos o tecnologías alternativos mediante los cuales se ajustaran a las previsiones correspondientes

Para tal efecto, los interesados acompañarán a su propuesta la justificación en que ésta se sustente para cumplir con los objetivos y finalidades establecidos en la norma oficial mexicana de que se trate.

Una vez recibida la propuesta, la Secretaría en un plazo que no excedera de treinta días emitirá la resolución respectiva. En caso de que no se emita dicha resolución en el plazo señalado, se considerará que esta es negativa

Cuando la resolución sea favorable, deberá publicarse en un órgano de difusión oficial y surtirá efectos en beneficio de quien lo solicite, respetando, en su caso, los derechos adquiridos en materia de propiedad industrial

**ARTICULO 37 BIS.-** Las normas oficiales mexicanas en materia ambiental son de cumplimiento obligatorio en el territorio nacional y señalarán su ámbito de validez, vigencia y gradualidad en su aplicación

## SECCIÓN VII

### Autorregulación y Auditorías Ambientales

**ARTICULO 38.-** Los productores, empresas u organizaciones empresariales podrán desarrollar procesos voluntarios de autorregulación ambiental, a través de los cuales mejoren su desempeño ambiental, respetando la legislación y normatividad vigente en la materia y se comprometan a superar o cumplir mayores niveles, metas o beneficios en materia de protección ambiental

La Secretaría en el ámbito federal, inducirá o concertará:

- I- El desarrollo de procesos productivos adecuados y compatibles con el ambiente, así como sistemas de protección y restauración en la materia, convenidos con cámaras de industria, comercio y otras actividades productivas, organizaciones de productores, organizaciones representativas de una zona o región, instituciones de investigación científica y tecnológica y otras organizaciones interesadas,
- II- El cumplimiento de normas voluntarias o especificaciones técnicas en materia ambiental que sean más estrictas que las normas oficiales mexicanas o que se refieran a aspectos no previstas por estas, las cuales serán

establecidas de común acuerdo con particulares o con asociaciones u organizaciones que los representen. Para tal efecto, la Secretaría podrá promover el establecimiento de normas mexicanas conforme a lo previsto en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización:

- III - El establecimiento de sistemas de certificación de procesos o productos para inducir patrones de consumo que sean compatibles o que preserven, mejoren o restauren el medio ambiente, debiendo observar, en su caso, las disposiciones aplicables de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y
- IV.- Las demás acciones que induzcan a las empresas a alcanzar los objetivos de la política ambiental superiores a las previstas en la normatividad ambiental establecida.

**ARTICULO 38 BIS.-** Los responsables del funcionamiento de una empresa podrán en forma voluntaria, a través de la auditoría ambiental, realizar el examen metodológico de sus operaciones, respecto de la contaminación y el riesgo que generan, así como el grado de cumplimiento de la normatividad ambiental y de los parámetros internacionales y de buenas prácticas de operación e ingeniería aplicables, con el objeto de definir las medidas preventivas y correctivas necesarias para proteger el medio ambiente.

La Secretaría desarrollará un programa dirigido a fomentar la realización de auditorías ambientales, y podrá supervisar su ejecución. Para tal efecto

- I.- Elaborará los términos de referencia que establezcan la metodología para la realización de las auditorías ambientales;
- II - Establecerá un sistema de aprobación y acreditamiento de peritos y auditores. Para tal efecto, integrará un comité técnico constituido por representantes de instituciones de investigación, colegios y asociaciones profesionales y organizaciones del sector industrial ambientales, determinando los procedimientos y requisitos que deberán cumplir los interesados para incorporarse a dicho sistema, debiendo, en su caso, observar lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización
- III - Desarrollará programas de capacitación en materia de peritajes y auditorías ambientales.
- IV - Instrumentará un sistema de reconocimientos y estímulos que permita identificar a las industrias que cumplan oportunamente los compromisos adquiridos en las auditorías ambientales.
- V.- Promoverá la creación de centros regionales de apoyo a la mediana y pequeña industria, con el fin de facilitar la realización de auditorías en dichos sectores, y

Convendrá o concertará con personas físicas o morales, públicas o privadas, la realización de auditorías ambientales

**ARTICULO 38 BIS 1.-** La Secretaría pondrá los programas preventivos y correctivos derivados de las auditorías ambientales, así como el diagnóstico básico del cual derivan, a disposición de quienes resulten o puedan resultar directamente afectados

En todo caso, deberán observarse las disposiciones legales relativas a la confidencialidad de la información industrial y comercial

**ARTICULO 38 BIS 2.-** Los Estados y el Distrito Federal podrán establecer sistemas de autorregulación y auditorías ambientales en los ámbitos de sus respectivas competencias

## **SECCION VIII**

### **Investigación y Educación Ecológicas**



**ARTICULO 39.-** Las autoridades competentes promoverán la incorporación de contenidos ecológicos en los diversos ciclos educativos, especialmente en el nivel básico, así como en la formación cultural de la niñez y la juventud.

Asimismo, propiciarán el fortalecimiento de la conciencia ecológica, a través de los medios de comunicación masiva.

La Secretaría, con la participación de la Secretaría de Educación Pública, promoverá que las instituciones de educación superior y los organismos dedicados a la investigación científica y tecnológica, desarrollen planes y programas para la formación de especialistas en la materia en todo el territorio nacional y para la investigación de las causas y efectos de los fenómenos ambientales

**ARTICULO 40.-** La Secretaría del Trabajo y Previsión Social, promoverá el desarrollo de la capacitación y adiestramiento en y para el trabajo en materia de protección al ambiente, y de preservación y restauración del equilibrio ecológico, con arreglo a lo que establece esta Ley y de conformidad con los sistemas, métodos y procedimientos que prevenga la legislación especial. Asimismo, propiciará la incorporación de contenidos ecológicos en los programas de las comisiones mixtas de seguridad e higiene

**ARTICULO 41.-** El Gobierno Federal, las entidades federativas y los municipios con arreglo a lo que dispongan las legislaturas locales, fomentarán investigaciones científicas y promoverán programas para el desarrollo de técnicas y procedimientos que permitan prevenir, controlar y abatir la contaminación, propiciar el aprovechamiento racional de los recursos y proteger los ecosistemas. Para ello, se podrán celebrar convenios con instituciones de educación superior, centros de investigación, instituciones del sector social y privado, investigadores y especialistas en la materia.

**ARTICULO 42.-** Se deroga

**ARTICULO 43.-** Se deroga.

## **TÍTULO SEGUNDO**

### **Biodiversidad**

#### **CAPÍTULO I**

##### **Áreas Naturales Protegidas**

#### **SECCIÓN I**

##### **Disposiciones Generales**

**ARTICULO 44.-** Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en esta Ley y los demás ordenamientos aplicables.

Los propietarios, poseedores o titulares de otros derechos sobre tierras, aguas y bosques comprendidos dentro de áreas naturales protegidas deberán sujetarse a las modalidades que de conformidad con la presente Ley, establezcan los decretos por los que se constituyan dichas áreas, así como a las demás provisiones contenidas en el programa de manejo y en los programas de ordenamiento ecológico que correspondan.

**ARTICULO 45.-** El establecimiento de áreas naturales protegidas, tiene por objeto

1.- Preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas y de lo

ecosistemas;

- II.- Salvarguardar la diversidad genética de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva; así como asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular preservar las especies que están en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial.
- III.- Asegurar el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y sus elementos.
- IV.- Proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio de los ecosistemas y su equilibrio.
- V.- Generar, rescatar y divulgar conocimientos, prácticas y tecnologías, tradicionales o nuevas que permitan la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional;
- VI.- Proteger poblados, vías de comunicación, instalaciones industriales y aprovechamientos agrícolas mediante zonas forestales en montañas donde se originen torrentes, el ciclo hidrológico de cuencas, así como las demás que tiendan a la protección de elementos circundantes con los que se relacione ecológicamente el área, y
- VII. Proteger los entornos naturales de zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, así como zonas turísticas, y otras áreas de importancia para la recreación, la cultura e identidad nacionales y de los pueblos indígenas.

## SECCIÓN II

### Tipos y Características de las Áreas Naturales Protegidas

**ARTICULO 46.-** Se consideran áreas naturales protegidas

- I.- Reservas de la biosfera.
- II - Se deroga
- III - Parques nacionales.
- IV - Monumentos naturales
- V - Se deroga
- VI - Áreas de protección de recursos naturales
- VII - Áreas de protección de flora y fauna
- VIII - Santuarios.
- IX - Parques y Reservas Estatales
- X - Zonas de preservación ecológica de los centros de población

Para efectos de lo establecido en el presente Capítulo son de competencia de la Federación las áreas naturales protegidas comprendidas en las fracciones I a VIII anteriormente señaladas

Los Gobiernos de los Estados y del Distrito Federal, en los términos que establezca la legislación local en la materia, podrán establecer parques y reservas estatales en áreas relevantes a nivel de las entidades federativas, que reúnan las características señaladas en los artículos 48 y 50 respectivamente de esta Ley. Dichos parques y reservas no podrán establecerse en zonas previamente declaradas como áreas naturales protegidas de competencia de la

Federación, salvo que se trate de las señaladas en la fracción VI de este artículo.

Asimismo, corresponde a los municipios establecer las zonas de preservación ecológicas de los centros de población, conforme a lo previsto en la legislación local.

En las áreas naturales protegidas no podrá autorizarse la fundación de nuevos centros de población.

**ARTICULO 47.-** En el establecimiento, administración y manejo de las áreas naturales protegidas a que se refiere el artículo anterior, la Secretaría promoverá la participación de sus habitantes, propietarios o poseedores, gobiernos locales, pueblos indígenas, y demás organizaciones sociales, públicas y privadas, con objeto de propiciar el desarrollo integral de la comunidad y asegurar la protección y preservación de los ecosistemas y su biodiversidad

Para tal efecto, la Secretaría podrá suscribir con los interesados los convenios de concertación o acuerdos de coordinación que correspondan

**ARTICULO 48.-** Las reservas de la biosfera se constituirán en áreas biogeográficas relevantes a nivel nacional, representativas de uno o más ecosistemas no alterados significativamente por la acción del ser humano o que requieran ser preservados y restaurados, en los cuales habiten especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción

En tales reservas podrá determinarse la existencia de la superficie o superficies mejor conservadas, o no alteradas, que alojen ecosistemas, o fenómenos naturales de especial importancia, o especies de flora y fauna que requieran protección especial, y que serán conceptuadas como zona o zonas núcleo. En ellas podrá autorizarse la realización de actividades de preservación de los ecosistemas y sus elementos, de investigación científica y educación ecológica, y limitarse o prohibirse aprovechamientos que alteren los ecosistemas.

En las propias reservas deberá determinarse la superficie o superficies que protejan la zona núcleo del impacto exterior, que serán conceptuadas como zonas de amortiguamiento, en donde solo podrán realizarse actividades productivas emprendidas por las comunidades que allí habiten al momento de la expedición de la declaratoria respectiva o con su participación, que sean estrictamente compatibles con los objetivos, criterios y programas de aprovechamiento sustentable, en los términos del decreto respectivo y del programa de manejo que se formule y expida, considerando las previsiones de los programas de ordenamiento ecológico que resulten aplicables

**ARTICULO 49.-** En las zonas núcleo de las áreas naturales protegidas quedará expresamente prohibido

- I - Venter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante
- II - Interrumpir, rellenar, desecar o desviar los flujos hidráulicos.
- III - Realizar actividades cinegeticas o de explotación y aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestres y
- IV - Ejecutar acciones que contravengan lo dispuesto por esta Ley, la declaratoria respectiva y las demás disposiciones que de ellas se deriven

**ARTICULO 50.-** Los parques nacionales se constituirán tratándose de representaciones biogeográficas, a nivel nacional, de uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo, de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o bien por otras razones análogas de interés general

En los parques nacionales solo podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la protección de sus recursos naturales, el incremento de su flora y fauna y en general, con la preservación de los ecosistemas y de sus elementos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológicos

**ARTICULO 51.-** Para los fines señalados en el artículo anterior, así como para proteger y preservar los ecosistemas marinos y regular el aprovechamiento sustentable de la flora y fauna acuática, se establecerán parques nacionales en las zonas marinas mexicanas, que podrán incluir la zona federal marítimo terrestre contigua.

En estas áreas sólo se permitirán actividades relacionadas con la preservación de los ecosistemas acuáticos y sus elementos, las de investigación, repoblación, recreación y educación ecológica, así como los aprovechamientos de recursos naturales que procedan, de conformidad con lo que disponen esta Ley, la Ley de Pesca, la Ley Federal del Mar, las convenciones internacionales de las que México sea parte y los demás ordenamientos aplicables

Las autorizaciones, concesiones o permisos para el aprovechamiento de los recursos naturales en estas áreas, así como el tránsito de embarcaciones en la zona o la construcción o utilización de infraestructura dentro de la misma, quedarán sujetas a lo que dispongan las declaratorias correspondientes

Para el establecimiento, administración y vigilancia de los parques nacionales establecidos en las zonas marinas mexicanas, así como para la elaboración de su programa de manejo, se deberán coordinar, atendiendo a sus respectivas competencias, la Secretaría y la Secretaría de Marina

**ARTICULO 52.-** Los monumentos naturales se establecerán en áreas que contengan uno o varios elementos naturales, consistentes en lugares u objetos naturales, que por su carácter único o excepcional, interés estético, valor histórico o científico, se resuelva incorporar a un régimen de protección absoluta. Tales monumentos no tienen la variedad de ecosistemas ni la superficie necesaria para ser incluidos en otras categorías de manejo

En los monumentos naturales únicamente podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con su preservación, investigación científica, recreación y educación.

**ARTICULO 53.-** Las áreas de protección de recursos naturales, son aquellas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos forestales de aptitud preferentemente forestal, siempre que dichas áreas no queden comprendidas en otra de las categorías previstas en el artículo 46 de esta Ley

Se consideran dentro de esta categoría las reservas y zonas forestales, las zonas de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y demás cuerpos considerados aguas nacionales, particularmente cuando estos se destinen al abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones

En las áreas de protección de recursos naturales sólo podrán realizarse actividades relacionadas con la preservación, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en ellas comprendidos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológica, de conformidad con lo que disponga el decreto que las establezca, el programa de manejo respectivo y las demás disposiciones jurídicas aplicables

**ARTICULO 54.-** Las áreas de protección de la flora y la fauna se constituirán de conformidad con las disposiciones de esta Ley, de las Leyes Federal de Caza y Pesca y de las demás leyes aplicables, en los lugares que contienen los hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres

En dichas áreas podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia

Asimismo, podrá autorizarse el aprovechamiento de los recursos naturales a las comunidades que ahí habitan en el momento de la expedición de la declaratoria respectiva, o que resulte posible según los estudios que se realicen, el que deberá sujetarse a las normas oficiales mexicanas y usos del suelo que al efecto se establezcan en la propia declaratoria

**ARTICULO 55.-** Los santuarios son aquellas áreas que se establecen en zonas caracterizadas por una considerable riqueza de flora o fauna, o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Dichas áreas abarcarán cañadas, vegas, relictos, grutas, cavernas, cenotes, caletas, u otras unidades topográficas o geográficas que requieran ser preservadas o protegidas

En los santuarios sólo se permitirán actividades de investigación, recreación y educación ambiental, compatibles con la naturaleza y características del área.

**ARTICULO 56.-** Las autoridades de los Estados y del Distrito Federal, podrán promover ante el Gobierno Federal, el reconocimiento de las áreas naturales protegidas que conforme a su legislación establezcan, con el proposito de compatibilizar los regimenes de protección correspondientes.

**ARTICULO 56 BIS.-** La Secretaría constituirá un Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas, que estará integrado por representantes de la misma, de otras dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, así como de instituciones académicas y centros de investigación, agrupaciones de productores y empresarios, organizaciones no gubernamentales y de otros organismos de carácter social o privado, así como personas físicas, con reconocido prestigio en la materia

El Consejo fungirá como órgano de consulta y apoyo de la Secretaría en la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de la política para el establecimiento, manejo y vigilancia de las áreas naturales protegidas de su competencia

Las opiniones y recomendaciones que formule el Consejo deberán ser considerados por la Secretaría en el ejercicio de las facultades que en materia de áreas naturales protegidas le corresponden conforme a este y otros ordenamientos jurídicos aplicables

El Consejo podrá invitar a sus sesiones a representantes de los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, cuando se traten asuntos relacionados con áreas naturales protegidas de competencia federal que se encuentren dentro de su territorio. Asimismo, podrá invitar a representantes de ejidos, comunidades, propietarios, poseedores y en general a cualquier persona cuya participación sea necesaria conforme al asunto que en cada caso se trate

### SECCIÓN III

#### Declaratorias para el Establecimiento, Administración

#### y Vigilancia de Áreas Naturales Protegidas

**ARTICULO 57.-** Las áreas naturales protegidas señaladas en las fracciones I a VIII del artículo 4o de esta Ley, se establecerán mediante declaratoria que expida el Titular del Ejecutivo Federal conforme a esta y las demás leyes aplicables

**ARTICULO 58.-** Previamente a la expedición de las declaratorias para el establecimiento de las áreas naturales protegidas a que se refiere el artículo anterior, se deberán realizar los estudios que lo justifiquen, en los términos del presente capítulo, los cuales deberán ser puestos a disposición del público. Asimismo, la Secretaría deberá solicitar la opinión de:

- I - Los gobiernos locales en cuyas circunscripciones territoriales se localice el área natural de que se trate.
- II - Las dependencias de la Administración Pública Federal que deban intervenir, de conformidad con sus atribuciones.
- III - Las organizaciones sociales públicas o privadas, pueblos indígenas y demás personas físicas o morales

interesadas, y

IV.- Las universidades, centros de investigación, instituciones y organismos de los sectores público, social y privado interesados en el establecimiento, administración y vigilancia de áreas naturales protegidas

**ARTICULO 59.-** Los pueblos indígenas, las organizaciones sociales, públicas o privadas, y demás personas interesadas, podrán promover ante la Secretaría el establecimiento, en terrenos de su propiedad o mediante contrato con terceros, de áreas naturales protegidas, cuando se trate de áreas destinadas a la preservación, protección y restauración de la biodiversidad. La Secretaría, en su caso, promoverá ante el Ejecutivo Federal la expedición de la declaratoria respectiva, mediante la cual se estableciera el manejo del área por parte del promovente, con la participación de la Secretaría conforme a las atribuciones que al respecto se le otorgan en esta Ley.

Asimismo, los sujetos señalados en el párrafo anterior, podrán destinar voluntariamente los predios que les pertenezcan a acciones de preservación de los ecosistemas y su biodiversidad. Para tal efecto, podrán solicitar a la Secretaría el reconocimiento respectivo. El certificado que emita dicha autoridad, deberá contener, por lo menos, el nombre del promovente, la denominación del área respectiva, su ubicación, superficie y colindancias, el régimen de manejo a que se sujetará y, en su

caso, el plazo de vigencia. Dichos predios se considerarán como áreas productivas dedicadas a una función de interés público.

**ARTICULO 60.-** Las declaratorias para el establecimiento de las áreas naturales protegidas señaladas en las fracciones I a VIII del artículo 46 de esta Ley deberán contener por lo menos, los siguientes aspectos:

- I - La delimitación precisa del área, señalando la superficie, ubicación, deslinde y en su caso, la zonificación correspondiente.
- II - Las modalidades a que se sujetará dentro del área, el uso o aprovechamiento de los recursos naturales en general o específicamente de aquellos sujetos a protección.
- III - La descripción de actividades que podrán llevarse a cabo en el área correspondiente, y las modalidades y limitaciones a que se sujetarán.
- IV - La causa de utilidad pública que en su caso fundamente la expropiación de terrenos para que la nación adquiera su dominio, cuando al establecerse un área natural protegida se requiera dicha resolución en estos casos, deberán observarse las previsiones de las Leyes de Expropiación, Agraria y los demás ordenamientos aplicables.
- V - Los lineamientos generales para la administración, el establecimiento de órganos colegiados representativos, la creación de fondos o fideicomisos y la elaboración del programa de manejo del área y
- VI - Los lineamientos para la realización de las acciones de preservación, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales dentro de las áreas naturales protegidas para su administración y vigilancia, así como para la elaboración de las reglas administrativas a que se sujetarán las actividades dentro del área respectiva conforme a lo dispuesto en esta y otras leyes aplicables.

Las medidas que el Ejecutivo Federal podrá imponer para la preservación y protección de las áreas naturales protegidas, serán únicamente las que se establecen según las materias respectivas, en la presente Ley, las Leyes Forestal, de Aguas Nacionales, de Pesca Federal, de Caza y las demás que resulten aplicables.

La Secretaría promoverá el ordenamiento ecológico del territorio dentro y en las zonas de influencia de las áreas naturales protegidas, con el propósito de generar nuevos patrones de desarrollo regional acordes con objetivos de

sustentabilidad.

**ARTICULO 61.-** Las declaratorias deberán publicarse en el Diario Oficial de la Federación y se notificarán previamente a los propietarios o poseedores de los predios afectados, en forma personal cuando se conocieren sus domicilios; en caso contrario se hará una segunda publicación, la que surtirá efectos de notificación. Las declaratorias se inscribirán en él o los registros públicos de la propiedad que correspondan.

**ARTICULO 62.-** Una vez establecida un área natural protegida, sólo podrá ser modificada su extensión, y en su caso, los usos del suelo permitidos o cualquiera de sus disposiciones, por la autoridad que la haya establecido, siguiendo las mismas formalidades previstas en esta Ley para la expedición de la declaratoria respectiva.

**ARTICULO 63.-** Las áreas naturales protegidas establecidas por el Ejecutivo Federal podrán comprender de manera parcial o total, predios sujetos a cualquier régimen de propiedad.

El Ejecutivo Federal, a través de las dependencias competentes, realizará los programas de regularización de la tenencia de la tierra en las áreas naturales protegidas, con el objeto de dar seguridad jurídica a los propietarios y poseedores de los predios en ellas comprendidos.

La Secretaría promoverá que las autoridades Federales, Estatales, Municipales y del Distrito Federal, dentro del ámbito de su competencia, en los términos que establezcan las disposiciones jurídicas aplicables y, en su caso, los programas de manejo, den prioridad a los programas de regularización de la tenencia de la tierra en las áreas naturales protegidas de competencia federal.

Los terrenos nacionales ubicados dentro de áreas naturales protegidas de competencia federal, quedarán a disposición de la Secretaría, quien los destinará a los fines establecidos en el decreto correspondiente, conforme a las disposiciones jurídicas que resulten aplicables.

**ARTICULO 64.-** En el otorgamiento o expedición de permisos, licencias, concesiones, o en general de autorizaciones a que se sujetaren la exploración, explotación o aprovechamiento de recursos en áreas naturales protegidas, se observarán las disposiciones de la presente Ley, de las leyes en que se fundamenten las declaratorias de creación correspondiente, así como las prevenciones de las propias declaratorias y los programas de manejo.

El solicitante deberá en tales casos demostrar ante la autoridad competente su capacidad técnica y económica para llevar a cabo la exploración, explotación o aprovechamiento de que se trate, sin causar deterioro al equilibrio ecológico.

La Secretaría, así como las Secretarías de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y de la Reforma Agraria prestarán oportunamente a ejidatarios, comuneros y pequeños propietarios la asesoría técnica necesaria para el cumplimiento de lo dispuesto en el párrafo anterior, cuando estos no cuenten con suficientes recursos económicos para procurársela.

La Secretaría, tomando como base los estudios técnicos y socioeconómicos practicados, podrá solicitar a la autoridad competente la cancelación o revocación del permiso, licencia, concesión o autorización correspondiente cuando la exploración, explotación o aprovechamiento de recursos ocasione o pueda ocasionar deterioro al equilibrio ecológico.

**ARTICULO 64 BIS.-** El Ejecutivo Federal, a través de la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, así como los gobiernos de las entidades federativas y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias:

I.- Promoverán las inversiones públicas y privadas para el establecimiento y manejo de las áreas naturales protegidas.

II.- Establecerán o en su caso promoverán la utilización de mecanismos para captar recursos y financiar o apoyar el manejo de las áreas naturales protegidas:

III.- Establecerán los incentivos económicos y los estímulos fiscales para las personas, y las organizaciones sociales, públicas o privadas, que participen en la administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas, así como para quienes aporten recursos para tales fines o destinen sus predios a acciones de preservación en términos del artículo 59 de esta Ley.

IV.- Promoverán ante la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, que en las participaciones Federales a Estados o Municipios se considere como criterio, la superficie total que cada uno de estos destine a la preservación de los ecosistemas y su biodiversidad, en términos de lo dispuesto en el artículo 46 de esta Ley.

**ARTICULO 64 BIS 1.-** La Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, podrán otorgar a los propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, y demás personas interesadas, concesiones, permisos o autorizaciones para la realización de obras o actividades en las áreas naturales protegidas, de conformidad con lo que establece esta Ley, la declaratoria y el programa de manejo correspondientes.

Los núcleos agrarios, pueblos indígenas y demás propietarios o poseedores de los predios en los que se pretendan desarrollar las obras o actividades anteriormente señaladas, tendrán preferencia para obtener los permisos, concesiones y autorizaciones respectivos.

**ARTICULO 65.-** La Secretaría formulará, dentro del plazo de un año contado a partir de la publicación de la declaratoria respectiva en el Diario Oficial de la Federación, el programa de manejo del área natural protegida de que se trate, dando participación a los habitantes, propietarios y poseedores de los predios en ella incluidos, a las demás dependencias competentes, los gobiernos estatales, municipales y del Distrito Federal, en su caso, así como a organizaciones sociales, públicas o privadas y demás personas interesadas.

Una vez establecida un área natural protegida de competencia federal, la Secretaría deberá designar al Director del área de que se trate, quien será responsable de coordinar la formulación, ejecución y evaluación del programa de manejo correspondiente, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las disposiciones que de ella se deriven.

**ARTICULO 66.-** El programa de manejo de las áreas naturales protegidas deberá contener, por lo menos, lo siguiente:

- I - La descripción de las características físicas, biológicas, sociales y culturales del área natural protegida, en el contexto nacional, regional y local, así como el análisis de la situación que guarda la tenencia de la tierra en la superficie respectiva.
- II - Las acciones a realizar a corto, mediano y largo plazo, estableciendo su vinculación con el Plan Nacional de Desarrollo, así como con los programas sectoriales correspondientes. Dichas acciones comprenderán, entre otras las siguientes: de investigación y educación ambientales, de protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, la flora y la fauna, para el desarrollo de actividades recreativas, turísticas, obras de infraestructura y demás actividades productivas; de financiamiento para la administración del área; de prevención y control de contingencias; de vigilancia y las demás que por las características propias del área natural protegida se requieran.
- III - La forma en que se organizará la administración del área y los mecanismos de participación de los individuos y comunidades asentadas en la misma, así como de todas aquellas personas, instituciones, grupos y organizaciones sociales interesadas en su protección y aprovechamiento sustentable.
- IV - Los objetivos específicos del área natural protegida.



V.- La referencia a las normas oficiales mexicanas aplicables a todas y cada una de las actividades a que esté sujeta el área;

VI.- Los inventarios biológicos existentes y los que se prevea realizar, y

VII. Las reglas de carácter administrativo a que se sujetarán las actividades que se desarrollen en el área natural protegida de que se trate.

La Secretaría deberá publicar en el Diario Oficial de la Federación, un resumen del programa de manejo respectivo y el plano de localización del área

**ARTICULO 67.-** La Secretaría podrá, una vez que se cuente con el programa de manejo respectivo, otorgar a los gobiernos de los Estados, de los Municipios y del Distrito Federal, así como a ejidos, comunidades agrarias, pueblos indígenas, grupos y organizaciones sociales, y empresariales y demás personas físicas o morales interesadas, la administración de las áreas naturales protegidas a que se refieren las fracciones I a VIII del artículo 46 de esta Ley. Para tal efecto, se deberán suscribir los acuerdos o convenios que conforme a la legislación aplicable procedan.

Quienes en virtud de lo dispuesto en este artículo adquieran la responsabilidad de administrar las áreas naturales protegidas, estarán obligados a sujetarse a las previsiones contenidas en la presente Ley, los reglamentos, normas oficiales mexicanas que se expidan en la materia, así como a cumplir los decretos por los que se establezcan dichas áreas y los programas de manejo respectivos.

La Secretaría deberá supervisar y evaluar el cumplimiento de los acuerdos y convenios a que se refiere este precepto. Asimismo, deberá asegurarse que en las autorizaciones para la realización de actividades en áreas naturales protegidas de su competencia, se observen las previsiones anteriormente señaladas

**ARTICULO 68.-** Se deroga

**ARTICULO 69.-** Se deroga

**ARTICULO 70.-** Se deroga

**ARTICULO 71.-** Se deroga

**ARTICULO 72.-** Se deroga

**ARTICULO 73.-** Se deroga

**ARTICULO 74.-** La Secretaría integrará el Registro Nacional de Áreas Naturales Protegidas, en donde deberán inscribirse los decretos mediante los cuales se declaren las áreas naturales protegidas de interés federal, y los instrumentos que los modifiquen. Deberán consignarse en dicho Registro los datos de la inscripción de los decretos respectivos en los registros públicos de la propiedad que correspondan. Asimismo, se deberá integrar el registro de los certificados a que se refiere el artículo 59 de esta Ley.

Cualquier persona podrá consultar el Registro Nacional de Áreas Naturales Protegidas, el cual deberá ser integrado al Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.

**ARTICULO 75.-** Todos los actos, convenios y contratos relativos a la propiedad, posesión o cualquier derecho relacionado con bienes inmuebles ubicados en áreas naturales protegidas deberán contener referencia de la declaratoria correspondiente y de sus datos de inscripción en el Registro Público de la Propiedad.

Los notarios y cualesquiera otros fedatarios públicos solo podrán autorizar las escrituras públicas, actos, convenios

o contratos en los que intervengan, cuando se cumpla con lo dispuesto en el presente artículo.

**ARTICULO 75 BIS.-** Los ingresos que la Federación perciba por concepto del otorgamiento de permisos, autorizaciones y licencias en materia de áreas naturales protegidas, conforme lo determinen los ordenamientos aplicables, se destinarán a la realización de acciones de preservación y restauración de la biodiversidad dentro de las áreas en las que se generen dichos ingresos

## **SECCIÓN IV**

### **Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas**

**ARTICULO 76.-** La Secretaría integrará el Sistema Nacional de Areas Naturales Protegidas, con el propósito de incluir en el mismo las áreas que por su biodiversidad y características ecológicas sean consideradas de especial relevancia en el país.

La integración de áreas naturales protegidas de competencia federal al Sistema Nacional de Areas Naturales Protegidas, por parte de la Secretaría, requerirá la previa opinión favorable del Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

**ARTICULO 77.-** Las Dependencias de la Administración Pública Federal, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los municipios, deberán considerar en sus programas y acciones que afecten el territorio de un área natural protegida de competencia federal, así como en el otorgamiento de permisos, concesiones y autorizaciones para obras o actividades que se desarrollen en dichas áreas, las previsiones contenidas en la presente Ley, los reglamentos, normas oficiales mexicanas que se expidan en la materia, en los decretos por los que se establezcan las áreas naturales protegidas y en los programas de manejo respectivos

## **CAPÍTULO II**

**Zonas de Restauración ARTICULO 78.-** En aquellas áreas que presenten procesos de degradación o desertificación, o graves desequilibrios ecológicos, la Secretaría deberá formular y ejecutar programas de restauración ecológica, con el propósito de que se lleven a cabo las acciones necesarias para la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los procesos naturales que en ella se desarrollaban

En la formulación, ejecución y seguimiento de dichos programas, la Secretaría deberá promover la participación de los propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, gobiernos locales, y demás personas interesadas

**ARTICULO 78 BIS.-** En aquellos casos en que se estén produciendo procesos acelerados de desertificación o degradación que impliquen la pérdida de recursos de muy difícil regeneración, recuperación o restablecimiento, o afectaciones irreversibles a los ecosistemas o sus elementos, la Secretaría, promoverá ante el Ejecutivo Federal la expedición de declaratorias para el establecimiento de zonas de restauración ecológica. Para tal efecto, elaborará previamente, los estudios que las justifiquen

Las declaratorias deberán publicarse en el Diario Oficial de la Federación y serán inscritas en el Registro Público de la Propiedad correspondiente

Las declaratorias podrán comprender, de manera parcial o total, predios sujetos a cualquier régimen de propiedad, y expresarán

- I - La delimitación de la zona sujeta a restauración ecológica, precisando superficie, ubicación y deslinde,
- II - Las acciones necesarias para regenerar, recuperar o restablecer las condiciones naturales de la zona

III.- Las condiciones a que se sujetarán, dentro de la zona, los usos del suelo, el aprovechamiento de los recursos naturales, la flora y la fauna, así como la realización de cualquier tipo de obra o actividad;

IV.- Los lineamientos para la elaboración y ejecución del programa de restauración ecológica correspondiente, así como para la participación en dichas actividades de propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, gobiernos locales y demás personas interesadas, y

V.- Los plazos para la ejecución del programa de restauración ecológica respectivo

**ARTICULO 78 BIS 1.-** Todos los actos y convenios relativos a la propiedad, posesión o cualquier otro derecho relacionado con bienes inmuebles ubicados en las zonas que fueren materia de las declaratorias a que se refiere el artículo 78 BIS quedarán sujetas a la aplicación de las modalidades previstas en las propias declaratorias.

Los notarios y cualesquiera otros fedatarios públicos, harán constar tal circunstancia al autorizar las escrituras públicas, actos, convenios o contratos en los que intervengan

Será nulo todo acto, convenio o contrato que contravenga lo establecido en la mencionada declaratoria

### **CAPÍTULO III**

#### **Flora y Fauna Silvestre**

**ARTICULO 79.-** Para la preservación y aprovechamiento sustentable de la flora y fauna silvestre, se consideraran los siguientes criterios

I.- La preservación de la biodiversidad y del habitat natural de las especies de flora y fauna que se encuentran en el territorio nacional y en las zonas donde la nacion ejerce su soberanía y jurisdiccion.

II - La continuidad de los procesos evolutivos de las especies de flora y fauna y demas recursos biologicos destinando áreas representativas de los sistemas ecologicos del pais a acciones de preservacion e investigacion.

III - La preservación de las especies endemicas amenazadas en peligro de extincion o sujetas a proteccion especial;

IV.- El combate al trafico o apropiacion ilegal de especies

V - El fomento y creacion de las estaciones biologicas de rehabilitacion y repoblamiento de especies de fauna silvestre.

VI - La participacion de las organizaciones sociales, publicas o privadas y los demas interesados en la preservacion de la biodiversidad

VII -El fomento y desarrollo de la investigacion de la fauna y flora silvestre y de los materiales geneticos con el objeto de conocer su valor cientifico, ambiental, economico y estrategico para la Nacion

VIII El fomento del trato digno y respetuoso a las especies animales con el proposito de evitar la crueldad en contra de estas

IX - El desarrollo de actividades productivas alternativas para las comunidades rurales y

X - El conocimiento biologico tradicional y la participacion de las comunidades, así como los pueblos indigenas en la elaboracion de programas de biodiversidad de las areas en que habitan

**ARTICULO 80.-** Los criterios para la preservación y aprovechamiento sustentable de la flora y fauna silvestre, a que se refiere el artículo 79 de esta Ley, serán considerados en:

- I.- El otorgamiento de concesiones, permisos y, en general, de toda clase de autorizaciones para el aprovechamiento, posesión, administración, conservación, repoblación, propagación y desarrollo de la flora y fauna silvestres;
- II.- El establecimiento o modificación de vedas de la flora y fauna silvestres;
- III.- Las acciones de sanidad fitopecuaria;
- IV.- La protección y conservación de la flora y fauna del territorio nacional, contra la acción perjudicial de plagas y enfermedades, o la contaminación que pueda derivarse de actividades fitopecuarias;
- V.- El establecimiento de un sistema nacional de información sobre biodiversidad y de certificación del uso sustentable de sus componentes que desarrolle la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, así como la regulación de la preservación, restauración de flora y fauna silvestre;
- VI.- La formulación del programa anual de producción, repoblación, cultivo, siembra y disseminación de especies de la flora y fauna acuáticas;
- VII.- La creación de áreas de refugio para proteger las especies acuáticas que así lo requieran; y
- VIII.- La determinación de los métodos y medidas aplicables o indispensables para la conservación, cultivo y repoblación de los recursos pesqueros

**ARTICULO 81.-** La Secretaría establecerá las vedas de la flora y fauna silvestre, y su modificación o levantamiento, con base en los estudios que para tal efecto previamente lleve a cabo.

Las vedas tendrán como finalidad la preservación, repoblación, propagación, distribución, aclimatación o refugio de los especímenes, principalmente de aquellas especies endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial

Los instrumentos jurídicos mediante los cuales se establezcan vedas deberán precisar su naturaleza y temporalidad, los límites de las áreas o zonas vedadas y las especies de la flora o la fauna comprendidas en ellas, de conformidad con las disposiciones legales que resulten aplicables

Dichos instrumentos deberán publicarse en el órgano oficial de difusión del Estado o Estados donde se ubique el área vedada, sin perjuicio de lo dispuesto en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y demás ordenamientos aplicables

**ARTICULO 82.-** Las disposiciones de esta Ley son aplicables a la posesión, administración, preservación, repoblación, propagación, importación, exportación y desarrollo de la flora y fauna silvestre y material genético, sin perjuicio de lo establecido en otros ordenamientos jurídicos

**ARTICULO 83.-** El aprovechamiento de los recursos naturales en áreas que sean el hábitat de especies de flora o fauna silvestres, especialmente de las endémicas, amenazadas o en peligro de extinción, deberá hacerse de manera que no se alteren las condiciones necesarias para la subsistencia, desarrollo y evolución de dichas especies

La Secretaría deberá promover y apoyar el manejo de la flora y fauna silvestre, con base en el conocimiento biológico tradicional, información técnica, científica y económica, con el propósito de hacer un aprovechamiento sustentable de las especies

**ARTICULO 84.-** La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas para la preservación y aprovechamiento

sustentable de la flora y fauna silvestre y otros recursos biológicos.

**ARTICULO 85.-** Cuando así se requiera para la protección de especies, la Secretaría promoverá ante la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial el establecimiento de medidas de regulación o restricción, en forma total o parcial, a la exportación o importación de especímenes de la flora y fauna silvestres e impondrá las restricciones necesarias para la circulación o tránsito por el territorio nacional de especies de la flora y fauna silvestres procedentes del y destinadas al extranjero.

**ARTICULO 86.-** A la Secretaría le corresponde aplicar las disposiciones que sobre preservación y aprovechamiento sustentable de especies de fauna silvestre establezcan ésta y otras leyes, y autorizar su aprovechamiento en actividades económicas, sin perjuicio de las facultades que correspondan a otras dependencias, conforme a otras leyes.

**ARTICULO 87.-** El aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre en actividades económicas podrá autorizarse cuando los particulares garanticen su reproducción controlada o desarrollo en cautiverio o semicautiverio o cuando la tasa de explotación sea menor a la de renovación natural de las poblaciones, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas que al efecto expida la Secretaría

No podrá autorizarse el aprovechamiento sobre poblaciones naturales de especies amenazadas o en peligro de extinción, excepto en los casos en que se garantice su reproducción controlada y el desarrollo de poblaciones de las especies que correspondan.

La autorización para el aprovechamiento sustentable de especies endémicas se otorgará conforme a las normas oficiales mexicanas que al efecto expida la Secretaría, siempre que dicho aprovechamiento no amenace o ponga en peligro de extinción a la especie.

El aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre requiere el consentimiento expreso del propietario o legítimo poseedor del predio en que estas se encuentren. Asimismo, la Secretaría podrá otorgar a dichos propietarios o poseedores, cuando garanticen la reproducción controlada y el desarrollo de poblaciones de fauna silvestre, los permisos cinegéticos que correspondan.

La colecta de especies de flora y fauna silvestre, así como de otros recursos biológicos con fines de investigación científica, requiere de autorización de la Secretaría y deberá sujetarse a los términos y formalidades que se establezcan en las normas oficiales mexicanas que se expidan, así como en los demás ordenamientos que resulten aplicables. En todo caso, se deberá garantizar que los resultados de la investigación estén a disposición del público. Dichas autorizaciones no podrán amparar el aprovechamiento para fines de utilización en biotecnología, la cual se sujetará a lo dispuesto en el artículo 87 BIS.

El aprovechamiento de recursos forestales no maderables y de leña para usos domésticos se sujetará a las normas oficiales mexicanas que expida la Secretaría y demás disposiciones aplicables.

**ARTICULO 87 BIS.-** El aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre, así como de otros recursos biológicos con fines de utilización en la biotecnología requiere de autorización de la Secretaría.

La autorización a que se refiere este artículo solo podrá otorgarse si se cuenta con el consentimiento previo, expreso e informado, del propietario o legítimo poseedor del predio en el que el recurso biológico se encuentre.

Asimismo, dichos propietarios o legítimos poseedores tendrán derecho a una repartición equitativa de los beneficios que se deriven o puedan derivarse de los aprovechamientos a que se refiere este artículo, con arreglo a las disposiciones jurídicas aplicables.

La Secretaría y las demás dependencias competentes establecerán los mecanismos necesarios para intercambiar información respecto de autorizaciones o resoluciones relativas al aprovechamiento de recursos biológicos para los

fines a que se refiere este precepto.

**ARTICULO 87 BIS 1.-** Los ingresos que la Federación perciba por concepto del otorgamiento de permisos, autorizaciones y licencias en materia de flora y fauna silvestre, conforme lo determinen los ordenamientos aplicables, se destinarán a la realización de acciones de preservación y restauración de la biodiversidad en las áreas que constituyan el hábitat de las especies de flora y fauna silvestre respecto de las cuales se otorgaron los permisos, licencias o autorizaciones correspondientes.

**ARTICULO 87 BIS 2.-** El Gobierno Federal, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, regularán el trato digno y respetuoso que debiera darse a los animales.

## **TÍTULO TERCERO**

### **Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales**

#### **CAPÍTULO I**

##### **Aprovechamiento Sustentable del Agua y los Ecosistemas Acuáticos**

**ARTICULO 88.-** Para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos se consideraran los siguientes criterios.

- I - Corresponde al Estado y a la sociedad la protección de los ecosistemas acuáticos y del equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico.
- II.- El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que comprenden los ecosistemas acuáticos deben realizarse de manera que no se afecte su equilibrio ecológico:
- III - Para mantener la integridad y el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos, y
- IV - La preservación y el aprovechamiento sustentable del agua, así como de los ecosistemas acuáticos es responsabilidad de sus usuarios así como de quienes realicen obras o actividades que afecten dichos recursos

**ARTICULO 89.-** Los criterios para el aprovechamiento sustentable del agua y de los ecosistemas acuáticos, serán considerados en

- I - La formulación e integración del Programa Nacional Hidráulico
- II - El otorgamiento de concesiones, permisos y en general toda clase de autorizaciones para el aprovechamiento de recursos naturales o la realización de actividades que afecten o puedan afectar el ciclo hidrológico
- III - El otorgamiento de autorizaciones para la desviación, extracción o derivación de aguas de propiedad nacional
- IV - El establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva
- V - Las suspensiones o revocaciones de permisos, autorizaciones, concesiones o asignaciones otorgados conforme a las disposiciones previstas en la Ley de Aguas Nacionales, en aquellos casos de obras o actividades que dañen los recursos hidráulicos nacionales o que afecten el equilibrio ecológico.
- VI - La operación y administración de los sistemas de agua potable y alcantarillado que sirven a los centros de población e industrias

VII.- Las provisiones contenidas en el programa director para el desarrollo urbano del Distrito Federal respecto de la política de reuso de aguas:

VIII. Las políticas y programas para la protección de especies acuáticas endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial.

IX.- Las concesiones para la realización de actividades de acuicultura, en términos de lo previsto en la Ley de Pesca, y

X.- La creación y administración de áreas o zonas de protección pesquera.

**ARTICULO 90.-** La Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Salud, expedirán las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y manejo de zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes de abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones e industrias, y promoverá el establecimiento de reservas de agua para consumo humano

**ARTICULO 91.-** El otorgamiento de las autorizaciones para afectar el curso o cauce de las corrientes de agua, se sujetará a los criterios ecológicos contenidos en la presente Ley

**ARTICULO 92.-** Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reuso.

**ARTICULO 93.-** La Secretaría, realizará las acciones necesarias para evitar, y en su caso controlar procesos de eutrofización, salinización y cualquier otro proceso de contaminación en las aguas nacionales

**ARTICULO 94.-** La exploración, explotación, aprovechamiento y administración de los recursos acuáticos vivos y no vivos, se sujetará a lo que establecen esta Ley, la Ley de Pesca, las normas oficiales mexicanas y las demás disposiciones aplicables

**ARTICULO 95.-** La Secretaría deberá solicitar a los interesados, en los términos señalados en esta Ley, la realización de estudios de impacto ambiental previo al otorgamiento de concesiones, permisos y en general autorizaciones para la realización de actividades pesqueras, cuando el aprovechamiento de las especies ponga en peligro su preservación o pueda causar desequilibrio ecológico

**ARTICULO 96.-** La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas para la protección de los ecosistemas acuáticos y promoverá la concertación de acciones de preservación y restauración de los ecosistemas acuáticos con los sectores productivos y las comunidades

**ARTICULO 97.-** La Secretaría establecerá viveros, criaderos y reservas de especies de flora y fauna acuáticas

## **CAPÍTULO II**

### **Preservación y Aprovechamiento Sustentable del Suelo y sus Recursos**

**ARTICULO 98.-** Para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se considerarán los siguientes criterios

- I - El uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no debe alterar el equilibrio de los ecosistemas.
- II - El uso de los suelos debe hacerse de manera que estos mantengan su integridad física y su capacidad productiva

- III.- Los usos productivos del suelo deben evitar prácticas que favorezcan la erosión, degradación o modificación de las características topográficas, con efectos ecológicos adversos:
- IV.- En las acciones de preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, deberán considerarse las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural.
- V.- En las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse a cabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas, y
- VI.- La realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

**ARTÍCULO 99.-** Los criterios ecológicos para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se considerarán en:

- I.- Los apoyos a las actividades agrícolas que otorgue el Gobierno Federal, de manera directa o indirecta, sean de naturaleza crediticia, técnica o de inversión, para que promuevan la progresiva incorporación de cultivos compatibles con la preservación del equilibrio ecológico y la restauración de los ecosistemas.
- II.- La fundación de centros de población y la radicación de asentamientos humanos:
- III.- El establecimiento de usos, reservas y destinos, en los planes de desarrollo urbano, así como en las acciones de mejoramiento y conservación de los centros de población.
- IV.- La determinación de usos, reservas y destinos en predios forestales:
- V.- El establecimiento de zonas y reservas forestales.
- VI.- La determinación o modificación de los límites establecidos en los coeficientes de agostadero.
- VII.- Las disposiciones, lineamientos técnicos y programas de protección y restauración de suelos en las actividades agropecuarias, forestales e hidráulicas.
- VIII.- El establecimiento de distritos de conservación del suelo.
- IX.- La ordenación forestal de las cuencas hidrográficas del territorio nacional.
- X.- El otorgamiento y la modificación, suspensión o revocación de permisos de aprovechamiento forestal.
- XI.- Las actividades de extracción de materias de subsuelo, la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento de sustancias minerales, las excavaciones y todas aquellas acciones que alteren la cubierta y suelos forestales.
- XII.- La formulación de los programas de ordenamiento ecológico a que se refiere esta Ley.

**ARTÍCULO 100.-** Las autorizaciones para el aprovechamiento de recursos forestales implican la obligación de hacer un aprovechamiento sustentable de ese recurso. Cuando las actividades forestales deterioren gravemente el equilibrio ecológico, afecten la biodiversidad de la zona, así como la regeneración y capacidad productiva de los terrenos, la Secretaría revocará, modificará o suspenderá la autorización respectiva, en términos de lo dispuesto por esta Ley y la Ley Forestal.



**ARTICULO 101.-** En las zonas selváticas, el Gobierno Federal atenderá en forma prioritaria, de conformidad con las disposiciones aplicables:

- I.- La preservación y el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas selváticos, donde existan actividades agropecuarias establecidas;
- II.- El cambio progresivo de la práctica de roza, tumba y quema a otras que no impliquen deterioro de los ecosistemas, o de aquéllas que no permitan su regeneración natural o que alteren los procesos de sucesión ecológica;
- IV -El cumplimiento, en la extracción de recursos no renovables, de los criterios establecidos en esta Ley, así como de las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan;
- V - La introducción de cultivos compatibles con los ecosistemas y que favorezcan su restauración cuando hayan sufrido deterioro.
- VI.- La regulación ecológica de los asentamientos humanos...
- VII. La prevención de los fenómenos de erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural, y

La regeneración, recuperación y rehabilitación de las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, a fin de restaurarlas

**ARTICULO 101 BIS.-** En la realización de actividades en zonas áridas, deberán observarse los criterios que para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se establecen en esta Ley y las demás disposiciones que resulten aplicables

**ARTICULO 102.-** Todas las autorizaciones que afecten el uso del suelo en las zonas selváticas o áridas, así como el equilibrio ecológico de sus ecosistemas, quedan sujetas a los criterios y disposiciones que establecen esta Ley y demás aplicables.

**ARTICULO 103.-** Quienes realicen actividades agrícolas y pecuarias deberán llevar a cabo las prácticas de preservación, aprovechamiento sustentable y restauración necesarias para evitar la degradación del suelo y desequilibrios ecológicos y, en su caso, lograr su rehabilitación, en los términos de lo dispuesto por esta y las demás leyes aplicables

**ARTICULO 104.-** La Secretaría promoverá ante la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y las demás dependencias competentes, la introducción y generalización de prácticas de protección y restauración de los suelos en las actividades agropecuarias, así como la realización de estudios de impacto ambiental previos al otorgamiento de autorizaciones para efectuar cambios del uso del suelo, cuando existan elementos que permitan prever grave deterioro de los suelos afectados y del equilibrio ecológico en la zona

**ARTICULO 105.-** En los estímulos fiscales que se otorganen a las actividades forestales, deberán considerarse criterios ecológicos de manera que se promuevan el desarrollo y fomento integral de la actividad forestal, el establecimiento y ampliación de plantaciones forestales y las obras para la protección de suelos forestales, en los términos de esta Ley y de la Ley Forestal

**ARTICULO 106.-** Se deroga **ARTICULO 107.-** Se deroga **CAPITULO III**

**De la Exploración y Explotación de los Recursos**

**no Renovables en el Equilibrio Ecológico**

**ARTICULO 108.-** Para prevenir y controlar los efectos generados en la exploración y explotación de los recursos no renovables en el equilibrio ecológico e integridad de los ecosistemas, la Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que permitan:

- I.- El control de la cantidad de las aguas y la protección de las que sean utilizadas o sean el resultado de esas actividades, de modo que puedan ser objeto de otros usos;
- II.- La protección de los suelos y de la flora y fauna silvestres, de manera que las alteraciones topográficas que generen esas actividades sean oportuna y debidamente tratadas; y
- III.- La adecuada ubicación y formas de los depósitos de desmontes, relaves y escorias de las minas y establecimiento de beneficio de los minerales

**ARTICULO 109.-** Las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior serán observadas por los titulares de concesiones, autorizaciones y permisos para el uso, aprovechamiento, exploración, explotación y beneficio de los recursos naturales no renovables

## **TÍTULO CUARTO**

### **Protección al Ambiente**

#### **CAPÍTULO I**

##### **Disposiciones Generales**

**ARTICULO 109 BIS.-** La Secretaría, en los términos que señalen los reglamentos de esta Ley, deberá integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de su competencia, coordinar los registros que establezca la Ley y crear un sistema consolidado de información basado en las autorizaciones, licencias o permisos que en la materia deberán otorgarse

**ARTICULO 109 BIS I.-** La Secretaría deberá establecer los mecanismos y procedimientos necesarios, con el propósito de que los interesados realicen un solo trámite, en aquellos casos en que para la operación y funcionamiento de establecimientos industriales, comerciales o de servicios se requiera obtener diversos permisos, licencias o autorizaciones que deban ser otorgados por la propia dependencia

#### **CAPÍTULO II**

##### **Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera**

**ARTICULO 110.-** Para la protección a la atmósfera se consideraran los siguientes criterios

- I.- La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país y
- II.- Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico

**ARTICULO 111.-** Para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría tendrá las siguientes facultades

- I.- Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan la calidad ambiental de las distintas áreas, zonas o regiones del territorio nacional, con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud.

- II.- Integrar y mantener actualizado el inventario de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera de jurisdicción federal, y coordinarse con los gobiernos locales para la integración del inventario nacional y los regionales correspondientes;
- III.- Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan por contaminante y por fuente de contaminación, los niveles máximos permisibles de emisión de olores, gases así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera provenientes de fuentes fijas y móviles.
- IV.- Formular y aplicar programas para la reducción de emisión de contaminantes a la atmósfera, nacional. Dichos programas deberán prever los objetivos que se pretende alcanzar, los plazos correspondientes y los mecanismos para su instrumentación; con base en la calidad del aire que se determine para cada área, zona o región del territorio
- V.- Promover y apoyar técnicamente a los gobiernos locales en la formulación y aplicación de programas de gestión de calidad del aire, que tengan por objeto el cumplimiento de la normatividad aplicable.
- VI.- Requerir a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción federal, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 37 de la presente Ley, su reglamento y en las normas oficiales mexicanas respectivas;
- VII.-Expedir las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire;
- VIII. Expedir las normas oficiales mexicanas para la certificación por la autoridad competente, de los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes determinadas.
- IX.- Expedir, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, las normas oficiales mexicanas que establezcan los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera provenientes de vehículos automotores nuevos en planta y de vehículos automotores en circulación, considerando los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud.
- X - Definir niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes, áreas, zonas o regiones de tal manera que no se rebasen las capacidades de asimilación de las cuencas atmosféricas y se cumplan las normas oficiales mexicanas de calidad del aire
- XI - Promover en coordinación con las autoridades competentes, de conformidad con las disposiciones que resulte aplicables, sistemas de derechos transferibles de emisión de contaminantes a la atmósfera.
- XII - Aprobar los programas de gestión de calidad del aire elaborados por los gobiernos locales para el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas respectivas
- XIII Promover ante los responsables de la operación de fuentes contaminantes, la aplicación de nuevas tecnologías con el propósito de reducir sus emisiones a la atmósfera y
- XIV Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan las previsiones a que deberá sujetarse la operación de fuentes fijas que emitan contaminantes a la atmósfera, en casos de contingencias y emergencias ambientales

**ARTICULO 111 BIS.-** Para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan o puedan emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, se requerirá autorización de la Secretaría

Para los efectos a que se refiere esta Ley, se consideran fuentes fijas de jurisdicción federal, las industrias químicas

del petróleo y petroquímica, de pinturas y tintas, automotriz, de celulosa y papel, metalúrgica, del vidrio, de generación de energía eléctrica, del asbesto, cementera y calera y de tratamiento de residuos peligrosos

El reglamento que al efecto se expida determinará los subsectores específicos pertenecientes a cada uno de los sectores industriales antes señalados, cuyos establecimientos se sujetarán a las disposiciones de la legislación federal, en lo que se refiere a la emisión de contaminantes a la atmósfera

**ARTICULO 112.-** En materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, de conformidad con la distribución de atribuciones establecida en los artículos 7o., 8o. y 9o. de esta Ley, así como con la legislación local en la materia

- I.- Controlarán la contaminación del aire en los bienes y zonas de jurisdicción local, así como en fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, comerciales y de servicios, siempre que no estén comprendidos en el artículo 111 BIS de esta Ley.
- II.- Aplicarán los criterios generales para la protección a la atmósfera en los planes de desarrollo urbano de su competencia, definiendo las zonas en que sea permitida la instalación de industrias contaminantes.
- III - Requerirán a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción local, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, de conformidad con lo dispuesto en el reglamento de la presente Ley y en las normas oficiales mexicanas respectivas.
- IV.- Integrarán y mantendrán actualizado el inventario de fuentes de contaminación;
- V.- Establecerán y operarán, sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación;
- VI.- Establecerán y operarán, con el apoyo técnico en su caso de la Secretaría, sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Los gobiernos locales remitirán a la Secretaría los reportes locales de monitoreo atmosférico, a fin de que aquélla los integre al Sistema Nacional de Información Ambiental.
- VII -Establecerán requisitos y procedimientos para regular las emisiones del transporte público, excepto el federal, y las medidas de tránsito, y en su caso, la suspensión de circulación, en casos graves de contaminación
- VIII Tomarán las medidas preventivas necesarias para evitar contingencias ambientales por contaminación atmosférica.
- IX.- Elaborarán los informes, sobre el estado del medio ambiente en la entidad o municipio correspondiente, que convengan con la Secretaría a través de los acuerdos de coordinación que se celebren.
- X - Impondrán sanciones y medidas por infracciones a las leyes que al efecto expidan las legislaturas locales, o a los bandos y reglamentos de policía y buen gobierno que expidan los ayuntamientos, de acuerdo con esta Ley
- XI - Formularán y aplicarán, con base en las normas oficiales mexicanas que expida la Federación para establecer la calidad ambiental en el territorio nacional, programas de gestión de calidad del aire
- XII -Ejercerán las demás facultades que les confieren las disposiciones legales y reglamentarias aplicables

**ARTICULO 113.-** No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente. En todas las emisiones a la atmósfera, deberán ser observadas las previsiones de esta Ley y de las disposiciones reglamentarias que de ella emanen, así como las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría

**ARTICULO 114 -** Las autoridades competentes promoverán, en las zonas que se hubieren determinado como aptas para uso industrial, próximas a áreas habitacionales, la instalación de industrias que utilicen tecnologías

combustibles que generen menor contaminación.

**ARTICULO 115.-** La Secretaría promoverá que en la determinación de usos del suelo que definan los programas de desarrollo urbano respectivos, se consideren las condiciones topográficas, climatológicas y meteorológicas, para asegurar la adecuada dispersión de contaminantes

**ARTICULO 116.-** Para el otorgamiento de estímulos fiscales, las autoridades competentes considerarán a quienes:

- I.- Adquieran, instalen u operen equipo para el control de emisiones contaminantes a la atmósfera.
- II - Fabriquen, instalen o proporcionen mantenimiento a equipo de filtrado, combustión, control, y en general, de tratamiento de emisiones que contaminen la atmósfera:
- III.- Realicen investigaciones de tecnología cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes.
- IV.- Ubiquen o realocalicen sus instalaciones para evitar emisiones contaminantes en zonas urbanas

### **CAPÍTULO III**

#### **Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos**

**ARTICULO 117.-** Para la prevención y control de la contaminación del agua se consideraran los siguientes criterios

- I.- La prevención y control de la contaminación del agua es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país.
- II.- Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.
- III - El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva l responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas.
- IV - Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo, y
- V.- Las participación y corresponsabilidad de la sociedad es condición indispensable para evitar la contaminación del agua

**ARTICULO 118.-** Los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua serán considerados en

- I - La expedición de normas oficiales mexicanas para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales para evitar riesgos y daños a la salud pública.
- II - La formulación de las normas oficiales mexicanas que deberá satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados aguas nacionales
- III - Los convenios que celebre el Ejecutivo Federal para entrega de agua en bloque a los sistemas usuarios o a usuarios, especialmente en lo que se refiere a la determinación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que deban instalarse.
- IV - El establecimiento de zonas reglamentadas de veda o de reserva en términos de la Ley de Aguas Nacionales.

V.- Las concesiones, asignaciones, permisos y en general autorizaciones que deban obtener los concesionarios, asignatarios o permisionarios, y en general los usuarios de las aguas propiedad de la nación, para infiltrar aguas residuales en los terrenos, o para descargarlas en otros cuerpos receptores distintos de los alcantarillados de las poblaciones:

VI - La organización, dirección y reglamentación de los trabajos de hidrología en cuencas, cauces y álveos de aguas nacionales, superficiales y subterráneos

VII. La clasificación de cuerpos réceptores de descarga de aguas residuales, de acuerdo a su capacidad de asimilación o dilución y la carga contaminante que éstos puedan recibir, y

**ARTICULO 119.-** La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que se requieran para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales, conforme a lo dispuesto en esta Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones que resulten aplicables

**ARTICULO 119 BIS.-** En materia de prevención y control de la contaminación del agua, corresponde a los gobiernos de los Estados y de los Municipios, por sí o a través de sus organismos públicos que administren el agua, así como al del Distrito Federal, de conformidad con la distribución de competencias establecida en esta Ley y conforme lo dispongan sus leyes locales en la materia:

I.- El control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado,

II.- La vigilancia de las normas oficiales mexicanas correspondientes, así como requerir a quienes generen descargas a dichos sistemas y no cumplan con estas, la instalación de sistemas de tratamiento,

III - Determinar el monto de los derechos correspondientes para que el municipio o autoridad estatal respectiva, pueda llevar a cabo el tratamiento necesario, y en su caso proceder a la imposición de las sanciones a que haya lugar, y

IV.- Llevar y actualizar el registro de las descargas a los sistemas de drenaje y alcantarillado que administren, el que será integrado al registro nacional de descargas a cargo de la Secretaría

**ARTICULO 120.-** Para evitar la contaminación del agua quedan sujetos a regulación federal o local

I - Las descargas de origen industrial

II - Las descargas de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas,

III - Las descargas derivadas de actividades agropecuarias

IV - Las descargas de desechos, sustancias o residuos generados en las actividades de extracción de recursos no renovables,

V - La aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas,

VI - Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos, y

VII El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua

**ARTICULO 121.-** No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de

drenaje y alcantarillado de los centros de población.

**ARTICULO 122.-** Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo, y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:

I.- Contaminación de los cuerpos receptores.

II.- Interferencias en los procesos de depuración de las aguas, y

III.- Trastornos, impedimentos o alteraciones en los correctos aprovechamientos, o en el funcionamiento adecuado de los sistemas, y en la capacidad hidráulica en las cuencas, cauces, vasos, mantos acuíferos y demás depósitos de propiedad nacional, así como de los sistemas de alcantarillado

**ARTICULO 123.-** Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido

**ARTICULO 124.-** Cuando las aguas residuales afecten o puedan afectar fuentes de abastecimiento de agua, la Secretaría lo comunicará a la Secretaría de Salud y negará el permiso o autorización correspondiente, o revocará, y en su caso, ordenará la suspensión del suministro

**ARTICULO 125.-** Se deroga

**ARTICULO 126.-** Los equipos de tratamiento de las aguas residuales de origen urbano que diseñen, operen o administren los municipios, las autoridades estatales, o el Distrito Federal, deberán cumplir con las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan

**ARTICULO 127.-** La Secretaría en coordinación con la Secretaría de Salud, emitirán opinión con base en los estudios de la cuenca y sistemas correspondientes para la programación y construcción de obras e instalaciones de purificación de aguas residuales de procedencia industrial

**ARTICULO 128.-** Las aguas residuales provenientes de los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano podrán utilizarse en la industria y en la agricultura, si se someten en los casos que se requiera, al tratamiento que cumpla con las normas oficiales mexicanas emitidas por la Secretaría, y en su caso por la Secretaría de Salud

En los aprovechamientos existentes de aguas residuales en la agricultura, se promoverán acciones para mejorar la calidad del recurso, la reglamentación de los cultivos y las prácticas de riego

**ARTICULO 129.-** El otorgamiento de asignaciones, autorizaciones, concesiones o permisos para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas en actividades económicas susceptibles de contaminar dicho recurso, estará condicionado al tratamiento previo necesario de las aguas residuales que se produzcan

**ARTICULO 130.-** La Secretaría autorizará el vertido de aguas residuales en aguas marinas, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las normas oficiales mexicanas que al respecto expida. Cuando el origen de las descargas provenga de fuentes móviles o de plataformas fijas en el mar territorial y la zona económica exclusiva, la Secretaría se coordinará con la Secretaría de Marina para la expedición de las autorizaciones correspondientes

**ARTICULO 131.-** Para la protección del medio marino, la Secretaría emitirá las normas oficiales mexicanas para la explotación, preservación y administración de los recursos naturales vivos y abióticos, del lecho y el subsuelo

del mar y de las aguas suprayacentes, así como las que deberán observarse para la realización de actividades de exploración y explotación en la zona económica exclusiva.

**ARTICULO 132.-** La Secretaría se coordinará con las Secretarías de Marina, de Energía, de Salud y de Comunicaciones y Transportes, a efecto de que dentro de sus respectivas atribuciones intervengan en la prevención y control de la contaminación del medio marino, así como en la preservación y restauración del equilibrio de sus ecosistemas, con arreglo a lo establecido en la presente Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, la Ley Federal del Mar, las convenciones internacionales de las que México forma parte y las demás disposiciones aplicables.

**ARTICULO 133 -** La Secretaría, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud conforme a otros ordenamientos legales, realizará un sistemático y permanente monitoreo de la calidad de las aguas, para detectar la presencia de contaminantes o exceso de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan. En los casos de aguas de jurisdicción local se coordinará con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios.

#### **CAPÍTULO IV**

##### **Prevención y Control de la Contaminación del Suelo**

**ARTICULO 134.-** Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

- I.- Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo.
- II - Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos.
- III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales, incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.
- IV.- La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar.
- V - En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

**ARTICULO 135.-** Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se considerarán, en los siguientes casos

- I - La ordenación y regulación del desarrollo urbano
- II - La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;
- III - La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorgan;
- IV - El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas

**ARTICULO 136.-** Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir y evitar



- I.- La contaminación del suelo.
- II.- Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos:
- III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación, y
- IV.- Riesgos y problemas de salud.

**ARTICULO 137.-** Queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales.

La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.

**ARTICULO 138.-** La Secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para

- I.- La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales; y
- II.- La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras

**ARTICULO 139.-** Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría

**ARTICULO 140.-** La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial

**ARTICULO 141.-** La Secretaría, en coordinación con las Secretarías de Comercio y Fomento Industrial y de Salud, expedirán normas oficiales mexicanas para la fabricación y utilización de empaques y envases para todo tipo de productos, cuyos materiales permitan reducir la generación de residuos sólidos

Asimismo, dichas Dependencias promoverán ante los organismos nacionales de normalización respectivos, la emisión de normas mexicanas en las materias a las que se refiere este precepto

**ARTICULO 142.-** En ningún caso podrá autorizarse la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas en las que la Nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra Nación, solo podrán otorgarse cuando exista previo consentimiento de esta

**ARTICULO 143.-** Los plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, quedarán sujetos a las normas oficiales mexicanas que expidan en el ámbito de sus respectivas competencias, la Secretaría y las Secretarías de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, de Salud y de Comercio y Fomento Industrial. El Reglamento de esta Ley establecerá la regulación que dentro del mismo marco de coordinación deba observarse en actividades relacionadas con dichos materiales, incluyendo la disposición final de sus residuos, empaques y envases vacíos, medidas para evitar efectos adversos en los ecosistemas y los procedimientos para el otorgamiento de las autorizaciones correspondientes

**ARTICULO 144.-** Atendiendo a lo dispuesto por la presente Ley, la Ley Federal de Sanidad Vegetal y las demás disposiciones legales y reglamentarias aplicables, la Secretaría coordinadamente con las Secretarías de Salud, de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y de Comercio y Fomento Industrial, participará en la determinación de restricciones arancelarias y no arancelarias relativas a la importación y exportación de materiales peligrosos.

No podrán otorgarse autorizaciones para la importación de plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, cuando su uso no esté permitido en el país en el que se hayan elaborado o fabricado.

## **CAPÍTULO V**

### **Actividades Consideradas como Altamente Riesgosas**

**ARTICULO 145.-** La Secretaría promoverá que en la determinación de los usos del suelo se especifiquen las zonas en las que se permita el establecimiento de industrias, comercios o servicios considerados riesgosos por la gravedad de los efectos que puedan generar en los ecosistemas o en el ambiente tomándose en consideración

- I.- Las condiciones topográficas, meteorológicas, climatológicas, geológicas y sísmicas de las zonas.
- II.- Su proximidad a centros de población, previendo las tendencias de expansión del respectivo asentamiento y la creación de nuevos asentamientos;
- III.- Los impactos que tendría un posible evento extraordinario de la industria, comercio o servicio de que se trate, sobre los centros de población y sobre los recursos naturales;
- IV.- La compatibilidad con otras actividades de las zonas.
- V.- La infraestructura existente y necesaria para la atención de emergencias ecológicas, y
- VI.- La infraestructura para la dotación de servicios básicos

**ARTICULO 146.-** La Secretaría, previa opinión de las Secretarías de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Gobernación y del Trabajo y Previsión Social, conforme al Reglamento que para tal efecto se expida, establecerá la clasificación de las actividades que deban considerarse altamente riesgosas en virtud de las características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas para el equilibrio ecológico o el ambiente, de los materiales que se generen o manejen en los establecimientos industriales, comerciales o de servicios considerando además los volúmenes de manejo y la ubicación del establecimiento

**ARTICULO 147.-** La realización de actividades industriales, comerciales o de servicios altamente riesgosas, se llevarán a cabo con apego a lo dispuesto por esta Ley, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior

Quienes realicen actividades altamente riesgosas, en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría un estudio de riesgo ambiental, así como someter a la aprobación de dicha dependencia y de las Secretarías de Gobernación, de Energía, de Comercio y

Fomento Industrial, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos

**ARTICULO 148.-** Cuando para garantizar la seguridad de los vecinos de una industria que lleve a cabo actividades altamente riesgosas, sea necesario establecer una zona intermedia de salvaguarda, el Gobierno Federal podrá, mediante declaratoria, establecer restricciones a los usos urbanos que pudieran ocasionar riesgos para la población. La Secretaría promoverá, ante las autoridades locales competentes, que los planes o programas de desarrollo urbano establezcan que en dichas zonas no se permitirán los usos habitacionales, comerciales u otros que

pongan en riesgo a la población.

**ARTICULO 149.-** Los Estados y el Distrito Federal regularán la realización de actividades que no sean consideradas altamente riesgosas, cuando éstas afecten el equilibrio de los ecosistemas o el ambiente dentro de la circunscripción territorial correspondiente, de conformidad con las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables.

La legislación local definirá las bases a fin de que la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, coordinen sus acciones respecto de las actividades a que se refiere este precepto

## **CAPÍTULO VI**

### **Materiales y Residuos Peligrosos**

**ARTICULO 150.-** Los materiales y residuos peligrosos deberán ser manejados con arreglo a la presente Ley, su Reglamento y las normas oficiales mexicanas que expida la Secretaría, previa opinión de las Secretarías de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Energía, de Comunicaciones y Transportes, de Marina y de Gobernación. La regulación del manejo de esos materiales y residuos incluirá según corresponda, su uso, recolección, almacenamiento, transporte, reuso, reciclaje, tratamiento y disposición final

El Reglamento y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el párrafo anterior, contendrán los criterios y listados que clasifiquen los materiales y residuos peligrosos identificándolos por su grado de peligrosidad y considerando sus características y volúmenes. Corresponde a la Secretaría la regulación y el control de los materiales y residuos peligrosos.

Asimismo, la Secretaría en coordinación con las dependencias a que se refiere el presente artículo, expedirá las normas oficiales mexicanas en las que se establezcan los requisitos para el etiquetado y envasado de materiales y residuos peligrosos, así como para la evaluación de riesgo e información sobre contingencias y accidentes que pudieran generarse por su manejo, particularmente tratándose de sustancias químicas

**ARTICULO 151.-** La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contrate los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría y los residuos sean entregados a dichas empresas, la responsabilidad por las operaciones será de estas independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los generó

Quiénes generen, reusen o reciclen residuos peligrosos deberán hacerlo del conocimiento de la Secretaría en los términos previstos en el Reglamento de la presente Ley

En las autorizaciones para el establecimiento de confinamientos de residuos peligrosos, solo se incluirán los residuos que no puedan ser técnica y económicamente sujetos de reuso, reciclamiento o destrucción térmica o físico química, y no se permitirá el confinamiento de residuos peligrosos en estado líquido

**ARTICULO 151 BIS.-** Requiere autorización previa de la Secretaría

- I - La prestación de servicios a terceros que tenga por objeto la operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos
- II - La instalación y operación de sistemas para el tratamiento o disposición final de residuos peligrosos o para su reciclaje cuando este tenga por objeto la recuperación de energía, mediante su incineración y
- III - La instalación y operación por parte del generador de residuos peligrosos, de sistemas para su reuso, reciclaje y disposición final, fuera de la instalación en donde se generaron dichos residuos

**ARTICULO 152.-** La Secretaría promoverá programas tendientes a prevenir y reducir la generación de residuos peligrosos, así como a estimular su reuso y reciclaje.

En aquellos casos en que los residuos peligrosos puedan ser utilizados en un proceso distinto al que los generó, el Reglamento de la presente Ley y las normas oficiales mexicanas que se expidan, deberán establecer los mecanismos y procedimientos que hagan posible su manejo eficiente desde el punto de vista ambiental y económico.

Los residuos peligrosos que sean usados, tratados o reciclados en un proceso distinto al que los generó, dentro del mismo predio, serán sujetos a un control interno por parte de la empresa responsable, de acuerdo con las formalidades que establezca el Reglamento de la presente Ley

En el caso de que los residuos señalados en el párrafo anterior, sean transportados a un predio distinto a aquél en el que se generaron, se estará a lo dispuesto en la normatividad aplicable al transporte terrestre de residuos peligrosos.

**ARTICULO 152 BIS.-** Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzca contaminación del suelo, los responsables de dichas operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable, para el predio o zona respectiva

**ARTICULO 153.-** La importación o exportación de materiales o residuos peligrosos se sujetará a las restricciones que establezca el Ejecutivo Federal, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Comercio Exterior. En todo caso deberán observarse las siguientes disposiciones

- I - Corresponderá a la Secretaría el control y la vigilancia ecológica de los materiales o residuos peligrosos importados o a exportarse, aplicando las medidas de seguridad que correspondan, sin perjuicios de lo que sobre este particular prevé la Ley Aduanera.
- II.- Únicamente podrá autorizarse la importación de materiales o residuos peligrosos para su tratamiento, reciclaje o reuso, cuando su utilización sea conforme a las leyes, reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones vigentes.
- III - No podrá autorizarse la importación de materiales o residuos peligrosos cuyo único objeto sea su disposición final o simple depósito, almacenamiento o confinamiento en el territorio nacional o en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, o cuando su uso o fabricación no este permitido en el país en que se hubiere elaborado
- IV - No podrá autorizarse el tránsito por territorio nacional de materiales peligrosos que no satisfagan las especificaciones de uso o consumo conforme a las que fueron elaborados, o cuya elaboración, uso o consumo se encuentren prohibidos o restringidos en el país al que estuvieren destinados, ni podrá autorizarse el tránsito de tales materiales o residuos peligrosos cuando provengan del extranjero para ser destinados a un tercer país.
- V - El otorgamiento de autorizaciones para la exportación de materiales o residuos peligrosos quedará sujeto a que exista consentimiento expreso del país receptor
- VI - Los materiales y residuos peligrosos generados en los procesos de producción, transformación, elaboración o reparación en los que se haya utilizado materia prima introducida al país bajo el régimen de importación temporal, inclusive los regulados en el artículo 85 de la Ley Aduanera, deberán ser retornados al país de procedencia dentro del plazo que para tal efecto determine la Secretaría.

VII.-El otorgamiento de autorizaciones por parte de la Secretaría para la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos quedará sujeto a que se garantice debidamente el cumplimiento de lo que establezca la presente Ley y las demás disposiciones aplicables así como la reparación de los daños y perjuicios que pudieran causarse tanto en el territorio nacional como en el extranjero:

Asimismo, la exportación de residuos peligrosos deberá negarse cuando se contemple su reimportación al territorio nacional, no exista consentimiento expreso del país receptor, el país de destino exija reciprocidad; o implique un incumplimiento de los compromisos asumidos por México en los Tratados y Convenciones Internacionales en la materia; y

VIII. En adición a lo que establezcan otras disposiciones aplicables, podrán revocarse las autorizaciones que se hubieren otorgado para la importación o exportación de materiales y residuos peligrosos, sin perjuicio de la imposición de la sanción o sanciones que corresponda en los siguientes casos:

a) Cuando por causas supervinientes, se compruebe que los materiales o residuos peligrosos autorizados constituyen mayor riesgo para el equilibrio ecológico que el que se tuvo en cuenta para el otorgamiento de la autorización correspondiente;

b) Cuando la operación de importación o exportación no cumplan los requisitos fijados en la guía ecológica que expida la Secretaría;

c) Cuando los materiales o residuos peligrosos ya no posean los atributos o características conforme a los cuales fueron autorizados, y

d) Cuando se determine que la autorización fue transferida a una persona distinta a la que solicitó la autorización, o cuando la solicitud correspondiente contenga datos falsos, o presentados de manera que se oculte información necesaria para la correcta apreciación de la solicitud.

## CAPÍTULO VII

### Energía Nuclear

**ARTÍCULO 154.-** La Secretaría de Energía y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que, en su caso, corresponda a la Secretaría de Salud, cuidarán que la exploración, explotación y beneficio de minerales radioactivos, el aprovechamiento de los combustibles nucleares, los usos de la energía nuclear y en general, las actividades relacionadas con la misma, se lleven a cabo con apego a las normas oficiales mexicanas sobre seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas, de manera que se eviten riesgos a la salud humana y se asegure la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, correspondiendo a la Secretaría realizar la evaluación de impacto ambiental.

## CAPÍTULO VIII

### Ruido, Vibraciones, Energía Térmica y Lumínica, Olores y Contaminación Visual

**ARTÍCULO 155.-** Quedan prohibidas las emisiones de ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica y la generación de contaminación visual, en cuanto rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas que para ese efecto expida la Secretaría, considerando los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente que determine la Secretaría de Salud. Las autoridades federales o locales, según su esfera de competencia, adoptarán las medidas para impedir que se transgredan dichos límites y en su caso, aplicarán las sanciones correspondientes.

En la construcción de obras o instalaciones que generen energía térmica o lumínica, ruido o vibraciones, así como en la operación o funcionamiento de las existentes deberán llevarse a cabo acciones preventivas y correctivas para

evitar los efectos nocivos de tales contaminantes en el equilibrio ecológico y el ambiente.

**ARTICULO 156.-** Las normas oficiales mexicanas en materias objeto del presente Capitulo, establecerán los procedimientos a fin de prevenir y controlar la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, luminica, radiaciones electromagnéticas y olores, y fijarán los límites de emisión respectivos.

La Secretaría de Salud realizará los análisis, estudios, investigaciones y vigilancia necesarias con el objeto de localizar el origen o procedencia, naturaleza, grado, magnitud y frecuencia de las emisiones para determinar cuándo se producen daños a la salud. La Secretaria, en coordinación con organismos públicos o privados, nacionales o internacionales, integrará la información relacionada con este tipo de contaminación, así como de métodos y tecnología de control y tratamiento de la misma

## **TÍTULO QUINTO**

### **Participación Social e Información Ambiental**

#### **CAPÍTULO I**

##### **Participación Social**

**ARTICULO 157.-** El Gobierno Federal deberá promover la participación corresponsable de la sociedad en la planeación, ejecución, evaluación y vigilancia de la política ambiental y de recursos naturales

**ARTICULO 158.-** Para los efectos del artículo anterior, la Secretaría

**ARTICULO 159.-** La Secretaría integrará órganos de consulta en los que participen entidades y dependencias de la administración pública, instituciones académicas y organizaciones sociales y empresariales. Dichos órganos tendrán funciones de asesoría, evaluación y seguimiento en materia de política ambiental y podrán emitir las opiniones y observaciones que estimen pertinentes. Su organización y funcionamiento se sujetará a los acuerdos que para el efecto expida la Secretaría

Cuando la Secretaria deba resolver un asunto sobre el cual los organos a que se refiere el parrafo anterior hubiesen emitido una opinión, la misma debera expresar las causas de aceptacion o rechazo de dicha opinión

#### **CAPÍTULO II**

##### **Derecho a la Información Ambiental**

**ARTICULO 159 BIS.-** La Secretaría desarrollará un Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales que tendrá por objeto registrar, organizar, actualizar y difundir la información ambiental nacional, que estará disponible para su consulta y que se coordinará y complementará con el Sistema de Cuentas Nacionales a cargo del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

En dicho Sistema, la Secretaría deberá integrar, entre otros aspectos, información relativa a los inventarios de recursos naturales existentes en el territorio nacional, a los mecanismos y resultados obtenidos del monitoreo de la calidad del aire, del agua y del suelo, al ordenamiento ecológico del territorio, así como la información señalada en el artículo 109 BIS y la correspondiente a los registros, programas y acciones que se realicen para la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente

La Secretaria reunirá informes y documentos relevantes que resulten de las actividades científicas, académicas, trabajos técnicos o de cualquier otra índole en materia ambiental y de preservación de recursos naturales realizados en el país por personas físicas o morales, nacionales o extranjeras, los que serán remitidos al Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales

**ARTICULO 159 BIS 1.-** La Secretaría deberá elaborar y publicar bianualmente un informe detallado de la situación general existente en el país en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente.

**ARTICULO 159 BIS 2.-** La Secretaría editará una Gaceta en la que se publicarán las disposiciones jurídicas, normas oficiales mexicanas, decretos, reglamentos, acuerdos y demás actos administrativos, así como información de interés general en materia ambiental, que se publiquen por el Gobierno Federal o los gobiernos locales, o documentos internacionales en materia ambiental de interés para México, independientemente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación o en otros órganos de difusión. Igualmente en dicha Gaceta se publicará información oficial relacionada con las áreas naturales protegidas y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales

**ARTICULO 159 BIS 3 -** Toda persona tendrá derecho a que la Secretaría, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios pongan a su disposición la información ambiental que les soliciten, en los términos previstos por esta Ley. En su caso, los gastos que se generen, correrán por cuenta del solicitante

- I - Convocará, en el ámbito del Sistema Nacional de Planeación Democrática, a las organizaciones obreras, empresariales, de campesinos y productores agropecuarios, pesqueros y forestales, comunidades agrarias, pueblos indígenas, instituciones educativas, organizaciones sociales y privadas no lucrativas y demás personas interesadas para que manifiesten su opinión y propuestas;
- II - Celebrará convenios de concertación con organizaciones obreras y grupos sociales para la protección del ambiente en los lugares de trabajo y unidades habitacionales, con pueblos indígenas, comunidades agrarias y demás organizaciones campesinas para el establecimiento, administración y manejo de áreas naturales protegidas, y para brindarles asesoría ecológica en las actividades relacionadas con el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales con organizaciones empresariales, en los casos previstos en esta Ley para la protección del ambiente, con instituciones educativas y académicas para la realización de estudios e investigaciones en la materia, con organizaciones civiles e instituciones privadas no lucrativas para emprender acciones ecológicas conjuntas, así como con representaciones sociales y con particulares interesados en la preservación y restauración del equilibrio ecológico para la protección al ambiente
- III.- Celebrará convenios con los medios de comunicación masiva para la difusión, información y promoción de acciones de preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.
- IV - Promoverá el establecimiento de reconocimientos a los esfuerzos más destacados de la sociedad para preservar y restaurar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente.
- V.- Impulsará el fortalecimiento de la conciencia ecológica a través de la realización de acciones conjuntas con la comunidad para la preservación y mejoramiento del ambiente, el aprovechamiento racional de los recursos naturales y el correcto manejo de desechos. Para ello, la Secretaría podrá, en forma coordinada con los Estados y Municipios correspondientes, celebrar convenios de concertación con comunidades urbanas y rurales, así como con diversas organizaciones sociales.
- VI - Concertará acciones e inversiones con los sectores social y privado y con instituciones académicas, grupos y organizaciones sociales, pueblos indígenas y demás personas físicas y morales interesadas, para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente

Para los efectos de lo dispuesto en el presente ordenamiento, se considera información ambiental, cualquier información escrita, visual o en forma de base de datos, de que dispongan las autoridades ambientales en materia de agua, aire, suelo, flora, fauna y recursos naturales en general, así como sobre las actividades o medidas que les afectan o puedan afectarlos.

Toda petición de información ambiental deberá presentarse por escrito, especificando claramente la información que se solicita y los motivos de la petición. Los solicitantes deberán identificarse indicando su nombre o razón

social y domicilio.

**ARTICULO 159 BIS 4.-** Las autoridades a que se refiere el artículo anterior, denegarán la entrega de información cuando:

- I.- Se considere por disposición legal que la información es confidencial o que por su propia naturaleza su difusión afecta la seguridad nacional;
- II.- Se trate de información relativa a asuntos que son materia de procedimientos judiciales o de inspección y vigilancia, pendientes de resolución;
- III.- Se trate de información aportada por terceros cuando los mismos no estén obligados por disposición legal a proporcionarla, o
- IV.- Se trate de información sobre inventarios e insumos y tecnologías de proceso, incluyendo la descripción del mismo

**ARTICULO 159 BIS 5.-** La autoridad ambiental deberá responder por escrito a los solicitantes de información ambiental en un plazo no mayor a veinte días a partir de la recepción de la petición respectiva. En caso de que la autoridad conteste negativamente la solicitud, deberá señalar las razones que motivaron su determinación

Si transcurrido el plazo establecido en el párrafo anterior la autoridad ambiental no emite su respuesta por escrito, la petición se entenderá resuelta en sentido negativo para el promovente.

La autoridad ambiental, dentro de los diez días siguientes a la solicitud de información, deberá notificar al generador o propietario de la misma de la recepción de la solicitud.

Los afectados por actos de la Secretaría regulados en este Capítulo, podrán ser impugnados mediante la interposición del recurso de revisión, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y en la Ley Federal de Procedimiento Administrativo

**ARTICULO 159 BIS 6.-** Quien reciba información ambiental de las autoridades competentes, en los términos del presente Capítulo, será responsable de su adecuada utilización y deberá responder por los daños y perjuicios que se ocasionen por su indebido manejo

## **TITULO SEXTO**

### **Medidas De Control y Seguridad y Sanciones**

#### **CAPÍTULO I**

##### **Disposiciones Generales**

**ARTICULO 160.-** Las disposiciones de este título se aplicarán en la realización de actos de inspección y vigilancia, ejecución de medidas de seguridad, determinación de infracciones administrativas y de comisión de delitos y sus sanciones, y procedimientos y recursos administrativos, cuando se trate de asuntos de competencia federal regulados por esta Ley, salvo que otras leyes regulen en forma específica dichas cuestiones, en relación con las materias de que trata este propio ordenamiento

En las materias anteriormente señaladas, se aplicarán supletoriamente las disposiciones de las Leyes Federales de Procedimiento Administrativo y sobre Metrología y Normalización. Tratándose de materias referidas en esta Ley que se encuentran reguladas por leyes especiales, el presente ordenamiento será de aplicación supletoria por lo que se refiere a los procedimientos de inspección y vigilancia



## CAPITULO II

### Inspección y Vigilancia

**ARTICULO 161.-** La Secretaria realizará los actos de inspección y vigilancia del cumplimiento de las disposiciones contenidas en el presente ordenamiento, así como de las que del mismo se deriven.

**ARTICULO 162.-** Las autoridades competentes podrán realizar, por conducto de personal debidamente autorizado, visitas de inspección, sin perjuicio de otras medidas previstas en las leyes que puedan llevar a cabo para verificar el cumplimiento de este ordenamiento.

Dicho personal, al realizar las visitas de inspección, deberá contar con el documento oficial que los acredite o autorice a practicar la inspección o verificación, así como la orden escrita debidamente fundada y motivada, expedida por autoridad competente en la que se precisará el lugar o zona que habrá de inspeccionarse, el objeto de la diligencia y el alcance de ésta

**ARTICULO 163.-** El personal autorizado, al iniciar la inspección se identificará debidamente con la persona con quien se entienda la diligencia, exhibirá la orden respectiva y le entregará copia de la misma con firma autógrafa, requiriéndola para que en el acto designe dos testigos

En caso de negativa o de que los designados no acepten fungir como testigos, el personal autorizado podrá designarlos, haciendo constar esta situación en el acta administrativa que al efecto se levante, sin que esta circunstancia invalide los efectos de la inspección

**ARTICULO 164.-** En toda visita de inspección se levantará acta, en la que se harán constar en forma circunstanciada los hechos u omisiones que se hubiesen presentado durante la diligencia, así como lo previsto en el artículo 67 de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo

Concluida la inspección, se dará oportunidad a la persona con la que se entendió la diligencia para que en el mismo acto formule observaciones en relación con los hechos u omisiones asentados en el acta respectiva, y para que ofrezca las pruebas que considere convenientes o haga uso de ese derecho en el término de cinco días siguientes a la fecha en que la diligencia se hubiere practicado

A continuación se procederá a firmar el acta por la persona con quien se entendió la diligencia, por los testigos y por el personal autorizado, quien entregará copia del acta al interesado

Si la persona con quien se entendió la diligencia o los testigos, se negaren a firmar el acta, o el interesado se negare a aceptar copia de la misma, dichas circunstancias se asentaran en ella, sin que esto afecte su validez y valor probatorio.

**ARTICULO 165.-** La persona con quien se entienda la diligencia estará obligada a permitir al personal autorizado el acceso al lugar o lugares sujetos a inspección en los términos previstos en la orden escrita a que se hace referencia en el artículo 162 de esta Ley, así como a proporcionar toda clase de información que conduzca a la verificación del cumplimiento de esta Ley y demás disposiciones aplicables, con excepción de lo relativo a derechos de propiedad industrial que sean confidenciales conforme a la Ley. La información deberá mantenerse por la autoridad en absoluta reserva, si así lo solicita el interesado, salvo en caso de requerimiento judicial.

**ARTICULO 166.-** La autoridad competente podrá solicitar el auxilio de la fuerza pública para efectuar la visita de inspección, cuando alguna o algunas personas obstaculicen o se opongan a la práctica de la diligencia independientemente de las sanciones a que haya lugar

**ARTICULO 167.-** Recibida el acta de inspección por la autoridad ordenadora, requerirá al interesado, mediante notificación personal o por correo certificado con acuse de recibo, para que adopte de inmediato las medidas correctivas o de urgente aplicación necesarias para cumplir con las disposiciones jurídicas aplicables, así como con

los permisos, licencias, autorizaciones o concesiones respectivas, fundando y motivando el requerimiento, señalando el plazo que corresponda, y para que dentro del término de quince días exponga lo que a su derecho convenga y, en su caso, aporte las pruebas que considere procedentes, en relación con la actuación de la Secretaría.

Admitidas y desahogadas las pruebas ofrecidas por el interesado, o habiendo transcurrido el plazo a que se refiere el párrafo anterior, sin que haya hecho uso de ese derecho, se pondrán a su disposición las actuaciones, para que en un plazo tres días hábiles, presente por escrito sus alegatos.

**ARTICULO 168.-** Una vez recibidos los alegatos o transcurrido el término para presentarlos, la Secretaría procederá, dentro de los veinte días siguientes, a dictar por escrito la resolución respectiva, misma que se notificará al interesado, personalmente o por correo certificado con acuse de recibo.

**ARTICULO 169.-** En la resolución administrativa correspondiente, se señalarán o, en su caso, adicionarán, las medidas que deberán llevarse a cabo para corregir las deficiencias o irregularidades observadas, el plazo otorgado al infractor para satisfacerlas y las sanciones a que se hubiere hecho acreedor conforme a las disposiciones aplicables.

Dentro de los cinco días hábiles que sigan al vencimiento del plazo otorgado al infractor para subsanar las deficiencias e irregularidades observadas, éste deberá comunicar por escrito y en forma detallada a la autoridad ordenadora, haber dado cumplimiento a las medidas ordenadas en los términos del requerimiento respectivo.

Cuando se trate de segunda o posterior inspección para verificar el cumplimiento de un requerimiento o requerimientos anteriores, y del acta correspondiente se desprenda que no se ha dado cumplimiento a las medidas previamente ordenadas, la autoridad competente podrá imponer además de la sanción o sanciones que procedan conforme al artículo 171 de esta Ley, una multa adicional que no exceda de los límites máximos señalados en dicho precepto.

En los casos en que el infractor realice las medidas correctivas o de urgente aplicación o subsane las irregularidades detectadas, en los plazos ordenados por la Secretaría, siempre y cuando el infractor no sea reincidente, y no se trate de alguno de los supuestos previstos en el artículo 170 de esta Ley, esta podrá revocar o modificar la sanción o sanciones impuestas.

En los casos en que proceda, la autoridad federal hará del conocimiento del Ministerio Público la realización de actos u omisiones constatados en el ejercicio de sus facultades que pudieran configurar uno o más delitos.

### **CAPITULO III**

#### **Medidas de Seguridad**

**ARTICULO 170.-** Cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico o de daño o deterioro grave a los recursos naturales, casos de contaminación con repercusiones peligrosas para los ecosistemas, sus componentes o para la salud pública, la Secretaría, fundada y motivadamente, podrá ordenar alguna o algunas de las siguientes medidas de seguridad:

- I - La clausura temporal, parcial o total de las fuentes contaminantes, así como de las instalaciones en que se manejen o almacenen especímenes, productos o subproductos de especies de flora o de fauna silvestre, recursos forestales o se desarrollen las actividades que den lugar a los supuestos a que se refiere el primer párrafo de este artículo.
- II - El aseguramiento precautorio de materiales y residuos peligrosos, así como de especímenes, productos o subproductos de especies de flora o de fauna silvestre o su material genético, recursos forestales, además de los bienes, vehículos, utensilios e instrumentos directamente relacionados con la conducta que da lugar a la imposición de la medida de seguridad, o

**III.- La neutralización o cualquier acción análoga que impida que materiales o residuos peligrosos generen los efectos previstos en el primer párrafo de este artículo.**

Asimismo, la Secretaría podrá promover ante la autoridad competente, la ejecución de alguna o algunas de las medidas de seguridad que se establezcan en otros ordenamientos.

**ARTICULO 170 BIS.-** Cuando la Secretaría ordene alguna de las medidas de seguridad previstas en esta Ley, indicará al interesado, cuando proceda, las acciones que debe llevar a cabo para subsanar las irregularidades que motivaron la imposición de dichas medidas, así como los plazos para su realización, a fin de que una vez cumplidas éstas, se ordene el retiro de la medida de seguridad impuesta

## **CAPITULO IV**

### **Sanciones Administrativas**

**ARTICULO 171.-** Las violaciones a los preceptos de esta Ley, sus reglamentos y las disposiciones que de ella emanen serán sancionadas administrativamente por la Secretaría, con una o más de las siguientes sanciones.

I - Multa por el equivalente de veinte a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción;

II.- Clausura temporal o definitiva, total o parcial, cuando

- a) El infractor no hubiere cumplido en los plazos y condiciones impuestos por la autoridad, con las medidas correctivas o de urgente aplicación ordenadas;
- b) En casos de reincidencia cuando las infracciones generen efectos negativos al ambiente, o
- c) Se trate de desobediencia reiterada en tres o más ocasiones, al cumplimiento de alguna o algunas medidas correctivas o de urgente aplicación impuestas por la autoridad

III.- Arresto administrativo hasta por treinta y seis horas

IV - El decomiso de los instrumentos, ejemplares, productos o subproductos directamente relacionados con infracciones relativas a recursos forestales, especies de flora y fauna silvestre o recursos genéticos, conforme a lo previsto en la presente Ley

V.- La suspensión o revocación de las concesiones, licencias, permisos o autorizaciones correspondientes

Si una vez vencido el plazo concedido por la autoridad para subsanar la o las infracciones que se hubieren cometido, resultare que dicha infracción o infracciones aun subsisten, podrán imponerse multas por cada día que transcurra sin obedecer el mandato, sin que el total de las multas exceda del monto máximo permitido, conforme a la fracción I de este artículo

En el caso de reincidencia, el monto de la multa podrá ser hasta por dos veces del monto originalmente impuesto, sin exceder del doble del máximo permitido, así como la clausura definitiva

Se considera reincidente al infractor que incurra más de una vez en conductas que impliquen infracciones a un mismo precepto, en un periodo de dos años, contados a partir de la fecha en que se levante el acta en que se hizo constar la primera infracción, siempre que esta no hubiese sido desvirtuada

**ARTICULO 172.-** Cuando la gravedad de la infracción lo amerite, la autoridad solicitará a quien los hubiere otorgado, la suspensión, revocación o cancelación de la concesión, permiso, licencia y en general de toda autorización otorgada para la realización de actividades comerciales, industriales o de servicios, o para el aprovechamiento de recursos naturales que haya dado lugar a la infracción

**ARTICULO 173.-** Para la imposición de las sanciones por infracciones a esta Ley, se tomará en cuenta:

- I.- La gravedad de la infracción, considerando principalmente los siguientes criterios: impacto en la salud pública; generación de desequilibrios ecológicos; la afectación de recursos naturales o de la biodiversidad, y, en su caso, los niveles en que se hubieran rebasado los límites establecidos en la norma oficial mexicana aplicable;
- II.- Las condiciones económicas del infractor;
- III.- La reincidencia, si la hubiere;
- IV.- El carácter intencional o negligente de la acción u omisión constitutiva de la infracción, y
- V.- El beneficio directamente obtenido por el infractor por los actos que motiven la sanción

En el caso en que el infractor realice las medidas correctivas o de urgente aplicación o subsane las irregularidades en que hubiere incurrido, previamente a que la Secretaría imponga una sanción, dicha autoridad deberá considerar tal situación como atenuante de la infracción cometida.

La autoridad correspondiente podrá otorgar al infractor, la opción para pagar la multa o realizar inversiones equivalentes en la adquisición e instalación de equipo para evitar contaminación o en la protección, preservación o restauración del ambiente y los recursos naturales, siempre y cuando se garanticen las obligaciones del infractor, no se trate de alguno de los supuestos previstos en el artículo 170 de esta Ley y la autoridad justifique plenamente su decisión

**ARTICULO 174.-** Cuando proceda como sanción el decomiso o la clausura temporal o definitiva, total o parcial, el personal comisionado para ejecutarla procederá a levantar acta detallada de la diligencia, observando las disposiciones aplicables a la realización de inspecciones. En los casos en que se imponga como sanción la clausura temporal, la Secretaría deberá indicar al infractor las medidas correctivas y acciones que debe llevar a cabo para subsanar las irregularidades que motivaron dicha sanción, así como los plazos para su realización

**ARTICULO 174 BIS.-** La Secretaría dará a los bienes decomisados alguno de los siguientes destinos

- I - Venta directa en aquellos casos en que el valor de lo decomisado no exceda de 5,000 veces el salario mínimo general vigente en el Distrito Federal al momento de imponer la sanción;
- II - Remate en subasta pública cuando el valor de lo decomisado exceda de 5,000 veces el salario diario, mínimo general vigente en el Distrito Federal al momento de imponer la sanción;
- III - Donación a organismos públicos e instituciones científicas o de enseñanza superior o de beneficencia pública, según la naturaleza del bien decomisado y de acuerdo a las funciones y actividades que realice el donatario, siempre y cuando no sean lucrativas. Tratándose de especies y subespecies de flora y fauna silvestre, éstas podrán ser donadas a zoológicos públicos siempre que se garantice la existencia de condiciones adecuadas para su desarrollo, o
- IV - Destrucción cuando se trate de productos o subproductos de flora y fauna silvestre, de productos forestales plagados o que tengan alguna enfermedad que impida su aprovechamiento, así como artes de pesca y caza prohibidos por las disposiciones jurídicas aplicables

**ARTICULO 174 BIS I.-** Para efectos de lo previsto en las fracciones I y II del artículo anterior, únicamente serán procedentes dichos supuestos cuando los bienes decomisados sean susceptibles de apropiación conforme a las disposiciones jurídicas aplicables

En la determinación del valor de los bienes sujetos a remate o venta, la Secretaría considerará el precio que

respecto de dichos bienes corra en el mercado, al momento de realizarse la operación

En ningún caso, los responsables de la infracción que hubiera dado lugar al decomiso podrán participar ni beneficiarse de los actos señalados en el artículo 174 BIS de esta Ley, mediante los cuales se lleve a cabo la enajenación de los bienes decomisados.

**ARTICULO 175.-** La Secretaría podrá promover ante las autoridades federales o locales competentes, con base en los estudios que haga para ese efecto, la limitación o suspensión de la instalación o funcionamiento de industrias, comercios, servicios, desarrollos urbanos, turísticos o cualquier actividad que afecte o pueda afectar el ambiente, los recursos naturales, o causar desequilibrio ecológico o pérdida de la biodiversidad.

**ARTICULO 175 BIS.-** Los ingresos que se obtengan de las multas por infracciones a lo dispuesto en esta Ley, sus reglamentos y demás disposiciones que de ella se deriven, así como los que se obtengan del remate en subasta pública o la venta directa de los bienes decomisados, se destinarán a la integración de fondos para desarrollar programas vinculados con la inspección y la vigilancia en las materias a que se refiere esta Ley

## **CAPÍTULO V**

### **Recurso de Revisión**

**ARTICULO 176.-** Las resoluciones definitivas dictadas en los procedimientos administrativos con motivo de la aplicación de esta Ley, sus reglamentos y disposiciones que de ella emanen, podrán ser impugnadas por los afectados, mediante el recurso de revisión, dentro de los quince días hábiles siguientes a la fecha de su notificación, o ante las instancias jurisdiccionales competentes

El recurso de revisión se interpondrá directamente ante la autoridad que emitió la resolución impugnada, quien en su caso, acordará su admisión, y el otorgamiento o denegación de la suspensión del acto recurrido, turnando el recurso a su superior jerárquico para su resolución definitiva

**ARTICULO 177.-** Cuando con la interposición del recurso de revisión, el promovente solicite la suspensión del decomiso, la autoridad podrá ordenar la devolución de los bienes respectivos al interesado, siempre y cuando:

I - Sea procedente el recurso, y

II - Se exhiba garantía por el monto del valor de lo decomisado, el cual será determinado por la Secretaría de acuerdo con el precio que corra en el mercado al momento en que deba otorgarse dicha garantía

En el supuesto en que no se cumplan los requisitos anteriores, la Secretaría determinará el destino final de los productos perecederos y de las especies de flora y fauna silvestre vivas de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las demás que resulten aplicables

Por lo que se refiere a los bienes distintos a los señalados en el párrafo anterior, estos se mantendrán en depósito y no podrá disponerse de ellos hasta en tanto cause estado la resolución correspondiente

**ARTICULO 178.-** No procederá la suspensión del decomiso en los siguientes casos

I.- Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre que carezcan de la concesión, permiso o autorización correspondiente.

II - Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre extraídas o capturadas en época, zona o lugar no comprendidos en la concesión, permiso o autorización respectivos, así como en volúmenes superiores a los establecidos

III - Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre declaradas en veda o sean consideradas raras

amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial conforme a esta Ley u otras disposiciones jurídicas aplicables:

IV.- Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre decomisadas a extranjeros, o en embarcaciones o transportes extranjeros.

V.- Cuando se trate de productos o subproductos de flora y fauna silvestre, armas de caza, artes de pesca y demás objetos o utensilios prohibidos por la normatividad aplicable, y

Cuando se trate de materias primas forestales maderables y no maderables, provenientes de aprovechamientos para los cuales no exista autorización.

**ARTICULO 179.-** Por lo que se refiere a los demás trámites relativos a la sustanciación del recurso de revisión a que se refiere el artículo 176 del presente ordenamiento, se estará a lo dispuesto por la Ley Federal de Procedimiento Administrativo

**ARTICULO 180.-** Tratándose de obras o actividades que contravengan las disposiciones de esta Ley, los programas de ordenamiento ecológico, las declaratorias de áreas naturales protegidas o los reglamentos y normas oficiales mexicanas derivadas de la misma, las personas físicas y morales de las comunidades afectadas tendrán derecho a impugnar los actos administrativos correspondientes, así como a exigir que se lleven a cabo las acciones necesarias para que sean observadas las disposiciones jurídicas aplicables, siempre que demuestren en el procedimiento que dichas obras o actividades originan o pueden originar un daño a los recursos naturales, la flora o la fauna silvestre, la salud pública o la calidad de vida. Para tal efecto, deberán interponer el recurso administrativo de revisión a que se refiere este capítulo

**ARTICULO 181.-** En caso de que se expidan licencias, permisos, autorizaciones o concesiones contraviniendo esta Ley, serán nulas y no producirán efecto legal alguno, y los servidores públicos responsables serán sancionados conforme a lo dispuesto en la legislación en la materia. Dicha nulidad podrá ser exigida por medio del recurso a que se refiere el artículo anterior

## **CAPITULO VI**

### **De Los Delitos Del Orden Federal**

**ARTICULO 182.-** En aquellos casos en que como resultado del ejercicio de sus atribuciones, la Secretaría tenga conocimiento de actos u omisiones que pudieran constituir delitos conforme a lo previsto en la legislación aplicable, formulara ante el Ministerio Público Federal la denuncia correspondiente

Toda persona podrá presentar directamente las denuncias penales que correspondan a los delitos ambientales previstos en la legislación aplicable

La Secretaría proporcionará, en las materias de su competencia, los dictámenes técnicos o periciales que le soliciten el Ministerio Público o las autoridades judiciales, con motivo de las denuncias presentadas por la comisión de delitos ambientales

**ARTICULO 183 -** Se deroga. (Nota: Los artículos 183 a 187 se derogan en virtud de las reformas al Código Penal)

**ARTICULO 184.-** Se deroga

**ARTICULO 185.-** Se deroga

**ARTICULO 186.-** Se deroga

**ARTICULO 187.-** Se deroga.

**ARTICULO 188.-** Las leyes de las entidades federativas establecerán las sanciones penales y administrativas por violaciones en materia ambiental del orden local

## **CAPITULO VII**

### **Denuncia Popular**

**ARTICULO 189.-** Toda persona, grupos sociales, organizaciones no gubernamentales, asociaciones y sociedades podrán denunciar ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente o ante otras autoridades todo hecho, acto u omisión que produzca o pueda producir desequilibrio ecológico o daños al ambiente o a los recursos naturales, o contravenga las disposiciones de la presente Ley y de los demás ordenamientos que regulen materias relacionadas con la protección al ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico

Si en la localidad no existiere representación de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, la denuncia se podrá formular ante la autoridad municipal o, a elección del denunciante, ante las oficinas más próximas de dicha representación

Si la denuncia fuera presentada ante la autoridad municipal y resulta del orden federal, deberá ser remitida para su atención y trámite a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

**ARTICULO 190.-** La denuncia popular podrá ejercitarse por cualquier persona, bastando que se presente por escrito y contenga:

- I.- El nombre o razón social, domicilio, teléfono si lo tiene, del denunciante y, en su caso, de su representante legal;
- II.- Los actos, hechos u omisiones denunciados.
- III - Los datos que permitan identificar al presunto infractor o localizar la fuente contaminante, y
- IV.- Las pruebas que en su caso ofrezca el denunciante

Asimismo, podrá formularse la denuncia por vía telefónica, en cuyo supuesto el servidor público que la reciba, levantará acta circunstanciada, y el denunciante deberá ratificarla por escrito, cumpliendo con los requisitos establecidos en el presente artículo, en un término de tres días hábiles siguientes a la formulación de la denuncia, sin perjuicio de que la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente investigue de oficio los hechos constitutivos de la denuncia

No se admitirán denuncias notoriamente improcedentes o infundadas, aquellas en las que se advierta mala fe, carencia de fundamento o inexistencia de petición, lo cual se notificará al denunciante

Si el denunciante solicita a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente guardar secreto respecto de su identidad, por razones de seguridad e interés particular, esta llevará a cabo el seguimiento de la denuncia conforme a las atribuciones que la presente Ley y demás disposiciones jurídicas aplicables le otorgan

**ARTICULO 191.-** La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, una vez recibida la denuncia, acusará recibo de su recepción, le asignará un número de expediente y la registrará. En caso de recibirse dos o más denuncias por los mismos hechos, actos u omisiones, se acordará la acumulación en un sólo expediente, debiéndose notificar a los denunciantes el acuerdo respectivo

Una vez registrada la denuncia, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente dentro de los 10 días siguientes a su presentación, notificará al denunciante el acuerdo de calificación correspondiente, señalando el trámite que se

le ha dado a la misma.

Si la denuncia presentada fuera competencia de otra autoridad, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente acusará de recibo al denunciante pero no admitirá la instancia y la turnará a la autoridad competente para su trámite y resolución, notificándole de tal hecho al denunciante, mediante acuerdo fundado y motivado.

**ARTICULO 192.-** Una vez admitida la instancia, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente llevará a cabo la identificación del denunciante, y hará del conocimiento la denuncia a la persona o personas, o a las autoridades a quienes se imputen los hechos denunciados o a quienes pueda afectar el resultado de la acción emprendida, a fin de que presenten los documentos y pruebas que a su derecho convenga en un plazo máximo de 15 días hábiles, a partir de la notificación respectiva.

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente efectuará las diligencias necesarias con el propósito de determinar la existencia de actos, hechos u omisiones constitutivos de la denuncia.

Asimismo, en los casos previstos en esta Ley, podrá iniciar los procedimientos de inspección y vigilancia que fueran procedentes, en cuyo caso se observarán las disposiciones respectivas de presente Título.

**ARTICULO 193.-** El denunciante podrá coadyuvar con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, aportándole las pruebas, documentación e información que estime pertinentes. Dicha dependencia deberá manifestar las consideraciones adoptadas respecto de la información proporcionada por el denunciante, al momento de resolver la denuncia.

**ARTICULO 194.-** La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente podrá solicitar a las instituciones académicas, centros de investigación y organismos del sector público, social y privado, la elaboración de estudios, dictámenes o peritajes sobre cuestiones planteadas en las denuncias que le sean presentadas.

**ARTICULO 195.-** Si del resultado de la investigación realizada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, se desprende que se trata de actos, hechos u omisiones en que hubieren incurrido autoridades federales, estatales o municipales, emitirá las recomendaciones necesarias para promover ante estas la ejecución de las acciones procedentes.

Las recomendaciones que emita la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente serán públicas, autónomas y no vinculatorias.

**ARTICULO 196.-** Cuando una denuncia popular no implique violaciones a la normatividad ambiental, ni afecte cuestiones de orden público e interés social, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente podrá sujetar la misma a un procedimiento de conciliación. En todo caso, se deberá escuchar a las partes involucradas.

**ARTICULO 197.-** En caso de que no se comprueben que los actos, hechos u omisiones denunciados producen o pueden producir desequilibrio ecológico o daños al ambiente o a los recursos naturales o contravengan las disposiciones de la presente Ley, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente lo hará del conocimiento del denunciante, a efecto de que este emita las observaciones que juzgue convenientes.

**ARTICULO 198.-** La formulación de la denuncia popular, así como los acuerdos, resoluciones y recomendaciones que emita la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, no afectarán el ejercicio de otros derechos o medios de defensa que pudieran corresponder a los afectados conforme a las disposiciones jurídicas aplicables, ni suspenderán ni interrumpirán sus plazos preclusivos de prescripción o de caducidad. Esta circunstancia deberá señalarse a los interesados en el acuerdo de admisión de la instancia.

**ARTICULO 199.-** Los expedientes de denuncia popular que hubieren sido abiertos, podrán ser concluidos por las siguientes causas:



- I.- Por incompetencia de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente para conocer de la denuncia popular planteada;
- II.- Por haberse dictado la recomendación correspondiente.
- III.- Cuando no existan contravenciones a la normatividad ambiental;
- V.- Por falta de interés del denunciante en los términos de este Capítulo;
- VII.- Por haberse dictado anteriormente un acuerdo de acumulación de expedientes.
- VIII.- Por haberse solucionado la denuncia popular mediante conciliación entre las partes:

Por la emisión de una resolución derivada del procedimiento de inspección, o

Por desistimiento del denunciante

**ARTICULO 200.-** Las leyes de las entidades federativas establecerán el procedimiento para la atención de la denuncia popular cuando se trate de actos, hechos u omisiones que produzcan o puedan producir desequilibrios ecológicos o daños al ambiente, por violaciones a la legislación local ambiental

**ARTICULO 201.-** Las autoridades y servidores públicos involucrados en asuntos de la competencia de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, o que por razón de sus funciones o actividades puedan proporcionar información pertinente, deberán cumplir en sus términos con las peticiones que dicha dependencia les formule en tal sentido.

Las autoridades y servidores públicos a los que se les solicite información o documentación que se estime con carácter reservado, conforme a lo dispuesto en la legislación aplicable, lo comunicarán a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. En este supuesto, dicha dependencia deberá manejar la información proporcionada bajo la más estricta confidencialidad.

**ARTICULO 202.-** La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente en el ámbito de sus atribuciones, está facultada para iniciar las acciones que procedan ante las autoridades judiciales competentes, cuando conozca de actos, hechos u omisiones que constituyan violaciones a la legislación administrativa o penal.

**ARTICULO 203.-** Sin perjuicio de las sanciones penales o administrativas que procedan, toda persona que contamine o deteriore el ambiente o afecte los recursos naturales o la biodiversidad, será responsable y estará obligada a reparar los daños causados, de conformidad con la legislación civil aplicable.

El término para demandar la responsabilidad ambiental, será de cinco años contados a partir del momento en que se produzca el acto, hecho u omisión correspondiente.

**ARTICULO 204.-** Cuando por infracción a las disposiciones de esta Ley se hubieren ocasionado daños o perjuicios, los interesados podrán solicitar a la Secretaría la formulación de un dictamen técnico al respecto, el cual tendrá valor de prueba, en caso de ser presentado en juicio.

## **TRANSITORIOS**

**ARTICULO PRIMERO.-** El presente Decreto entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

**ARTICULO SEGUNDO.-** Se derogan la Ley sobre la Zona Exclusiva de Pesca de la Nación, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de enero de 1967, la Ley de Conservación del Suelo y Agua, publicada en dicho órgano de difusión el 6 de julio de 1946, así como todas las disposiciones legales que se opongan a lo

previsto en el presente Decreto.

**ARTICULO TERCERO.-** Los gobiernos de las Entidades Federativas, así como los Ayuntamientos, deberán adecuar sus leyes, reglamentos, ordenanzas, bandos de policía y buen gobierno y demás disposiciones aplicables, a lo establecido en el presente Decreto.

**ARTICULO CUARTO.-** Los procedimientos y recursos administrativos relacionados con las materias de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, iniciados con anterioridad a la entrada en vigor del presente Decreto, se tramitarán y resolverán conforme a las disposiciones vigentes en ese momento, y las demás disposiciones aplicables en la materia de que se trate

**ARTICULO QUINTO.-** La Federación, en coordinación con las autoridades de las Entidades Federativas y Municipales, según corresponda, aplicará lo dispuesto en este Decreto en el ámbito local, en aquellas materias cuya competencia no correspondía a dichos órdenes de gobierno antes de la entrada en vigor del presente Decreto, hasta en tanto sean expedidos y modificados los ordenamientos señalados en el ARTICULO TERCERO TRANSITORIO.

**ARTICULO SEXTO.-** Las autorizaciones, permisos, licencias y concesiones otorgadas con anterioridad a la fecha de entrada en vigor del presente Decreto, seguirán vigentes; su prórroga se sujetará a las disposiciones del presente Decreto.

**ARTICULO SEPTIMO.-** La Secretaría, mediante acuerdo que se publicará en el Diario Oficial de la Federación, deberá determinar la categoría de área natural protegida que, conforme a lo dispuesto en este Decreto, corresponderá a las áreas o zonas que hayan sido establecidas con anterioridad a la entrada en vigor del mismo, con la finalidad de cumplir alguno o algunos de los propósitos establecidos en el artículo 45 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, o cuya caracterización sea análoga o similar a la descripción de alguna de las áreas naturales protegidas de competencia federal previstas en el artículo 46 de dicho ordenamiento

**ARTICULO OCTAVO.-** Tratándose de las reservas forestales, reservas forestales nacionales, zonas protectoras forestales, zonas de restauración y propagación forestal y las zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes para el abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones, la Secretaría deberá realizar los estudios y análisis que sean necesarios para determinar si las condiciones que dieron lugar a su establecimiento no se han modificado y si los propósitos previstos en el instrumento mediante el cual se declaró su constitución, corresponde a los objetivos y características señalados en los artículos 45 y 53 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

En caso de que conforme a los estudios y análisis que se lleven a cabo sea necesario modificar los decretos mediante los cuales se declaran las áreas y zonas anteriormente señaladas, la Secretaría deberá promover ante el Ejecutivo Federal la expedición del decreto que corresponda, previa opinión favorable del Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas

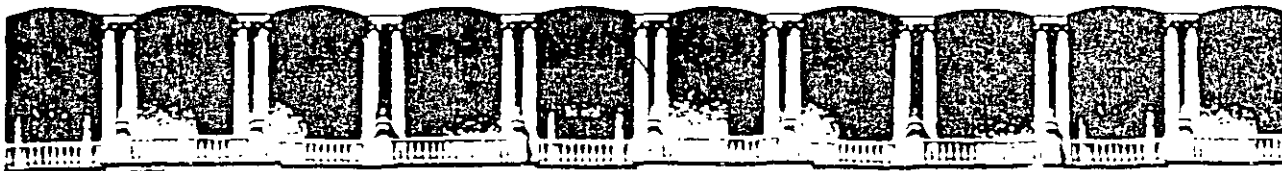
Asimismo, la Secretaría deberá poner a disposición de los gobiernos locales, propietarios, poseedores, grupos y organizaciones sociales públicas o privadas, instituciones de investigación y educación superior y demás personas interesadas, los estudios o análisis que realice para los efectos a que se refiere este artículo, con el propósito de que estos le presenten las opiniones y propuestas que consideren procedentes. La Secretaría deberá incorporar en dichos estudios y análisis las consideraciones que estime pertinentes en relación con las opiniones y propuestas que le sean remitidas, a fin de hacerlas del conocimiento del Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas, previamente a que éste emita su recomendación, respecto de la procedencia de la modificación del decreto correspondiente

**ARTICULO NOVENO.-** En el caso de las áreas y zonas a que se refiere el artículo anterior, solo se requerirá la autorización en materia de impacto ambiental a que se refiere el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, cuando la obra o actividad de que se trate quede comprendida en alguno de los supuestos previstos en las fracciones I a X o XII y XIII del precepto citado. Dicha autorización se otorgará de

conformidad con lo dispuesto en el propio ordenamiento y las disposiciones que del mismo se deriven.

**ARTICULO DECIMO.-** En tanto se expidan las disposiciones reglamentarias que se deriven del presente Decreto, seguirán en vigor las que han regido hasta ahora, en lo que no la contravengan.

---



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***MARCO NORMATIVO***

**PRESENTADO POR: BIOL. HECTOR LESSER H.  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

**INSTRUCTIVO PARA LA FORMULACION DEL INFORME PREVENTIVO AL QUE SE REFIEREN LOS ARTICULOS 7° Y 8° DEL REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL**

**I. Datos generales**

Contestar las preguntas que a continuación se presentan en forma clara y concreta:

1. Nombre de la empresa u organismo solicitante.
2. Nombre y puesto del responsable del proyecto.
3. Nacionalidad de la empresa.
4. Actividad principal de la empresa u organismo.
5. Domicilio para oír y recibir notificaciones.
6. Cámara o asociación a la que pertenece la empresa u organismo, indicando:
  - Número de registro.
  - Fecha de ingreso.
  - Registro Federal de Causantes.

*Ubicación y descripción general de la obra o actividad proyectada, indicando:*

1. Nombre del proyecto.
2. Naturaleza del proyecto (descripción general del proyecto, indicando la capacidad proyectada y la inversión requerida).
3. Vida útil del proyecto.
4. Programa de trabajo.
5. Ubicación física del proyecto. Anexar plano de distribución de la planta y plano de localización del predio, especificando:
  - Estado.
  - Municipio.
  - Localidad.
  - Localización.
6. Situación legal del predio.
7. Superficie requerida (ha, m).
8. Colindancia del predio y actividad que se desarrolla.
9. Obra civil desarrollada para preparación del terreno.
10. Vías de acceso (marítimas y terrestres).
11. Vinculación con las normas y regulaciones de uso del suelo en el área correspondiente.
12. Requerimientos de mano de obra.
13. Obras o servicios de apoyo a utilizar en las diferentes etapas del proyecto.
14. Sitios alternativos para el desarrollo de la obra o actividad.

**III. Descripción del proceso**

1. Materiales y sustancias que serán utilizados en las etapas de preparación del sitio, construcción y mantenimiento de la obra o actividad proyectada. *Enlistar e indicar volúmenes.*

2. Equipo requerido para las etapas de preparación de sitio, construcción, operación y mantenimiento de la obra u actividad proyectada. *Enlistar e indicar capacidad instalada.*

3. Recursos naturales del área que serán aprovechados en las diferentes etapas. *Especificar.*

4. En caso de una industria de transformación y/o extractiva:

- Indicar las sustancias o materiales que serán utilizados en el proceso.
- Enlistar los productos finales.

5. Fuente de suministro de energía eléctrica y o combustible.

6. Requerimientos de agua cruda y potable, y fuente de suministro.

7. Residuos que serán generados en las diferentes etapas del proyecto, y destino final de los mismos.

- Emisiones a la atmósfera.
- Descarga de aguas residuales.
- Residuos sólidos.
- Emisiones de ruido.
- Otro.

**INSTRUCTIVO PARA DESARROLLAR Y PRESENTAR LA MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL EN LA MODALIDAD GENERAL A QUE SE REFIEREN LOS ARTICULOS 9° Y 10° DEL REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL**

**I. Datos generales**

Contestar las preguntas que a continuación se presentan, en forma clara y concreta.

1. Nombre de la empresa u organismo solicitante.
2. Nacionalidad de la misma.
3. Actividad principal de la empresa u organismo.
4. Domicilio para oír y recibir notificaciones, indicando:
  - Estado.
  - Municipio.
  - Código postal.
  - Ciudad.
  - Localidad.
  - Teléfono.
5. Cámara o asociación a la que pertenece.

## 5.1. Registro en la Cámara, indicando:

- Número.
- Fecha.

## 6. Registro Federal de Causantes.

## 7. Responsable de la elaboración del estudio de impacto ambiental, indicando:

- Nombre.
- Razón social.
- Registro SEDUE.

## 7.1. Registro Federal de Causantes.

## 7.2. Domicilio para oír y recibir notificaciones, y teléfono.

## II. Descripción de la obra o actividad proyectada

En esta sección se solicita información de carácter general de la obra o actividad, con la finalidad de configurar una descripción general de la misma; asimismo se solicita información específica de cada etapa, con el objetivo de obtener los elementos necesarios para la evaluación del impacto (positivo o negativo) de la obra o actividad.

## 1. Descripción general.

## 1.1. Nombre del proyecto.

1.2. Naturaleza del proyecto. Explicar en forma general el tipo de obra o actividad que se desea llevar a cabo, especificando el volumen de producción —si se trata de una industria—, la capacidad proyectada y la inversión requerida.

1.3. Objetivos y justificación del proyecto. El solicitante debe dejar en claro las causas que motivaron la realización de la obra o actividad y los beneficios económicos, sociales y de otro tipo que ésta conlleva.

1.4. Programa de trabajo. En este punto se debe anexar la calendarización de cada etapa, indicando la fecha de inicio de actividades.

1.5. Proyectos asociados. Explicar si en el desarrollo de la obra o actividad se requerirá de otros proyectos.

1.6. Políticas de crecimiento a futuro. Explicar en forma general la estrategia a seguir por la empresa indicando ampliaciones, futuras obras o actividades que pretenderán desarrollarse en la zona.

## 2. Etapa de selección del sitio.

En este apartado se solicita información referente a las características del lugar en que se desarrollará la obra o actividad, así como de los alrededores de la zona.

2.1. Ubicación física del proyecto. Anexar plano de localización del predio, indicando las coordenadas en las que se sitúa.

- Estado.
- Municipio.
- Localidad.

2.2. Urbanización del área. Señalar si el predio se sitúa en una zona urbana, suburbana o rural.

2.3. Criterios de elección del sitio. Mencionar los estudios realizados para la selección.

2.4. Superficie requerida (ha, m<sup>2</sup>).

2.5. Uso actual del suelo en el predio. Mencionar el tipo de actividad que se desarrolla.

2.6. Colindancias del predio. Mencionar la orientación de cada predio, indicando la principal actividad que en ellos se desarrolle.

2.7. Situación legal del predio. Compra, venta, concesión, expropiación, otro.

2.8. Vías de acceso al área donde se desarrollará la obra o actividad. En el caso de proyectos relacionados con cuerpos de agua señalar las rutas de navegación que se utilizarán.

2.9. Sitios alternativos que hayan sido o estén siendo evaluados. Indicar su ubicación regional, municipal, local, otra.

## 3. Etapa de preparación del sitio y construcción.

En este apartado se solicitará información relacionada con las actividades de preparación del sitio previas a la construcción, así como las actividades relacionadas con la construcción misma de la obra o con el desarrollo de la actividad.

— Se deben anexar los planos gráficos del proyecto y el sistema constructivo, así como la memoria técnica del proyecto, esto último en forma breve.

3.1. Programa de trabajo. Presentar en forma gráfica (v. gr. GANTT) fechas de inicio y finalización de la preparación del sitio y construcción, indicando además las principales actividades que se desarrollarán en estas etapas con su respectiva calendarización.

3.2. Preparación del terreno. Indicar si para la preparación del terreno se requerirá de algún tipo de obra civil (desmontes, nivelaciones, relleno, despié, desecación de lagunas, otros). En caso de que así sea, especificar:

3.2.1. Recursos que serán alterados.

3.2.2. Área que será afectada: localización.

3.3. Equipo utilizado. Señalar el tipo de maquinaria que se utilizará durante la etapa de preparación del sitio y construcción, especificando la cantidad y operación por unidad de tiempo.

3.4. Materiales. Enlistar los materiales que se utilizarán en ambas etapas, especificando el tipo, volumen y forma de traslado del mismo.

— En caso de que se utilicen recursos de la zona (bancos de materiales, madera u otros), indicar cantidad.

3.5. Obras y servicios de apoyo. Indicar las obras provisionales y los servicios necesarios para la etapa de preparación del terreno, y para la etapa de construcción (construcción de caminos de acceso, puentes provisionales, campamentos, otros).

3.6. Personal utilizado. Especificar el número de trabajadores que serán empleados, y su tiempo de ocupación.

3.7. Requerimientos de energía.

3.7.1. Electricidad. Indicar origen, fuente de suministro, potencia y voltaje.

3.7.2. Combustible. Indicar origen, fuente de suministro, cantidad que será almacenada y forma de almacenamiento.

3.8. Requerimientos de agua. Especificar si se trata de agua cruda o potable, indicando el origen, volumen, traslado y forma de almacenamiento.

3.9. Residuos generados. Indicar el tipo o tipos de residuos que se generarán durante la etapa de preparación del sitio y la de construcción.

3.10. Desmantelamiento de la infraestructura de apoyo. Indicar el destino final de las obras y servicios de apoyo empleados en esta etapa.

4. Etapa de operación y mantenimiento.

La información que se solicita en este apartado, corresponde a la etapa de operación del proyecto, y a las actividades de mantenimiento necesarias para el buen funcionamiento del mismo. Las preguntas 4, 5 y 6 deben ser contestadas en caso de que el proyecto esté relacionado con la industria de la transformación y/o extractiva.

4.1. Programa de operación. Anexar un diagrama de flujo. Las industrias de la transformación y extractivas agregar una descripción de cada uno de los procesos.

4.2. Recursos naturales del área que serán aprovechados. Indicar tipo, cantidad y su procedencia.

4.3. Requerimientos de personal. Indicar la cantidad total del personal que será necesario para la operación, especificando turnos.

— Los puntos del 4 al 6 sólo deberán ser contestados por proyectos relacionados con la industria de la transformación y/o extractiva.

4.4. Materias primas e insumos por fase de proceso:

— Indicar tipo y cantidad de los mismos, considerando las sustancias que sean utilizadas para el mantenimiento de la maquinaria.

4.4.1. Subproductos por fase de proceso.

— Indicar tipo y volumen aproximado.

4.4.2. Productos finales.

— Indicar tipo y cantidad estimada.

4.5. Forma y características de transportación de:

Materias primas.

Productos finales.

Subproductos.

4.6. Forma y características de almacenamiento de:

Materias primas.

Productos finales.

Subproductos.

4.6.1. Medidas de seguridad. Indicar las que serán adoptadas.

4.7. Requerimientos de energía.

4.7.1. Electricidad.

— Indicar voltaje y fuente de aprovechamiento.

4.7.2. Combustible.

— Indicar tipo, origen, consumo por unidad de tiempo y forma de almacenamiento.

4.8. Requerimientos de agua.

— Indicar cantidad y origen, asimismo reportar los requerimientos excepcionales que vayan a ser utilizados y su periodicidad aproximada, plantear otras fuentes alternativas de abasto.

	Consumo ordinario		Consumo excepcional	
	Volumen	Origen	Volumen	Periodicidad
Agua potable	_____	_____	_____	_____
Agua tratada	_____	_____	_____	_____
Agua cruda	_____	_____	_____	_____

4.9. Residuos. Indicar el tipo de residuos que serán generados, especificando el volumen.

— Emisiones a la atmósfera. Indicar si son gaseosos, humos o partículas.

— Descarga de aguas residuales. Indicar aspectos físicos, químicos y bioquímicos.

— Residuos sólidos industriales. Describir sus componentes, y si se encuentran en estado húmedo o seco.

— Residuos sólidos domésticos.

— Residuos agroquímicos. Indicar tipo y periodo de vida de sus componentes.

— Otros.

4.10. Factibilidad de reciclaje.

— Indicar si es factible el reciclaje de los residuos que reporta.

4.11. Disposiciones de residuo.

— Especificar forma de manejo y características del cuerpo receptor.

4.12. Niveles de ruido.

— Indicar intensidad (en dB) y duración del mismo.

4.13. Posibles accidentes y planes de emergencia.

— Describa en forma detallada.

5. Etapa de abandono de sitio.

— En este apartado deberá describir el destino programado para el sitio y sus alrededores, al término de las operaciones, y se deberá especificar:

5.1. Estimación de vida útil.

5.2. Programas de restitución del área.

5.3. Planes de uso del área al concluir la vida útil del proyecto.

### III. Aspectos generales del medio natural y socio-económico

#### Medio natural.

— En esta sección se deberá describir el medio natural resaltando aquellos aspectos que se consideren particularmente importantes por el grado de afectación que provocaría el desarrollo del proyecto. Como apoyo será necesario anexar una serie de fotografías que muestren al área del proyecto y su zona circundante.

#### I. Rasgos físicos

##### 1. Climatología.

##### 1.1. Tipo de clima:

— Considerar la clasificación de Köppen modificada por E. García para la República Mexicana.

##### 1.2. Temperaturas promedio.

##### 1.3. Precipitación promedio anual (mm).

##### 1.4. Intemperismos severos.

— Indicar frecuencia de intemperismos, p. ej. huracanes, heladas, granizadas o algún otro.

1.5. Altura de la capa de mezclado del aire. Sólo en caso de información disponible.

1.6. Calidad del aire. Sólo en caso de información disponible.

##### 2. Geomorfología y geología.

2.1. Geomorfología general. Elaborar una síntesis en la que se describa, en términos generales, las características geomorfológicas más importantes. Especificar si existen bancos de material, su ubicación y estado actual.

2.2. Descripción breve de las características del relieve.

##### 2.3. Susceptibilidad de la zona a:

- Sismicidad.
- Deslizamientos.
- Derrumbes.
- Otros movimientos de tierra o roca.
- Posible actividad volcánica.

##### 3. Suelos:

3.1. Tipo de suelos presentes en el área y zonas aledañas.

3.2. Composición del suelo. (Clasificación de FAO.)

##### 3.3. Capacidad de saturación.

##### 4. Hidrología (rango de 10 a 15 km).

##### 4.1. Principales ríos o arroyos cercanos.

- . Permanentes o intermitentes.
- . Estimación del volumen de escorrentía por unidad de tiempo.
- . Actividad para la que son aprovechados.
- . Indicar si reciben algún tipo de residuo.

4.2. Embalses y cuerpos de agua cercanos (lagos, presas, etc.).

Localización y dimensión al predio.

Área inundable del cuerpo de agua o em. (ha).

. Volumen (mm<sup>3</sup>).

. Usos principales.

##### 4.3. Drenaje subterráneo.

- . Profundidad y dirección.
- . Usos principales (agua, riego, etc.).
- . Cercanía del proyecto a pozos.

— En caso de extracción, consultar si el agua está siendo explotada, subexplotada, etc.

5. Oceanografía. (Si el proyecto se asocia a un área de influencia marina, presentar la siguiente información.)

##### 5.1. Batimetría:

- . Bancos.
- . Composición de sedimentos.
- . Arrecifes o bajos fondos.

##### 5.2. Ciclo de mareas.

##### 5.3. Corrientes.

##### 5.4. Temperatura promedio del agua.

#### II. Rasgos biológicos

Presentar la información de acuerdo con los alcances del proyecto (en una zona terrestre, mar o ambas).

##### 1. Vegetación.

##### 1.1. Tipo de vegetación de la zona.

1.2. Principales asociaciones vegetacionales y distribución.

##### 1.3. Mencionar especies de interés comercial.

1.4. Señalar si existe vegetación endémica y/o en peligro de extinción.

##### 2. Fauna.

##### 2.1. Fauna característica de la zona.

##### 2.2. Especies de valor comercial.

##### 2.3. Especies de interés cinegético.

2.4. Especies amenazadas o en peligro de extinción.

##### 3. Ecosistema y paisaje.

Responder las siguientes preguntas colocando "SI" o "NO" al final de éstas. En caso de que la respuesta sea afirmativa, explique en términos generales la forma en que la obra o actividad incidirá.

3.1. ¿Modificará la dinámica natural de algún cuerpo de agua?

3.2. ¿Modificará la dinámica natural de las comunidades de flora y fauna?

3.3. ¿Crearán barreras físicas que limiten el plazamiento de la flora y/o fauna?

3.4. ¿Se contempla la introducción de especies exóticas?

3.5. Explicar si es una zona considerada con cualidades estéticas únicas o excepcionales.



3.6. ¿Es una zona considerada con atractivo turístico?

3.7. ¿Es o se encuentra cerca de un área arqueológica o de interés histórico?

3.8. ¿Es o se encuentra cerca de un área natural protegida?

3.9. ¿Modificará la armonía visual con la creación de un paisaje artificial?

3.10. ¿Existe alguna afectación en la zona? Explique en qué forma y su grado actual de degradación?

### III. Medio socioeconómico.

En este apartado se solicitará información referente a las características sociales y económicas del sitio seleccionado y sus alrededores.

#### 1. Población.

Proporcionar en forma concisa los siguientes datos:

- . Población económicamente activa.
- . Grupos étnicos.
- . Salario mínimo vigente.
- . Nivel de ingresos per cápita.

#### 2. Servicios.

Indicar con una cruz si el sitio seleccionado y sus alrededores cuenta con los siguientes servicios:

##### 2.1. Medios de comunicación.

- Vías de acceso. Indicar sus características y su distancia al predio.
- Teléfono.
- Telégrafo.
- Correo.
- Otros.

##### 2.2. Medios de transporte.

- Terrestres.
- Aéreos.
- Marítimos.
- Otros.

##### 2.3. Servicios públicos.

- Agua (potable, tratada).
- Energéticos (combustibles).
- Electricidad.
- Sistema de manejo de residuos. Especificar su tipo y distancia al predio.
  - . Drenaje.
  - . Canales de desagüe.
  - . Tiradero a cielo abierto.
  - . Basurero municipal.
  - . Relleno sanitario.
  - . Otros.

##### 2.4. Centros educativos.

- Enseñanza básica.
- Enseñanza media.
- Enseñanza media superior.
- Enseñanza superior.
- Otros.

2.5. Centros de salud. Indicar su distancia al predio.

- De 1er. grado.
- De 2o. grado.

2.6. Vivienda. Indicar el tipo de vivienda predominante por su tipo de material de construcción y su distancia al predio.

- Madera.
- Adobe.
- Tabique.

#### 2.7. Zonas de recreo.

- Parques.
- Centros deportivos.
- Centros culturales (cine, teatro, museos, monumentos nacionales).

#### 3. Actividades.

Indicar con una cruz el tipo de actividad predominante en el área seleccionada y su alrededor.

##### 3.1. Agricultura:

- De riego.
- De temporal.
- Otras.

##### 3.2. Ganadería:

- Intensiva.
- Extensiva.
- Otras.

##### 3.3. Pesca:

- Intensiva.
- Extensiva.
- Otras.

##### 3.4. Industriales:

- Extractiva.
- Manufacturera.
- De servicios.

#### 4. Tipo de economía.

Indicar con una cruz a cuál de las siguientes categorías pertenece el área en que se desarrollará el proyecto.

- Economía de autoconsumo.
- Economía de mercado.
- Otras.

#### 5. Cambios sociales y económicos.

Especificar con una cruz si la obra o actividad creará:

- Demanda de mano de obra.
- Cambios demográficos (migración, aumento de la población).
- Aislamiento de núcleos poblacionales.
- Modificación en los patrones culturales de la zona.
- Demanda de servicios:
  - . Medios de comunicación.
  - . Medios de transporte.
  - . Servicios públicos.

- . Zonas de recreo.
- . Centros educativos.
- . Centros de salud.
- . Vivienda.

#### IV. Vinculación con las normas y regulaciones sobre uso del suelo

En este apartado el solicitante deberá consultar a la Secretaría de Desarrollo Urbano Estatal o Federal para verificar si el uso que pretende darse al suelo corresponde al establecido por las normas y regulaciones.

Los elementos que deberán considerarse son:

1. Plan Director Urbano, correspondiente a la Dirección General de Desarrollo Urbano.
2. Planes o Programas Ecológicos del Territorio Nacional, correspondientes a la Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica.
3. Sistema Nacional de Areas Protegidas, a cargo de la Dirección General de Conservación Ecológica de los Recursos Naturales.

#### V. Identificación de impactos ambientales

En esta sección se deberán identificar y describir los impactos ambientales provocados por el desarro-

llo de la obra o actividad durante las diferentes etapas. Para ello, se puede utilizar la metodología que más convenga al proyecto.

#### VI. Medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales identificados

En este apartado el proponente dará a conocer las medidas y acciones a seguir por el organismo interesado, con la finalidad de prevenir o mitigar los impactos que la obra o actividad provocará en cada etapa de desarrollo del proyecto.

Las medidas y acciones deben presentarse en forma de programa en el que se precisen el impacto potencial y la(s) medida(s) adoptada(s) en cada una de las etapas.

#### Conclusiones

Finalmente, con base en una autoevaluación integral del proyecto, el solicitante deberá realizar un balance (impacto desarrollo) en donde se discutirán los beneficios que genere el proyecto y su importancia en la economía local, regional o nacional, y la influencia del proyecto en la modificación de los procesos naturales.

#### Referencias

En este punto indicar aquellas fuentes que hayan sido consultadas para la resolución de este estudio.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente establece, en su artículo 146, que deberán publicarse en el D.O.F. los listados de las actividades consideradas altamente riesgosas, lo cual ha ocurrido en dos ocasiones: el 28 de marzo de 1990 y el 4 de mayo de 1992.

El Primer Listado se publicó en la Gaceta Ecológica #9 y el Segundo nunca ha aparecido en sus páginas. Con el propósito de difundir y mantener actualizada a la sociedad en general y, en particular, al sector industrial, presentamos ambos Listados. Un elemento adicional que muestra su importancia es que están siendo utilizados como referencia en el Programa de Desregulación y Simplificación de Trámites a la Industria en Materia de Impacto Ambiental.

## PRIMER LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS

**ACUERDO** por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los Artículos 5o. Fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 Fracción XXXII y 37 Fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expide el primer listado de actividades altamente riesgosas.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice Estados Unidos Mexicanos, Secretaría de Gobernación.

**ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARIAS DE GOBERNACION Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 5o. FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE; 27 FRACCION XXXII Y 37 FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL, EXPIDEN EL PRIMER LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS**

### CONSIDERANDO

Que la regulación de las actividades que se consideren altamente riesgosas por la magnitud o gravedad de los efectos que puedan generar en el equilibrio ecológico o el ambiente, está contemplada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como asunto de alcance general de la nación o de interés de la Federación y se prevé que una vez hecha la determinación de las mismas, se publicarán los listados correspondientes.

Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Que por lo tanto, se hace necesario determinar la cantidad mínima de las sustancias peligrosas con las propiedades antes mencionadas, que en cada caso, convierte su producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, en actividades que, de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas, vía atmosférica, provocarían la presencia de límites de concentración superiores a los permisibles, en un área determinada por una franja de 100 metros en torno de las instalaciones, o medios de transporte, y en el caso de la formación de nubes explosivas, la existencia, de ondas de sobrepresión. A esta cantidad mínima de sustancia peligrosa, se le denomina cantidad de reporte.

Que en consecuencia, para la determinación de las actividades consideradas altamente riesgosas, se partirá de la clasificación de las sustancias peligrosas, en función de sus propiedades, así como de las cantidades de reporte correspondiente.

Que cuando una sustancia presente más de una de las propiedades señaladas, está se clasificará en fun-

ción de aquella ó aquéllas que presenten el o los más altos grados potenciales de afectación al ambiente, a la población o a sus bienes y aparecerá en el listado o listados correspondientes.

Que mediante este Acuerdo se expide el primer listado de actividades altamente riesgosas y que corresponde a aquéllas en que se manejan sustancias tóxicas. En dicho listado quedan exceptuadas en forma expresa el uso y aplicación de plaguicidas con propiedades tóxicas, en virtud de que existe una legislación específica para el caso, en la que se regula esta actividad en lo particular.

Que este primer listado y los subsecuentes que se expidan, para el caso de aquellas actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables, explosivas, reactivas, corrosivas o biológicas, éstas constituirán el sustento para determinar las normas técnicas de seguridad y operación, así como para la elaboración de los programas para la prevención de accidentes, previstos en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mismos que deberán observarse en la realización de dichas actividades. Que cuando las actividades asociadas con el manejo de sustancias con propiedades radioactivas, podrían considerarse altamente riesgosas, las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología no establecerán un listado de las mismas, en virtud de que la expedición de las normas de seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas compete a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud, de conformidad con los dispuesto por la legislación que de manera específica regula estas actividades.

Que las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Agricultura y Recursos Hidráulicos y del Trabajo y Previsión Social, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este primer listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente

## ACUERDO

**ARTICULO 1o.-** Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte.

**ARTICULO 2o.-** Para los efectos de este ordenamiento se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

**Cantidad de reporte:** Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

**Manejo:** Alguna o el conjunto de las actividades siguientes: producción, procesamiento, transporte, almacenamiento uso o disposición final de sustancias peligrosas.

**Sustancia peligrosa:** Aquella que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radioactividad, corrosividad o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

**Sustancia tóxica:** Aquella que puede producir en organismos vivos, lesiones, enfermedades, implicaciones genéticas o muerte.

**ARTICULO 3o.-** Con base en lo previsto en el artículo primero, se expide el primer listado de actividades altamente riesgosas, que corresponde a aquéllas en que se manejen sustancias tóxicas. Estas actividades son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejen volúmenes iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes

I. Cantidad de reporte: a partir de 1kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso.

Acido cianhídrico  
Acido fluorhídrico-(fluoruro de hidrógeno)  
Arsina  
Cloruro de hidrógeno  
Cloro (1)  
Diborano  
Dióxido de nitrógeno  
Flúor  
Fosgeno  
Hexafluoruro de telurio  
Oxido nítrico  
Ozono(2)  
Seleniuro de hidrógeno  
Tetrafluoruro de azufre  
Tricloruro de boro

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acroleína  
Alil amina  
Bromuro de propargilo  
Butil vinil éter  
Carbonilo de níquel  
Ciclopentano  
Clorometil metil eter  
Cloruro de metacrilato  
Dioxolano  
Disulfuro de metilo  
Fluoruro cianúrico  
Furano  
Isocianato de metilo  
Metil hidracina  
Metil vinil cetona  
Pentaborano  
Sulfuro de dimetilo  
Tricloroetil silano

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

2 Clorofenil tiourea  
2,4 Ditiobiuret  
4,6 Dinitro-cresol  
Acido bencen arsénico  
Acido cloroacético  
Acido fluoroacético  
Acido metil-carbamilo  
Acido tiocianico 2-benzotriámico  
Aldicarb  
Arseniato de calcio  
Bis clorometil cetona  
Brenodiolona

Carbofurano (furadán)  
Carbonilos de cobalto  
Cianuro de potasio  
Cianuro de sodio  
Cloroplatinato de amonio  
Cloruro crómico  
Cloruro de dicloro benzalkonio  
Cloruro platinoso  
Cobalto  
Cobalto (2,2-(1,2-etano)  
Complejo de organorodio  
Decaborano  
Dicloro xileno  
Difacionona  
Didisocianato de isoforona  
Dimetil-p-fenilendiamina  
Dixitoxin  
Endosulfan  
Epn  
Estereato de cadmio  
Estricnina  
Fenamifos  
Fenil tiourea  
Fluoroacetamida  
Fósforo (rojo, amarillo y blanco)  
Fósforo de zinc  
Fosmet  
Hexacloro naftaleno  
Hidruro de litio  
Metil anzifos  
Metil paration  
Monocrotófos (azodrin)  
Oxido de cadmio  
Paraquat  
Paraquat-metasulfato  
Pentadecilamina  
Pentóxido de arsénico  
Pentóxido de fósforo  
Pentóxido de vanadio  
Pireno  
Piridina, 2 metil, 5 vinil  
Seleniato de sodio  
Sulfato de estricnina  
Sulfato taloso  
Sulfato de talio  
Tetracloruro de iridio  
Tetracloruro de platino  
Tetraóxido de osmio  
Tiosemicarbazida  
Triclorofón  
Trióxido de azufre

II. Cantidad de reporte: a partir de 10 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acido sulfhídrico  
Amoníaco anhidro  
Fosfina  
Metil mercaptano  
Trifluoruro de boro

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

1.2.3.4 diepoxibutano  
2.cloroetanol  
Bromo  
Cloruro de acrilóilo  
1 Sulfuro de carbono  
Mesitileno  
Oxicloruro fosforoso  
Pentacarbonilo de fierro  
Propionitrilo  
Pseudocumeno  
Tetracloruro de titanio  
Tricloro (clorometil) silano  
Vinil norborneno

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

Acetato de metoxietilmercurio  
Acetato fenil mercuríco  
Acetato mercuríco  
Arsenito de potasio  
Arsenito de sodio  
Azida de sodio  
Bromuro cianógeno  
Cianuro potásico de plata  
Cloruro de mercurio  
Cloruro de talio  
Fenol  
Fosfato etilmercuríco  
Hidroquinona  
Isocianato de metilo  
Lindano  
Malonato taloso  
Malononitrilo  
Níquel metálico  
Óxido mercuríco  
Pentaclorofenol  
Pentacloruro de fósforo

Salcomina  
Selenito de sodio  
Telurio  
Telurito de sodio  
Tiosemicarbácida acetona  
Tricloruro de galio  
Warfarin

III. Cantidad de reporte: a partir de 100 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en el estado gaseoso:

Bromuro de metilo  
Etano (3)  
Óxido de etileno

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2,6-Diisocianato de tolueno  
Acetaldehído (3)  
Acetato de vinilo  
Acido nítrico  
Acilonitrilo  
Alcohol alílico  
Beta propiolactona  
Cloroacetaldehído  
Crotonaldehído  
Disulfuro de carbono  
Eter bis-cloro metílico  
Hidracina  
Metil tricloro silano  
Nitrosodimetilamina  
Óxido de propileno  
Pentacloroetano  
Pentafluoruro de antimonio  
Perclorometil mercaptano  
Piperidina  
Propilenoamina  
Tetrametilo de plomo  
Tetranitrometano  
Tricloro benceno  
Tricloruro de arsénico  
Trietoxisilano  
Trifluoruro de boro

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

Acido cresílico  
Acido selenioso  
Acetilamida

Carbonato de talio  
Metomil  
Oxido tálico  
Yoduro cianógeno

IV. Cantidad de reporte: a partir de 1,000 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Butadieno

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetonitrilo  
Benceno (3)  
Cianuro de bencilo  
Cloroformo  
Cloruro de benzal  
Cloruro de bencilo  
2,4-Diisocianato de tolueno  
Epiclorohidrina  
Isobutironitrilo  
Oxiclорuro de selenio  
Peroxido de hidrógeno  
Tetracloruro de carbono (3)  
Tetraetilo de plomo  
Trimetilcloro silano

V. Cantidad de reporte: a partir de 10,000 Kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2,4,6 Trimetil anilina  
Anilina  
Ciclohexilamina  
Cloruro de benceno sulfonilo  
Diclorometil fenil silano  
Etilen diamina  
Forato  
Formaldehido cianohidrina  
Gas mostaza, sinónimo (sulfato de bis 2-cloroetilo)  
Hexacloro ciclo pentadieno  
Lactonitrilo  
Mecloretamina  
Metanol  
Oleum  
Sulfato de dimetilo

Tiocianato de etilo  
Tolueno (3)

VI. Cantidad de reporte: a partir de 100,000 Kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido.

1,1-Dimetil hidracina  
Anhídrido metacrílico  
Cumeno  
Diclorvos  
Eter dicloroetilico  
Eter diglicidílico  
Fenil dicloro arsina  
Nevinfos (fosforín)  
Octametil difosforamida  
Tricloro fenil silano

VII. Cantidad de reporte: a partir de 1,000,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Adiponitrilo  
Clordano  
Dibutilftalato  
Dicrotofos (bidrín)  
Dimetil 4 ácido fosfórico  
Dimetilftalato  
Dioctilftalato  
Fosfamidón  
Metil-5-Dimetón  
Nitrobenceno  
Tricloruro fosforoso

(1) Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

(2) Se aplica exclusivamente a actividades donde se realicen procesos de ozonización.

(3) En virtud de que esta sustancia presenta además propiedades explosivas o inflamables, también será considerada, en su caso, en el proceso para determinar los listados de actividades altamente riesgosas, correspondientes a aquellas en que se manejen sustancias explosivas o inflamables.

ARTICULO 4o.- Se exceptúa del listado de actividades altamente riesgosas, previsto en el artículo

anterior, el uso o aplicación de plaguicidas con propiedades tóxicas.

**ARTICULO 5o.-** Para efectos del presente Acuerdo, se entenderá como sustancias en estado sólido, aquéllas que se encuentren en polvo menor de 10 micras.

**ARTICULO 6o.-** En el caso de las sustancias señaladas en el artículo 3o. que correspondan a plaguicidas, la cantidad de reporte se entenderá referida a su ingrediente técnico llamado también activo.

En los demás casos, las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse de conformidad con su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentran en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, a fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

**ARTICULO 7o.-** Las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal; Comercio y Fomento Industrial, de Salud; Agricultura y Recursos Hidráulicos y del Trabajo y Previsión Social, podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de investigaciones que al efecto se lleven a cabo.

### **TRANSITORIO**

**UNICO.-** El presente acuerdo entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el *Diario Oficial de la Federación*.

Ciudad de México a 26 de marzo de mil novecientos noventa.- El Secretario de Gobernación, Fernando Gutiérrez Barnos.- Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Patricio Chinnos Calero.-Rúbrica.

Publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de marzo de 1990.

## **SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS**

**ACUERDO** por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 5o - fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 fracción XXXII y 37 fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expiden el segundo listado de actividades altamente riesgosas

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos - Secretaría de Gobernación

**ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARÍAS DE GOBERNACION Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 5o**

**FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE, 27 FRACCION XXXII Y 37 FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL EXPIDEN EL SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS.**

### **CONSIDERANDO**

Que la regulación de las actividades altamente riesgosas, está contemplada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como asunto de alcance general de la nación o de interés de la Federación y se prevé que una vez hecha la determinación de las mismas se publicarán los listados correspondientes



Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionarían una afectación significativa al ambiente a la población o a sus bienes.

Que por lo tanto, se hace necesario fijar dicha cantidad para cada sustancia peligrosa que presente las propiedades antes mencionadas. A esta cantidad se le denomina cantidad de reporte.

Que con base en el criterio anterior se ha procedido a determinar las actividades altamente riesgosas en función de las propiedades de las sustancias que se manejen y a agrupar dichas actividades en los listados correspondientes.

Que cuando una actividad esté relacionada con el manejo de una sustancia que presente más de una de las características de peligrosidad señaladas, en cantidades iguales o superiores a su cantidad de reporte, dicha actividad será considerada altamente riesgosa y se incluirá en cada uno de los listados que correspondan.

Que el 28 de marzo de 1990 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* el primer listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias tóxicas. Que mediante este Acuerdo se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas, en cantidades tales que de producirse una liberación, ya sea por fuga o derrame de las mismas en la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final provocaría la formación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamabilidad, en un área determinada por una franja de 100 de longitud en torno de la instalaciones o medio de transporte dados, y en el caso de formación de nubes explosivas, la presencia de ondas de sobrepresión de 0.5lb/pulg<sup>2</sup> en esa misma franja.

Que tanto el primer listado que corresponde al manejo de sustancias tóxicas y este concerniente al manejo de sustancias inflamables y explosivas así como los subsecuentes que se expidan para el caso de aquellas actividades relacionadas con el manejo de sustancias reactivas, corrosivas o biológicas, constituirán el sustento para determinar las normas técnicas de seguridad y operación, así como para la elaboración y presentación de los programas para la prevención de accidentes previstos en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mismos que deberán observarse en la realización de dichas actividades.

Que aun cuando las actividades asociadas con el manejo de sustancias con propiedades radioactivas podrían considerarse altamente riesgosas, las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología no establecerán un listado de las mismas, en virtud de que la expedición de las normas de seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas compete a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud de conformidad con lo dispuesto por la legislación que de manera específica regula estas actividades.

Que la Secretaría de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, así como con la participación de la Secretaría de la Defensa Nacional, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este segundo listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente:

#### **ACUERDO**

**ARTICULO 1o.-** Se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas.

**ARTICULO 2o.-** Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peli-

grosas en cantidades iguales o superiores a la cantidad de reporte.

**ARTICULO 3o.-** Para los efectos de este Acuerdo se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

**Cantidad de reporte:** Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transportes dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población, o a sus bienes.

**Manejo:** Alguna o el conjunto de las actividades siguientes: producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final de sustancias peligrosas.

**Sustancia peligrosa:** Aquélla que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radiactividad, corrosividad, o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

**Sustancia inflamable:** Aquélla que es capaz de formar una mezcla con el aire en concentraciones tales para prenderse espontáneamente o por la acción de una chispa.

**Sustancia explosiva:** Aquélla que en forma espontánea o por acción de alguna forma de energía genera una gran cantidad de calor y energía de presión en forma casi instantánea.

**ARTICULO 4o.-** Las actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables y explosivas que deben considerarse altamente riesgosas son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso y disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejan cantidades iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes:

I. Cantidad de reporte a partir de 500 kg

a) en el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso

Acetileno  
Acido sulfhídrico  
Anhídrido hipocloroso  
Butano (Niso)  
Butadieno  
1-Buteno  
2-Buteno (cis,trans)  
Cianógeno  
Ciclobutano  
Ciclopropano  
Cloruro de metilo  
Cloruro de vinilo  
Difluoruro 1-Cloroetano  
Dimetil amina  
2,2-Dimetil propano  
Etano  
Eter metílico  
Etileno  
Fluoruro de etilo  
Formaldehido  
Hidrógeno  
Metano  
Metilamina  
2-Metil propeno  
Propano  
Propileno  
Propino  
Sulfuro de carbonilo  
Tetrafluoroetileno  
Trifluorocloroetileno  
Trimetil amina

b) En el caso de las sustancias en estado gaseoso no previstas en el inciso anterior y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación <37.8° C  
Temperatura de ebullición <21 1° C  
Presión de vapor >760 mm hg

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2-Butino  
Cloruro de etilo  
Etilamina  
3-Metil-1-Buteno  
Metil etil eter  
Nitrito de etilo  
Oxido de etileno  
1-Pentano

II. Cantidad de reporte a partir de 3,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetaldehído  
Acido cianhídrico  
Amileno(cis,trans)  
Colodión  
Disulfuro de carbono  
2-Metil-1-Buteno  
2-Metil-2-Buteno  
Oxido de propileno  
Pentano (Niso)  
1-Penteno  
1-Penteno  
Sulfuro de dimetilo

III. Cantidad de reporte a partir de 10,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acroleína  
Alil amina  
Bromuro de alilo  
Carbonilo de níquel  
Ciclopentano  
Ciclopenteno  
1-Cloro propileno  
2-Cloro propileno  
Cloruro de alilo  
Cloruro de acetilo  
Cloruro de propilo (Niso)  
1,1-Dicloroetileno  
Diethylamina  
Dihidropirán  
2,2 Dimetil butano  
2,3 Dimetil butano  
2,3 Dimetil 1-Buteno  
2,3 Dimetil 2-Buteno  
2- Etil 1-Buteno  
Eter dietílico  
Eter vinílico  
Etilico mercaptano  
Etoxiacetileno  
Formiato de etilo  
Formiato de metilo  
Furano  
Isopreno  
Isopropenil acetileno  
2-Metil Pentano  
3-metil Pentano  
2-Metil-1-Penteno

2-Metil-2-Penteno  
4-Metil-1-Penteno  
4-Metil-2-Penteno  
2-Metil-2-Propanotiol  
Metil propil acetileno  
Metil triclorosilano  
Propil amina (Niso)  
Propenil etil éter  
Tetrahidrofurano  
Triclorosilano  
Vinil etil eter  
Vinil isopropil éter

IV. Cantidad de reporte a partir de 20,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetato de etilo  
Acetato de metilo  
Acetato de vinilo  
Acetona  
Acrilato de metilo  
Acrilonitrilo  
Alcohol metílico  
Alcohol etílico  
Benceno  
1-Bromo-2-Buteno  
Butilamina (Niso,sec.ter)  
Ciclohexano  
Ciclohexeno  
Cicloheptano  
2-Cloro-2-Buteno  
Cloruro de butilo (Niso,sec.ter)  
Cloruro de vinilideno  
Dicloroetano  
Dicloroetileno (cis,trans)  
1,2-Dicloroetileno  
Dimetil diclorosilano  
1,1 Dimetil hidrazina  
2,3 Dimetil pentano  
2,4 Dimetil pentano  
Dimetoxi metano  
Diosobutileno  
Diosopropilamina  
Dioxolano  
Eter etil propílico  
Eter propílico (Niso)  
Etil butil éter  
Etil ciclobutano  
Etil ciclopentano  
Etil diclorosilano

Etil metil cetona  
Etilenimina  
Formiato de propilo (Niso)  
Fluorobenceno  
1-Hexeno  
2-Hexeno (cis,trans)  
Heptano (Niso y mezclas de isómeros)  
Hepteno  
Heptileno  
Heptileno 2-trans  
1,4-Hexadieno  
Hexano (Niso y mezclas de isómeros)  
Isobutiraldehído  
2-Metil furano  
Metil Ciclohexano  
Metil Ciclopentano  
Metil Diclopentano  
Metil Diclorosilano  
Metil éter propílico  
2-Metil hexano  
3-Metil hexano  
Metil hidrazina  
2-Metil-1,3-Pentadieno  
4-Metil-1,3-Pentadieno  
Metil pirrolidina  
2-Metil tetrahidrofurano  
Metil vinil cetona  
Monóxido de butadieno  
Nitrato de etilo  
2,5-Norbomadieno  
Óxido de butileno  
Óxido de pentametileno  
1,2-Óxido de butileno  
Pirrolidina  
Propionaldehído  
Propionato de metilo  
Propionato de vinilo  
Trietilamina  
2,2,3-Trimetil butano  
2,3,3-Trimetil-1-Buteno  
2,3,4-Trimetil-1-Penteno  
2,4,4-Trimetil-2-Penteno  
3,4,4-Trimetil-2-Penteno  
Trimetilclorosilano  
Vinil isobutil éter

V. Cantidad de reporte a partir de 50,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Gas L.P. comercial <sup>III</sup>

VI. Cantidad de reporte a partir de 100,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en el estado líquido:

Acetato de propilo (Niso)  
Alcohol alílico  
Alcohol desnaturalizado  
Alcohol propílico (Niso)  
Amilamina (N.sec)  
Bromuro de N-butilo  
Butirato de metilo  
Butironitrilo (Niso)  
1,2-Dicloropropano  
2,3-Dimetil hexano  
2,4-dimetil hexano  
P-Dioxano  
Eter alílico  
Formiato de isobutilo  
2-Metil-2-Butanol  
2-Metil Butiraldehído  
2-Metil-3-Etil pentano  
3-Metil-2-Butanol  
Metil metacrilato  
Piperidina  
Piridina  
Propionato de etilo  
Propionitrilo  
Tetrametilo de plomo  
2,2,3-Trimetil pentano  
2,2,4-Trimetil pentano  
2,3,3-Trimetil pentano  
Tolueno

VII. Cantidad de reporte a partir de 200,000 kg

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido

Acetal  
Acetato de butilo (iso,sec)  
Acetato de isoamilo  
Acetato de isopropenilo  
Acetonitrilo  
Acrilato de isobutilo  
Alcohol alílico (N.sec)  
Alcohol butílico (iso,sec,ter)  
Amil mercaptan  
Benzotrifluoruro

1-Butanol  
 Butil mercaptan (N,sec)  
 Butirato de etilo (Niso)  
 Clorobenceno  
 Cloruro de amilo  
 Crotonaldehído  
 Cumeno  
 Dietilcetona  
 Dietílico carbonato  
 1,3-Dimetil butilamina  
 1,3-Dimetil ciclohexano  
 1,4-Dimetil ciclohexano (cis, trans)  
 Estireno  
 Etil benceno  
 Etil butilamina  
 2-etil butiraldehído  
 Etil ciclohexano  
 Etilendiamina  
 Etileno-glicol dietílico éter  
 Ferropenacarbonilo  
 Isobromuro de amilo  
 Isoformiato de amilo  
 Metacrilato de etilo  
 Metil isobutil cetona  
 Metil propil cetona  
 Nitroetano  
 Nitrometano  
 Octano (N, iso)  
 Octeno (iso)  
 1-Octeno  
 2-Octeno  
 Oxido de mesitilo  
 2,2,5-Trimetil hexano  
 Vinil triclorosilano  
 Xileno (M.O.P.)

#### VIII. Cantidad de reporte a partir de 10,000 kg

- a) En el caso de las sustancias en estado líquido, no previstas en las fracciones anteriores y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación <37.8 °C  
 Temperatura de ebullición >21.1 °C  
 Presión de vapor  $\leq$ 760 mm hg

#### IX. Cantidad de reporte a partir de 10,000 barriles.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Gasolinas <sup>(1)</sup>  
 Kerosenas incluye naftas y diáfano <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

**ARTICULO 5.-** Se exceptúa de este listado a las actividades relacionadas con el manejo de las sustancias a que se refiere el artículo 41 de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos.

**ARTICULO 6.-** Las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse referidas a su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentren en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, con el fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

**ARTICULO 7.-** Las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía Minas e Industria Paraestatal de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y de Trabajo y Previsión Social, podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de las investigaciones que sobre el particular se lleven a cabo.

#### TRANSITORIO

**UNICO.-** El presente acuerdo entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el *Diario Oficial de la Federación*.

México D.F. a 30 de Abril de 1992.- El Secretario de Gobernación, Fernando Gutiérrez Barrios.- Rúbrica - El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Luis Donald Colosio Murrieta.-Rúbrica.

Publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 4 de mayo de 1992.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

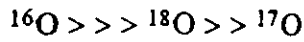
**TEMA :**

***EVALUACIÓN DE RIESGO***

**PRESENTADO POR: M. en I. ANTONIO CARDONA BENAVIDES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

## MOLECULA DEL AGUA

Abundancia de isotopos de oxigeno

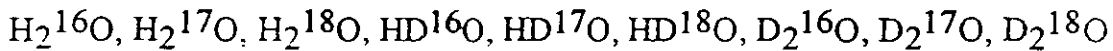


Abundancia de isotopos de hidrogeno

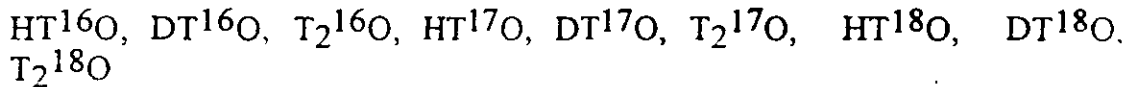


⇒ 48 moléculas diferentes, 39 radioactivas

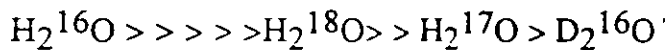
⇒ **9 moléculas estables de agua**



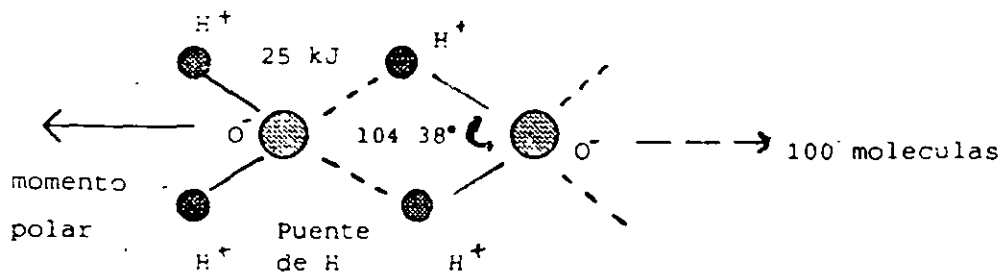
aunque, también es posible encontrar las siguientes moléculas



abundancia relativa



### Agregado molecular de agua a 20°C



En una molécula gramo de agua la energía de los puentes o ligaduras de Hidrogeno constituye alrededor de 25 KJ. Esto provoca que el agua sea un líquido practicamente incompresible.

## Propiedades Físico-Químicas del agua

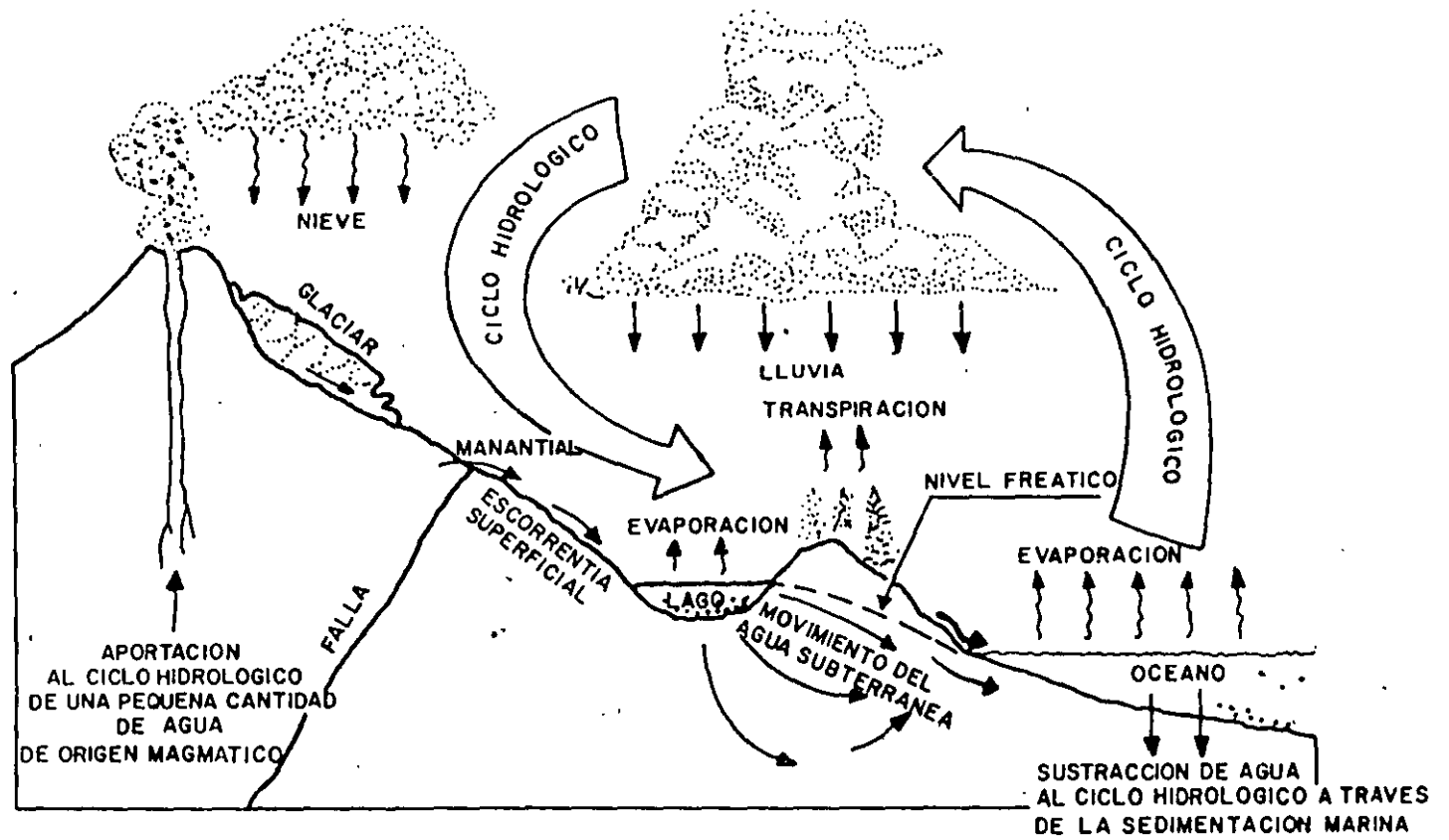
Propiedad	Simbología	Valor	Peculiaridades
Densidad	$\rho$	998.2 g/cm <sup>3</sup>	f(T)
Viscosidad	$\mu$	1.0 x 10 <sup>-2</sup> centipoise	f(1/T)
Coef. Cinemático de Viscosidad	$\nu$	1.01 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s [stockes]	f(1/T)
Coef. Conductividad Térmica	K	140 x 10 <sup>-5</sup> cal / cm s	no es buena conductora de calor
Calor de fusión	C <sub>f</sub>	79.71 cal/g C	
Calor de vaporización	C <sub>v</sub>	595.4 cal/g C	
Calor específico	C <sub>e</sub>	1.0 cal/g °C	buena moderadora del clima
Coef. Lamé Modulo de rigidez	$\mu$	0	En líquidos no existen ondas longitudinales
Vel. ondas P	V <sub>p</sub>	1.485 Km/s	
Compresibilidad isotérmica		4.6 cm <sup>2</sup> /dina 10 <sup>-11</sup>	f(T)
Coef. de Compresibilidad	$\beta$	4.88 x 10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /N	$\beta = 1/\epsilon$
Coef. de elasticidad	$\epsilon$	0.205 x 10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>	
Indice de Refracción para luz de sodio	I <sub>r</sub>	1333	
Resistividad (agua Kohlrausse)	$\rho_{max}$	28 x 10 <sup>6</sup> ohm cm <sup>-1</sup>	f(1/mineralización)
Conductividad eléctrica específica	$\mu$	5 x 10 <sup>-6</sup> S/m	f(mineralización)
Constante o permeabilidad dieléctrica	$\epsilon$	80.4	f(1/frecuencia) hace del agua el disolvente natural mas fuerte
Tensión superficial		72.75 dinas/cm	

valores a T de 20° C



## ***PROPIEDADES "ANÓMALAS" DEL AGUA***

- Al congelarse, aumenta su volumen 10 % a presión normal
- Al aumentar la presión desciende la temperatura de fusión, en las sustancias comunes el proceso es inverso.
- Con excepción de algunas sustancias, tiene mayor peso en estado líquido que en estado sólido.
- Tiene máxima densidad a 3.98 ° C
- Posee el mayor calor específico - capacidad calórica- de todas las sustancias sólidas o líquidas
- La temperatura de congelación decae con el aumento de presión
- Tiene el mayor Calor de Evaporación de todos los líquidos comunes
- Tiene el mayor Calor de Fundición (excepto el amoníaco)
- La mayor constante dieléctrica de los líquidos comunes
- Es el mejor solvente natural conocido
- La molécula de agua posee un momento dipolar muy alto
- Posee una tensión superficial excepcionalmente grande.



CICLO HIDROLOGICO

Un RS es un RIP si muestra alguna de las siguientes características:

- **Flamabilidad** Punto Ignición menor a 60° C.  
Sólido que bajo condiciones normales presenta combustión espontánea
  
- **Corrosividad** un RS con  $12.5 < \text{pH} < 2$  o líquido que corróe acero a razón de cm/año a una  $T = 55^\circ \text{C}$
  
- **Reactividad** Un RS -inestable que reacciona violentamente sin detonación
  - reacciona violentamente con agua
  - forma mezcla explosiva con agua
  - genera gases tóxicos, vapores, humos cuando se añade agua
  - contiene cianuro o sulfatos y genera gases tóxicos, vapores o humos a  $2 < \text{pH} < 12.5$
  - detona cuando es calentado bajo confinamiento
  - detona a P y T normales
  - catalogado como explosivo
  
- **Toxicidad** Afecta adversamente a la salud. Puede ser cancerígeno o no-cancerígeno

## **RESIDUOS SOLIDOS (RS)**

Desechos de actividades antropogenicas

no se incluyen

- Descargas de liquidos domesticos
- Descargas de aguas residuales industriales
- Retorno de riego
- Material nuclear
- Residuos mineros

## **RESIDUOS INDUSTRIALES PELIGROSOS (RIP)**

Es un RS o una combinacion de RS's que por su cantidad, concentracion de solutos o las caracteristicas fisicas, quimicas o infecciosas puede:

- Causar o incrementar mortalidad o enfermedades
- Ser un riesgo potencial para la salud o el medio ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

Un RS puede ser considerado como un RIP si

- Muestra al analizarlo cualquier caracteristica de un RIP
- Ha sido definido y catalogado como RIP
- Es una mezcla que contiene RS's y por lo menos un RIP
- No esta excluido de las regulaciones vigentes como RIP

Un RS es un RIP si muestra alguna de las siguientes características:

\* **Flamabilidad**

Punto ignición menor a 60° C.  
Sólido que bajo condiciones normales presenta combustión espontánea

\* **Corrosividad**

un RS con  $12.5 < \text{pH} < 2$  o líquido que corroe acero a razón de 6 cm/año a una  $T = 55^\circ \text{C}$

\* **Reactividad**

Un RS -inestable que reacciona violentamente sin detonación

-reacciona violentamente con agua

-forma mezcla explosiva con agua

-genera gases tóxicos, vapores, humos cuando se añade agua

-contiene cianuro o sulfatos y genera gases tóxicos, vapores o humos a  $2 < \text{pH} < 12.5$

-detona cuando es calentado bajo confinamiento

-detona a P y T normales

-catalogado como explosivo

\* **Toxicidad**

Afecta adversamente a la salud. Puede ser cancerígeno o no-cancerígeno

## ACTIVIDADES ANTROPOGENICAS QUE APORTAN CONTAMINANTES AL AGUA SUBTERRANEA

<b>DISPOSICION DE RESIDUOS</b>	
<b>SISTEMAS SEPTICOS</b>	Bacterias, virus, nitratos, fosfatos cloruros, TCE
<b>BASUREROS (ACTIVOS)</b>	SDT, metales, Fe, Mn, Cd, acidos, compuestos orgánicos
<b>POZOS INYECCION</b>	SDT, bacterias, Na,
<b>ALMACENAJE Y MANEJO MAT.</b>	
<b>TANQUES SUBTERRANEOS</b>	B, T, X, hidrocarburos
<b>AGROQUIMICOS</b>	Nitratos, compuestos orgánicos
<b>DUCTOS</b>	B, T, X, hidrocarburos
<b>ACTIVIDADES MINERAS</b>	
<b>JALES</b>	Acidos, Fe, Mn, U, Th, Mo, Se, As
<b>ACTIVIDADES PETROLERAS</b>	
<b>POZOS</b>	Salmueras
<b>ACTIVIDADES AGROPECUARIAS</b>	
<b>AGROQUIMICOS</b>	Nitratos, fosfatos, compuestos orgánicos
<b>IRRIGACION</b>	SDT, nitratos, fosfatos
<b>HECES ANIMALES</b>	Nitratos, nitritos, bacterias, fosfatos
<b>ACTIVIDADES URBANAS</b>	
<b>FUGAS DRENAJE</b>	Bacterias, hidrocarburos, STD, plomo
<b>FUGAS DUCTOS</b>	Hidrocarburos { gasolinas }, solventes

Contaminant	Examples of uses
<b>Aromatic hydrocarbons</b>	
Acetanilide	Intermediate manufacturing, pharmaceuticals, <u>dye-stuffs</u>
Alkyl benzene sulfonates	Detergents
Aniline	<u>Dyestuffs</u> , intermediate, photographic chemicals, pharmaceuticals, <u>herbicides</u> , <u>fungicides</u> , petroleum refining, explosives
Anthracene	<u>Dyestuffs</u> , intermediate, semiconductor research
Benzene	Detergents, intermediate, <u>solvents</u> , antiknock gasoline
Benzidine	<u>Dyestuffs</u> , reagent, stiffening agent in rubber compounding
Benzyl alcohol	<u>Solvent</u> , perfumes and flavors, photographic developer inks, <u>dye-stuffs</u> , intermediate
Butoxymethylbenzene	NA <sup>o</sup>
Chrysene	Organic synthesis, coal tar by-product
Creosote mixture	<u>Wood preservatives</u> , disinfectants
Dibenz[a,h.]anthracene	NA
Di-butyl-p-benzoquinone	NA
Dihydrotrimethylquinoline	Rubber antioxidant
4,4-Dinitrosodiphenylamine	NA
Ethylbenzene	Intermediate, <u>solvent</u> , gasoline
Fluoranthene	Coal tar by-product
Fluorene	Resinous products, <u>dye-stuffs</u> , <u>insecticides</u> , coal tar by-product
Fluorescein	<u>Dyestuffs</u>
Isopropyl benzene	<u>Solvent</u> , chemical manufacturing
4,4'-methylene-bis-2-chloroaniline (MOCA)	Curing agent for polyurethanes and epoxy resins
Methylthiobenzothiazole	NA
Naphthalene	<u>Solvent</u> , lubricant, explosives, preservatives, intermediate, <u>fungicide</u> , moth repellent
o-Nitroaniline	<u>Dyestuffs</u> , intermediate, interior paint pigments, chemical manufacturing
Nitrobenzene	<u>Solvent</u> , polishes, chemical manufacturing
4-Nitrophenol	Chemical manufacturing
n-Nitrosodiphenylamine	<u>Pesticides</u> , retarder of vulcanization of rubber
Phenanthrene	<u>Dyestuffs</u> , explosives, synthesis of drugs, biochemical research
n-Propylbenzene	<u>Dyestuffs</u> , solvent
Pyrene	Biochemical research, coal tar by-product
Styrene (vinyl benzene)	Plastics, resins, protective coatings, intermediate
Toluene	Adhesive solvent in plastics, <u>solvent</u> , aviation and high-octane blending stock, diluent and thinner, chemicals, explosives, detergents
1,2,4-Trimethylbenzene	<u>Manufacture of dyestuffs</u> , pharmaceuticals, chemical manufacturing
Xylenes (m, o, p)	Aviation gasoline, protective coatings, solvent, synthesis of organic chemicals, gasoline
<b>Oxygenated hydrocarbons</b>	
Acetic acid	Food additives, plastics, <u>dye-stuffs</u> , pharmaceuticals, photographic chemicals, <u>insecticides</u>
Acetone	<u>Dyestuffs</u> , <u>solvent</u> , chemical manufacturing, cleaning and drying of precision equipment
Benzophenone	Organic synthesis, odor fixative, flavoring, pharmaceuticals
Butyl acetate	<u>Solvent</u>
n-Butyl-benzylphthalate	Plastics, intermediate

Contaminant	Examples of uses
<b>Oxygenated hydrocarbons (cont'd)</b>	
Di-n-butyl phthalate	Plasticizer, <u>solvent</u> , adhesives, <u>insecticides</u> , safety glass, inks, paper coatings
Diethyl ether	Chemical manufacturing, <u>solvent</u> , analytical chemistry, anesthetic, perfumes
Diethyl phthalate	Plastics, explosives, <u>solvent</u> , <u>insecticides</u> , perfumes
Diisopropyl ether	<u>Solvent</u> , rubber cements, paint and varnish removers
2,4-Dimethyl-3-hexanol	Intermediate, <u>solvent</u> , lubricant
2,4-Dimethyl phenol	Pharmaceuticals, plastics, disinfectants, <u>solvent</u> , <u>dyestuffs</u> , <u>insecticides</u> , <u>fungicides</u> , additives to lubricants and gasolines
Di-n-octyl phthalate	Plasticizer for polyvinyl chloride and other vinyls
1,4-Dioxane	<u>Solvent</u> , lacquers, paints, varnishes, cleaning and detergent preparations, <u>fumigants</u> , paint and varnish removers, wetting agent, cosmetics
Ethyl acrylate	Polymers, acrylic paints, intermediate
Formic acid	<u>Dyeing</u> and finishing, chemicals, <u>manufacture of fumigants</u> , <u>insecticides</u> , <u>solvents</u> , plastics, refrigerants
Methanol (methyl alcohol)	Chemical manufacturing, <u>solvents</u> , automotive antifreeze, fuels
Methylcyclohexanone	<u>Solvent</u> , <u>lacquers</u>
Methyl ethyl ketone	<u>Solvent</u> , paint removers, cements and adhesives, cleaning fluids, printing, acrylic coatings
Methylphenyl acetamide	NA
Phenols (e.g., p-tert-butylphenol)	Resins, <u>solvent</u> , pharmaceuticals, reagent, <u>dyestuffs</u> and indicators, germicidal paints
Phthalic acid	<u>Dyestuffs</u> , medicine, perfumes, reagent
2-Propanol	Chemical manufacturing, <u>solvent</u> , deicing agent, pharmaceuticals, perfumes, lacquers, dehydrating agent, preservatives
2-Propyl-1-heptanol	<u>Solvent</u>
Tetrahydrofuran	<u>Solvent</u>
Varsol	Paint and varnish thinner
<b>Hydrocarbons with specific elements (e.g., with N, P, S, Cl, Br, I, F)</b>	
Acetyl chloride	Dyestuffs, pharmaceuticals, organic preparations
Alachlor (Lasso)	<u>Herbicides</u>
Aldicarb (sulfoxide and sulfone; Temik)	<u>Insecticide</u> , <u>nematocide</u>
Aldrin	<u>Insecticides</u>
Atrazine	<u>Herbicides</u> , <u>plant growth regulator</u> , weed-control agent
Benzoyl chloride	Medicine, intermediate
Bromacil	<u>Herbicides</u>
Bromobenzene	<u>Solvent</u> , motor oils, organic synthesis
Bromochloromethane	Fire extinguishers, organic synthesis
Bromodichloromethane	<u>Solvent</u> , fire extinguisher fluid, mineral and salt separations
Bromoform	<u>Solvent</u> , intermediate
Carbofuran	<u>Insecticide</u> , <u>nematocide</u>
Carbon tetrachloride	Degreasers, refrigerants and propellants, <u>fumigants</u> , chemical manufacturing
Chlordane	<u>Insecticides</u> , oil emulsions
Chlorobenzene	<u>Solvent</u> , <u>pesticides</u> , chemical manufacturing
Chloroform	Plastics, <u>fumigants</u> , <u>insecticides</u> , refrigerants and propellants



Contaminant	Examples of uses
<b>Hydrocarbons with specific elements</b>	
(cont'd)	
1,2-Dichloropropane	<u>Solvent</u> , intermediate, scouring compounds, <u>fumigant</u> , <u>nematocide</u> , additive for antiknock fluids
Dicyclopentadiene (DCPD)	<u>Insecticide manufacture</u>
Dieldrin	<u>Insecticides</u>
Diiodomethane	Organic synthesis
Diisopropylmethyl phosphonate (DIMP)	Nerve gas manufacture
Dimethyl disulfide	NA
Dimethylformamide	<u>Solvent</u> , organic synthesis
2,4-Dinitrophenol (Dinoseb, DNBP)	<u>Herbicides</u>
Dithiane	Mustard gas manufacture
Dioxins (e.g., TCDD)	Impurity in the herbicide 2,4,5-T
Dodecyl mercaptan (lauryl mercaptan)	Manufacture of synthetic rubber and plastics, pharmaceuticals, <u>insecticides</u> , <u>fungicides</u>
Endosulfan	<u>Insecticides</u>
Endrin	<u>Insecticides</u>
Ethyl chloride	Chemical manufacturing, anesthetic, <u>solvent</u> , refrigerants, <u>insecticides</u>
Bis-2-ethylhexylphthalate	Plastics
Di-2-ethylhexylphthalate	Plasticizers
Fluorobenzene	<u>Insecticide</u> and <u>larvicide intermediate</u>
Fluoroform	Refrigerants, intermediate, blowing agent for foams
Heptachlor	<u>Insecticides</u>
Heptachlorepoxyde	Degradation product of heptachlor, also acts as an insecticide
hexachlorobicycloheptadiene	NA
Hexachlorobutadiene	<u>Solvent</u> , transformer and hydraulic fluid, heat-transfer liquid
$\alpha$ -Hexachlorocyclohexane	<u>Insecticides</u>
(= Benzenehexachloride, or $\alpha$ -BHC)	
$\beta$ -Hexachlorocyclohexane ( $\beta$ -BHC)	<u>Insecticides</u>
$\gamma$ -Hexachlorocyclohexane ( $\gamma$ -BHC, or Lindane)	<u>Insecticides</u>
Hexachlorocyclopentadiene	Intermediate for resins, <u>dye stuffs</u> , <u>pesticides</u> , <u>fungicides</u> , pharmaceuticals
Hexachloroethane	<u>Solvent</u> , pyrotechnics and smoke devices, explosives, organic synthesis
Hexachloronorbornadiene	NA
isodrin	Intermediate compound in manufacture of Endrin
Kepone	<u>Pesticides</u>
Malathion	<u>Insecticides</u>
Methoxychlor	<u>Insecticides</u>
Methyl bromide	<u>Fumigants</u> , <u>pesticides</u> , organic synthesis
Methyl parathion	<u>Insecticides</u>
Oxathine	Mustard gas manufacture
Parathion	<u>Insecticides</u>
Pentachlorophenol (PCP)	<u>Insecticides</u> , <u>fungicides</u> , <u>bactericides</u> , <u>algicides</u> , <u>herbicides</u> , wood preservative
Phorate (Disulfoton)	<u>Insecticides</u>
polybrominated biphenyls (PBBs)	Flame retardant for plastics, paper, and textiles
Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Heat-exchange and insulating fluids in closed systems
Prometon	<u>Herbicides</u>

Contaminant	Examples of uses
<b>Hydrocarbons with specific elements (cont'd)</b>	
RDX (Cyclonite)	<u>Explosives</u>
Simazine	<u>Herbicides</u>
Tetrachlorobenzene	NA <sup>o</sup>
Tetrachloroethanes (1,1,1,2 and 1,1,2,2)	<u>Degreasers, paint removers, varnishes, lacquers</u> , photographic film, organic synthesis, <u>solvent, insecticides, fumigants, weed killer</u>
Tetrachloroethylene (or perchloroethylene, PCE)	<u>Degreasers, drycleaning, solvent, drying agent</u> , chemical manufacturing, heat-transfer medium, <u>vermifuge</u>
Toxaphene	<u>Insecticides</u>
Triazine	<u>Herbicides</u>
1,2,4-Trichlorobenzene	<u>Solvent, dyestuffs, insecticides</u> , lubricants, heat-transfer medium (e.g., coolant)
Trichloroethanes (1,1,1 and 1,1,2)	<u>Pesticides, degreasers, solvent</u>
1,1,2-Trichloroethylene (TCE)	<u>Degreasers, paints, drycleaning, dyestuffs</u> , textiles, <u>solvent</u> , refrigerant and heat exchange liquid, <u>fumigant</u> , intermediate, aerospace operations
Trichlorofluoromethane (Freon 11)	<u>Solvent</u> , refrigerants, fire extinguishers, intermediate
2,4,6-Trichlorophenol	<u>Fungicides, herbicides, defoliant</u>
2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T)	<u>Herbicides, defoliant</u>
2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid (2,4,5-TP or Silvex)	<u>Herbicides and plant growth regulator</u>
Trichlorotrifluoroethane	<u>Dry-cleaning</u> , fire extinguishers, refrigerants, intermediate, drying agent
Trinitrotoluene (TNT)	Explosives, intermediate in dyestuffs and photographic chemicals
Tris-(2,3-dibromopropyl) phosphate	Flame retardant
Vinyl chloride	Organic synthesis, polyvinyl chloride and copolymers, adhesives
<b>Other hydrocarbons</b>	
Alkyl sulfonates	Detergents
Cyclohexane	Organic synthesis, <u>solvent</u> , oil extraction
1,3,5,7-Cyclooctatetraene	Organic research
Dicyclopentadiene (DCPD)	<u>Intermediate for insecticides</u> , paints and varnishes, flame retardants
2,3-Dimethylhexane	NA
Fuel oil	Fuel, heating
Gasoline	Fuel
Jet fuels	Fuel
Kerosene	Fuel, heating <u>solvent, insecticides</u>
Lignin	Newsprint, ceramic binder, <u>dyestuffs</u> , drilling fuel additive, plastics
Methylene blue activated substances (MBAS)	Dyestuffs, analytical chemistry
Propane	Fuel, <u>solvent</u> , refrigerants, propellants, organic synthesis
Tannin	Chemical manufacturing, tanning, textiles, electroplating, inks, pharmaceuticals, photography, paper
4,6,8-Trimethyl-1-nonene	NA
Undecane	Petroleum research, organic synthesis
<b>Metals and cations</b>	
Aluminum	Alloys, foundry, paints, protective coatings, electrical industry, packaging, building and construction, machinery and equipment
Antimony	Hardening alloys, solders, sheet and pipe, pyrotechnics

Contaminant	Examples of uses
<b>Metals and cations (cont'd)</b>	
Arsenic	<u>Alloys</u> , <u>dyestuffs</u> , medicine, solders, electronic devices, <u>insecticides</u> , <u>rodenticides</u> , <u>herbicide</u> , preservative
Barium	<u>Alloys</u> , lubricant
Beryllium	Structural material in space technology, inertial guidance systems, additive to rocket fuels, moderator and reflector of neutrons in nuclear reactors
Cadmium	<u>Alloys</u> , coatings, batteries, electrical equipment, fire-protection systems, paints, <u>fungicides</u> , photography
Calcium	<u>Alloys</u> , <u>fertilizers</u> , reducing agent
Chromium	<u>Alloys</u> , protective coatings, paints, nuclear and high-temperature research
Cobalt	<u>Alloys</u> , <u>ceramics</u> , drugs, paints, <u>glass</u> , <u>printing</u> , catalyst, electroplating, lamp filaments
Copper	<u>Alloys</u> , paints, electrical wiring, machinery, construction materials, electroplating, piping, <u>insecticides</u>
Iron	<u>Alloys</u> , machinery, magnets
Lead	<u>Alloys</u> , batteries, gasoline additive, sheet and pipe, paints, radiation shielding
Lithium	<u>Alloys</u> , pharmaceuticals, coolant, batteries, solders, propellants
Magnesium	<u>Alloys</u> , batteries, pyrotechnics, precision instruments, optical mirrors
Manganese	<u>Alloys</u> , purifying agent
Mercury	<u>Alloys</u> , electrical apparatus, instruments, <u>fungicides</u> , <u>bactericides</u> , mildew proofing, paper, pharmaceuticals
Molybdenum	<u>Alloys</u> , pigments, lubricant
Nickel	<u>Alloys</u> , ceramics, batteries, electroplating, catalyst
Palladium	<u>Alloys</u> , catalyst, jewelry, protective coatings, electrical equipment
Potassium	<u>Alloys</u> , catalyst
Selenium	<u>Alloys</u> , electronics, ceramics, catalyst
Silver	<u>Alloys</u> , photography, chemical manufacturing, mirrors, electronic equipment, jewelry, equipment, catalyst, pharmaceuticals
Sodium	Chemical manufacturing, catalyst, coolant, nonglare lighting for highways, laboratory reagent
Thallium	<u>Alloys</u> , <u>glass</u> , <u>pesticides</u> , photoelectric applications
Titanium	<u>Alloys</u> , structural materials, abrasives, coatings
Vanadium	<u>Alloys</u> , catalysts, target material for x-rays
Zinc	<u>Alloys</u> , electroplating, electronics, automotive parts, <u>fungicides</u> , roofing, cable wrappings, nutrition
<b>Nonmetals and anions</b>	
Ammonia	<u>Fertilizers</u> , chemical manufacturing, refrigerants, synthetic fibers, fuels, <u>dyestuffs</u>
Boron	<u>Alloys</u> , fibers and filaments, semiconductors, propellants
Chlorides	Chemical manufacturing, water purification, shrink-proofing, flame-retardants, food processing
Cyanides	Polymer production (heavy duty tires), coatings, metallurgy, <u>pesticides</u>
Fluorides	Toothpastes and other dentrifices, additive to drinking water
Nitrates	<u>Fertilizers</u> , food preservatives
Nitrites	<u>Fertilizers</u> , food preservatives

# MECHNISMOS DE TRANSPORTE

- i) ADVECCION
- ii) DISPERSION
- iii) ADVEC. - DISPERS.
- iv) ADVEC. - RETARDO LINEAL (SORPSION)
- v) DISPERSION - RET. LIN.
- vi) ADVEC. - DISP. - RET. LIN.
- vii) i) → vi) - DEC. RAD.
- viii) i) → vii) - REACC. SOLUTO °

EL Retardo Lineal engloba todos los efectos de la interacción del soluto con el medio geológico.

- Absorción, reacciones químicas, reacciones biológicas

**Absorción** // Partición del soluto orgánico entre la fase sólida y líquida.

**Reac. Quim** // Oxidación, hidrólisis, catalisis de halogenación reductiva, sustitución nucleofílica

**Reac. Biol.** // Mec. de biotransf. (metabolismo directo, cometabolismo)

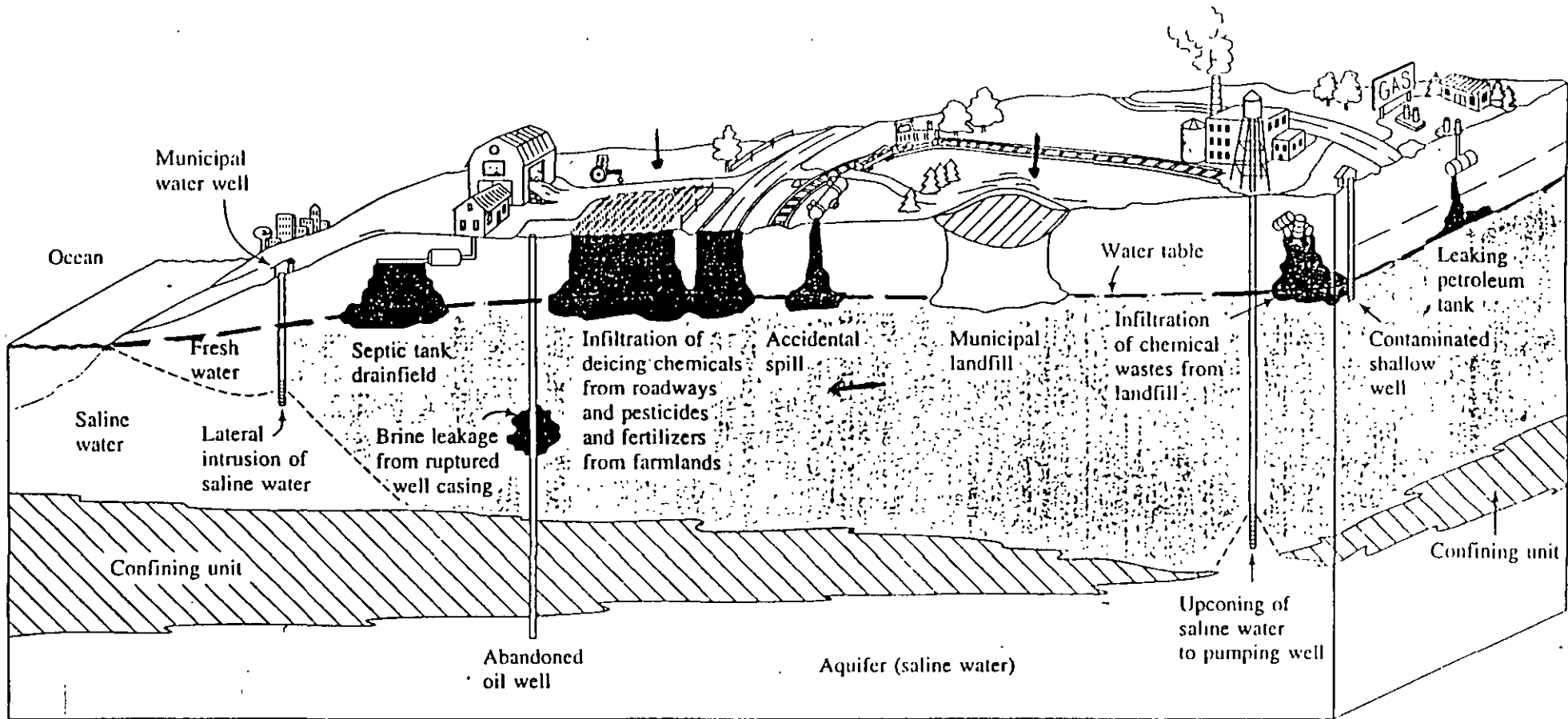


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

# TRANSPORTE DE SOLUTOS EN MEDIOS SATURADOS

## BALANCE DE MASA

$$\text{VARIACION MASA} = S_E - S_S \pm \Delta S$$

$$\text{SI } \Delta S = 0 \quad q = n(c\bar{v})$$

$$\text{SI } \Delta S \neq 0 \quad q = n(c\bar{v} - D\nabla c)$$

donde  $D\nabla c$  se deriva de la Primera Ley de Fick

SI  $C$  CAMBIA CON  $t$  y  $n = \text{Cte.}$

SE APLICA LA SEGUNDA LEY DE FICK  $\Rightarrow$

$$\frac{\partial (nc)}{\partial t} = \nabla q$$

FLUJO UNIDIRECCIONAL

$$q = n [c\bar{v} - D \partial c / \partial x]$$

y

$$\frac{\partial (nc)}{\partial t} = \partial q / \partial x \quad \Rightarrow \quad \text{SI } n = \text{Cte}$$

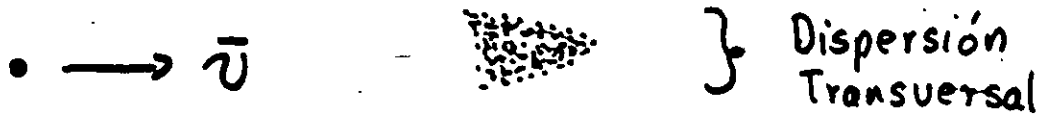
$$n \frac{\partial c}{\partial t} = n\bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} + nc \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - n \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial D}{\partial x} - nD \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$\text{SI } \bar{v} \text{ y } D = \text{Cte} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

# ADVECCION

# DISPERSION



Dispersion Longitudinal

$$D_{LON} \geq D_{TRANS}$$

$$D_L = \sigma_L^2 / 2t$$

$$D_T = \sigma_T^2 / 2t$$

$\sigma_L^2$  = extensión lateral pluma

$\sigma_T^2$  = extensión transversal de la pluma

NUMERO PECKET  $N_p$

CONTRIBUCION DE DISPERSION MECANICA Y DIFUSION

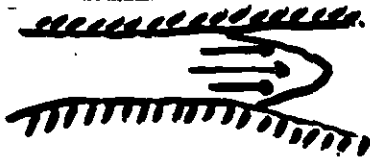
$$N_p = v \times d / D_d = v \times d / D_c$$

$d$  = diametro grano promedio

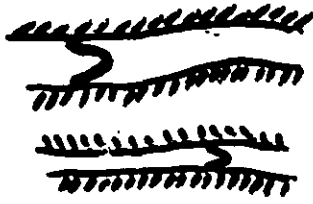
# MECANISMOS DE DISPERSION

Escaia Microscópica / Escaia Macroscópica

Difusión Molecular    Dispersion Mecánica



Perfil Velocidad



Diferentes dimens. poros



Ramificación Canales.



La dispersion mecánica puede ser representada como un proceso fickiano operando a escaia macro.

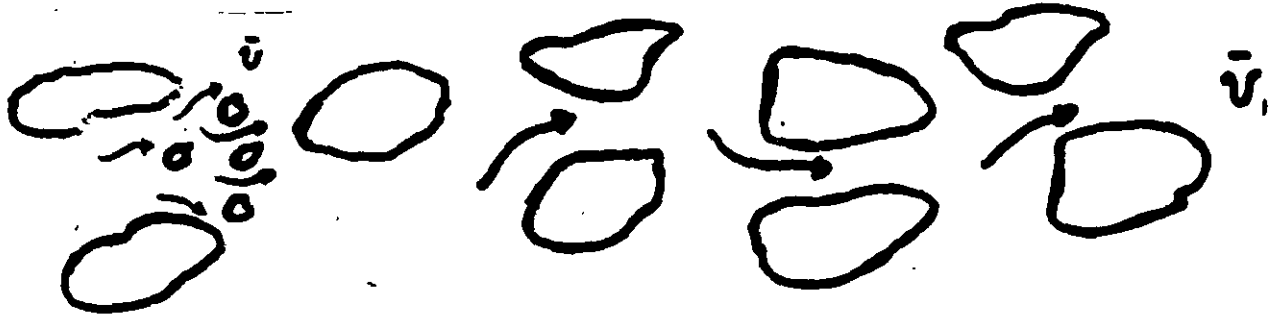
En la difusión fickiana  
es proporcional  
la difusión del flujo de soluto  
al gradiente de la concentración

$$J_d \sim \nabla c$$

$$J_d = -D_d \frac{\partial c}{\partial x}$$



# FACTOR DE ESCALA



Dispersión a pequeña escala

Dispersión a gran escala

$$D = D_m + D_e$$

Coef. Disp Mec.

Coef. Dif. Mol.

$$D_m = \alpha \bar{u}$$

dispersividad

$$D_e = D_0 \tau$$

Coef. Dif. libre

Relacionada Tortuosidad Medio Poroso

$\alpha$   $d(x)$  ?  
 $\alpha$   $\alpha(t)$  ?  
 $\alpha$   $d(x,t)$  ?

$$\tau \sim d^* \text{ ó } (d/d^*)^2 \text{ ó } d^*/d$$

$$\tau < 1$$

$$D_0 = D_0^t (1 + S/nK_d)^{-1}$$

Coef. Dif. Efectivo

Coef. Distrib.

$$K_d = K_s / K_f$$

función de distribución

# ZONA NO SATURADA

## RETENCION DE HUMEDAD

### i) Adsorción

En Mat. grano fino:  
mayor densidad carga  
mayor area especf.



Molecula de Agua  
(Orientada)

Rango de interacción 100 Å

### ii) Retención Capilar



Aire a dif. presiones  
dif. efecto capilar

Contenido de agua  $\theta$  a presión  $\psi$  con  $h = \psi + z$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} = M(\theta)$$

Capacidad de humedad especifica

Ecuación de flujo

$$M(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot K(\theta) \nabla h$$

Ec. dif. parc. no-lin. 2º orden

$$M, K = f(\theta)$$

$$M, K(\bar{x}, t) ?$$

# TRANSFORMACION, RETARDACION Y ATENUACION DE SOLUTOS

INTERACCION SOLUTO AGUA SUBTERRANEA MATRIZ POROS:

RETARDACION

$$\bar{v}_s < \bar{v}_a$$

ROCA - SOLUTO

ADSORCION, SORPSION QUIMICA, ABSORCION  
INTERCAMBIO IONICO



PARTICION

DISTRIB. SOLUTO Y FLUJO Y ROCA

# EC. TRANSPORTE

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{v}_x \frac{\partial c}{\partial x}$$

ec. dif. parcial lineal hiperb. hom. 1. 2 var. indep.

- ADV -

\* Medio incompresible, flujo estacionario no disp., no absorc., ...

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$c = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x - \bar{v}t}{(4Dt)^{1/2}} \right\}$$

- DISP -

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{v}_x \frac{\partial c}{\partial x}$$

ADV-DISP

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{v}_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{S}{n} K_f \frac{\partial c}{\partial t}$$

ADV-DISP RET. LIN.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{S}{n} K_d \frac{\partial c}{\partial t} - \lambda c - \frac{S}{n} K_d \lambda c$$

ADV-DISP RET. LIN. DEC. RAD. REACC.

$$R = 1 + \frac{S}{n} K_d \quad \text{Coef. de Retardación}$$

$K_d$ : Coef. Distribución

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\bar{v}}{R} \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda c$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{S}{n} \frac{\partial S}{\partial t}$$

$\frac{\partial S}{\partial t}$  ~ veloc. absorci.

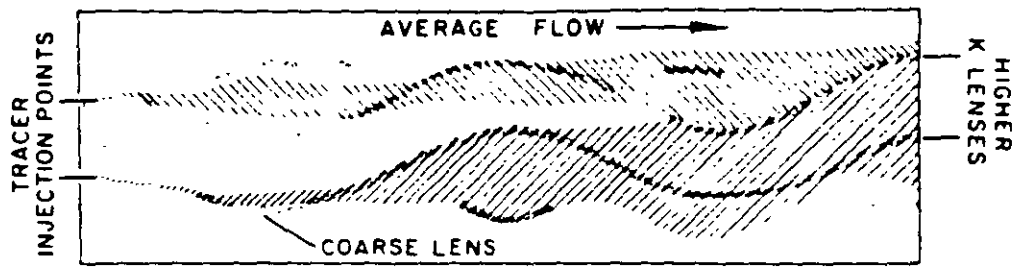


Fig. 6. Macroscopic dispersion as represented in a laboratory experiment (adapted from Skibitzkie and Robinson, 1963) "Higher K lenses" refers to lenses of high hydraulic conductivity

## Dispersión Macroscópica

### Dispersión - difusión medio doble porosidad

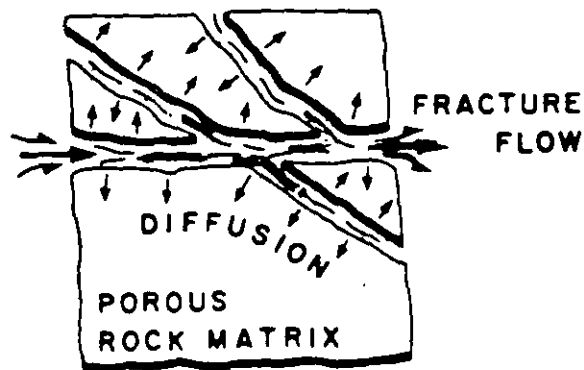
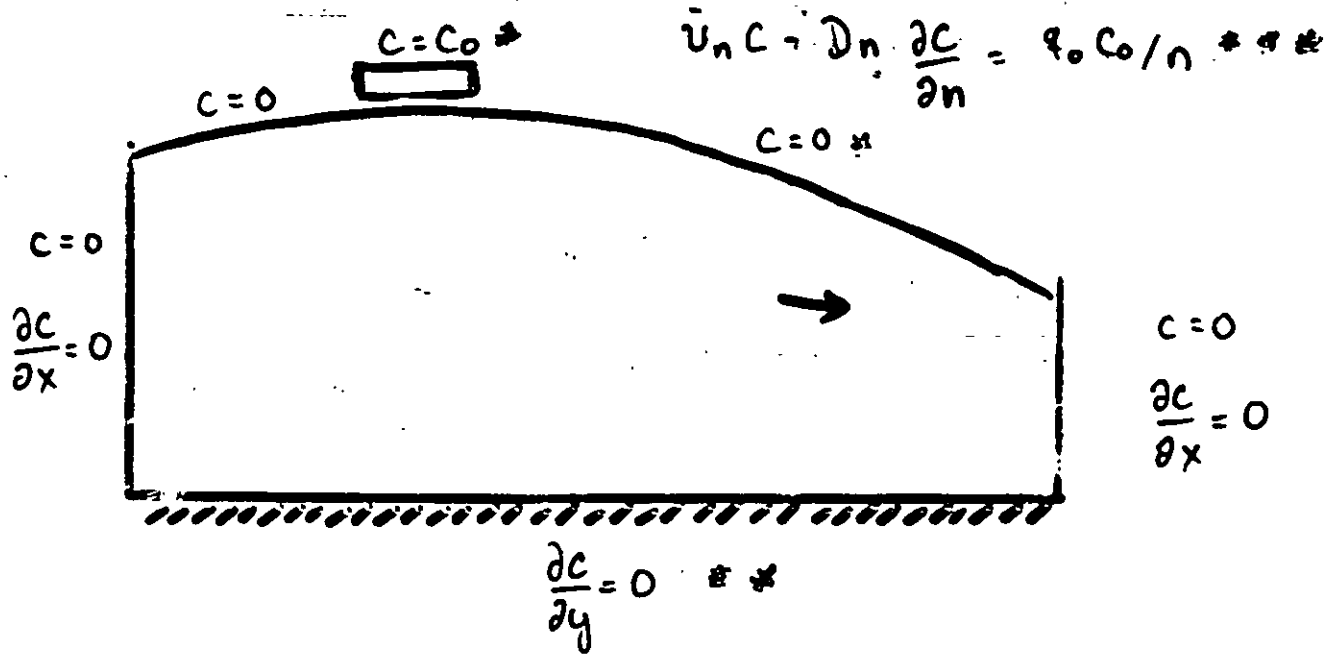
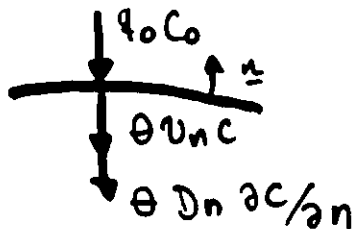


FIGURE 25 Schematic diagram representing flow through fractures and diffusion of contaminants from fractures into the rock matrix of a dual porosity medium

# Condiciones frontera



- \* Primer tipo (concentración conocida)
- \* \* Segundo tipo ( $q_0 = v_n = 0$ ) (Gradiente conocido)
- \* \* \* tercer tipo (flujo soluto conocido)



$$\begin{aligned}
 c(0, t) &= c_0 & t &\geq 0 \\
 c(x, 0) &= 0 & x &\geq 0 \\
 c(\infty, t) &= 0 & t &\geq 0
 \end{aligned}$$

# Soluciones

## Advección - Dispersión

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (C(x=0) = C_0)$$

$$C = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left( \frac{\bar{v}x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$



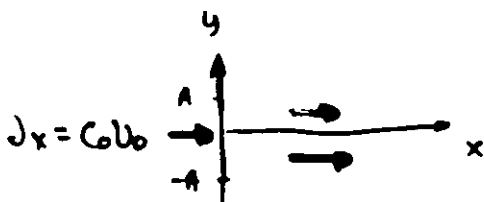
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_t \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

Caso no-estac.

$$C(x, y, t) = C_0 \frac{\bar{v}}{4\sqrt{\pi D_L}} \int_{t=0}^t \frac{1}{\sqrt{t}} \exp \left[ -\frac{(x - \bar{v}t)^2}{4D_L t} \right] \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{A+y}{2\sqrt{D_t t}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{A-y}{2\sqrt{D_t t}} \right) \right] dt$$

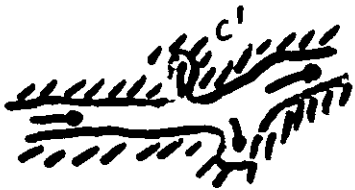
Caso estacionario

$$C(x, y) = C_0 \frac{\bar{v}}{2\pi \sqrt{D_L D_t}} \exp \left( \frac{\bar{v}x}{2D_L} \right) \int_{-A}^A \kappa_0 \omega(z) dz$$



# ADVECCION - DISPERSION

(MEDIOS NO-HOMOG. NO-ISOT.)

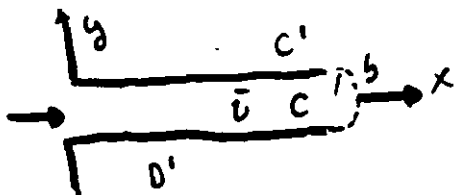


Difusión en zonas de estancamiento produce efectos de "capacitancia"

$$f \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - (1-f) \frac{\partial c'}{\partial t}$$

con  $(1-f) \frac{\partial c'}{\partial t} = D_c (c - c')$

$c'(x, t)$  ?  
 $f(c, n)$  ?



Difusión en matriz porosa-fracturada

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{q}{b}$$

$D'$  dif. matriz

con  $q = -D_e \frac{\partial c'}{\partial y}$

$b$  constante ?  
 $c'(c)$  ?

- \* Dispersión longitudinal tiende a ser no-gausiana
- \* Efecto de capacitancia produce mayor dispersión longitudinal

transp. matriz

$$\frac{D'}{R'} \frac{\partial^2 c'}{\partial y^2} = \frac{\partial c'}{\partial t}$$

con  $R' = 1 + \frac{S_{km}}{n}$  Coef. Ret. matriz

$$q^* = -n D' \frac{\partial^2 c'}{\partial y^2} \Big|_{y=b}$$

flujo difusivo en la interfase

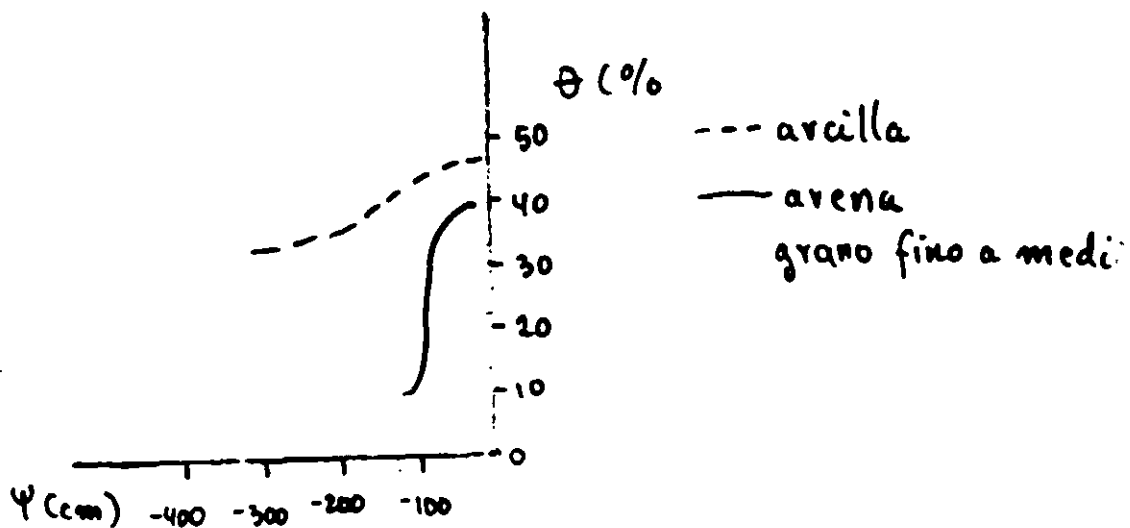


# TRANSP. ZONA NO-SATURADA.

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \theta D \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{v} n \frac{\partial C}{\partial x}$$

$\theta, \bar{v}(\bar{x}, t)$  ?

$\theta(C, t)$  ?



Término advectivo puede ser eliminado  $\Rightarrow$  dispersión predominante dif. Molecular.

De puede ser 1-2 ordenes de magnitud menor que en la zona saturada

$D_e = 1-2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  algunos iones

## POSIBLES AFECTACIONES A LA SALUD POR INGESTA DE AGUA CON METALES

Al	<b>ALUMINIO</b>	Cambios en la absorción de fosfatos en el tracto gastrointestinal
Sb	<b>ANTIMONIO</b>	Incrementa colesterol, decese glucosa, mutageno (?)
As	<b>ARSENICO</b>	Cancer dermal, hepático, renal, discromias, queratosis, polineuritis
Be	<b>BERILIO</b>	Disminución peso corporal, carcinogénico
Cd	<b>CADMIO</b>	Disfunciones renales, enfermedad Itai-itai {osteoporosis}
Cu	<b>COBRE</b>	Vomito, diarrea
Cr	<b>CROMO</b>	Cancer estomacal, irritación tracto gastrointestinal
Fe	<b>FIERRO</b>	Artritis reumatoide {incrementa daños}
Mg	<b>MAGNESIO</b>	Somnolencia, hipotonia, disminu. presión
Hg	<b>MERCURIO</b>	Disturbios emocionales y psicológicos. Neuralgia, dermatografismo, fatiga
Mo	<b>MOLIBDENO</b>	Molibnedosis { diarrea, anorexia, disturbios neurologicos }
Ni	<b>NIQUEL</b>	Cambios en el peso de organos, dermatitis en manos.
Pb	<b>PLOMO</b>	Neuropatía periférica, encefalopatía
Se	<b>SELENIO</b>	Selenosis [ caída de pelo y uñas ] disfunción hepática
Tl	<b>TALIO</b>	Decese glucosa, afectación sistema nervioso central
V	<b>VANADIO</b>	Inhibe síntesis colesterol

Modificado de Merian, 1991

## POSIBLES AFECTACIONES A LA SALUD POR INGESTA DE AGUA CON COMPUESTOS ORGANICOS

Atrazine	Incremento peso corazón e hígado
Bromodichlorometano	Carcinoma hepático
Benceno	Leucemia
Cloroformo	Tumores en los riñones
1,1-Dicloroetano 1,1-DCA	Perdida de peso corporal
1,1-Dicloroetileno 1,1-DCE	Degeneración hepatocelular
1,2 Dicloropropano 1,2-DCP	Carcinoma hepático
1,4-Diclorobenceno 1,4-DCB	Carcinoma hepatocelular
Endrin	Incremento peso del hígado
Etilbenceno	Incremento peso hígado riñones
Heptacloro	Carcinoma hepático
Hexaclorobenceno	Carcinoma hepático
Lindano	Carcinoma hepático
Monoclorobenceno	Nodulos neoplásticos hepáticos
1,1,1-Tricloroetano -TCA	Mortalidad fetal
1,2,4-Triclorobenceno -TCB	Incremento peso gland. suprarrenal
Tetracloroetano	Cambios en el cont. grasa hígado
Tolueno	Neurotoxicidad
Triclorofluorometano	Incremento de N en urea
Triclorotrifluoroetano	Incremento en peso hepático
Cloruro de vinilo	Carcinoma hepático
Xileno	Perdida peso corporal

Modificado de Wang R., 1994

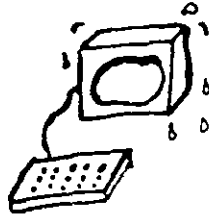
**Potencial de migración en el agua subterránea de contaminantes orgánicos.**

<b>Compuesto</b>	<b>Mobilidad Potencial</b>	<b>Potencial de Migración</b>
Tricloroetano	59.4	4470
Tetracloroetano	47.6	4104
Triclorometano	71.5	3208
1,4-Diclorobenceno	35.2	2659
1,3-Diclorobenceno	42.6	2571
1,2-Diclorobenceno	39.4	1875
Benceno	62.6	1046
Clorobenceno	50.7	1023
Etilbenceno	45.9	539
Trans-1,2-Dicloroetano	61.3	328
Diclorometano	78.5	78
Tetraclorometano	59.7	57

Modificado de Lesage S., 1992

# PROTOCOLO HIDROGEOQUIMICO.

OK!



MODELACION

HIPOTESIS !!??



CORRELACION  
GEOLOGICA  
HIDROGEOLOGICA

CRITERIOS !?

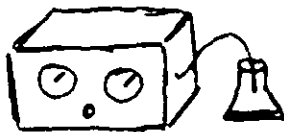


INTERPRETACION  
QUIMICA  
HIDROGEOLOGICA  
HIDROGEOQUIMICA

CONCENTRACIONES



RESOLUCION



ANALISIS  
INORGANICO  
BACTERIOLOGICO  
ORGANICO

REACC. QUIMICAS



ALMACENAMIENTO  
CAPAC. LAB.



MANEJO Y TRANSPORTE  
MUESTRAS.  
ENVASES VS REAC. QUIM.

REPRESENTATIVIDAD



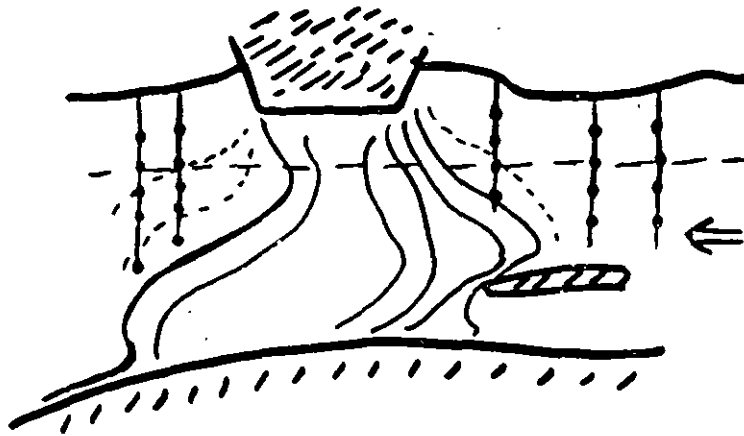
DETERM. IN SITU  
TECNICAS EXTRACCION

PLAN. MONITOREO



SEL. PUNTOS OBSERVACION

# SISTEMAS MONITOREO



QUE DESEAMOS  
MEDIR

QUE PODEMOS  
MEDIR

## QUE MEDIMOS

### COMO MEDIMOS

ACERO INOXID.  
PVC RIGIDO  
FIBRA VIDRIO IMPREGN CON EPOXY  
POLIINLIDENO PF  
POLITETRAFLUOROETILENO PTFE  
POLIETILENO FLEXIBLE  
POLIVINIL PVC FLEXIBLE

CO\$TO

QUIEN PAGA ?

QUIEN EJECUTA ?

A QUIEN BENEFICIA ! ?

TIEMPO

CUANDO ?

DONDE ?

YA PARA QUE !

IMPACTO

ECOLOGICO

SOCIAL

ECONOMICO

INVESTIGACION

IMPLEMENTACION ?

O SIN PAPER'S !

APOYO ECONOM. - ACABEI

# FUENTES POTENCIALES CONTAMINACION

INVENTARIO

LOCALIZACION

GEOLOGIA

SISTEMAS ACUIFEROS

PARAMETRIZACION

ENTORNO SOCIAL

ELEMENTOS POLVANTES

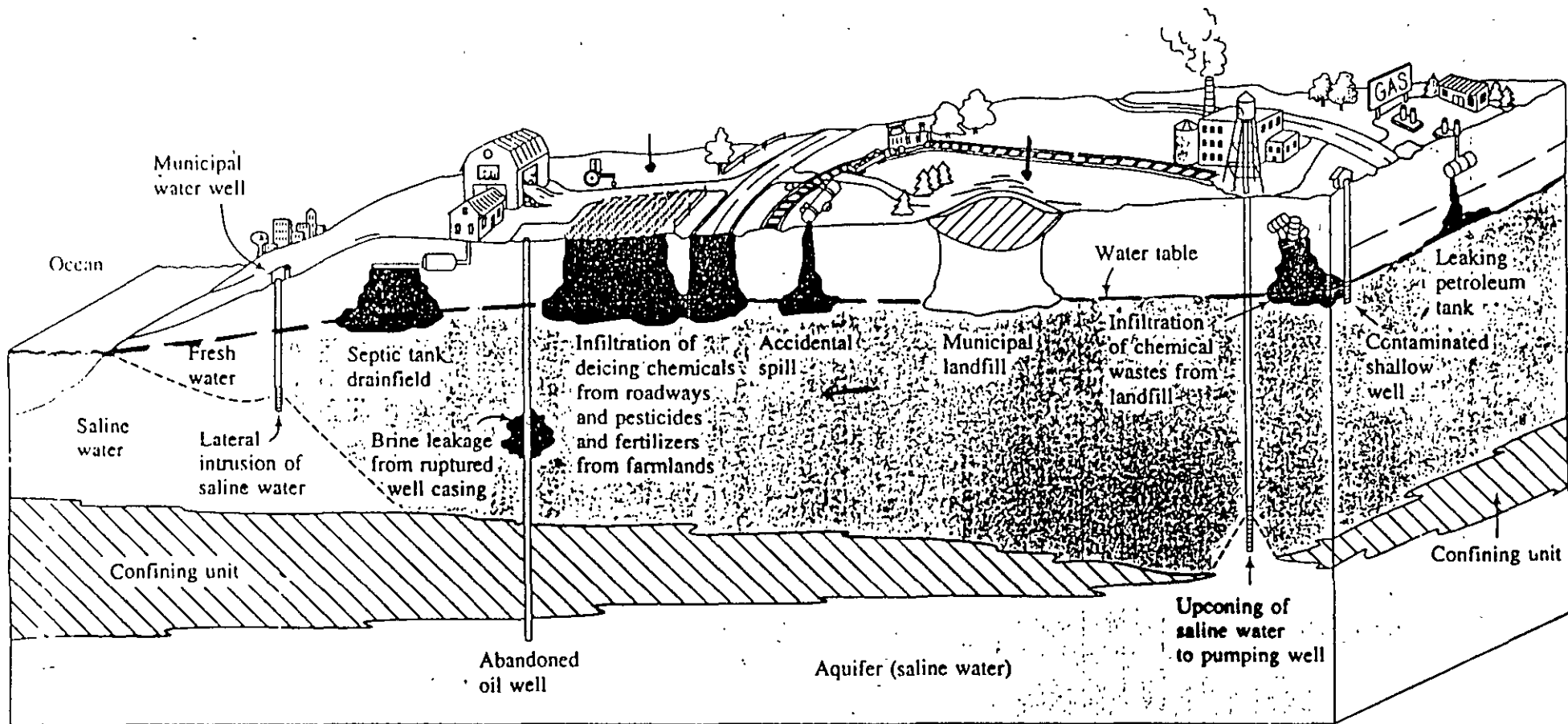
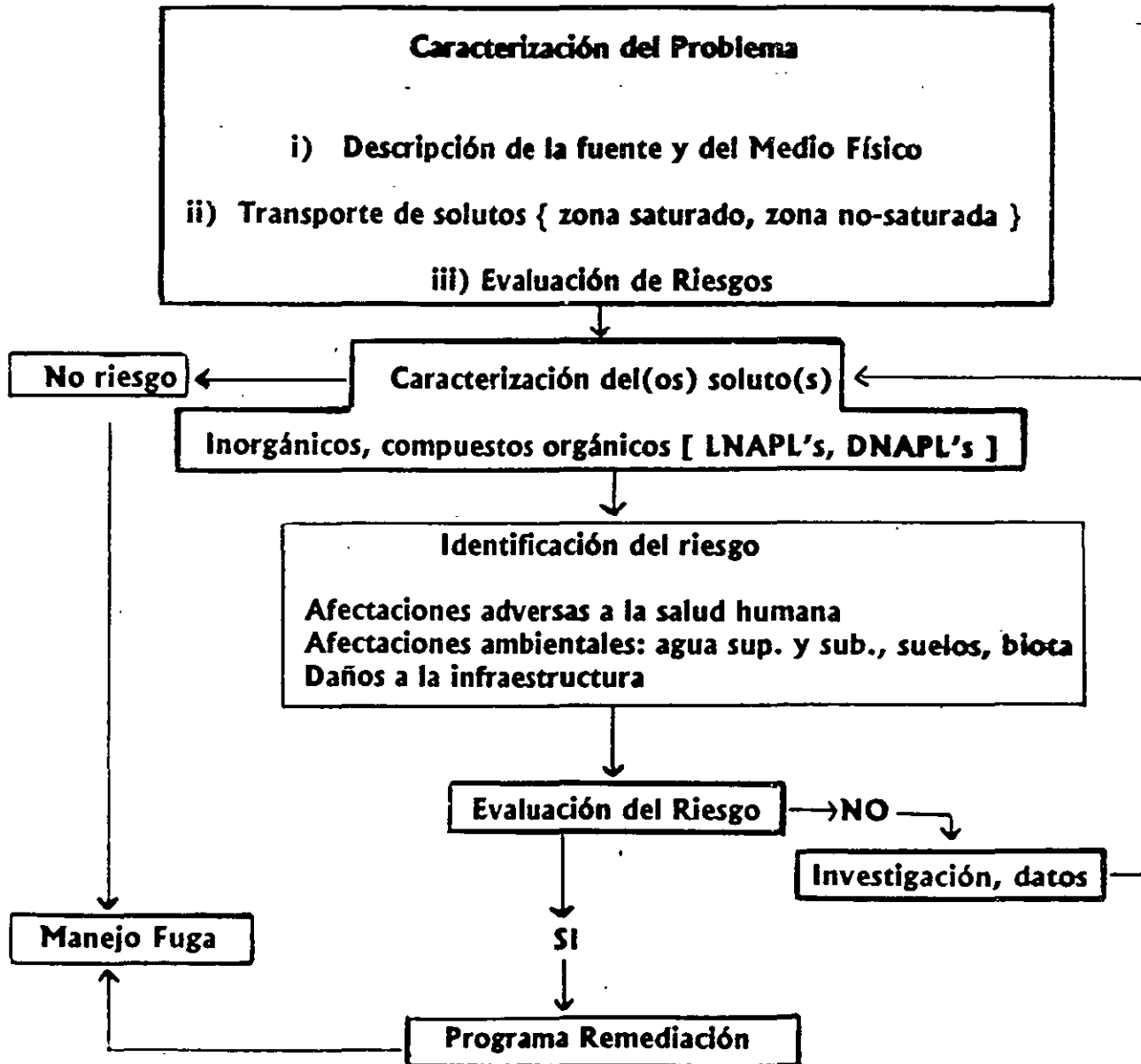


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.



# FUGAS DE CONTENEDORES



## Contaminación de Sistemas Acuíferos.

Rodríguez-Castillo Ramiro  
Depto. de Recursos Naturales  
Instituto de Geofísica UNAM.

Los sistemas acuíferos son susceptibles de ser contaminados por fuentes poluan-  
tes localizadas en la superficie. Estas dan origen a infiltraciones que alcanzan los -  
niveles de saturación y migran a través del medio permeable dando lugar a nubes o  
plumas contaminantes. La naturaleza de los lixiviados determina su poder contami-  
nante.

El estudio de estos procesos puede hacerse desde varios enfoques académicos.  
El más común es el geohidrológico que engloba los aspectos geológicos e hidrodiná-  
micos, tanto del flujo como del soluto . La modelación matemática y computacional  
comprende tópicos relacionados con el flujo y transporte de los contaminantes, efec-  
tuando predicciones sobre su evolución espacial y temporal ante diversas alternativas.  
En la Hidrogeoquímica se analiza el comportamiento químico del soluto y su relación  
con el medio que circula. Existen métodos de prospección geofísica enfocadas al mo-  
nitoreo superficial de la extensión lateral de la pluma contaminante. La Isotopia Hi-  
drológica proporciona información sobre el origen del flujo su permanencia y circu-  
lación en el acuífero. El sector salud estudia los efectos nocivos de los poluentes ,  
su sintomatología, cuadros clínicos y las relaciones causa-efecto.

Incluso desde el punto de vista jurídico también se pueden llevar a cabo investigaciones sobre normatividad y su implementación legal.

Como puede apreciarse una investigación de este tipo es eminentemente interdisciplinaria y requiere de un colectivo científico tan amplio como los objetivos del estudio a realizarse.

## FUENTES DE CONTAMINACION

Por contaminación o polución del agua debe entenderse la alteración degradación de su estado y composición natural al incorporarse un elemento, material, sustancia, compuesto que en su conjunto se le puede dar el nombre de soluto, así como toda fuente de energía térmica, radiaciones ionizantes que degradan su calidad natural, perjudicando o alterando con ésto, de alguna manera, toda forma de vida.

El proceso de contaminación se lleva a cabo de dos maneras fundamentales:

1) Por la acción del hombre consciente o inconscientemente, debido a una mala planeación económica y técnica, a la incapacidad y falta de cooperación por parte de las autoridades, lo que se ha dado por denominar contaminación antropógena.

2) Por la acción de la naturaleza, proceso al que se ha adoptado llamar alteración natural de la calidad, más que contaminación.

Trataremos aquí los tipos de contaminación antropógena y sus aspectos más relevantes, relacionados con sus fuentes y sus componentes más importantes.

### Contaminación Urbana. -

La alteración de la calidad del agua ocasionada por la actividad urbana es debida a la mala distribución y/o evacuación de los desechos producidos por la población. Existen dos formas principales de desechos o residuos urbanos:

a) Desechos sólidos. - Son aquellos restos orgánicos e inorgánicos que se generan en casas habitación, parques, jardines, vía pública, oficinas, mercados, comercios, construcciones, establecimientos de servicios e inclusive desechos peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación. La característica más notable de los residuos sólidos urbanos es su diversidad el cual es un problema de facetas múltiples.

Algunos ejemplos de desechos sólidos son:

- |                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| - algodón                  | - papel                  |
| - cartón                   | - pañal desechable       |
| - cenizas                  | - plástico de película   |
| - cuero                    | - plástico rígido        |
| - cartón encerado          | - poliuretano            |
| - fibra dura vegetal       | - poliestireno expandido |
| - fibras sintéticas        | - residuos de jardinería |
| - hueso                    | - residuos alimenticios  |
| - hulé                     | - trapos                 |
| - latas                    | - vidrios                |
| - loza y cerámica          | - residuos voluminosos   |
| - madera                   | autos, muebles, etc.)    |
| - material de construcción | - residuos de mercado    |

Es importante señalar que, cuando se depositan los desechos sólidos en un terreno sin haber sido planeado de acuerdo a las normas internacionales de sanidad, -lo que en nuestro medio es lo más común, denominándose tiraderos, basureros, depósitos a cielo abierto.- al llover la precipitación se incorpora a la basura, contribuyendo a acelerar los procesos de degradación, formando un residuo líquido con gran cantidad de sólidos en suspensión (lixiviado) el cual junto con los líquidos que se derivan de los desechos mismos, puede infiltrarse e incorporarse a un acuífero de dos maneras según el tipo de terreno: si es fisurado o con grietas el lixiviado llega rápido al agua subterránea y con todo su poder contaminante íntegro; cuando el terreno es poroso, tarda en llegar al acuífero o no llega por ser retenido y/o absorbido sufriendo parte del lixiviado modificaciones en su composición, influyendo en el acuífero en menor medida.

b) Aguas residuales. - Son aquellas producidas por labores domésticas como lavado, eliminación de excretas, pozos, fosas sépticas mal planeadas; por servicios como lavado de calles, escurrería urbana, alcantarillado y drenajes en malas condiciones; o por comerciales e industriales (que pueden ser lo más contaminantes por su variado contenido de compuestos orgánicos sintéticos. Se incorporan en este rubro las aguas "negras" de producción urbana que incluyen a la mayoría de las aguas residuales citadas.

Otra fuente posible de contaminación urbana, sobre todo bacteriológica y viral, son los cementerios al no tenerse conocimiento del tipo de terreno así como por mala planeación, diseño y construcción de éstos.

#### Contaminación Agrícola. -

A muy largo plazo esta contaminación es importante ya que abarca grandes zonas, al introducir al terreno cantidades considerables de abonos sintéticos y pesticidas de manera repetida en varias ocasiones al año dependiendo del tipo de producción agrícola. Las fuentes principales de contaminación agrícola son:

a) Los abonos sintéticos, los cuáles son compuestos químicos con alto contenido de elementos contaminantes como son:

Nitrógeno.- En forma de nitratos que afectan la salud y particularmente la de los lactantes. La cantidad de nitrato en el agua que se percola hacia el acuífero depende, entre otros factores de

- necesidad real del cultivo en el cual se aplica un cierto tipo de fertilizantes, su composición química, cantidad y frecuencia de aplicación,
- la cantidad de nitrógeno que el suelo ya contiene características del terreno, así como el sistema hidrológico local.

Fósforo.- El cual permanece retenido en el suelo.

Potasio.- Cuando se trata de pequeños porcentajes no es

dañino.

Existen factores importantes que influyen durante la infiltración de fertilizantes hacia las aguas subterráneas:

- cantidades excesivas de abono, que las plantas no aprovechan
- el uso de fertilizantes equivocados al tipo de planta clima;
- la precipitación e irrigación, que favorecen la infiltración y
- bajas temperaturas.

b) Los pesticidas.- Son productos tales como fungicidas, herbicidas, insecticidas, fumigantes y rodenticidas, o sea, compuestos químicos orgánicos sintéticos, altamente tóxicos y de uso común.

Los métodos de aplicación no controlados en el campo y la eliminación de envases son los factores más importantes que intervienen en la contaminación de aguas subterráneas. Estos pesticidas se aplican en forma líquida (atomizados) y sólidos (polvo o gránulos), alcanzando éstos con el agua de lluvia los niveles freáticos en terrenos permeables.

c) Contaminaciones puntuales.- Este tipo de contaminación es debida al almacenamiento de fertilizantes orgánicos naturales (estiércol) e inorgánicos, exceso de excrementos de ganado en establos y fosas sépticas.

#### Contaminación Industrial.-

Toda industria en el proceso de transformación de los recursos naturales desecha una gran variedad de sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas en estados sólido, líquido y graseoso que forma parte de los recursos o que se incorporan en alguna parte del proceso, los cuáles actúan como contaminantes de aguas subterráneas al infiltrarse en el terreno donde éstas se depositan.

La actividad industrial origina gran diversidad de productos de desechos que si son líquidos se descargan en aguas corrientes y si son sólidos se depositan en basureros industriales, los cuáles no siempre son diseñados ni supervisados, pudiendose originar lixiviados con alto grado de toxicidad. Se sabe que algunos son dañinos para el hombre, en tanto que los efectos de otros son mínimos y/o desconocidos. Algunos desechos industriales son compuestos orgánicos que pueden ser degradados por las bacterias, pero muy lentamente, de modo que llevan olores y sabores desagradables a lo largo de las corrientes de agua y hasta distancias considerables; por ejemplo, el desagüe doméstico contiene cantidades significativas de sustancias no biodegradables de origen desconocido y que algunas de éstas reaccionan con el cloro, que se utiliza para desinfectar el agua. Estos compuestos orgánicos clorinados son de graves consecuencias ya que pueden actuar como agentes cancerígenos. Los metales se

corroen (se oxidan) en el agua, y los productos disueltos o suspendidos de la oxidación se convierten en contaminantes. El plomo es uno de los venenos industriales más importantes transportados por el agua, su fuente principal la ha constituido siempre la tubería de plomo utilizada en las redes de suministro de agua. El plomo y arsénico fluyen a través de minerales que los contienen y dan lugar a venenos acumulativos. Los compuestos de otros metales como cobre, cadmio, plata y cromo son contaminantes industriales del agua, siendo este último el mejor indicador de contaminación industrial. Debido sobre todo a la alta concentración de metales pesados, las sustancias inorgánicas pueden llegar a ser tóxicas. Las sustancias orgánicas sintéticas tienen un grado de toxicidad variable y sus constituyentes presentan por lo regular alta resistencia a la degradación (fenoles, detergentes, grasas, insecticidas, etc.). Habría que tomar en cuenta que se han clasificado más de 6,000,000 de compuestos orgánicos, 40,000 de los cuales son generados de manera constante en diversos procesos industriales. Las sustancias orgánicas naturales son tóxicas en bajo grado pero pueden ser contaminantes portadores de virus y bacterias.

Las fuentes principales de contaminación industrial son:

- a) Aguas residuales vertidas sin control ni tratamiento en cauces, en pozos de inyección, depósitos de aguas tratadas o en cualquier tipo de terreno. Por lo general su contenido es rico en grasas, aceites y otros derivados del petróleo.
- b) Aguas con tratamiento insuficiente y usadas en agricultura o incorporadas a la red hidrológica local.
- c) Residuos sólidos o líquidos que son vertidos en terrenos permeables con un poder depurador natural insuficiente (Hidrocarburos, salmuera).
- d) Almacenamiento de materias primas líquidas o sólidas.
- e) Accidentes en el transporte de sustancias contaminantes, especialmente las tóxicas.
- f) Las fugas de tanques de almacenamiento y conducciones de tubería en un período de tiempo considerable.
- g) Desperdicios mineros. -

Es una contaminación netamente mineral que se relaciona con evacuaciones de aguas de mina y con lavaderos de mineral, por lavado de escombreras por el agua de lluvia o aguas de superficie, en especial aquellas escombreras que contienen materiales oxidables, tales como sulfuros y materias carbonosas. La acumulación de los residuos mineros recibe la denominación de "hales". En el procesamiento de sales solubles como en la fabricación de la potasa, se pueden tener vertidos muy importantes de salmueras. En la minería del petróleo se obtienen cantidades considerables de aguas de salinidad elevada que son también una importantes fuente de

contaminación mineral de aguas subterráneas. Algunas veces puede existir una contaminación orgánica derivada del vertido de aceites de flotación degradados o de productos relacionados con el petróleo.

Existen métodos de explotación minera que con determinantes en los procesos de contaminación y que a continuación se citan:

i) El sistema de explotación con hundimientos controlados, pueden ocasionar la conexión de acuíferos situados al techo, o provocar accesos de aguas superficiales a través de las subsidencias, con los posibles aportes de mala calidad.

ii) La explotación a cielo abierto es un camino directo a la entrada de aguas contaminantes desde el exterior o a través de la acción antrópica desarrollada en la explotación.

iii) La explotación con relleno supone la introducción de materiales contaminantes y rocas solubles con aportes también contaminantes a las aguas, a través de la fácil comunicación que constituyen los huecos mineros.

iv) La explotación por disolución de minerales solubles en agua, tales como la sal común, potasa, bórax, fosfatos y natrón, se realiza mediante inyección de agua en el yacimiento, a través de pozos y sondeos con la posterior extracción de agua. El recorrido del agua puede alterar la calidad del acuífero, por tratarse de productos altamente contaminantes.

v) En muchos casos también hay que tener presente la utilización de los huecos formados en profundidad, para el almacenamiento de gas licuado, gas natural u otros hidrocarburos, así como los residuos radiactivos, que su vez pueden ser fuente de contaminación.

Estos procesos de explotación a menudo requieren eliminar importantes cantidades de salmueras, que hay que considerar como fuentes contaminantes de primera magnitud. Además, éstos métodos no sólo plantean el problema temporal de la contaminación, sino que dejan latente unas condiciones muy favorables para que ésta continúe.

Las sustancias contaminantes aportadas por las fuentes anteriores sufren un proceso de autodepuración cuando se infiltra por la zona no saturada y dependiendo de su espesor y del tipo de terreno será el grado de depuración.

Diversidad de desechos sólidos industriales:

- |                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| - Desechos de acetileno     | - Desechos de la manufactura de |
| - Desechos agrícolas        | de alimentos.                   |
| - Aluminio                  | - Residuos de productos         |
| - Antimonio                 | animales                        |
| - Ceniza, escorias y polvos | - Asfalto                       |
| de chimenea                 | - Residuos de bausita           |



- Berilio
- Latón
- Desechos de ladrillería
- Bronce
- Calcio
- Desperdicios químicos
- Carbón
- Café
- Algodón
- Desperdicios de Fluoruro
- Residuos de frutas
- Vidrio
- Yeso
- Escoria de fluoruro de hidrógeno
- Plomo
- Cal
- Magnesio
- Mica
- Melazas
- Chatarra no ferrosa
- Desechos orgánicos
- Papel
- Salmuera
- Desechos de cerámica
- Escoria y desechos de pirita
- Espumas de sal
- Productos pesqueros comestibles
- Remolacha
- Azufre
- Tetractilo de plomo
- Estaño
- Tabaco
- Uranio
- Desperdicios de hortalizas
- Lana
- Aleación de cincón
- Bismuto
- Desechos de cervecería, destilación y fermentación
- Cadmio
- Carburos
- Cromo (Cromatos)
- Cobalto
- Cobre
- Desperdicios de lechería
- Desechos de fundición
- Germanio
- Fibra de vidrio
- Cáñamo
- Residuos inorgánicos
- Hierro
- Desechos de curtido y manufactura de pieles
- Manganeso
- Lana mineral
- Molibdeno
- Nylon
- Pintura
- Residuos de Petróleo
- Plásticos
- Metales preciosos
- Refractario
- Caucho
- Arena
- Sodio
- Almidón
- Fibras de caña de azúcar
- Tantalio
- Textiles
- Titanio
- Tungsteno
- Vanadio
- Desechos de madera
- Cinc
- Etcétera.

En nuestro medio no existe el control y manejo óptimos de los desechos industriales peligrosos como son los derivados del petróleo, industria química y farmacéutica, gasera, cementera, minera y otras pequeñas como son las tintorerías, laboratorios, talleres mecánicos y de material eléctrico y electrónico. En los valles de México y Toluca la presencia de industrias ha producido la acumulación de desechos tóxicos que han ocasionado trastornos en la salud de la población, como es el caso de una planta procesadora de cromatos de sodio y potasio y sulfatos de sodio, con el consiguiente "entierro" sin mayor estudio o medidas adecuadas de depositación de éstos compuestos. Los desechos industriales peligrosos constituyen un riesgo potencial en todas las etapas de su ciclo, durante su generación, recolección y transporte, almacenamiento o en los sitios de recepción, así como durante su tratamiento y disposición final. Considerando cada una de las etapas mencionadas, debe haber un control sistemático como

parte de una política integral de los manejos adecuados de éstos desechos. Este control permitiría que desde la fuente generadora se separaran los desechos de acuerdo con sus propiedades y características. Con ello se facilitaría su reuso, en caso de ser factible, así como su tratamiento adecuado y se evitaría que se mezclaran con otras sustancias que aumentan su volumen y peligrosidad, o bien se lograría hacer más seguro su confinamiento en los sitios destinados para su disposición final. El programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) consideran prioritarios los siguientes desechos peligrosos:

- Ácidos
- Bases industriales
- Intermediarios químicos
- Plastificantes compuestos
- Solventes
- Saborizantes y aromas
- Cianuros
- Productos farmacéuticos
- Plaguicidas, pesticidas y herbicidas
- Metales y sus derivados
- Productos para la guerra química
- Catalizadores y reactivos
- Productos derivados del petróleo como acetonas, fenoles, ésteres, etc.

Los problemas de contaminación de aguas subterráneas por sustancias peligrosas pueden ser agrupadas en tres categorías generales:

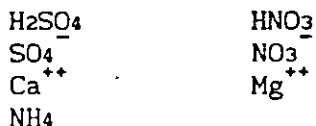
- 1) Contaminación causada por líquidos que permiten mezclarse con otros (miscibles) y por medios porosos que ayudan a llevarse a cabo la mezcla,
- 2) contaminación causada por líquidos poco factibles a mezclarse (inmiscibles), de menor densidad que el agua tal que éstos no se mueven en y por debajo del acuífero y
- 3) contaminación por líquidos inmiscibles que son más densos que el agua y por lo tanto pueden hundirse por la zona permeable.

La primer categoría es el problema clásico de contaminación de aguas subterráneas, la segunda incluye problemas referentes a aceites y gasolinas, La tercera se refiere a un gran número de productos líquidos producidos por la industria química. Algunos hidrocarburos son menos viscosos que el agua mientras que otros son moderadamente solubles. Estas características representan una severa amenaza a la calidad del agua porque pueden moverse en la parte baja de la zona permeable. Los componentes contaminantes están sujetos a la influencia de procesos de atenuación como dispersión, absorción, intercambio iónico y biodegradación.

Lluvia ácida. - Otra fuente de contaminación es la llamada lluvia ácida y es aquella cuyo pH es menor que 5.6, o sea, es una mezcla de ácidos fuertes y débiles. El pH de la lluvia es el resultado final de las reacciones de neutralización entre ácidos y bases presentes en la misma. Los ácidos fuertes son las sustancias que influyen sobre el pH de la lluvia. Los contaminantes emitidos a la atmósfera van a ser dispersados por el viento, éstos van a ser eliminados de la atmósfera por deposición húmeda, o sea, por la lluvia, granizo o nieves. El proceso es muy complejo, ya que según

el tipo de sustancia ésta se puede eliminar en diferentes formas.

La incorporación dentro de las nubes consiste en la introducción de contaminantes durante los procesos de condensación del vapor de agua en las nubes, aquí los contaminantes forman parte de los núcleos de condensación, quedando atrapados dentro de las gotas que integran la nube. Al caer las gotas como tales, o en forma de granizo o nieve, llevan los elementos contaminantes al suelo, éstos a su vez se filtran a través del subsuelo, llegando así al acuífero y por lo tanto lo contamina. Los principales ácidos contaminantes por el fenómeno de la lluvia ácida son:



### Intrusión marina. -

Es una fuente de contaminación debida al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando el agua dulce. El agua captada en un acuífero se contamina (saliniza) cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce y agua salada o por la propia agua salada, porque la extracción ocasiona movimientos relativos de la superficie piezométrica, los cuales dan lugar a movimientos ascendentes de la interfase. Esta contaminación puede provenir de la infiltración de agua de otros acuíferos salinizados. También debe considerarse la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas si el pozo está en una llanura costera de muy baja costa, o debido a la mayor penetración del agua del mar en ríos y lagunas costeras durante las mismas, o incluso por lluvias salinas originadas por fuertes tormentas litorales. Entre dos fluidos miscibles, tales como agua dulce y agua salada, no existe una interfase brusca sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla. Esta zona de mezcla o de transición, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales y su anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento.

La zona de mezcla dentro de la cual se sitúa la interfase teórica, es una zona dinámica en la cual se mueve no sólo como consecuencia de las diferencias de densidades sino también debido a cambios de nivel piezométrico en ambos líquidos. El peso específico del agua dulce se puede tomar como  $= 1000 \text{ kg/m}^3$  con escaso error dentro del margen de temperaturas normales. El peso específico del agua marina es mayor, y puede tomarse entre 1020 y 1030  $\text{kg/m}^3$  según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de  $= 1025 \text{ kg/m}^3$  (para 1900 ppm en  $Cl^-$ ). La viscosidad del agua marina es del orden de un 30% mayor que la del agua dulce a igual temperatura.

Las relaciones entre el agua dulce y el agua salada en regiones costeras es de gran interés ya que muchos acuíferos vierten sus aguas directamente en el mar. Este flujo de agua dulce crea un

estado de equilibrio entre ambas aguas que sólo sufre modificaciones naturales a largo plazo, debidas a cambios climáticos o movimientos relativos de la tierra y el mar. La ubicación de poblaciones, en México, a lo largo de sus costas y generación de agricultura e industria, originan una importante extracción de agua subterránea y por lo tanto, una substancial modificación de las relaciones agua dulce - salada.

El análisis de esta relación es complejo por las diferencias entre los fluidos (viscosidad, densidad y temperatura). Para la mejor comprensión de esta relación se especificará la formula de Ghyben - Herzberg:

Su estudio se basa en el equilibrio estático de las columnas de agua de diferente densidad, asumiendo las siguientes hipótesis:

i) El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por lo tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.

ii) No existe flujo de agua salada.

iii) La interfase es un plano, no existiendo zona de mezcla.

Equilibrándose la presión del agua dulce y salada en un punto arbitrario, se encuentra que la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto.

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas se pueden clasificar sobre una base posicional o geográfica: puntual, lineal y dispersa.

Las fuentes puntuales son tales como fosas sépticas, desperdicios municipales sólidos, desperdicios de animales, desperdicios mineros y otros sistemas relativamente pequeños de distribución de desechos en el suelo.

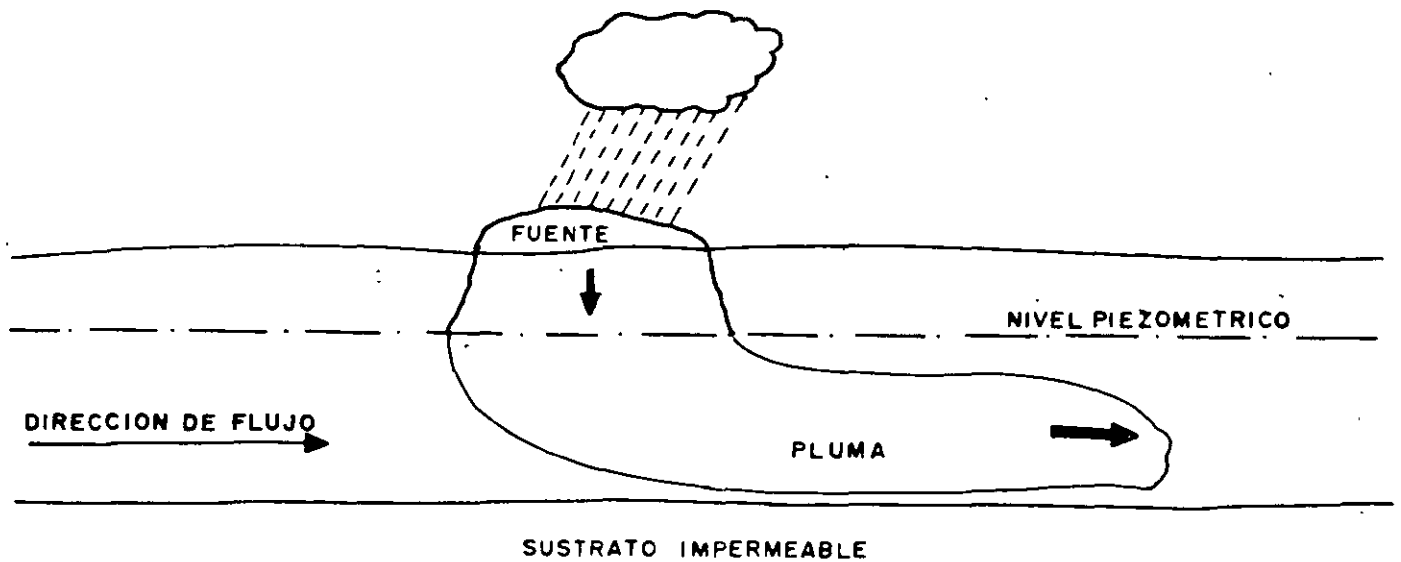
Las fuentes lineales son aquellas tales como derrames en sistemas de alcantarillado y tuberías, desperdicios mineros. salmuera, etc.

Las fuentes dispersas se extienden a través de grandes áreas, tales como la aplicación de químicos sobre el terreno para la agricultura, rellenos sanitarios, desperdicios mineros, "cementorios" clandestinos de substancias o elementos tóxicos, intrusión de agua de mar, etc.

## Mecanismos de Contaminación:

La fenomenología que controla el desplazamiento de un poluante a través de una matriz porosa puede ser transcrita en terminos tales que permiten establecer ecuaciones que describen la migración de un soluto en el flujo subterráneo.

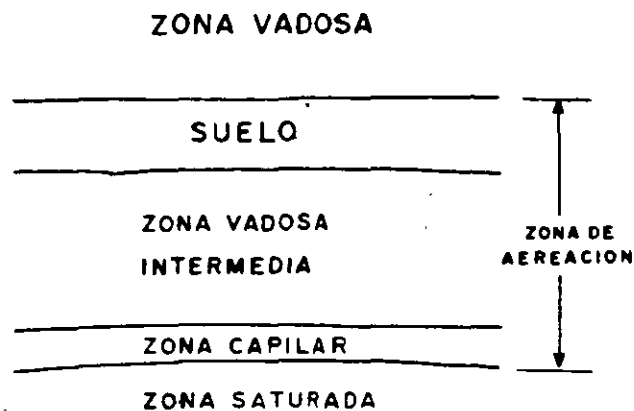
El establecimiento de un marco teórico adecuado requiere antes de la proposición de un modelo general hidrodinámico que conceptualiza el flujo de un poluante hacia un acuífero.



Un esquema general puede ser representado por una fuente puntual en la superficie del terreno con flujo del poluante en la zona no saturada el cual se continua en la franja capilar para llegar a la zona saturada en donde se inicia el proceso de mezcla y migración en el flujo subterráneo dando lugar a una nube o pluma contaminante.

### Transporte en la Zona No Saturada:

El flujo y transporte son mucho más complejos en la zona no saturada que en la saturada. Refiriéndose esta de manera genérica, como la parte que se encuentra arriba del nivel de saturación, aunque la presencia de la franja capilar provoque - que se busque una definición más concisa aceptándose ahora la que establece que se trata de una zona continua de fase gaseosa.



Cuando el poluante se desplaza en ella origina fuerzas interfaciales (fase líquida y gaseosa) que dan a esta zona propiedades únicas.

El contaminante migra como resultado de procesos advectivos y dispersivos en ambas fases. El flujo del soluto es controlado por la carga hidráulica  $h^*$ , misma que es originada por la presión ( $\Psi$ ) y la fuerza de gravedad ( $Z$ ).

donde  $\Psi$  se relaciona con la succión, la presión capilar y un potencial asociado a la matriz porosa. De estas componentes la succión es la presión negativa que tiende a extraer el agua de la matriz porosa. La forma en la cual el medio retiene el agua contra la presión negativa es una de las propiedades fundamentales de los medios no-saturados. Debiéndose esto por un lado a las fuerzas de absorción y por otro a las fuerzas capilares.

Las primeras resultan de la interacción de la molécula de agua, cuyo lado positivo es orientado hacia la carga negativa de las superficies minerales. Las segundas ocurren como resultado de la interfase curva entre la fase líquida y la gaseosa. La primera predomina en los medios secos o con materiales de textura fina.

Transporte en la zona saturada:

El transporte de un soluto en un medio saturado puede ser transcrito matemáticamente considerando que las reacciones entre la nube y el medio son mínimas, esto es se desprecian fenómenos de absorción, precipitación, reducción e intercambio iónico.

Si consideramos como primer y más simple mecanismo, el transporte del soluto como producto solo de la velocidad del flujo, esto es por absorción, el desplazamiento tendrá lugar a la velocidad lineal promedio del flujo, entonces la evolución

de advección,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

donde  $\bar{v} = \bar{q} / \eta$  y  $\bar{q}$  es el flujo darciano y  $\eta$  la porosidad efectiva.

La advección es también referida por algunos autores como convección.

Este último término no es ampliamente usado por su asociación a transporte de masas como respuesta a gradientes de densidad inducida por diferencias en temperatura.

Si el soluto se desplaza en el flujo con velocidades y direcciones distintas a  $\bar{v}$  por efectos de variaciones en la permeabilidad, por el proceso de mezcla por variaciones aleatorias en la fase acuosa y por difusión molecular interviene lo que se conoce como dispersión que no es otra cosa que un mecanismo de dilución del poluante en el flujo subterráneo.

Como se menciona la dispersión es causada por efectos microscópicos y macroscópicos.

A nivel microscópico la dispersión incluye los efectos de dispersión mecánica y difusión molecular la primera debido a las variaciones de velocidad entre el centro y las paredes de un poro y a las variaciones causadas por la inhomogeneidad en la poro



sidad. La segunda es debido a que los constituyentes del poluante (especies) se mueven de altas a bajas concentraciones.

A escala macroscópica la dispersión es provocada por la presencia de heterogeneidades en la matriz porosa.

La transcripción matemática del transporte por dispersión considera la absorción y en su forma más simple unidimensional, para solutos que no interactúan con la matriz porosa, circulando en un medio saturado, homogéneo, isotrópico y con régimen de flujo estacionario, es

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

en donde el parámetro nuevo es  $D$  que es el coeficiente de dispersión hidrodinámica en la dirección del flujo.  $D$  resume los efectos macro y micro por lo que puede expresarse en ambos términos esto es (Freeze, 1979).

$$D = \alpha \bar{v} + D^*$$

con  $\alpha$ , la dispersividad dinámica que es una propiedad del medio y  $D^*$  que es coeficiente de difusión molecular.

Si la velocidad del flujo es baja, esto es  $\bar{v}$  puede ser considerada cero, la advección se elimina y el coeficiente de dispersión se reduce al de difusión, transformándose la ecuación de absorción-dispersión en una de difusión

$$\frac{\partial C}{\partial t} = d' \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

con  $d'$  el coeficiente de difusión efectiva. Cuando ocurren reacciones químicas, pueden darse cambios en la concentración del soluto. Estas reacciones químicas y bioquímicas pueden ser agrupadas en 6 categorías: reacciones de absorción-desabsorción reacciones ácidas-básicas, solución-precipitación, oxidación-reducción, complejación, formación de pares/iónicos y síntesis microbiológico celular. Los contaminantes radioactivos son influenciados además por el decaimiento radiactivo de sus componentes.

Así para medios saturados homogéneos e isotrópicos con flujos estacionario, la ecuación de advección-dispersión que incluye los efectos de absorción es,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{S_r}{\eta} \frac{\partial S}{\partial t}$$

con  $S_r$  la densidad de la matriz porosa y  $S$  la masa del constituyente químico absorbido por la parte sólida de la matriz por unidad de masa de sólido, esto es  $\frac{\partial S}{\partial t}$  representa la velocidad a la que el soluto es absorbido y  $\frac{S_r}{\eta} \frac{\partial S}{\partial t}$  nos indica el cambio en la concentración en el fluido a causa de los fenómenos de absorción engloba las propiedades "medibles" del medio y de las reacciones químicas de inter-

res.

Los fenomenos de absorción llegan a ocurrir a velocidades mayores del flujo, S. que pudiera referirse como el grado de absorción es una función de la concentración del soluto en solución

$$\Rightarrow S = f(c)$$

$$\Rightarrow + \partial S / \partial t = \partial S / \partial c \cdot \partial c / \partial t$$

$$\Rightarrow s_r / \eta \partial S / \partial t = s_r / \eta \partial S / \partial c \cdot \partial c / \partial t$$

en la que el termino  $\partial S / \partial c$  nos indica partición del soluto entre la solución y el solido, la cual es determinada en laboratorio a temperatura constante por lo que las relaciones entre S y C son conocidas como isotermas.

Si el soluto incluye especies radioactivas a la ecuación habría que agregar un termino más que incluya el decaimiento del soluto.

$$\partial c / \partial t = D \partial^2 c / \partial x^2 - \bar{v} \partial c / \partial x + s_r / \eta \partial S / \partial t - \lambda C$$

$$\text{con } C = C_0 e^{-\lambda t} \quad \text{y} \quad \lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad \text{con}$$

$T_{1/2}$  la vida media del elemento radioactivo.

La expresión anterior describe el transporte unidimensional de un soluto en un medio homogéneo e isotrópico y considera los fenomenos más importantes que contro-

lan el desplazamiento del mismo.

El primer termino es el dispersivo el segundo es el adveectivo, el tercero es el que considera la absorción y el último el que involucra el decaimiento.

## CALIDAD DEL AGUA:

La calidad es la propiedad del agua que le permite seguir siendo útil, da de beber al hombre y a especies animales, sustenta toda la vida marina, sirve para irrigar la tierra, y sirve como medio de recreación.

Esta calidad se puede conocer a través del contenido de elementos y sustancias en el agua, haciendo un exámen minucioso en el cual se obtengan resultados cualitativos y cuantitativos de cada uno de ellos.

Para definir el grado de contaminación del agua se determinan los parámetros por medio de análisis físicos, químicos orgánicos e inorgánicos y bacteriológicos, incluyendo los virales.

Dependiendo de las características del agua, cada muestreo es diferente, o sea, su forma de recolección, cantidades de muestras, tipos de envases, limpieza de los mismos, etc., esto es en base al grado de contaminación del agua a tratar.

Los resultados de los análisis se comparan con las normas establecidas por el Gobierno en base a la normatividad internacional. Las pruebas de laboratorio son de gran importancia, ya que ayudan a formar una opinión de que tan adecuada resulta el agua de una fuente de abastecimiento para un uso determinado. Los principales -

criterios para evaluar el grado de contaminación del agua se basan en los siguientes factores:

- concentración de microorganismos coliformes
- déficit de saturación de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- concentración de sólidos en suspensión
- concentración de petróleo, fenoles, agentes tóxicos
- radiactividad

Los análisis que se hacen al agua se dividen en:

a) Físicos

- Temperatura. La variación de la temperatura puede indicar principio de contaminación. La temperatura del agua contaminada tiende a ser mayor que la natural en el mismo medio.
- Color. La variedad en el color da indicios de contaminación, sobre todo cuando es diferente al color natural del agua.
- Olor. En general el olor se debe a la presencia de materia orgánica en descomposición o a compuestos químicos como fenoles.
- Turbiedad. Las aguas contaminadas normalmente son turbias, porque contienen ma-

teria sólida en suspensión o volátil.

-Residuos sólidos. Se llama residuo a aquel que queda en un recipiente después de la evaporación de una muestra de agua y de su secado subsecuente a una temperatura definida.

-Conductividad eléctrica. Mide la concentración de electrolitos debido a la conductancia tan alta que tienen los iones hidrógeno u oxhidrilo. La conductividad eléctrica se relaciona con la concentración de sólidos disueltos.

-Resistividad eléctrica. Se relaciona con el grado de mineralización del agua.

-Radiactividad. La contaminación del agua se ha incrementado debido a la instalación de Plantas nucleares y el acelerado uso de radioisótopos, tanto en la industria como en la medicina. La vida media de los isótopos que constituyen los principales desperdicios radiactivos son:

	Elemento	vida media
	Bario 140	12 días
	Cesium 144	28 días
	Cesium 137	30 años
	Estroncio 89	53 días
	Estroncio 90	19.9 años

Iodo	131	8	días
Itrio	91	61	días
Niobio	95	35	días
Zirconio	95	65	días

b) Químicos.-El análisis químico proporciona datos útiles y específicos respecto al estado de descomposición de las aguas negras o corrientes contaminadas, para fines de tratamiento, evacuación y prevención.

i) Gases disueltos

- Oxígeno disuelto. Es muy importante la presencia de oxígeno disuelto en el agua, para que se lleve a cabo el proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica.

-Amoniaco. La presencia de amoniaco en el agua es frecuentemente interpretado como una contaminación reciente con productos nitrogenados; en aguas subterráneas -- puede provenir también de la disolución de estratos que contengan sales amoniacales.

-Bióxido de Carbono

-Cloro

-Hidrógeno

-Sulfuro de Hidrógeno



-Nitrógeno. En los análisis de agua negras se pueden hacer cinco tipos de determinaciones de nitrógeno: amoniacal, orgánico o protéico, albuminoide, nitritos y nitratos.

Los nitratos provienen generalmente de la materia orgánica nitrogenada de origen animal. Los nitritos se relacionan con una contaminación de aguas negras o de rios industriales sujeta a oxidación.

-Oxígeno

--Bióxido de Azufre

ii) Cationes

-Aluminio

-Amonio

-Bacterias reductoras del sulfato.

-Toxicidad aguda para la vida marina.

d) Bacteriológicos.-

Las corrientes contaminadas (aguas negras o industriales) contienen microorganismos que pueden clasificarse en : algas, hongos, bacterias, protozoos y formas superiores de vida. Las bacterias tienen la particularidad de reproducirse rápidamente, algunas

pueden crecer y subdividirse en sólo 15 minutos. De acuerdo a las temperaturas óptimas para el desarrollo de las bacterias, éstas se dividen en psicrófilicas cuando viven entre los 15° y 20° C; mesófilicas entre 25° y 45° C termófilicas entre 45° y 55° C.

Las bacterias que producen enfermedades en el hombre se denominan patógenas y en general son parásitos que viven a la temperatura del cuerpo humano. Las principales enfermedades causadas por bacterias y transmitidas por el agua son la fiebre tifoidea, la disentería, el cólera y ciertos tipos de trastornos gastrointestinales.

De acuerdo al medio de desarrollo las bacterias se dividen en:

1. Naturales del agua. En general no son patógenas; son típicas las pseudomonas, la serratia flavobacterium y chorobacterium.
2. Provenientes del suelo. No son patógenas y son frecuentes los bacillus y aerobacillus.
3. De origen intestinal o de aguas negras. Pueden ser o no patógenas; entre las no patógenas se hallan la Escherichiacoli (típica del hombre), aerobacter y proteus. Entre las patógenas la salmonella y la shigella; y el bacillus clostridium que es altamente peligrosa.

Número más probable (NMP). La estimación del conjunto de bacterias del grupo - -

coliforme presentes en un determinado volumen de agua, será el índice de la intensidad de contaminación. Para diferentes números de muestras con pruebas de fermentación, es posible hacer una estimación cuantitativa del número de bacterias coliformes presentes, con esto se puede determinar el número probable de organismos de ese grupo que haya en un determinado volumen de agua. Esto proporciona un índice de contaminación, el cual usualmente se expresa como "número más probable" (NMP) de bacterias del grupo observado. El NMP se basa en leyes de probabilidad empleando los resultados positivos y negativos de tubos incubados y de acuerdo con la porción de muestra.

Algas.-El sabor y olor de algunas aguas puede deberse a la proliferación de vegetales acuáticos unicelulares (algas) que flotan en forma libre. Generalmente son microscópicas. Las algas secretan aceites que son descargados durante sus proceso vitales y que son liberados después de la muerte y desintegración de las células, produciendo los olores y sabores característicos en las aguas. Las algas constituyen el alimento principal de los animales acuáticos; son productoras de oxígeno en el agua y facilitan la misma cuando se tiene bastante materia orgánica en vía de descomposición, por otro lado obstruyen las fases de potabilización del agua, principalmente la de filtrado. Por su acción fotosintética, son muy importantes en los procesos de purificación de agua

contaminadas.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X-CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***QUÍMICA DEL AGUA,  
CICLOS DEL FIERRO Y DEL NITRÓGENO***

**PRESENTADO POR: ING. ANTONIO CARDONA BENAVIDES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

①

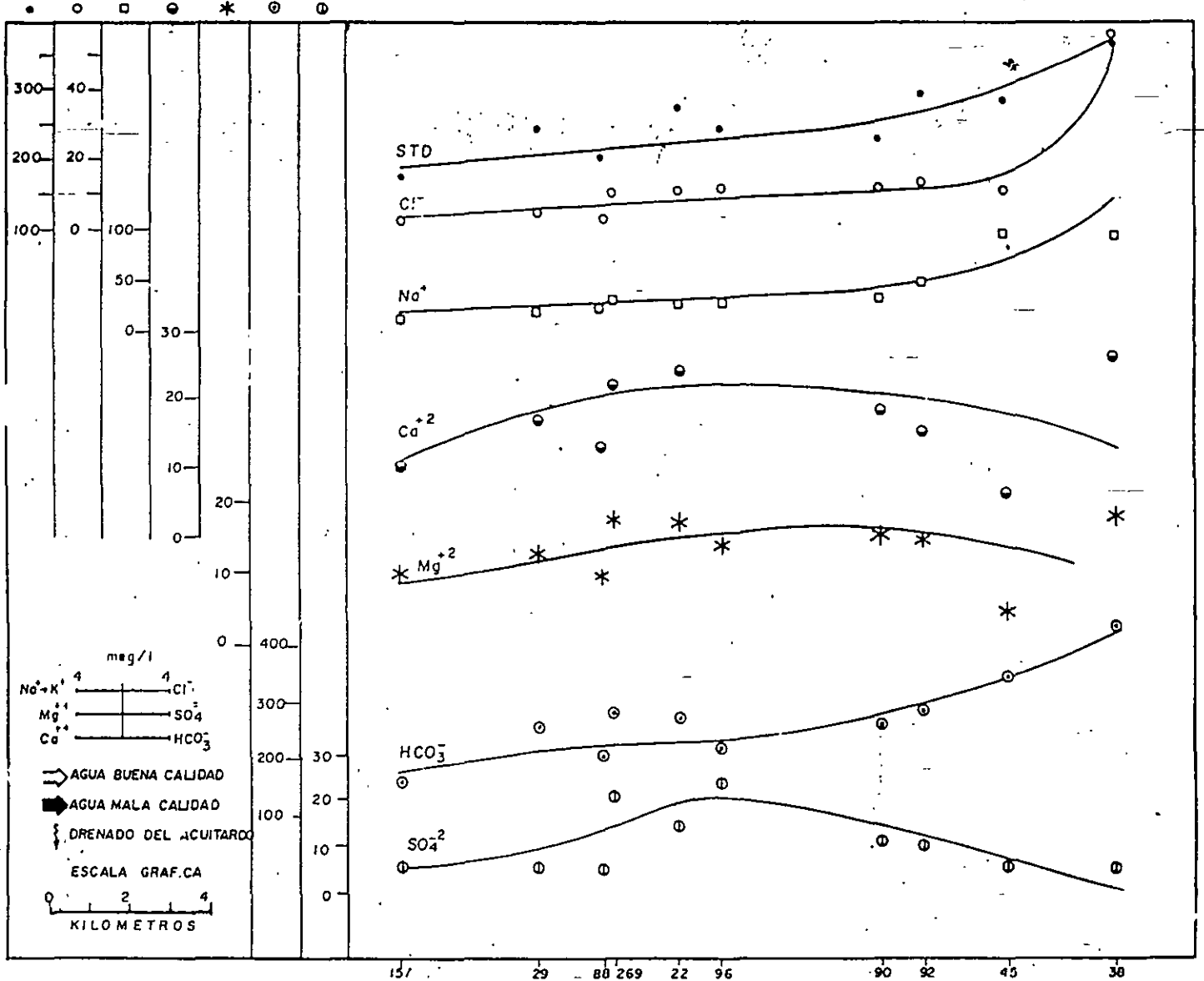
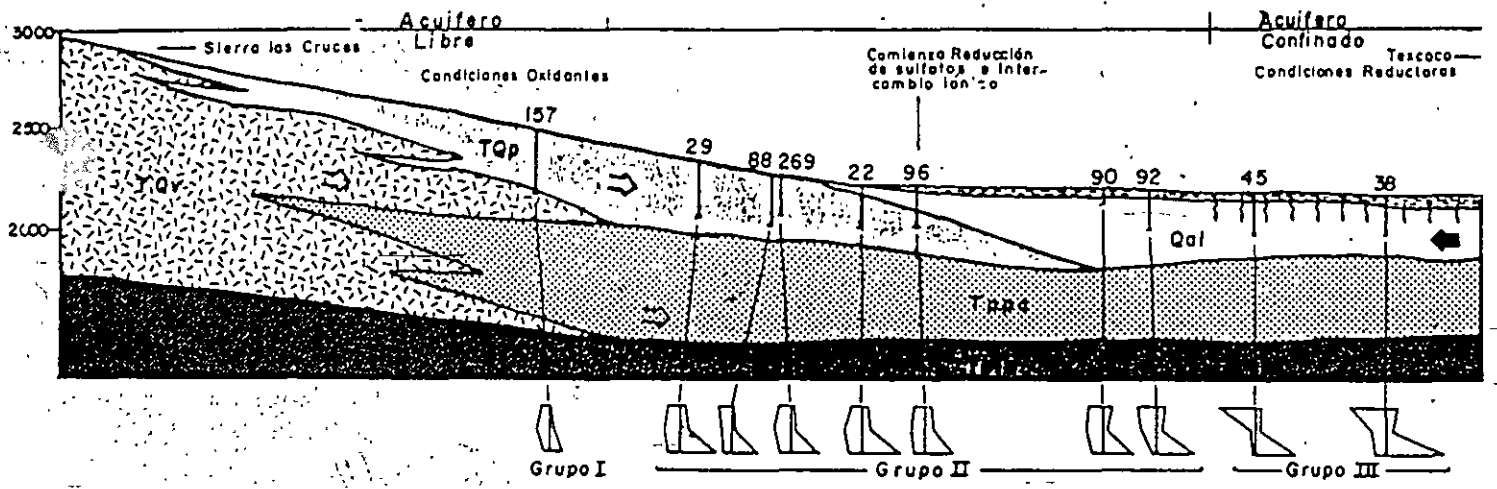


figura 1

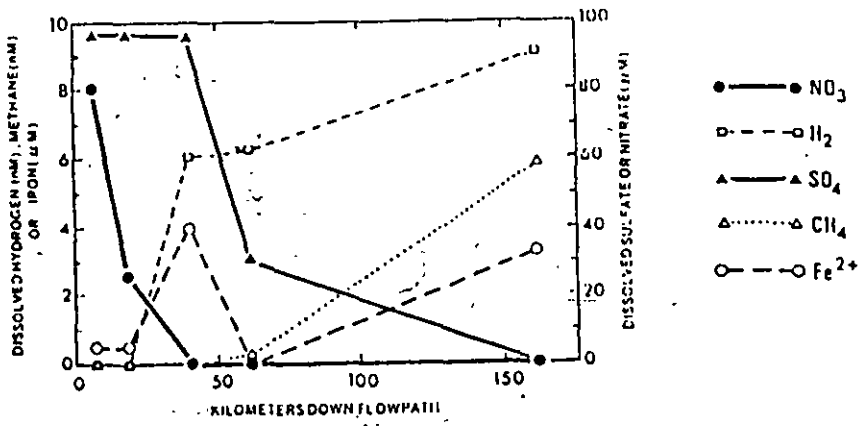


Figure 7.12. The distribution of redox species along the flow path of the Middendorf aquifer, South Carolina (modified from Lovley and Goodwin, 1988).

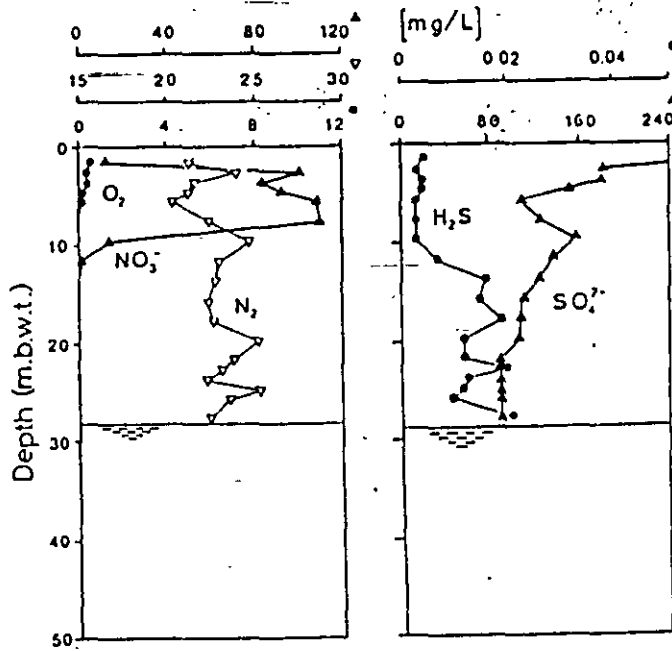


Figure 7.13. Redox zonation in a sandy Pleistocene aquifer affected by agricultural nitrate input (modified from Leuchs, 1957).

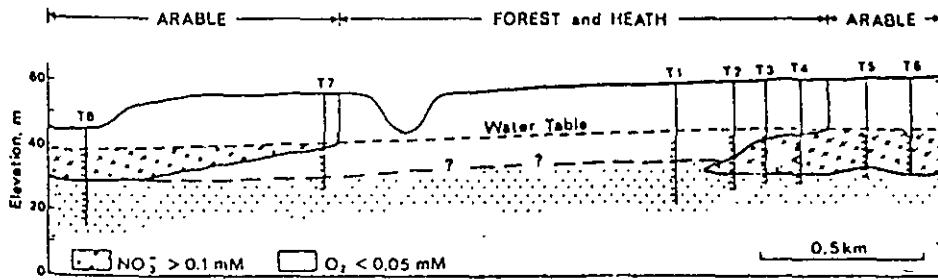


Figure 7.24. Nitrate pollution plumes emanating from agricultural fields into an unconfined sandy aquifer (Rabis Creek, Denmark). The groundwater flows from right to left. Numbers T1 through T8 refers to locations of multilevel samplers on which the plume distribution is based (reproduced with permission, Postma et al., 1991).

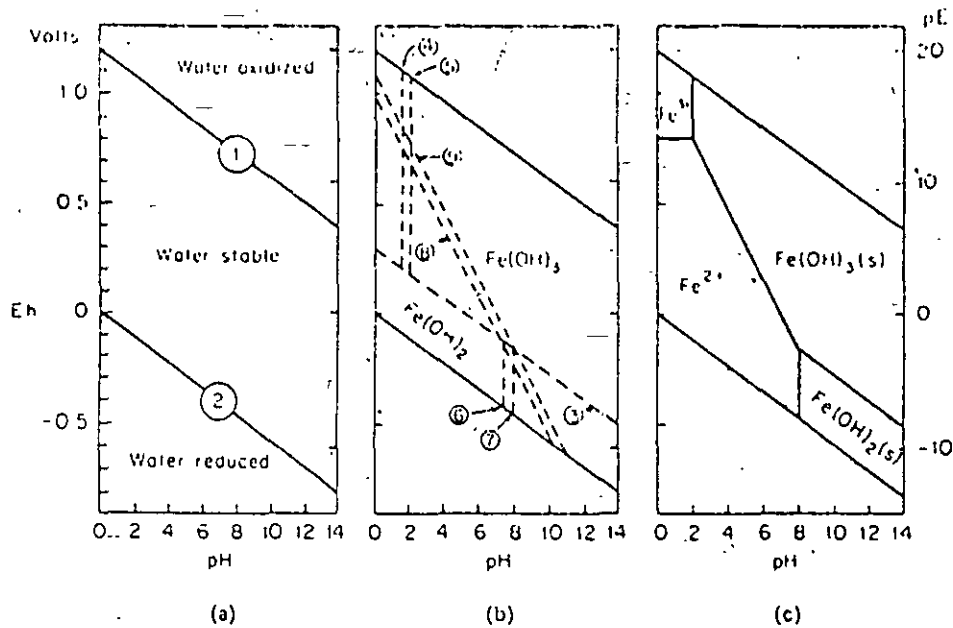
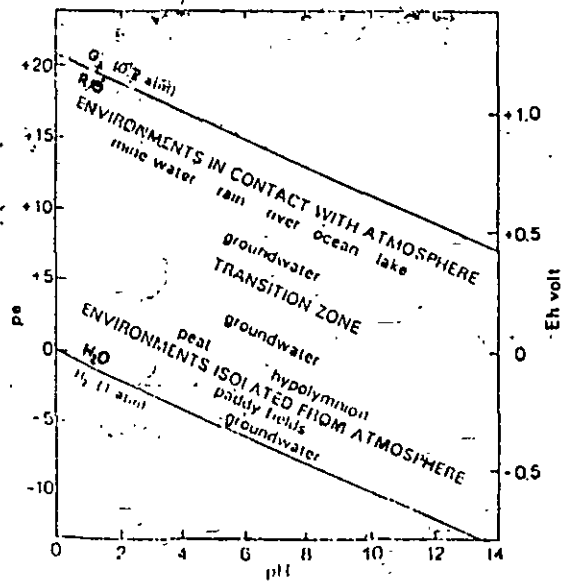


Figure 3.10 pE-pH diagrams, 25°C and 1 bar. (a) Stability field for water; (b) construction lines for the Fe-H<sub>2</sub>O system (see the text for equations, representing number-designated lines); (c) completed diagram showing stability fields for major dissolved species and solid phases.

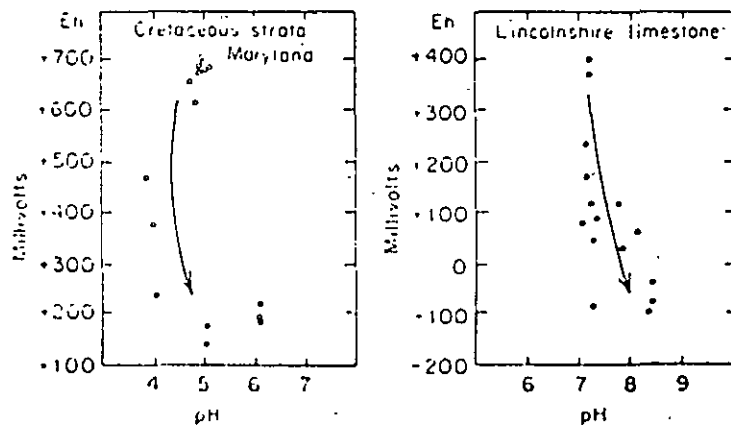
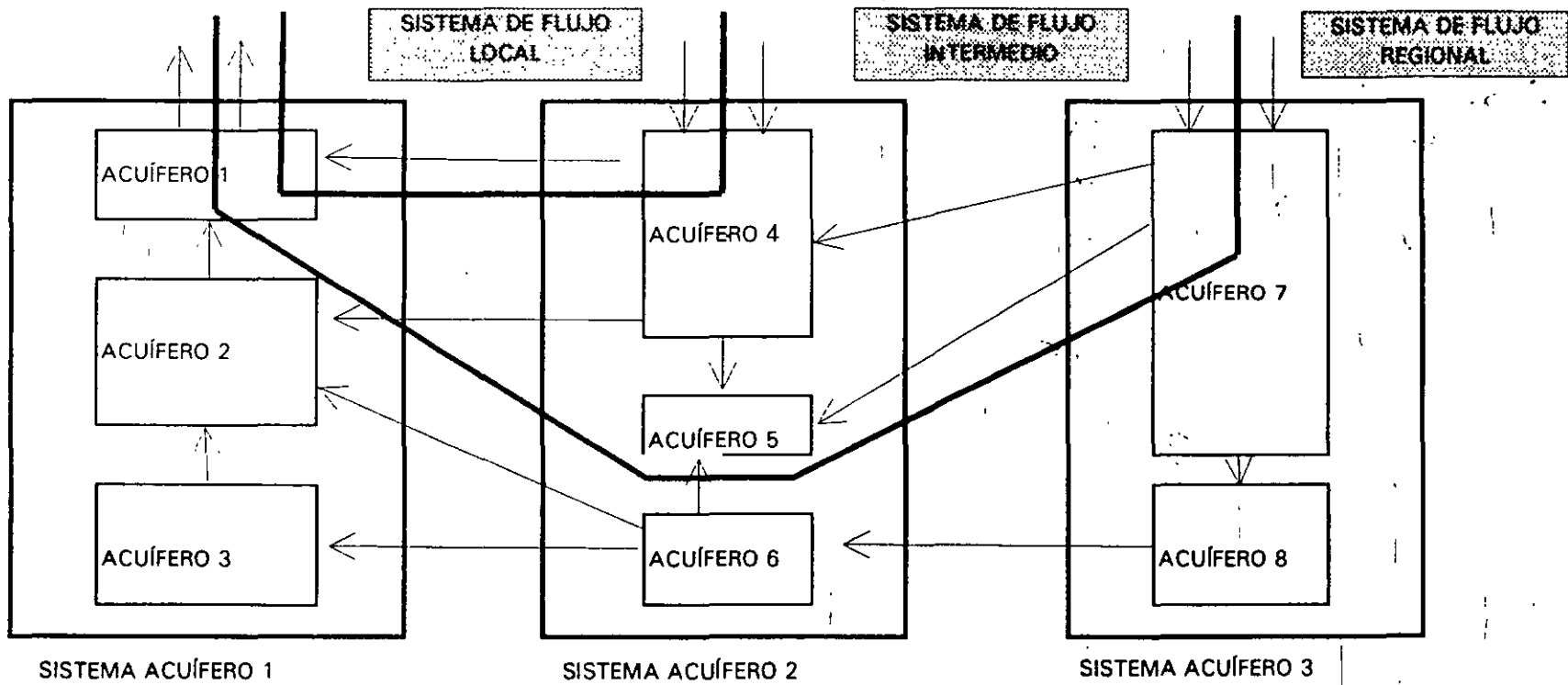


Figure 7.2 Trends in measured platinum-calomel electrode potential along regional flow paths in two aquifer systems. (a) Cretaceous strata, Maryland; (b) Lincolnshire limestone, Great Britain (adapted from H. E. Jackson, written communication, 1977, based on data from Buck and Barnes, 1960, Edmunds, 1973).



# RELACIÓN ENTRE ACUÍFEROS, SISTEMAS ACUÍFEROS Y SISTEMAS DE FLUJO



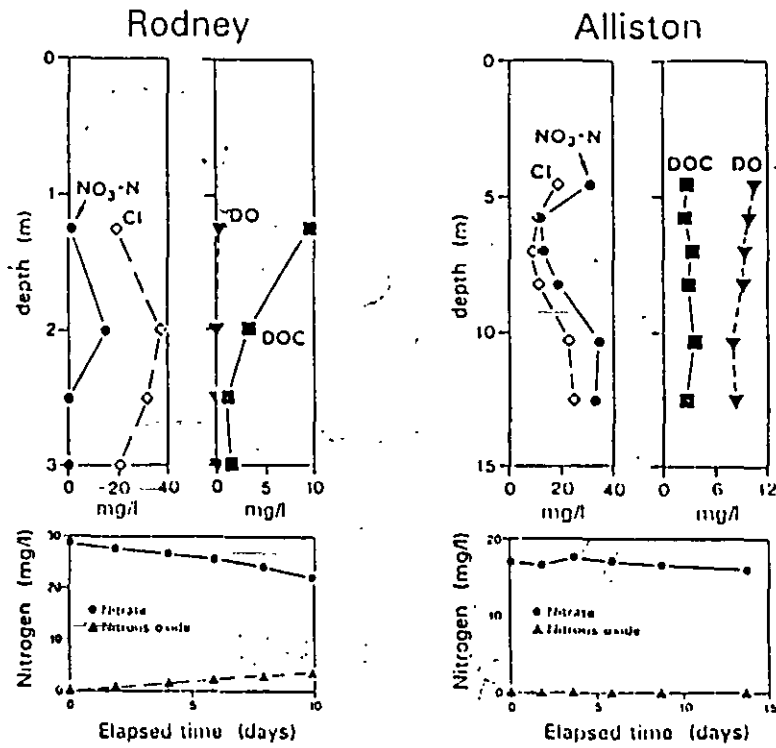


Figure 7.26. Nitrate reduction by *DOC* at Rodney (left) with a groundwater table at 1 m below the surface and at Alliston (right) with a water table at 4 m depth. The upper part shows field profiles while the lower part shows results of in situ denitrification measurements using the acetylene block technique (modified from Starr, 1988).

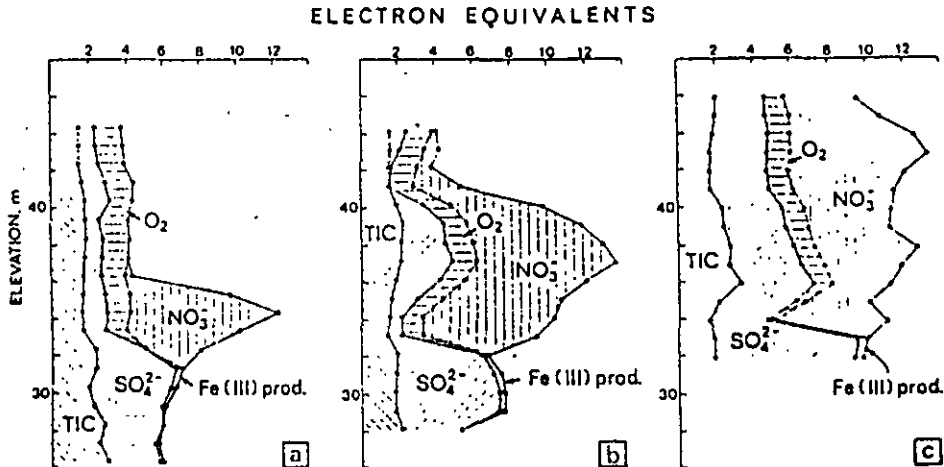


Figure 7.28. Cumulative distribution of electron equivalents in Rabbis Creek multisamplers T2 (a), T3 (b) and T5 (c) (see for location Figure 7.24). Electron equivalents are defined in Table 7.3 (reproduced with permission, Postma et al., 1991).

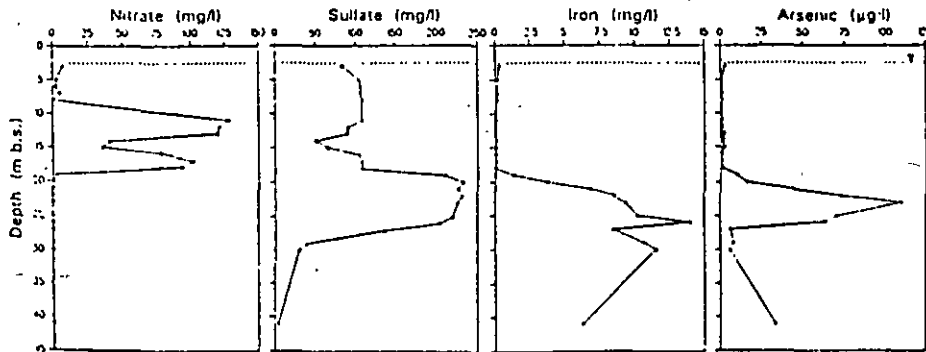


Figure 7.29. Nitrate reduction by pyrite oxidation in a sandy aquifer. Pyrite oxidation results in the release of arsenic from pyrite (modified from Van Beek et al., 1989).

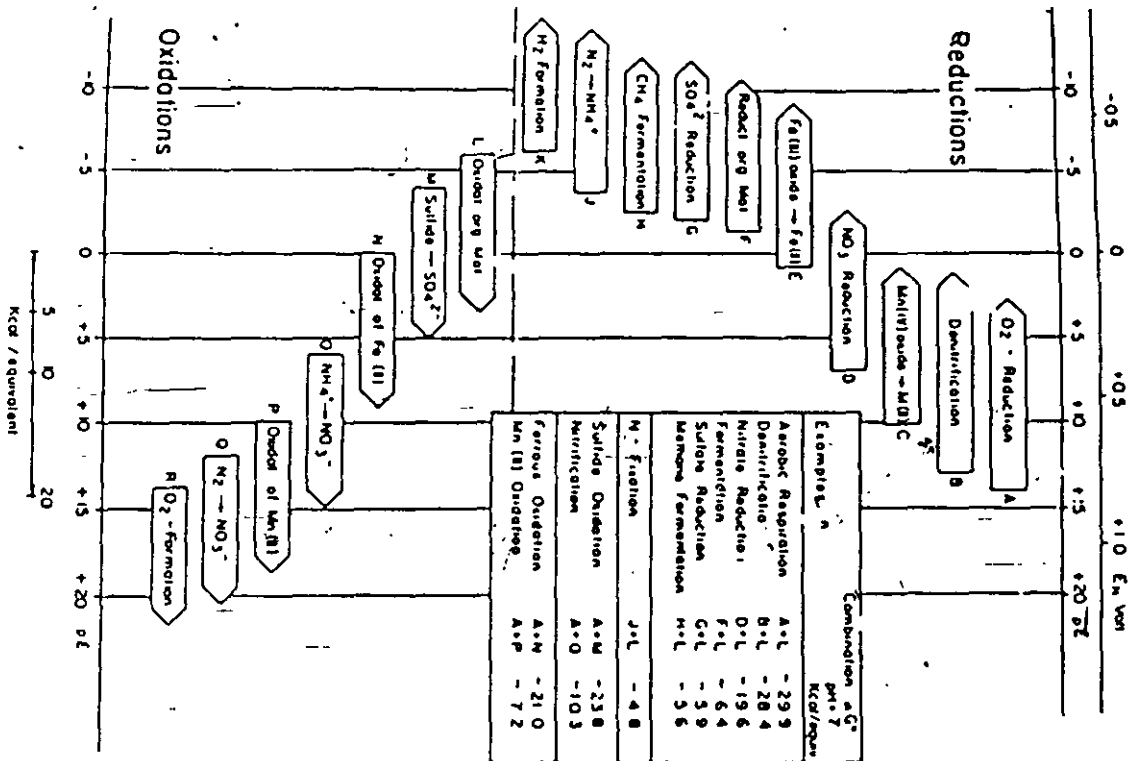


Figure 7.11 Sequence of microbially mediated redox processes.

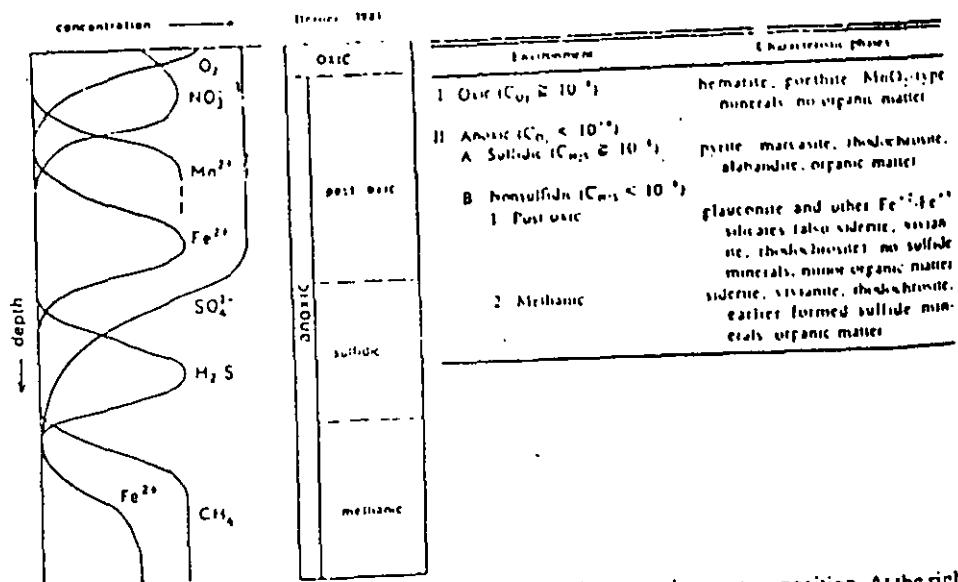


Figure 7.10. The sequence of reduction processes as reflected by groundwater composition. At the right is shown Berner's (1981) classification of redox environments together with solids which are expected to form in each zone.

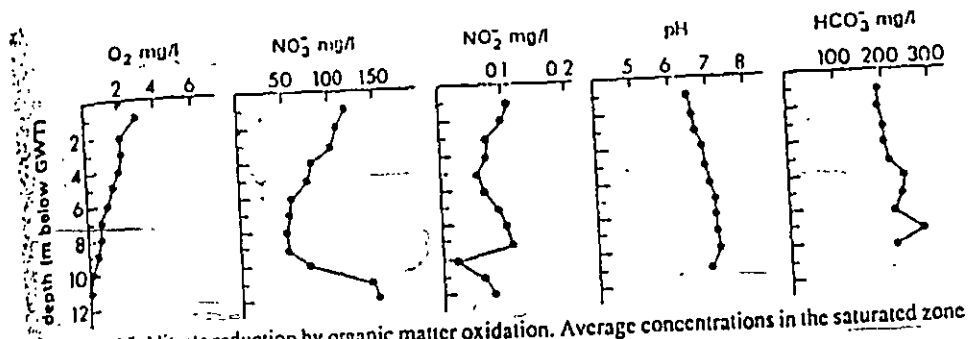


Figure 7.25. Nitrate reduction by organic matter oxidation. Average concentrations in the saturated zone at the Mussunt waterworks, Germany (modified from Obermann, 1982).

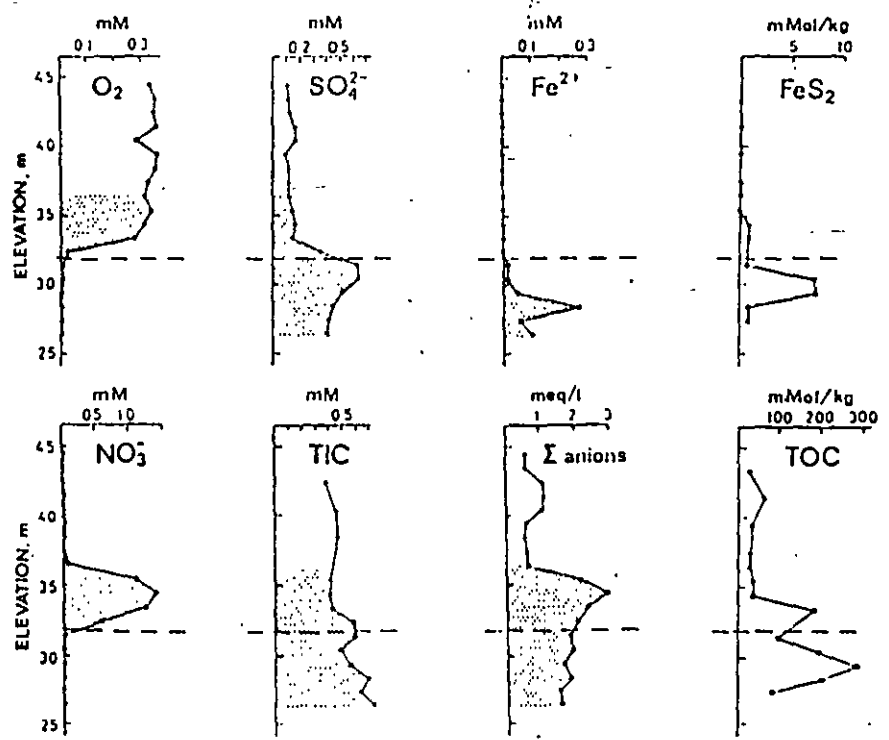
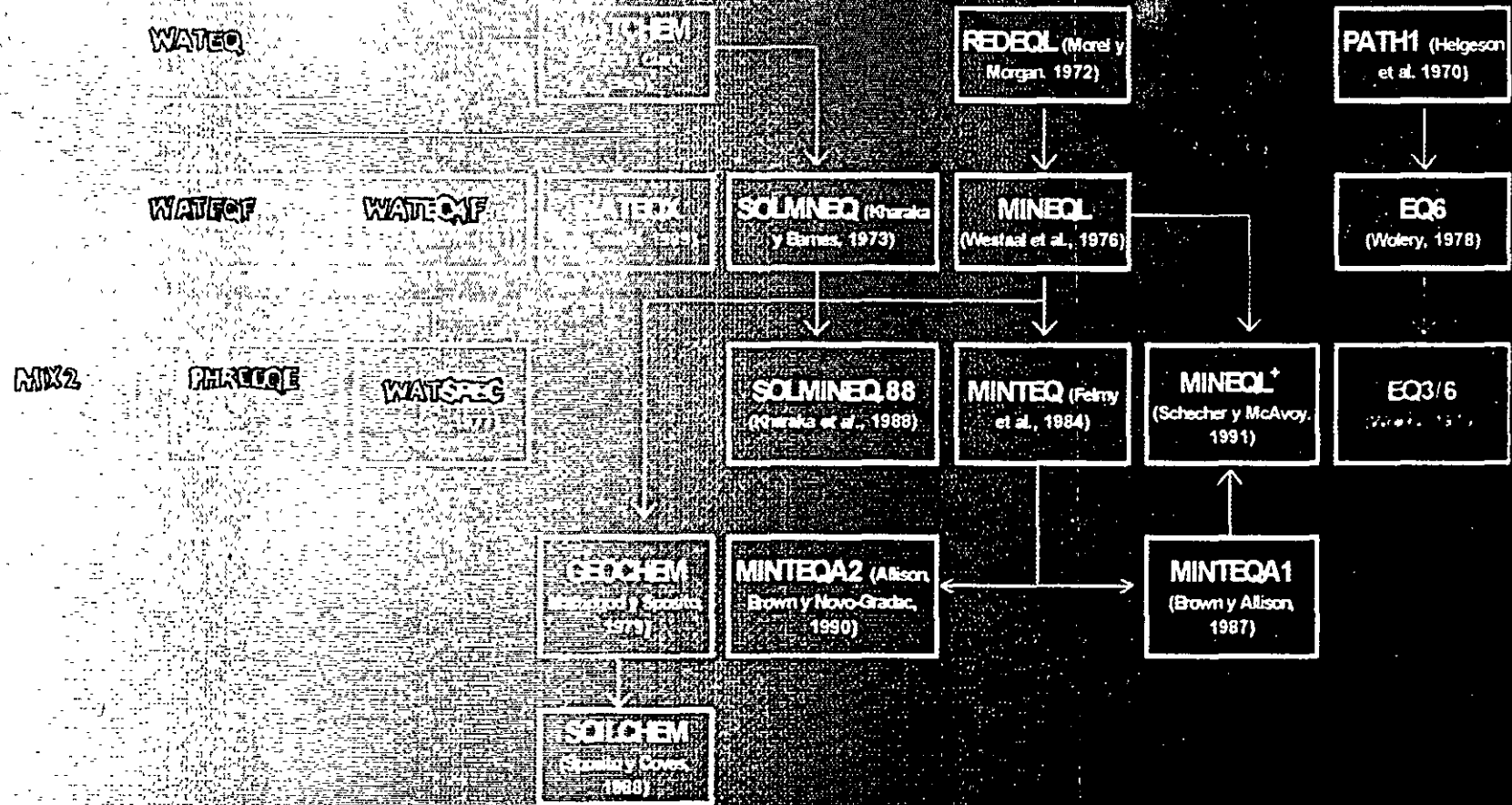


Figure 7.27. Pyrite oxidation by nitrate and oxygen in multilevel sampler T2 (for location see Figure 7.24) in the saturated zone of the Rabis Creek sandy aquifer. The dashed line indicates the depth where O<sub>2</sub> disappears and the shaded parts indicate nitrate contaminated water derived from arable land which is overlain by nitrate free water from a forested area (modified from Postma et al., 1991).

Table 7.3. Electron equivalent for dissolved redox components which reflect their molar concentrations multiplied by the number of electrons transferred.

Reaction	Electron equivalents	Electron equivalents
$\text{NO}_3^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2$	$+5e^-$	$5 \cdot m_{\text{NO}_3^-}$
$\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}^{2-}$	$+4e^-$	$4 \cdot m_{\text{O}_2}$
$\text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2$	$-4e^-$	$4 \cdot \text{TIC}$
$\text{S}_{\text{FeS}_2} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$	$-7e^-$	$7 \cdot m_{\text{SO}_4^{2-}}$
$\text{Fe}_{\text{FeS}_2} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$	$-1e^-$	$0.5 \cdot (m_{\text{SO}_4^{2-}} - 2m_{\text{FeS}_2})$

# Evolución de los Modelos de Asociación de Iones



### BALANCE DE MASA

$$\begin{aligned}(\text{Ca}^{+2}) &= (\text{Ca})_T - (\text{CaSO}_4^0) \\ (\text{Mg}^{+2}) &= (\text{Mg})_T - (\text{MgSO}_4^0) \\ (\text{Cl}^-) &= (\text{Cl})_T \\ (\text{SO}_4^{-2}) &= ((\text{SO}_4)_T) - (\text{CaSO}_4^0) - (\text{MgSO}_4^0) - (\text{HSO}_4^-)\end{aligned}$$

### REACCIONES DE DISOCIACIÓN

$$\begin{aligned}(\text{CaSO}_4^0) &= \gamma_{\text{Ca}} (\text{Ca}^{+2}) \gamma_{\text{SO}_4} (\text{SO}_4^{-2}) / (\gamma_{\text{CaSO}_4} K1) \\ (\text{MgSO}_4^0) &= \gamma_{\text{Mg}} (\text{Mg}^{+2}) \gamma_{\text{SO}_4} (\text{SO}_4^{-2}) / (\gamma_{\text{MgSO}_4} K2)\end{aligned}$$

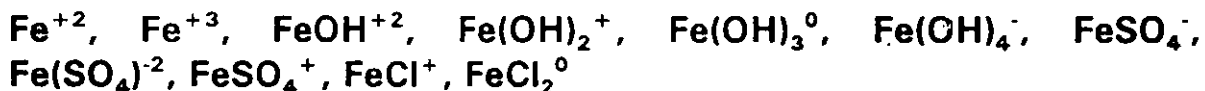
### EQUILIBRIO ÁCIDO - BASE

$$\begin{aligned}(\text{HSO}_4^-) &= \gamma_{\text{H}} (\text{H}^+) \gamma_{\text{SO}_4} (\text{SO}_4^{-2}) / (\gamma_{\text{HSO}_4} K3) \\ (\text{OH}^-) &= K_w / \gamma_{\text{H}} (\text{H}^+) \gamma_{\text{OH}}\end{aligned}$$

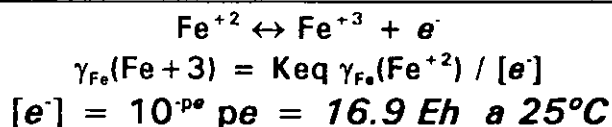
Únicamente es posible conjuntar 8 ecuaciones, por lo que la concentración de  $\text{H}^+$  debe de medirse. Si se mide el pH del agua subterránea en campo, se tiene la concentración faltante, ya que por definición:

$$(\text{H}^+) = \gamma_{\text{H}} 10^{-\text{pH}}$$

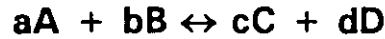
Cuando se añaden a la solución especies que se presentan en más de un estado de oxidación (hierro por ejemplo) se presenta las siguientes especies:



Es necesario modificar las ecuaciones previas ligeramente. El  $\text{Fe}^{+2}$  se puede calcular con ecuaciones de balance de masa. Para los complejos se utilizan reacciones de disociación o de equilibrio ácido-base. Para el caso del  $\text{Fe} + 3$ , no es posible plantear una ecuación



**• ESTADO DE SATURACIÓN DE LA SOLUCIÓN CON RESPECTO A VARIAS FASES SÓLIDAS**



por la Ley de acción de masas, si el sistema está en equilibrio:

$$K_{eq} = [C]^c [D]^d / [A]^a [B]^b$$

Si la reacción no está en equilibrio, entonces el lado derecho de la ecuación no es igual a  $K_{eq}$ , por lo que denomina Producto de Actividad Iónica (PAI), que se utiliza para conocer el estado de saturación de la solución, con relación a la fase (mineral) analizada.

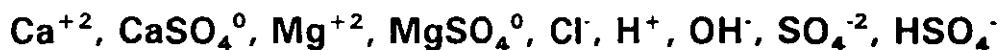
$PAI/K_{eq} < 1$	$\text{Log } PAI/K_{eq} < 0$	SUBSATURADA
$PAI/K_{eq} > 1$	$\text{Log } PAI/K_{eq} > 0$	SOBRESATURADA
$PAI/K_{eq} = 1$	$\text{Log } PAI/K_{eq} = 0$	EQUILIBRIO

**COMO FUNCIONA EL PROGRAMA PRINCIPAL**

Un agua natural contiene Ca, Mg, Cl,  $SO_4$ , además de  $H^+$  y  $OH^-$ , iones que siempre están presentes en cualquier agua.

DATOS:  $(Ca)_T$   $(Mg)_T$   $(Cl)_T$   $(SO_4)_T$  medidos en el laboratorio.

Para esa composición las siguientes especies químicas estarán presentes:



En total se tienen nueve (9) incógnitas, por lo que es necesario plantear un sistema de nueve ecuaciones linealmente independientes

\*\*\* COMPUTED RESULTS: DESCRIPTION OF SOLUTION \*\*\*

		Effective										
T	pH	TDS ppm	Ionic Str	pO2 Atm	pCO2 Atm	pCH4 Atm	CO2 Tot	Uncom CO2	ppm Uncom CO2	Ncrb Alk		
29.50	7.350	344.6	.00493	4.87E-37	7.35E-03	3.14E-71	.00277	2.53E-03	1.11E+02	3.05E-06		
I	Species	Anal ppm	Calc ppm	Anal Molal	Calc Molal	Activity	Act Coeff	-Log Act				
0	Ca	29.220	26.744	7.293E-04	6.675E-04	4.966E-04	.7440	3.304				
28	CaOH		.000247		4.337E-09	4.020E-09	.9270	8.396				
31	CaSO4 aq	0	5.676		4.171E-05	4.176E-05	1.0011	4.379				
81	CaHSO4	1	.000002		1.260E-11	1.168E-11	.9270	10.932				
29	CaHCO3	1	1.721		1.703E-05	1.578E-05	.9270	4.802				
30	CaCO3 aq	0	.245		2.453E-06	2.455E-06	1.0011	5.610				
100	CaF	1	.034		5.729E-07	5.311E-07	.9270	6.275				
1	Mg	2	.363	.334	1.493E-05	1.375E-05	1.026E-05	.7465	4.989			
18	MgOH	1	.000024		5.848E-10	5.421E-10	.9270	9.266				
22	MgSO4 aq	0	.090		7.511E-07	7.520E-07	1.0011	6.124				
21	MgHCO3	1	.026		3.101E-07	2.875E-07	.9270	6.541				
20	MgCO3 aq	0	.002366		2.807E-08	2.811E-08	1.0011	7.551				
19	MgF	1	.003974		9.180E-08	8.509E-08	.9270	7.070				
2	Na	1	50.220	50.050	2.185E-03	2.178E-03	2.020E-03	.9276	2.695			
43	NaSO4	-1		.532		4.469E-06	4.143E-06	.9270	5.383			
42	NaHCO3aq	0		.223		2.657E-06	2.660E-06	1.0011	5.575			
41	NaCO3	-1		.011		1.353E-07	1.254E-07	.9270	6.902			
297	NaF aq	0		.001106		2.634E-08	2.637E-08	1.0011	7.579			
3	K	1	2.845	2.836	7.278E-05	7.256E-05	6.721E-05	.9262	4.173			
45	KSO4	-1		.030		2.190E-07	2.030E-07	.9270	6.692			
63	H	1		.000048		4.785E-08	4.467E-08	.9336	7.350			
26	OH	-1		.005737		3.374E-07	3.128E-07	.9270	6.505			
17	CO3	-2		.216		3.598E-06	2.678E-06	.7444	5.572			
6	HCO3	-1	155.920	153.746	2.556E-03	2.521E-03	2.341E-03	.9289	2.631			
85	H2CO3 aq	0		13.853		2.234E-04	2.237E-04	1.0012	3.650			
5	SO4	-2	56.000	51.467	5.832E-04	5.360E-04	3.978E-04	.7422	3.400			
62	HSO4	-1		.000205		2.111E-09	1.957E-09	.9270	8.708			
61	F	-1	2.300	2.287	1.211E-04	1.204E-04	1.116E-04	.9270	3.952			
125	HF aq	0		.000160		8.016E-09	8.025E-09	1.0011	8.096			
126	HF2	-1		.000000		3.775E-12	3.500E-12	.9270	11.456			
296	H2F2 aq	0		.000000		1.455E-16	1.457E-16	1.0011	15.837			
4	Cl	-1	1.500	1.500	4.232E-05	4.232E-05	3.920E-05	.9262	4.407			
34	SiO2 tot	0	46.000						7.658E-04			
23	H4SiO4aq	0		73.321		7.631E-04	7.640E-04	1.0011	3.117			
24	H3SiO4	-1		.258		2.713E-06	2.515E-06	.9270	5.599			
25	H2SiO4	-2		.000025		2.616E-10	1.932E-10	.7384	9.714			
124	SiF6	-2		.000000		8.019E-27	5.922E-27	.7384	26.228			
84	NO3	-1	.010000	.010000	1.613E-07	1.613E-07	1.496E-07	.9270	6.825			
80	Li	1	.109	.109	1.577E-05	1.574E-05	1.459E-05	.9270	4.836			
82	LiSO4	-1		.002815		2.734E-08	2.534E-08	.9270	7.596			
87	Sr	2	.146	.141	1.670E-06	1.614E-06	1.202E-06	.7448	5.920			
88	SrOH	1		.000000		2.754E-12	2.557E-12	.9283	11.592			
68	SrHCO3	1		.008036		5.408E-08	5.024E-08	.9289	7.299			
95	SrCO3 aq	0		.000348		2.361E-09	2.348E-09	.9943	8.629			

1 617CNA

\*\*\* SOME RATIOS THAT MAY BE USEFUL... \*\*\*

Mole ratios from analytical molality		Log activity ratios	
Cl/Ca	= 5.8034E-02	Log Ca	/H2 = 11.3960
Cl/Mg	= 2.8353E+00	Log Mg	/H2 = 9.7112
Cl/Na	= 1.9369E-02	Log Na	/H1 = 4.6554
Cl/K	= 5.8151E-01	Log K	/H1 = 3.1774
Cl/Al	= 0.0000E+00	Log Al	/H3 = .0000
Cl/Fe	= 0.0000E+00	Log Fe	/H2 = .0000
Cl/SO4	= 7.2577E-02	Log Ca/Mg	= 1.6848
Cl/HCO3	= 1.6557E-02	Log Na/K	= 1.4780
Ca/Mg	= 4.8855E+01	Log Ca/K2	= 5.0411
Na/K	= 3.0023E+01	Log Diss Fe/H2	= 14.7000

42



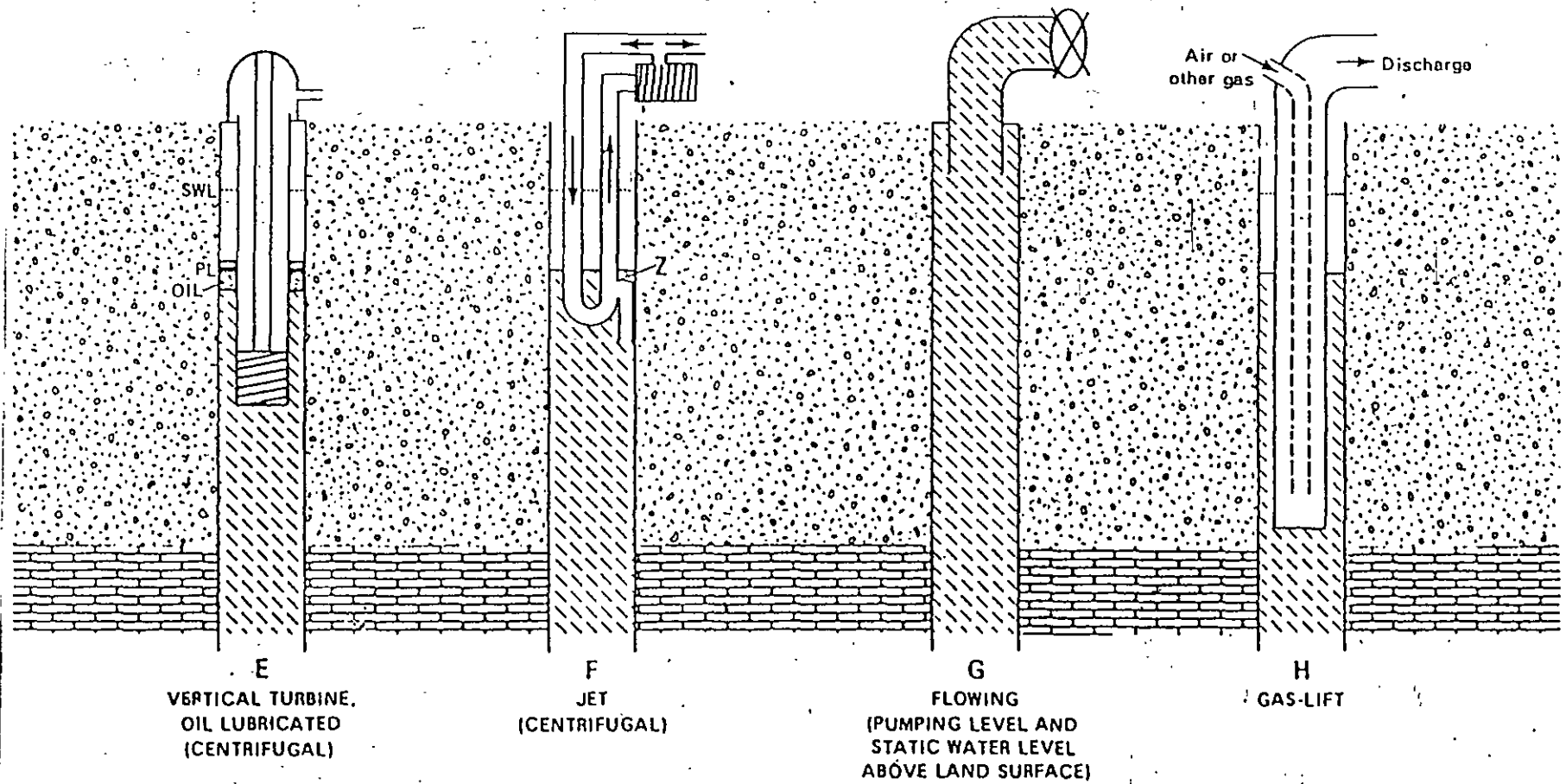
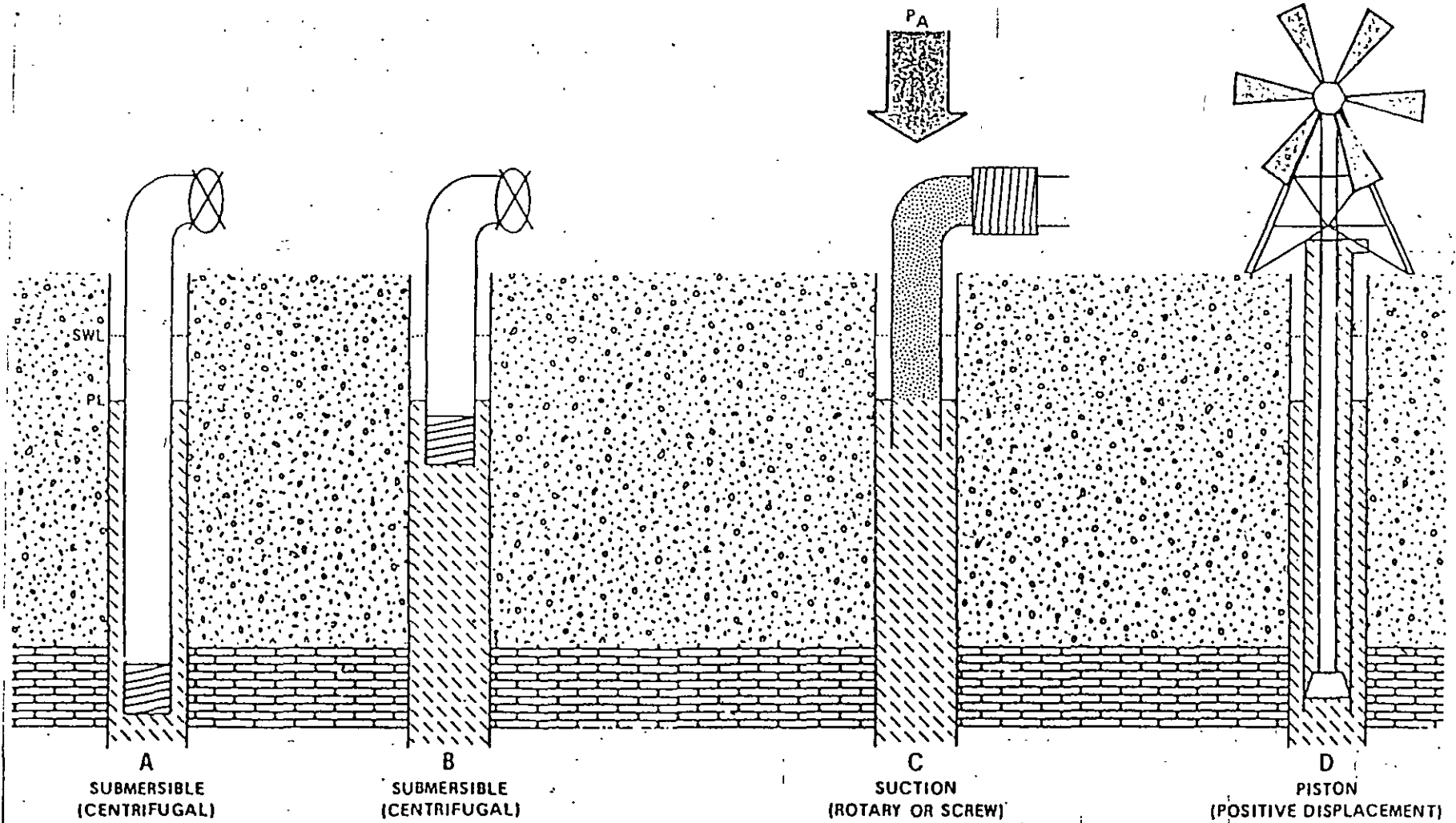


Figure 7.--Pump installations commonly found in ground-water sampling--Continued.



EXPLANATION

$P_A$  ATMOSPHERIC PRESSURE

REGION OF LESS-THAN-AQUIFER PRESSURE

REGION OF LESS-THAN-ATMOSPHERIC PRESSURE

PUMP IMPELLERS

CHECK VALVE

WATER PRODUCING UNIT

SWL..... STATIC WATER LEVEL

PL..... PUMPING WATER LEVEL

Figure 7.--Pump installations commonly found in ground-water sampling.

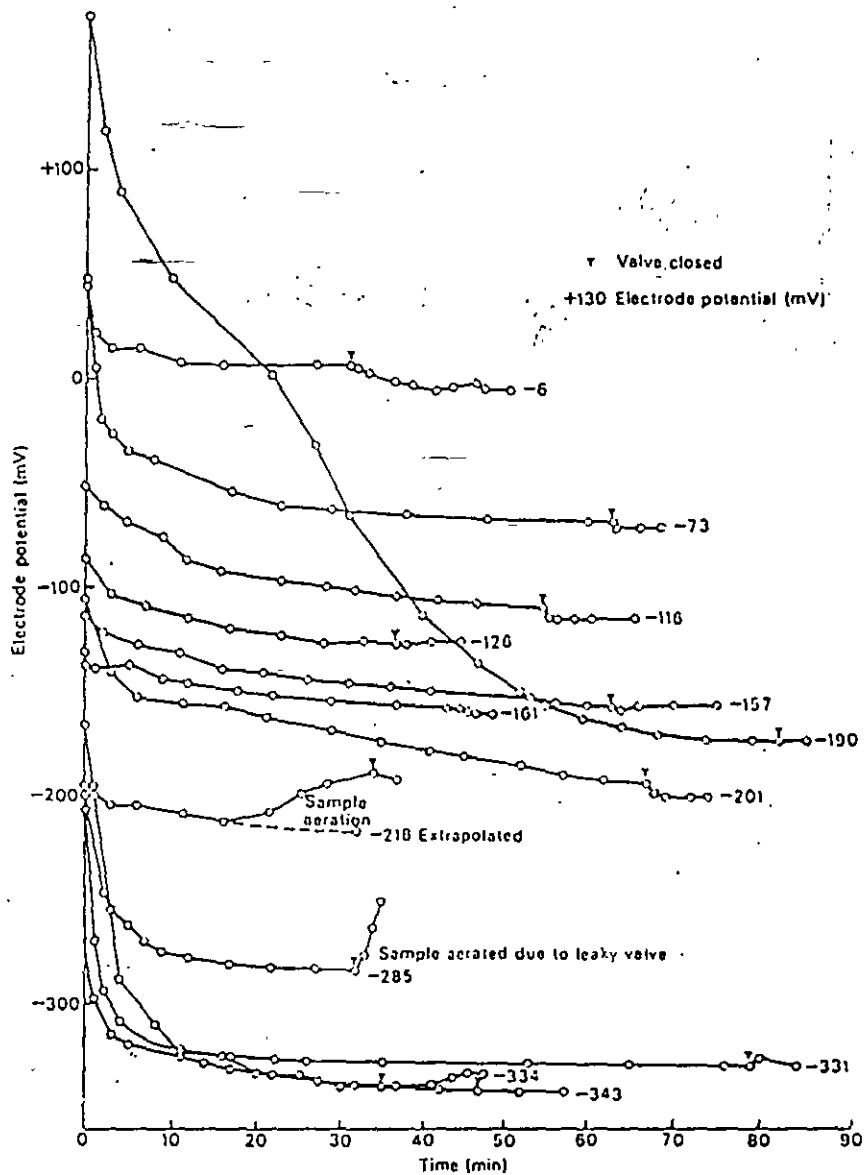


FIG. 6.4 Measurement of redox potential (Eh). Electrode potential ( $E_0$ ) response curves for a platinum/calomel electrode pair immersed in an anaerobic cell for a variety of groundwaters. Note that up to an hour may be needed in some instances to obtain a stable reading. A slight positive streaming potential is apparent for some waters when the tap is turned off. The  $Eh = E_0 + SCE_T$ , where  $SCE_T$  = potential of the saturated calomel electrode against the hydrogen half cell for the temperature of the groundwater.

1 617CNA

\*\*\* COMPUTED RESULTS: SATURATION INDICES (Log AP/KT)

Phase	Log AP/KT	Sigma (A)	Sigma (T)	Log AP/MinKT	Log AP/MaxKT	Log AP	Log KT	Log
			MinKT	Log MaxKT				
17 Anhydrite	-2.026					-6.704	-4.678	
21 Aragonite	<del>-5.10</del>		.020			-8.876	-8.366	
150 Actinite	-6.767					2.520	9.287	
19 Brucite	-6.803					-17.998	-11.195	
12 Calcite	-.369	.020	-.288		-8.876	-8.507	-8.588	
143 Celestite	-2.850		-2.966	-9.320	-6.470		-6.354	
97 Chalcedony	.356					-3.117	-3.473	
20 Chrysotile	-8.729					-60.228	-51.499	
29 Clinoenstite	-4.530	-4.164	-4.824	-21.115	-16.585	-16.951	-16.291	
99 Cristobalite	.410					-3.117	-3.527	
28 Diopside	-4.669					+40.545	-35.876	
11 Dolomite	-2.347					-19.437	-17.090	
340 Epsomite	-6.280					-8.389	-2.109	
62 Fluorite	-.309					-11.209	-10.899	
27 Forsterite	-11.472					-39.113	-27.641	
18 Gypsum	-2.107					-6.704	-4.597	
64 Halite	-8.693					-7.101	1.592	
117 Huntite	-10.310					-40.559	-30.249	
38 Hydrmagnesit	-23.202					-60.242	-37.040	
98 Magadiite	-4.340					-18.640	-14.300	
10 Magnesite	-2.465	-2.215	-2.715	-10.561	-8.096	-8.346	-7.846	
66 Mirabilite	-7.883					-8.790	-.907	
58 Nahcolite	-4.818					-5.325	-.507	
60 Natron	-9.822					-10.962	-1.139	
149 Nesquehonite	-4.877	-5.365	-5.952	-10.561	-5.684	-5.196	-4.609	
101 Quartz	.821					-3.117	-3.938	
36 Sepiolite(c)	-5.000					10.072	15.071	
153 Sepiolite(a)	-8.588					10.072	18.660	
100 SiO2 (a,L)	-.147					-3.117	-2.970	
395 SiO2 (a,M)	-.449					-3.117	-2.667	
399 SrF2	-5.298		-4.718		-13.825	-8.526	-9.106	
142 Strontianite	-2.215		.304		-11.492	-9.278	-11.797	
37 Talc	-4.228	2.000	-2.060	-5.976	16.666	20.894	18.726	22.642
65 Thenardite	-8.604					-8.789	-.185	
61 Thermonatr	-11.056					-10.961	.094	
31 Tremolite	-9.109					-147.552	-138.443	
59 Trona	-15.295					-16.287	-.991	

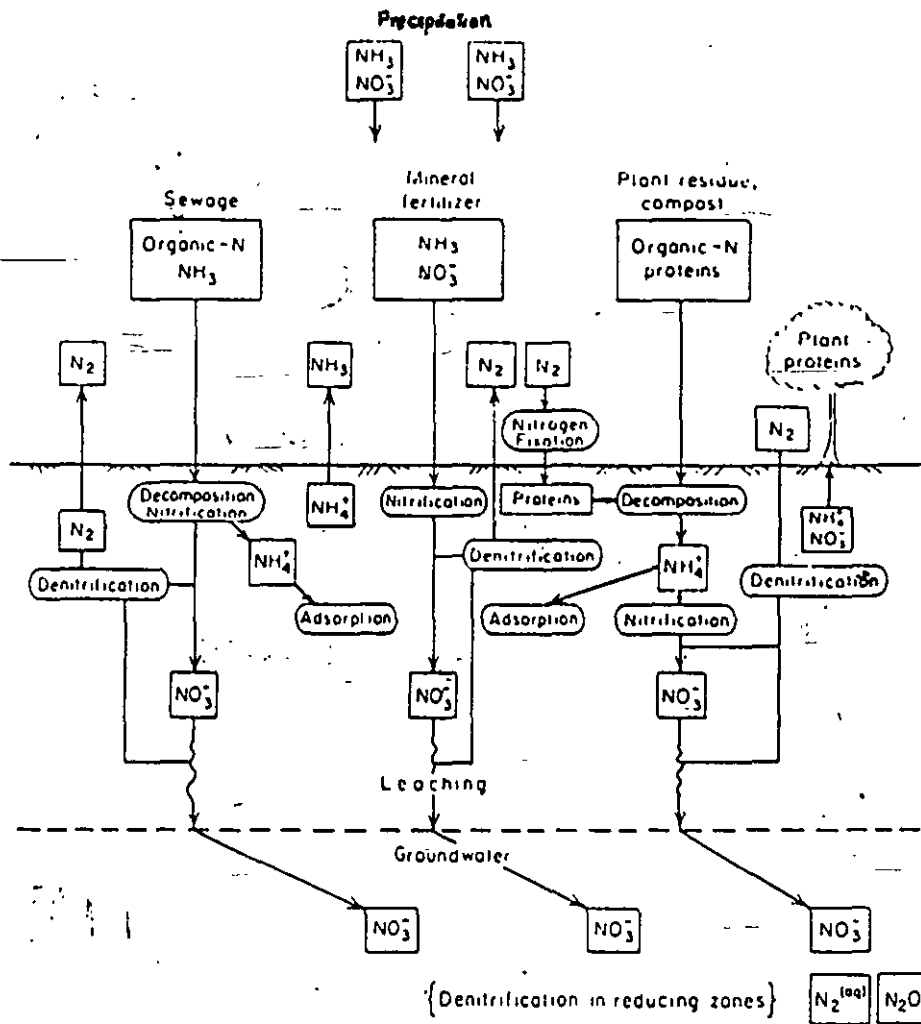


Figure 9.17 Sources and pathways of nitrogen in the subsurface environment.

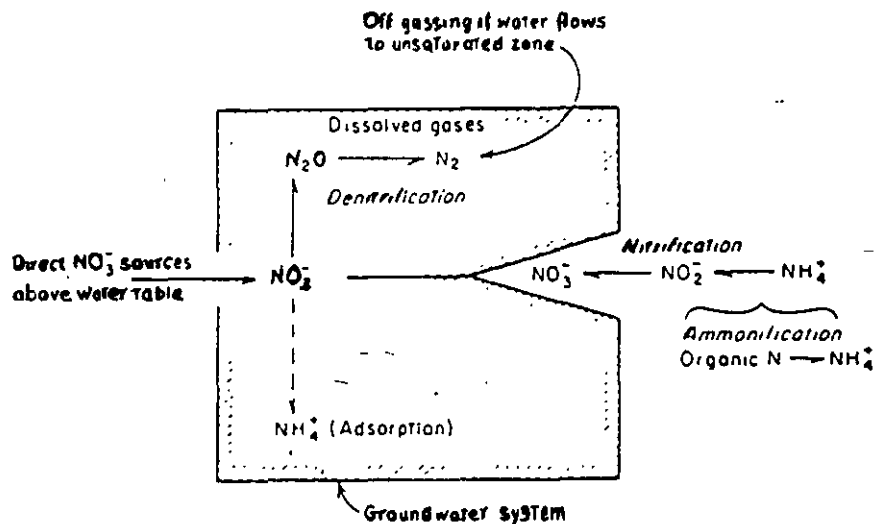


Figure 9.18 Nitrogen inputs and transformations in the groundwater system.

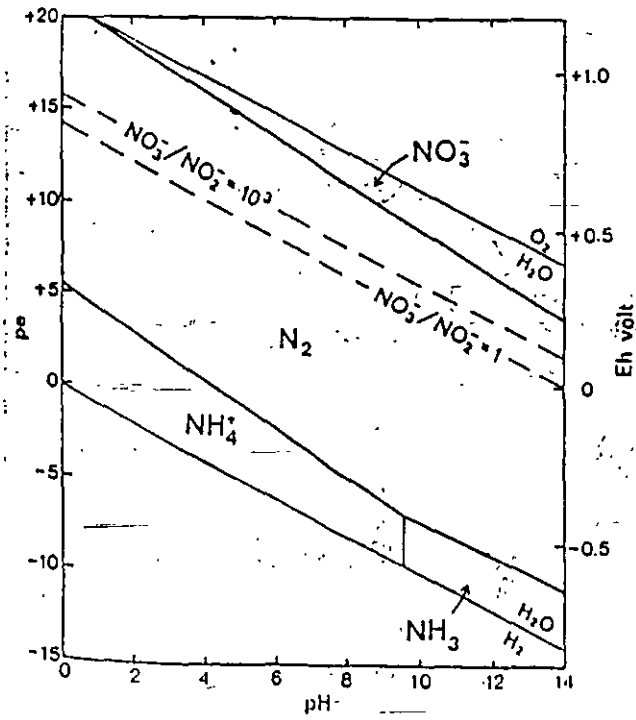


Figure 7.5. pe-pH diagram for the nitrogen system at 25°C. The diagram is valid under the conditions that  $P_{\text{N}_2} = 0.77$  atm and the activities of dissolved species are  $10^{-3}$  unless otherwise specified. Metastable boundaries are indicated by dashed lines.

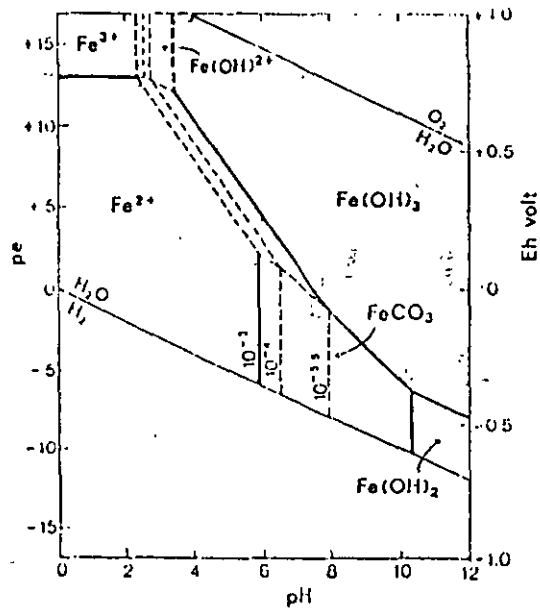


Figure 7.6. Stability relations in the system, Fe-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> at 25°C.  $TIC = 10^{-2.5}$  mol/l. Solid/solution boundaries are specified for different  $\text{Fe}^{2+}$  activities. Heavy lines indicate 'realistic' boundaries that correspond to usual field conditions.

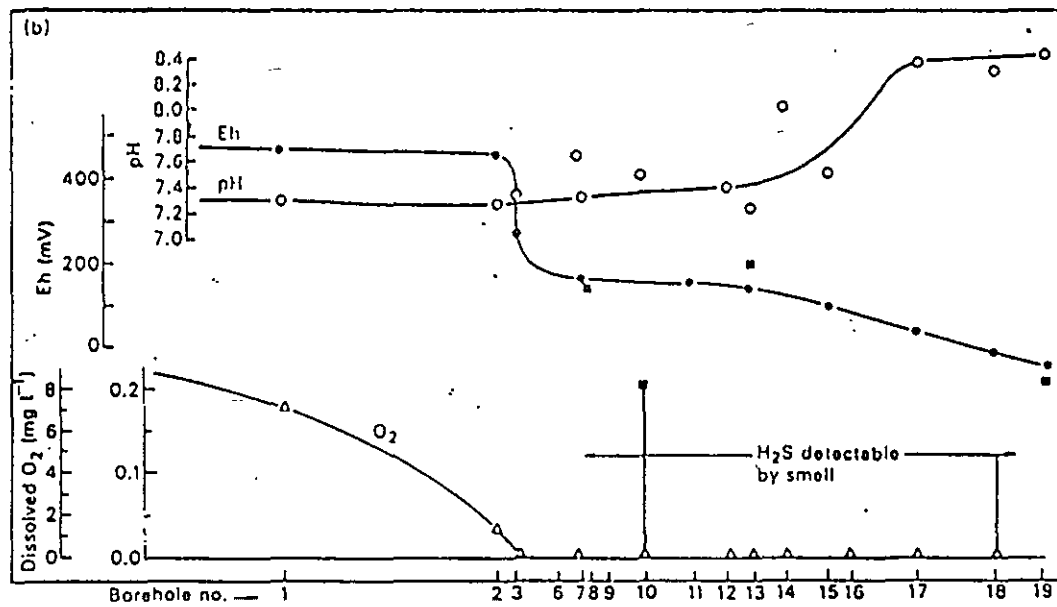
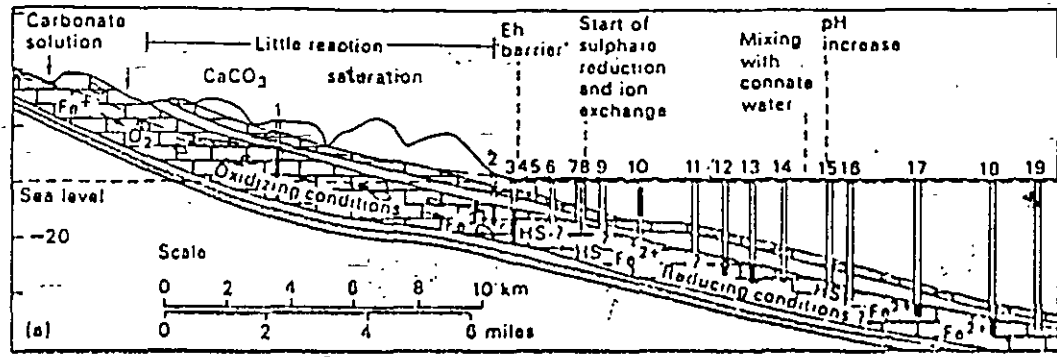


FIG. 6.7 Geochemical processes occurring in the Jurassic Limestone (Lincolnshire Limestone) groundwaters and rock matrix as the water flows downgradient beneath confining strata. (a) geological cross-section showing the principal boreholes investigated with their depth of penetration and a summary of the main processes taking place. (b) Downgradient variation in Eh, pH, O<sub>2</sub> and HS<sup>-</sup>. On the facing page (c) downgradient variation in the main species involved in redox reactions and (d) schematic representation of oxidized and reduced lithologies in the aquifer and their relationship to the groundwater flow.

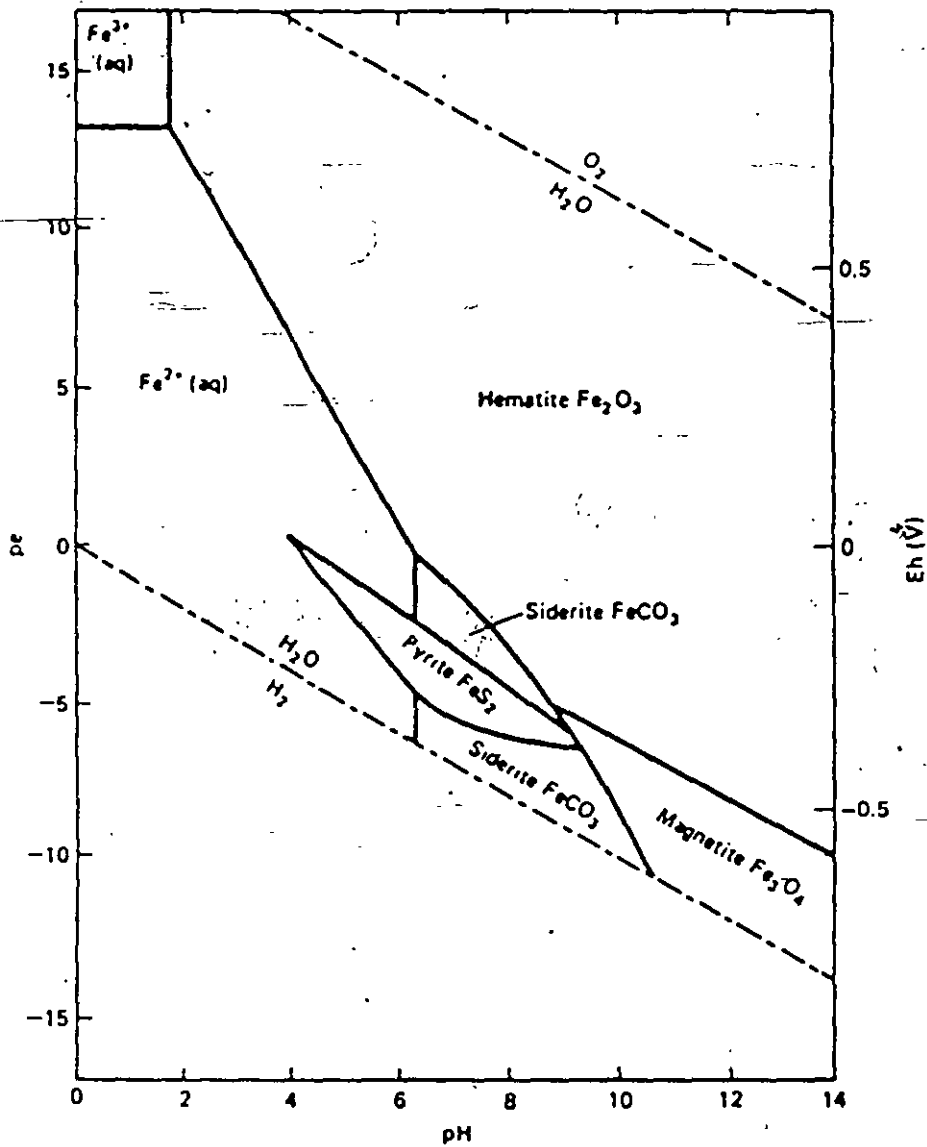


Figure 13-12 Stability relations in the system Fe-O-H<sub>2</sub>O-S-CO<sub>2</sub> at 25°C, assuming  $\Sigma S = 10^{-6}$ ,  $\Sigma CO_2 = 10^0$  (after Garrels and Christ, 1965).

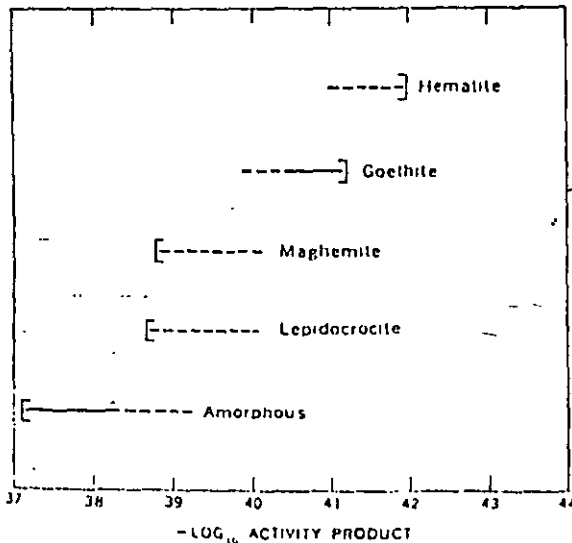
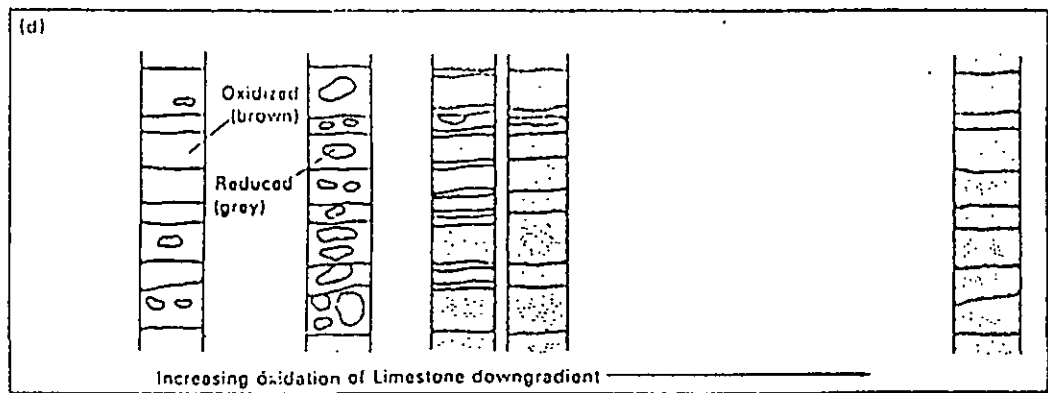
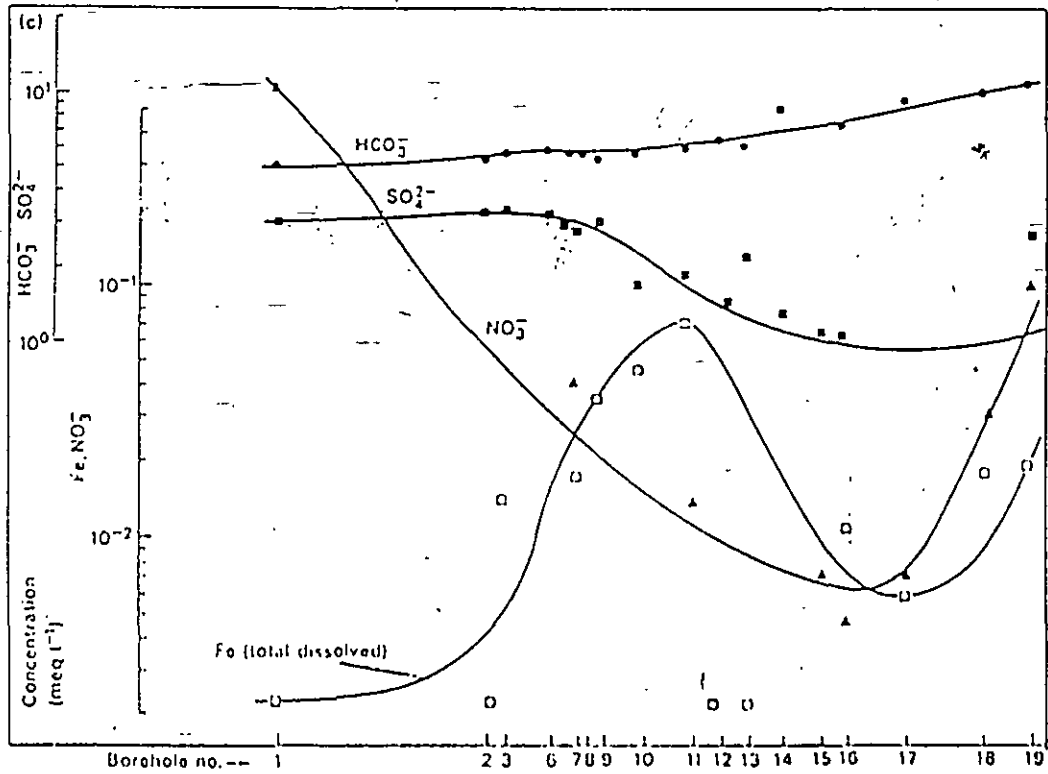


Figure 7.34. The stability ranges of common Fe-oxyhydroxides, hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), goethite ( $\alpha$ -FeOOH), maghemite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), lepidocrocite ( $\gamma$ -FeOOH) and amorphous Fe(OH)<sub>3</sub>, which is equivalent to ferrihydrite (5Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 9H<sub>2</sub>O). The activity products are expressed as  $IAP = [Fe^{III}][OH^-]^3$  and are given for 25°C and 1 atm (Langmuir, 1969).

Controlen las  
concentraciones  
de Fe en el  
agua subteranea







## INTRODUCCIÓN AL USO DEL MODELO GEOQUÍMICO WQ4F

*Para alimentar el modelo, se utilizan dos clases de datos:*

- DATOS DE LABORATORIO: Concentraciones de especies disueltas
- DATOS DE CAMPO: Temperatura, pH, Eh, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos.

EL PROGRAMA CALCULA:

- ESPECIACIÓN. O SEA LAS CONCENTRACIONES DE TODAS LAS ESPECIES EN SOLUCIÓN

La concentración de calcio que rinde el laboratorio es su concentración total, en la que NO se indican específicamente todas las especies (complejos) presentes

$(Ca)_{Total} =$  Concentración total de calcio (LABORATORIO)

$(Ca^{+2})$   $(CaHCO_3^+)$ ,  $(CaCO_3^0)$ ,  $(CaSO_4^0)$ , Concentración del ión libre y sus complejos (se calculan con el modelo)

- LAS ACTIVIDADES Y COEFICIENTES DE ACTIVIDAD DE TODAS LAS ESPECIES DISUELTAS

La actividad es la concentración que realmente participa en la reacción, esto desde el punto de vista termodinámico.

$$a_i = m\gamma_i$$

La actividad se calcula a partir de modelos no termodinámicos y de la fuerza iónica (I)

$$I = 0.5 \sum m z_i^2$$

# Modelos de Especiación Acuosa

- **Modelos de Asociación de Iones** Consideran que las soluciones **NO** son ideales (calcula coeficientes de actividad e incluye formación de complejos)
- **Modelos de Interacción Específica**. Definen el exceso de energía libre de las soluciones y consideran coeficientes de actividad en un amplio rango de concentraciones por medio de la aproximación de Pitzer.

# Modelos de Asociación de Iones

- Calcula coeficientes de actividad a partir de la teoría de Debye-Hückel. El cálculo de complejos se realiza a partir de relaciones definidas a partir de ley de acción de masas
- Consisten de: *i*) ecuaciones de balance de masa para cada elemento, *ii*) constantes de equilibrio para cada uno de los complejos posibles y *iii*) ecuaciones para definir los coeficientes de actividad

# Que información se requiere para el cálculo de Índices de Saturación?

**DATOS DE LABORATORIO:** Concentraciones de especies disueltas (ANIONES, CATIONES)

**DATOS DE CAMPO:** Temperatura, pH, Eh, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos.

$(Ca)_{total}$  = Concentración total de calcio (LABORATORIO)

$(Ca^{2+})$ ,  $(CaHCO_3^+)$ ,  $(CaCO_3^0)$ ,  $(CaSO_4^0)$ , Concentración del ión libre y sus complejos (se calculan con el modelo)

La **actividad** es la concentración que realmente participa en la reacción, esto desde el punto de vista termodinámico.

$$a_i = m_i$$

Se calcula a partir de modelos no termodinámicos y de la fuerza iónica

$$I = 0.5 \sum m_i z_i^2$$

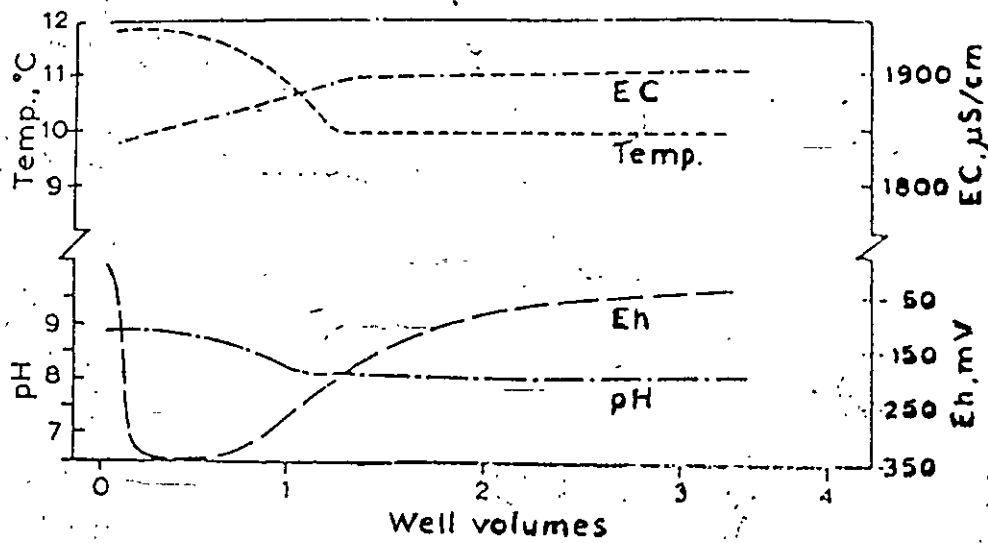


Figure 1.5. The change in chemical composition of discharge during well flushing (modified from Lloyd and Heathcote, 1985).

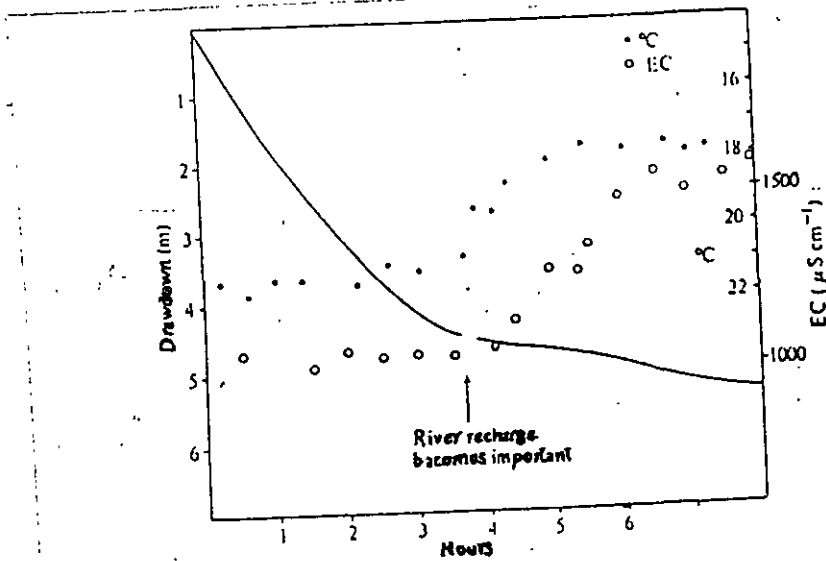


Fig. 4.5. Temperature (•) and electrical conductivity (EC) (○) indicating the effects of river recharge during a pumping test.

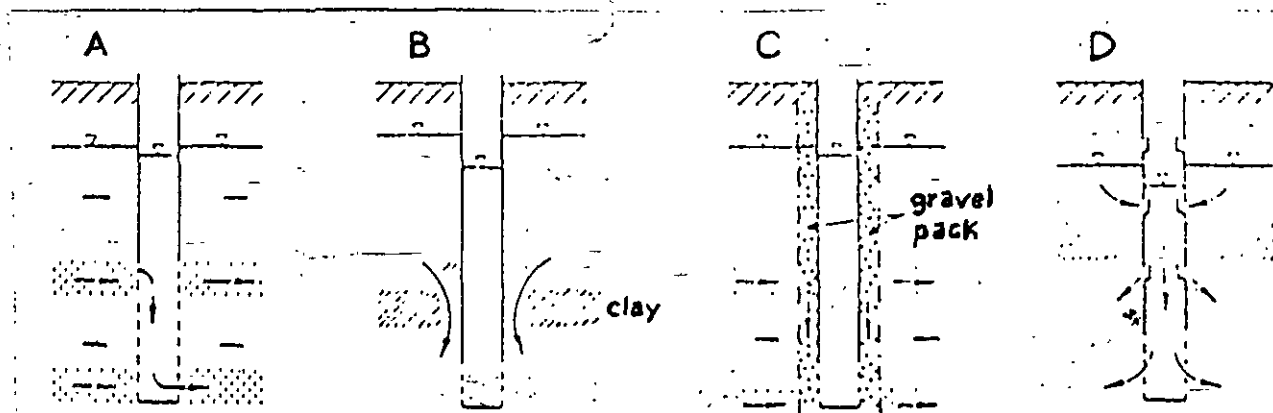
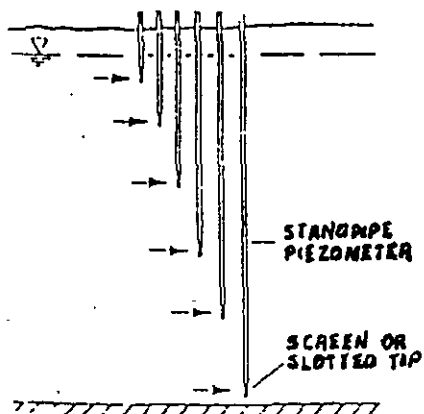
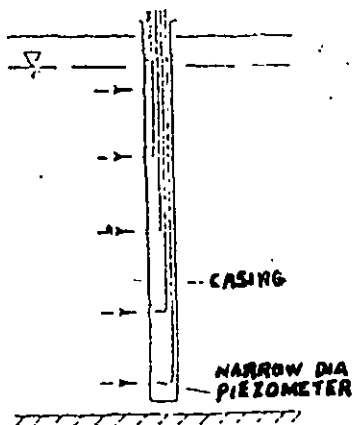


Figure 1.6. Different forms of leakage and short circuiting during groundwater sampling from screened wells (modified from Stuyfzand, 1989). For explanation see text.

CONVENTIONAL PIEZOMETERS



MULTIPLE PIEZOMETERS IN A SINGLE CASING



PACKER SAMPLING IN A LONG WELL SCREEN

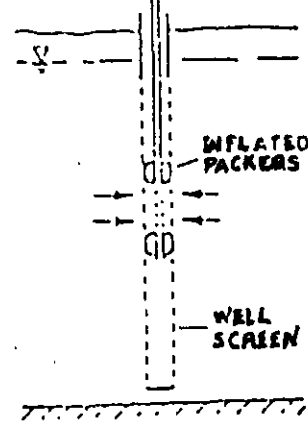
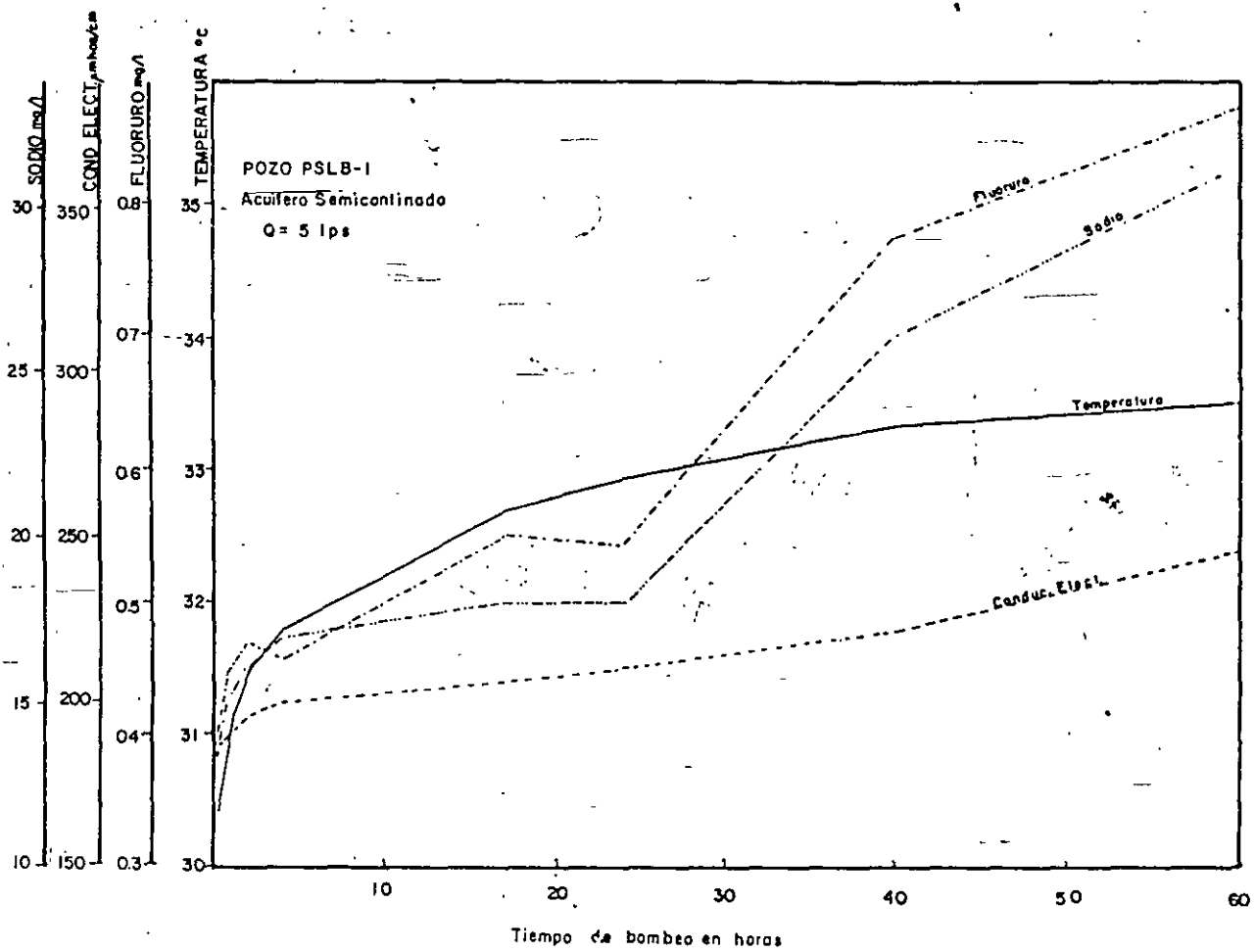
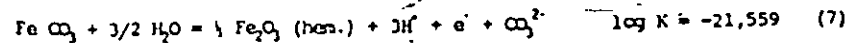
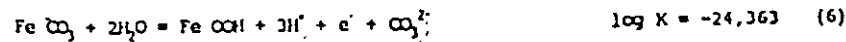
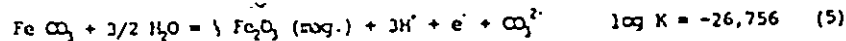
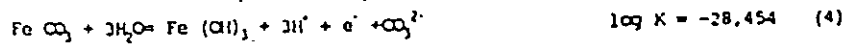


Figure 1.7. Three approaches for depth specific groundwater sampling (Cherry, 1983).







de donde se deduce la expresión general que define el pE en aguas carbonicas (Criaud y Fouillac, 1986).

$$\text{pE} = -\log K + \log (\text{CO}_3^{2-}) - 3 \cdot \text{pH} \quad (8)$$

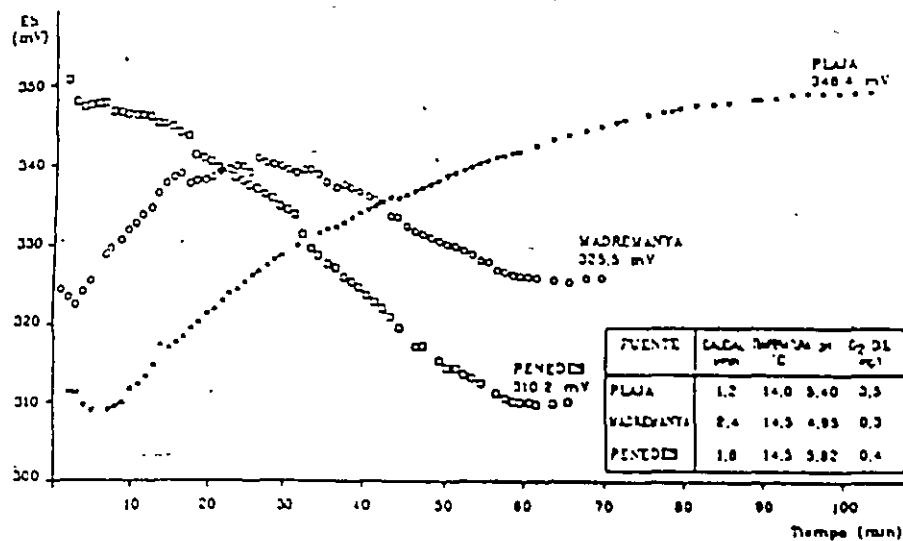


Tabla 2. Valores de pE experimentales y calculados.

Parametro	Fuente		
	Penedes	Madresanya	Playa
Actividad $\text{Fe}^{2+}$ (mol/l)	4,73 E-5	1,26 E-4	1,00 E-4
Actividad $\text{CO}_3^{2-}$ (mol/l)	4,38 E-7	5,47 E-8	1,38 E-8
pH	5,82	4,95	5,40
pE exp.	5,43	5,71	6,11
pE (Fe (OH) <sub>3</sub> )	4,63	6,34	4,39
pE (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> m)	2,93	4,64	2,70
pE (FeOOH)	0,54	2,25	0,30
pE (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-2,26	-0,55	-2,50

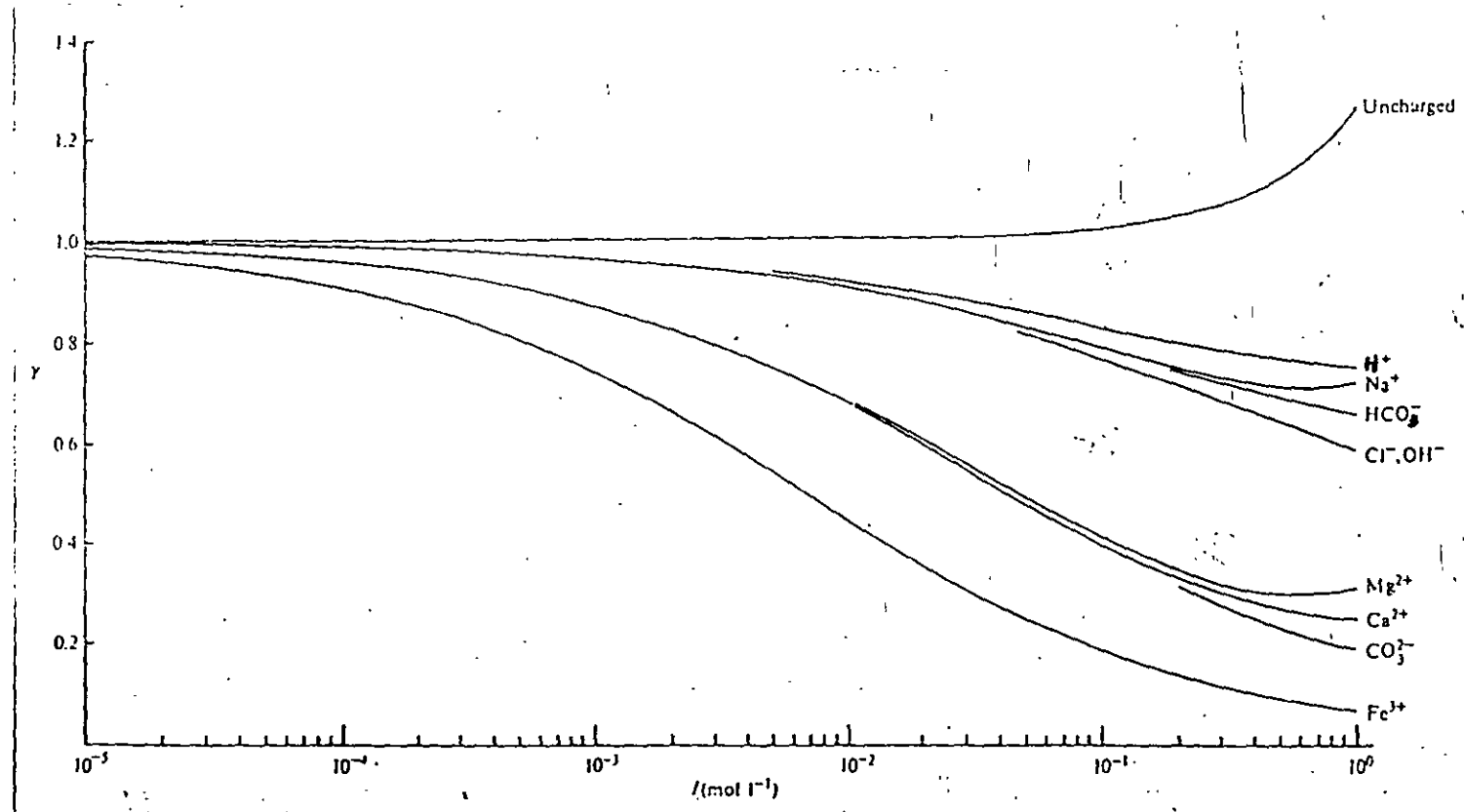


Fig. 3.1. Activity coefficients as a function of ionic strength.

## APLICACIONES PRÁCTICAS DEL MODELO WQ4F

- DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CERTEZA DE UN ANÁLISIS QUÍMICO
- OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE SATURACIÓN CON RESPECTO A MINERALES QUE CONSTITUYEN EL ACUÍFERO
- CÁLCULO DE DIVERSAS RELACIONES QUE SE UTILIZAN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD.
- AYUDA EN LA DETERMINACIÓN DE CORROSIÓN E INCRUSTACIÓN DE TUBERIAS DE ADEME, INTERPRETANDO ÍNDICES DE SATURACIÓN DE MINERALES DE HIERRO JUNTO CON DIAGRAMAS pH-Eh.
- PREDICCIÓN DE CONCENTRACIONES DE EQUILIBRIO DE ESPECIES CONTAMINANTES DE INTERÉS.
- DETERMINACIÓN DE DIFERENTES COMPLEJOS QUE FORMARÁN EL CONTAMINANTE DE INTERÉS, NECESARIOS CUANDO SE REALIZAN EXPERIMENTOS DE ADSORCIÓN O RETARDAMIENTO.
- ALGUNAS ESPECIES ORGÁNICAS QUE PUEDEN FORMAR COMPLEJOS CON LOS CONTAMINANTES INORGÁNICOS.

## PRINCIPALES VENTAJAS

- SU DISEÑO INTERACTIVO FACILITA LA ENTRADA DE DATOS
- FACILIDAD PARA MANEJAR VARIOS ANÁLISIS A LA VEZ
- EL TIEMPO MÁQUINA ES CORTO
- COMO SE DERIVA DE LA FAMILIA DE PROGRAMAS WATEQ ESTÁ MUY BIEN DOCUMENTADO
- FÁCILMENTE PUEDEN ACTUALIZARSE LAS BASES DE DATOS
- PUEDE INSTALARSE CASI EN CUALQUIER COMPUTADORA

# Modelación Hidrogeoquímica

La modelación hidrogeoquímica trata de interpretar y/o predecir las reacciones entre minerales, gases y materia orgánica con soluciones acuosas en sistemas (reales o hipotéticos) agua-roca.

# Modelación Hidrogeoquímica

- **MODELACIÓN INVERSA.** Combina la información de índices de saturación con relación a varios minerales, para cuantificar las reacciones en el sistema agua-roca. (BALANCE, NETPATH)
- **MODELACIÓN TEÓRICA O DE PREDICCIÓN.** Utiliza un modelo de especiación para predecir los resultados de reacciones hipotéticas. (PATH1, EQ3/6, PHREEQE, CHILLER)

**COMPLEJO.**- Especie disuelta a partir de la unión de dos o más especies más simples, cada una de las cuales puede existir en solución de manera independiente.

EJEMPLO: Complejos de Aluminio ( $Al^{+3}$ )

$Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_4^-$ ,  $AlF_6^{3-}$ , con compuestos orgánicos, etc.

**CONSTANTE DE ESTABILIDAD**



$$K_{est} = \frac{[Al(OH)_4^-]}{[Al^{+3}] [OH^-]^4}$$

En la medida de que  $K_{est}$  sea considerable, mayor será la estabilidad del complejo.

**IMPORTANCIA: MODIFICAN LAS RELACIONES ENTRE LA ACTIVIDAD Y LA CONCENTRACIÓN**

**SI EXISTEN COMPLEJOS (SIEMPRE EXISTIRÁN!!!!) ENTONCES:**

*Concentración total del elemento  $\neq$  Concentración del ión libre.*

$$(Al)_{Total} = (Al^{+3}) + (Al(OH)^{+2}) + (Al(OH)_2^+) + (Al(OH)_3^0) + (Al(OH)_4^-) + \dots$$

+ .(muchos más complejos)

Por lo tanto el valor de  $(Al^{+3})$  será menor que el valor de  $(Al)_{Total}$  obtenido del laboratorio.

**SON LOS COMPLEJOS IMPORTANTES?**

$$K_{est} CaSO_4^0 = 10^{2.23}$$

$$Ca^{+2} + SO_4^{-2} \leftrightarrow CaSO_4^0$$

$$K_{est} = \frac{[CaSO_4^0]}{[Ca^{+2}] [SO_4^{-2}]}$$

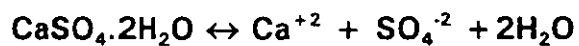
Si suponemos que la reacción se encuentra en equilibrio

$$[CaSO_4^0] = K_{est} K_{eq} = 10^{2.23} 10^{-4.36}$$

$$[CaSO_4^0] = 7.4 \times 10^{-3} \text{ moles / l}$$

PROBLEMAS DE CÁLCULO DE CONSTANTES DE EQUILIBRIO

Calcular el  $K_{ps}$  del yeso a 25°C a partir de datos termodinámicos.



$$K_{\text{eq}} = \frac{[\text{Ca}^{+2}] [\text{SO}_4^{-2}] [\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]}$$

ENERGÍA ESTÁNDAR (kJ/mol)

CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-1797.28	Ca <sup>+2</sup>	-553.58
H <sub>2</sub> O	-237.13	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-744.53

$$\Delta G_R^0 = -553.58 - 744.53 - 2 \times 273.13 - (-1797.28)$$

$$\Delta G_R^0 = 24.91 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{Log } K_{ps} = -\Delta G_R^0 / 5.708 = -4.36$$

$$K_{ps} \text{ Yeso} = 10^{-4.36}$$

Cálculo del producto de solubilidad para la disolución de calcita con base en datos de Energía libre de Gibbs.



ENERGÍA ESTÁNDAR (kJ/mol)

CaCO <sub>3</sub>	-1128.8	Ca <sup>+2</sup>	-553.58
	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-527.58	

$$\Delta G_R^0 = -553.6 - 527.8 - (-1128.8) = 47.4 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G_R^0 = -RT \ln K_{sp}$$

$$\text{Log } K_{sp} = -8.31$$



# INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA CONSTANTE DE EQUILIBRIO

$$\left( \frac{d(\Delta G^\circ / T)}{dT} \right)_p = -\frac{\Delta H^\circ}{T^2} \quad \text{ECUACION DE Gibbs-Helmholtz}$$

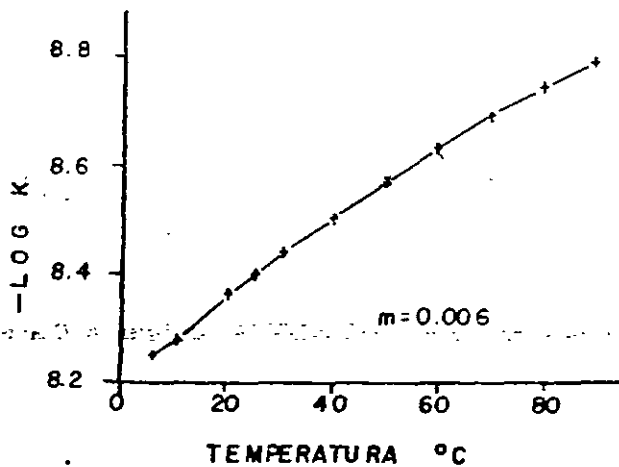
$$\ln(K_1/K_2) = -(\Delta H^\circ/R)(1/T_1 - 1/T_2)$$

$$\frac{d \ln K}{dT} = -\frac{\Delta H^\circ}{RT^2} \quad \text{ECUACION DE Van't Hoff}$$

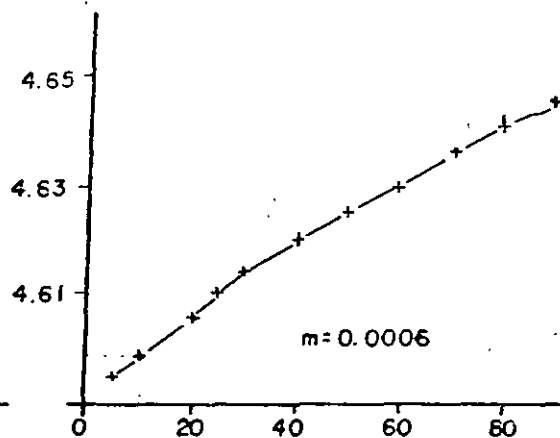
$T_2 =$  TEMPERATURA DE REFERENCIA

$$\ln(K_1/K_2) = \int_{T_2}^{T_1} (\Delta H/RT^2) dT$$

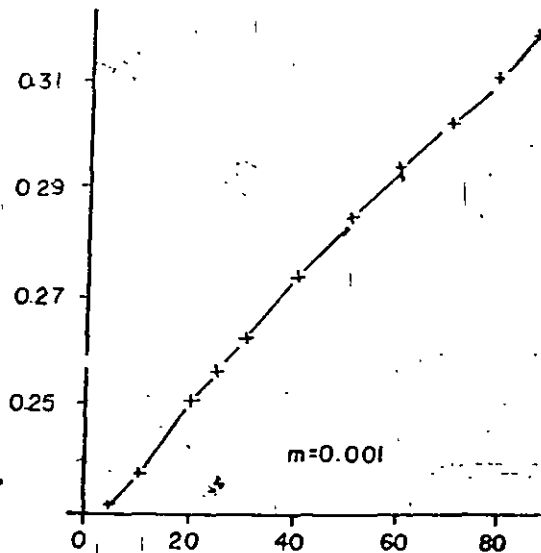
VALIDA PARA REACCIONES EN LAS QUE LA CAPACIDAD CALORIFICA ES CERCANA A CERO Y LA ENTALPIA ES CASI O INDEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA



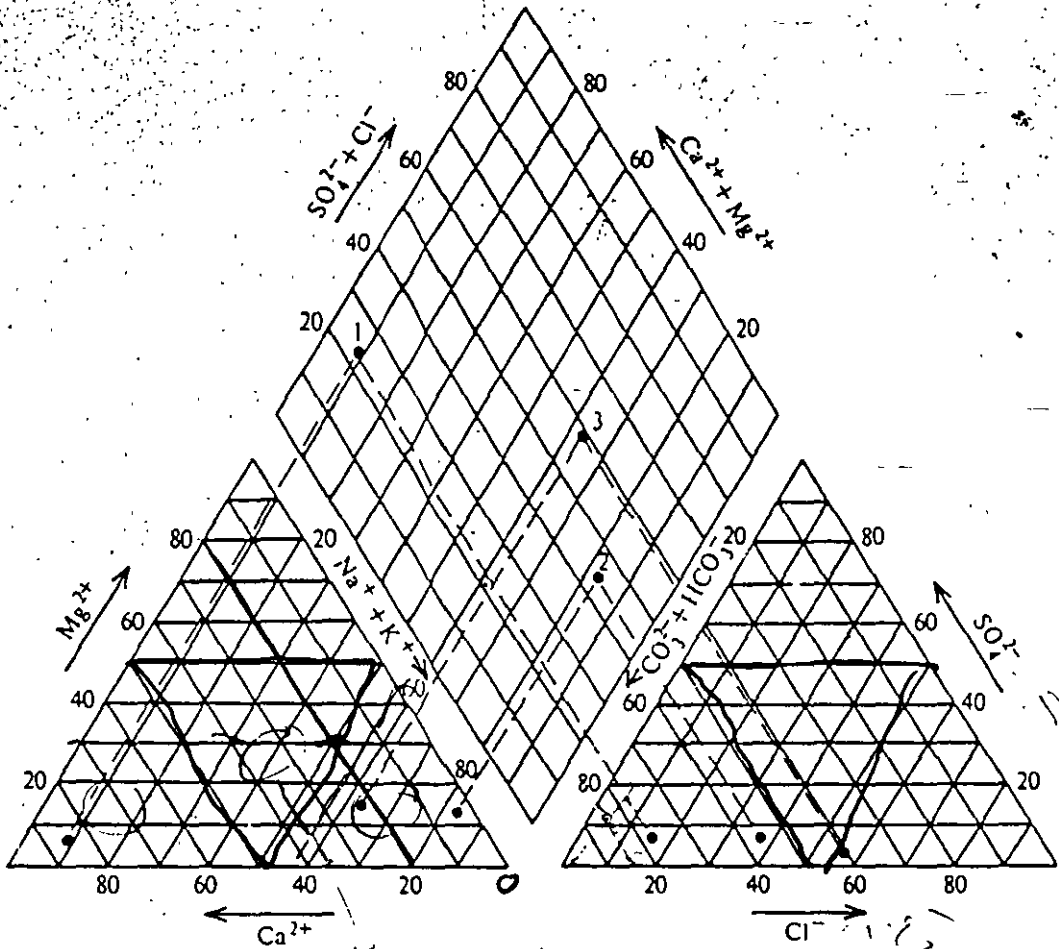
CALCITA



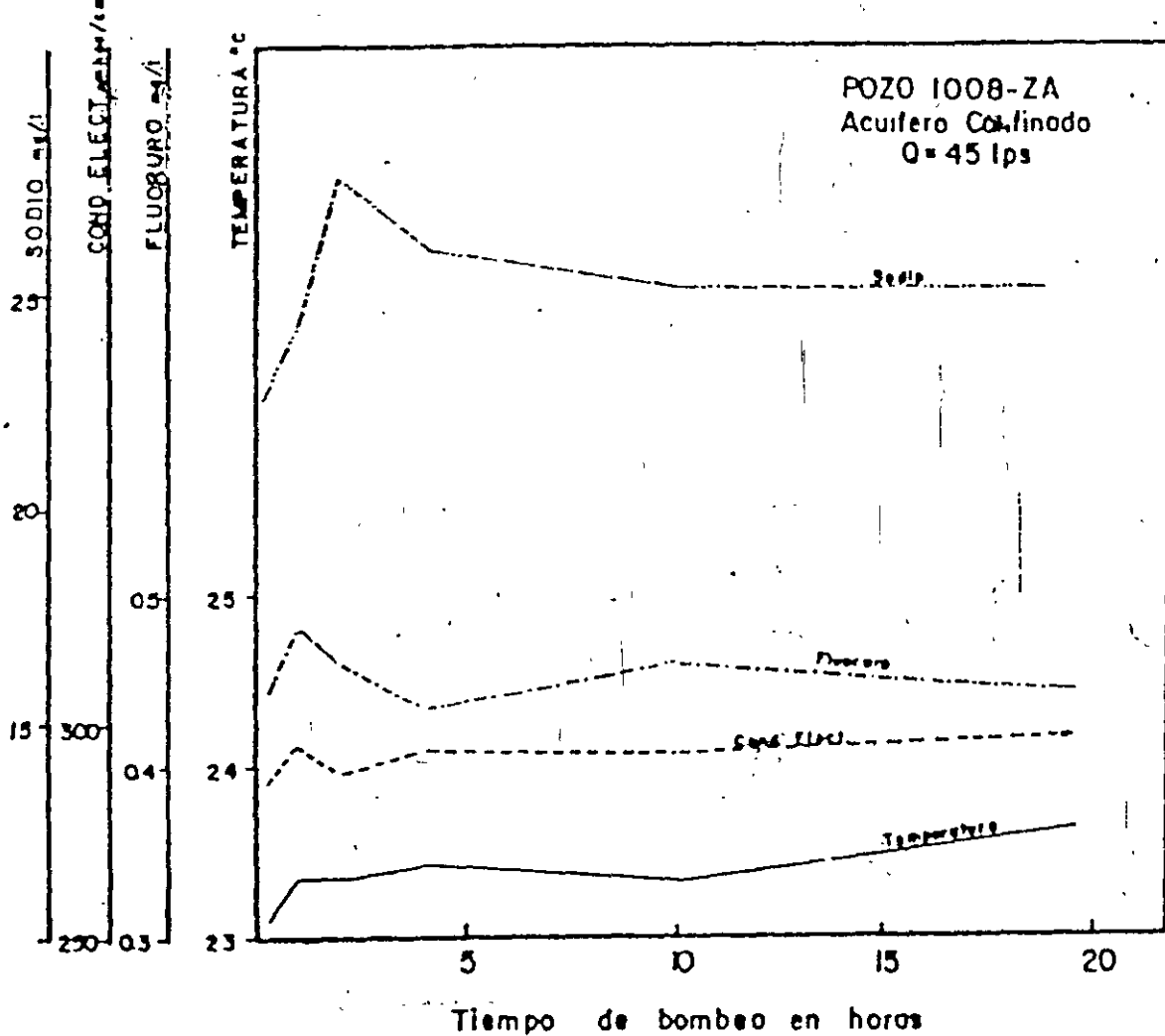
YESO



TENARDITA

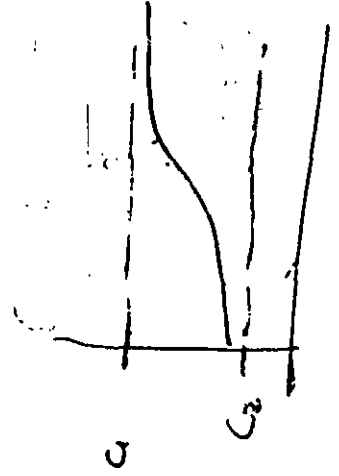
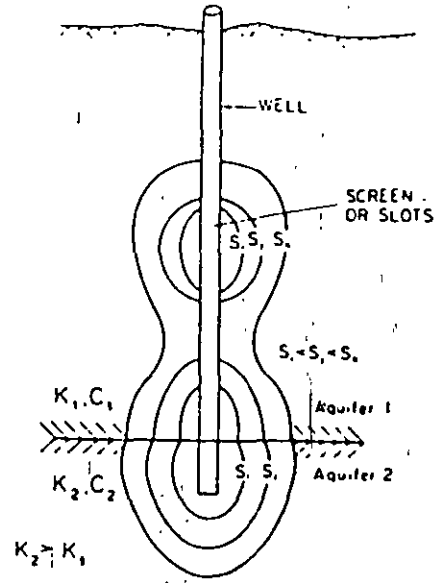
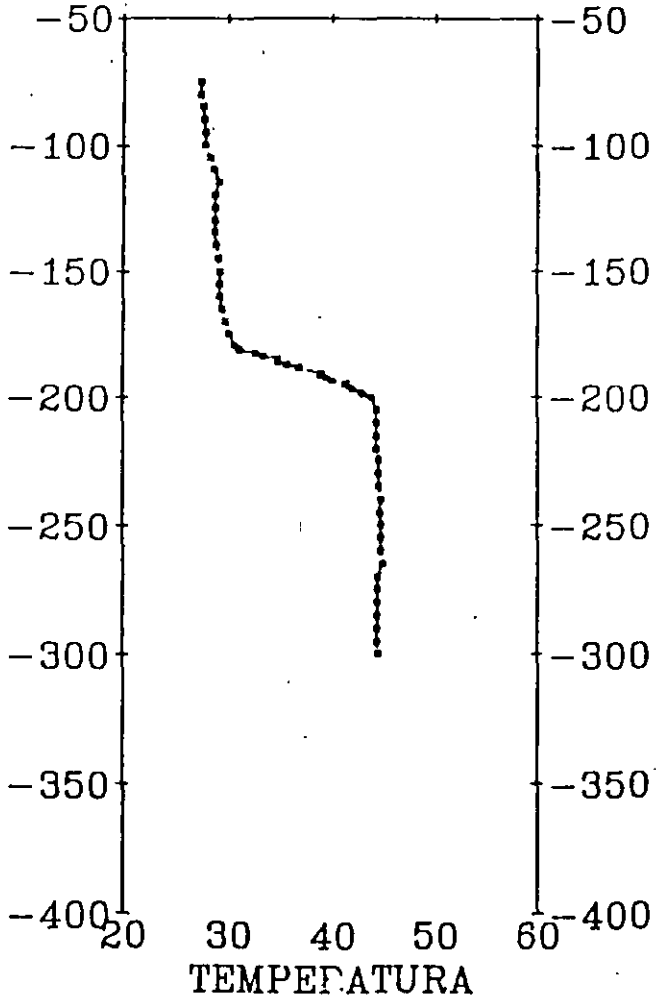


POZO 1008-ZA  
 Acuífero Confinado  
 Q = 45 lps

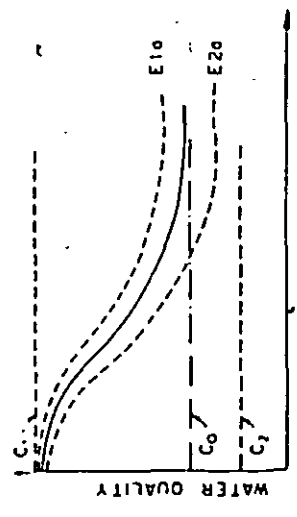


PROFUNDIDAD (M)

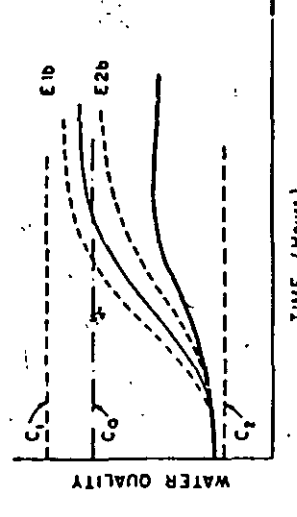
# P-107 REGISTRO DE TEMPERATURA



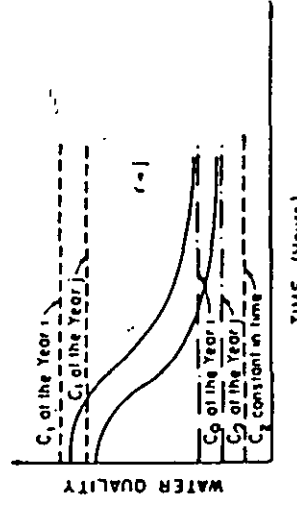
170



(a) POINT WELL LOCATED IN THE UPPER AQUIFER



(b) POINT WELL LOCATED IN THE LOWER AQUIFER



(c) POINT WELL LOCATED IN THE UPPER AQUIFER

# DIAGRAMA EXPANDIDO DE DUROV

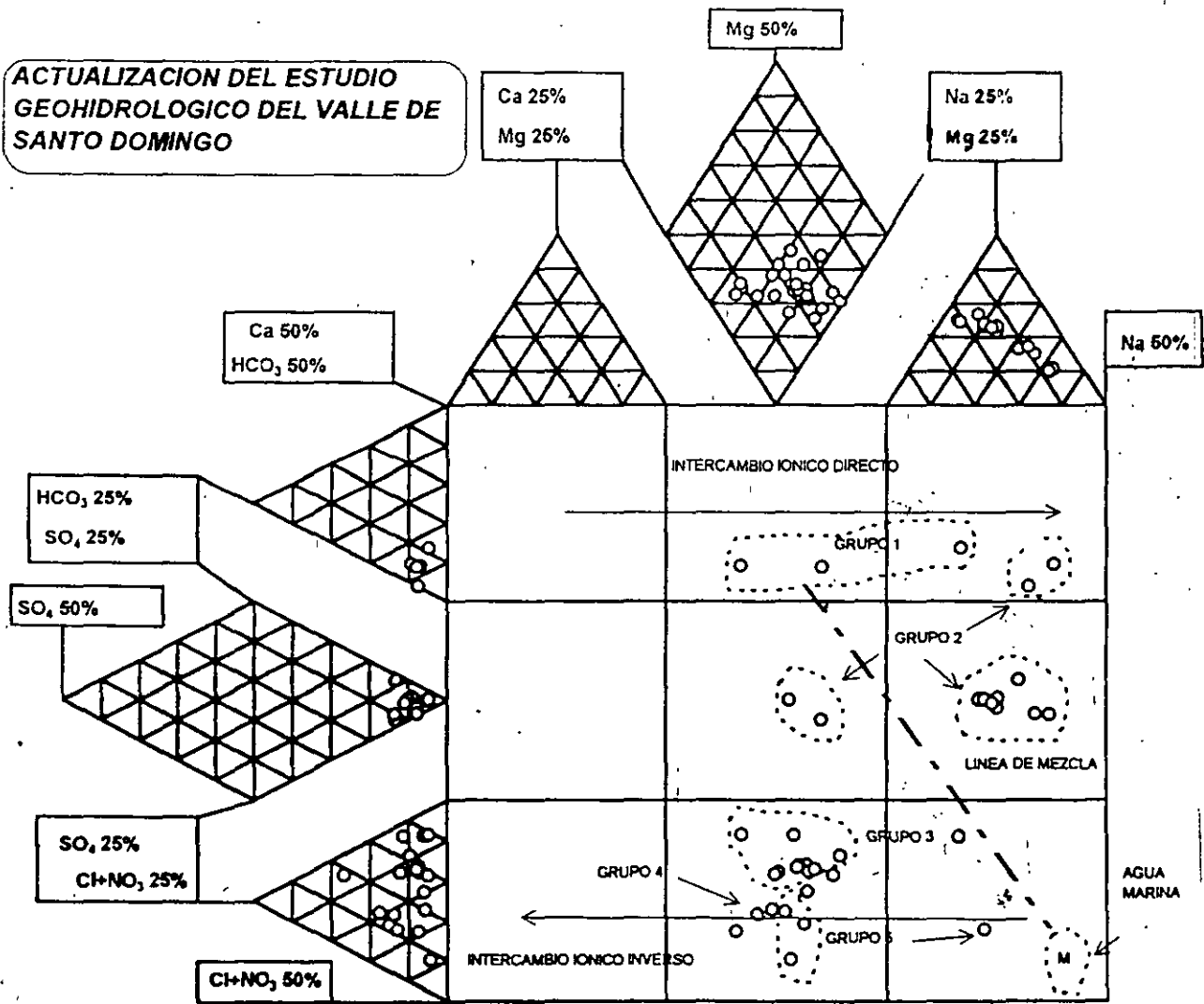
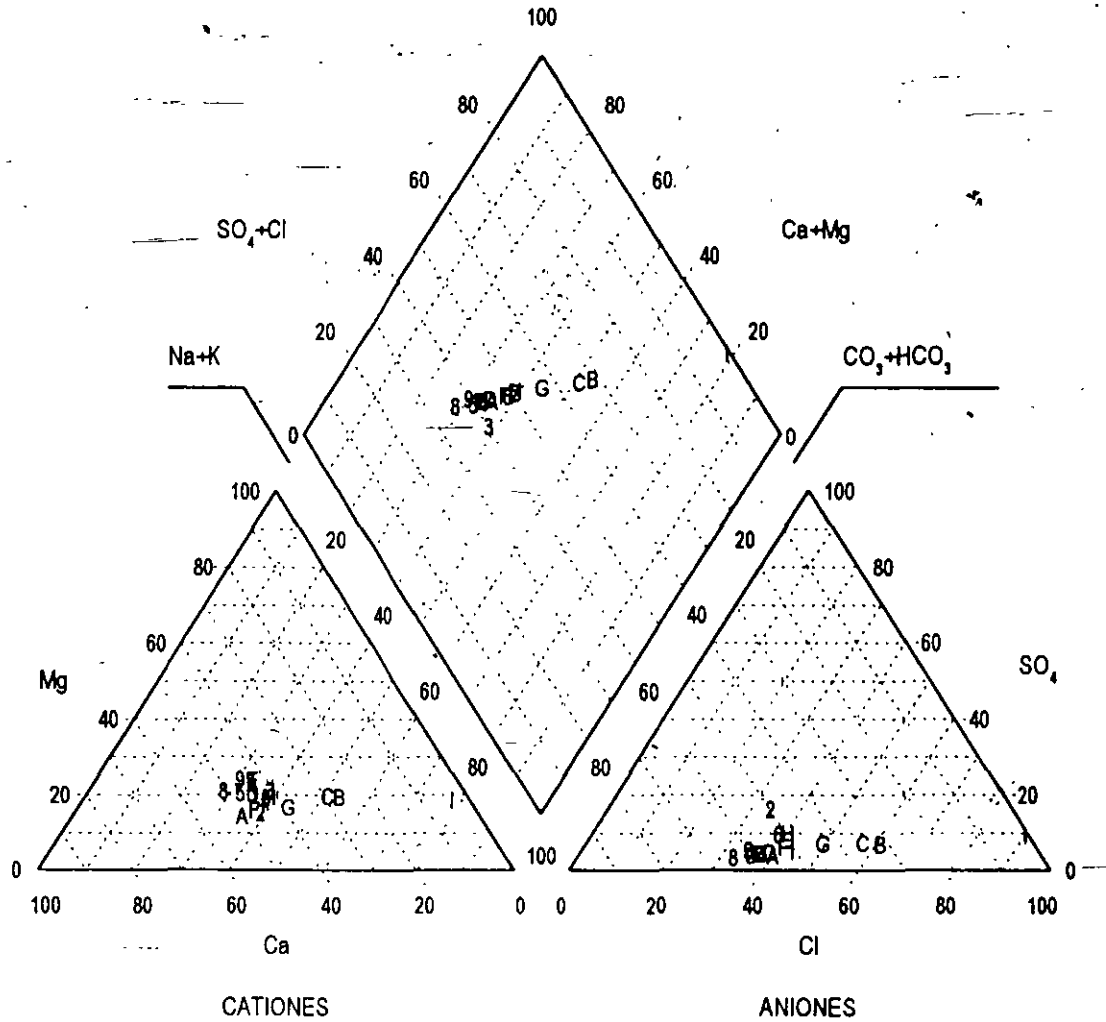
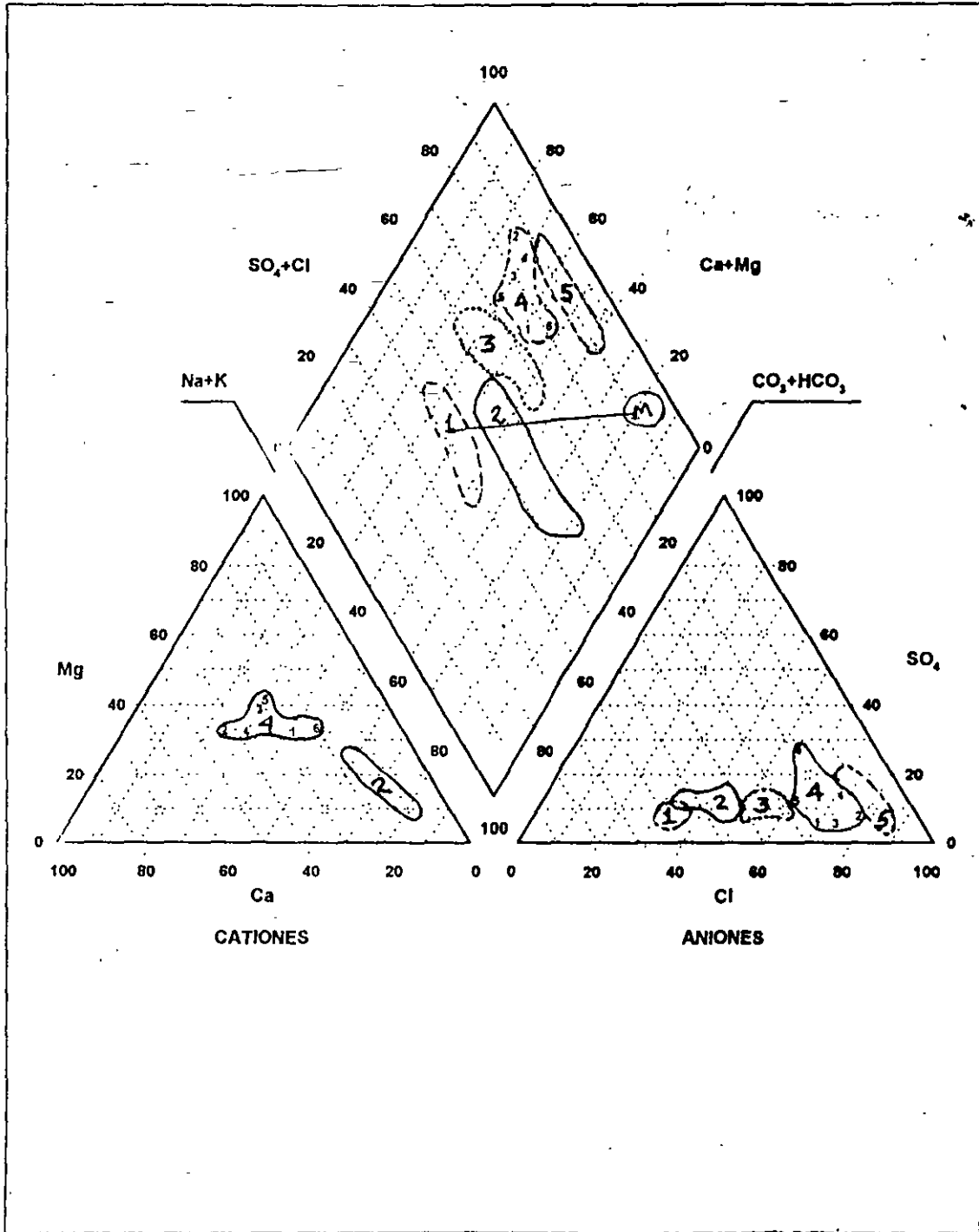


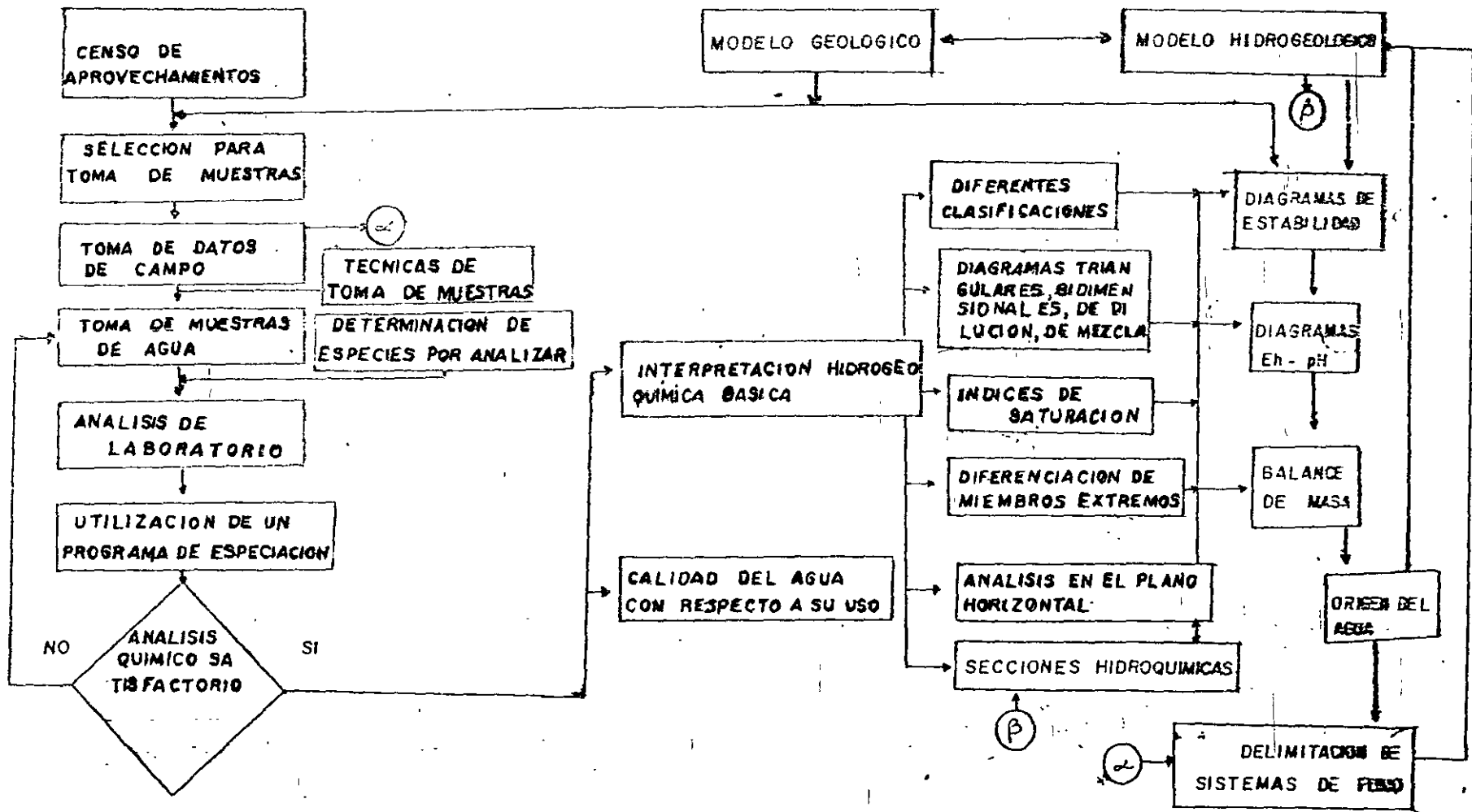
Figura V' 4.1.f

FIGURA 2. DIAGRAMA DE PIPER

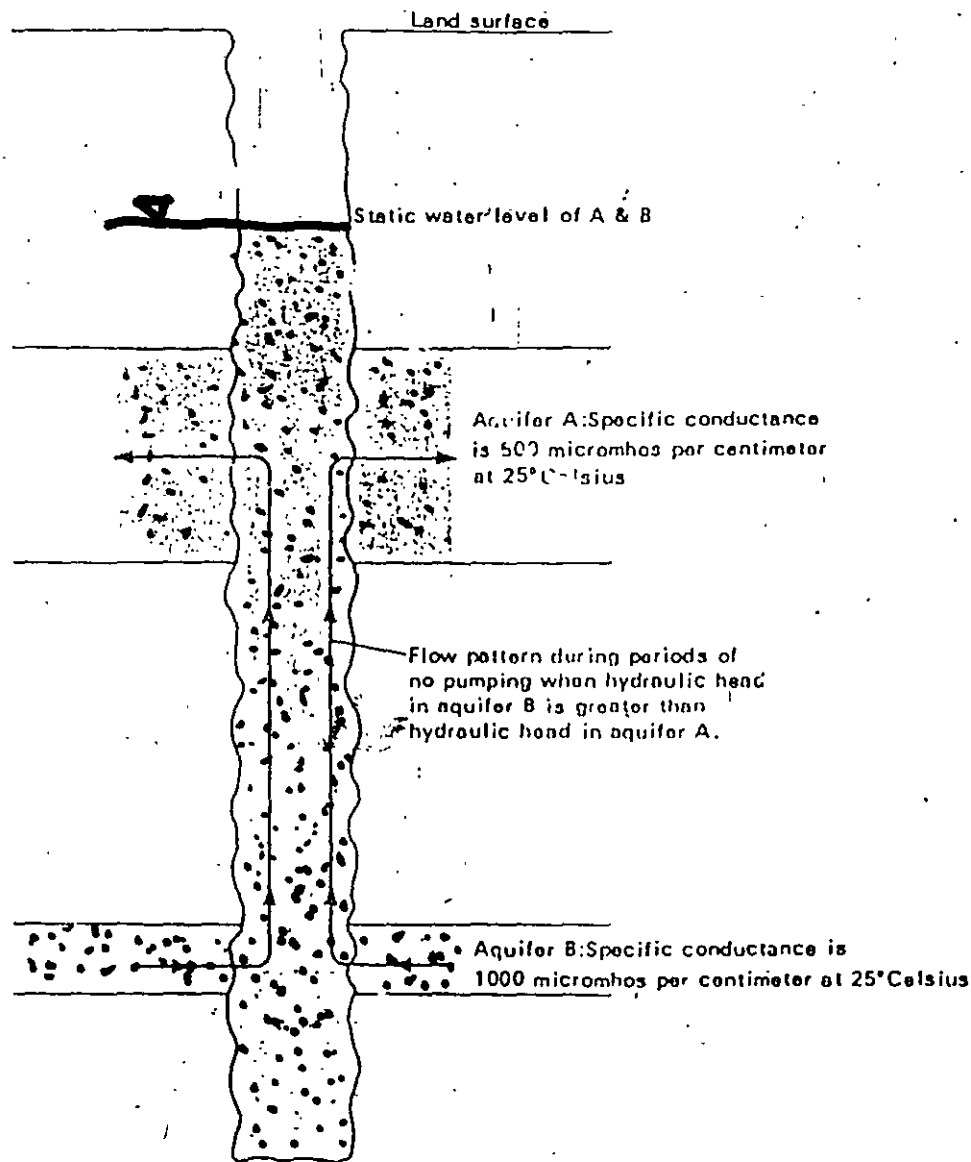


- |      |      |          |
|------|------|----------|
| 1 1  | 9 17 | H 9      |
| 2 10 | A 2  | I OCEANO |
| 3 11 | B 3  |          |
| 4 12 | C 4  |          |
| 5 13 | D 5  |          |
| 6 14 | E 6  |          |
| 7 15 | F 7  |          |
| 8 16 | G 8  |          |

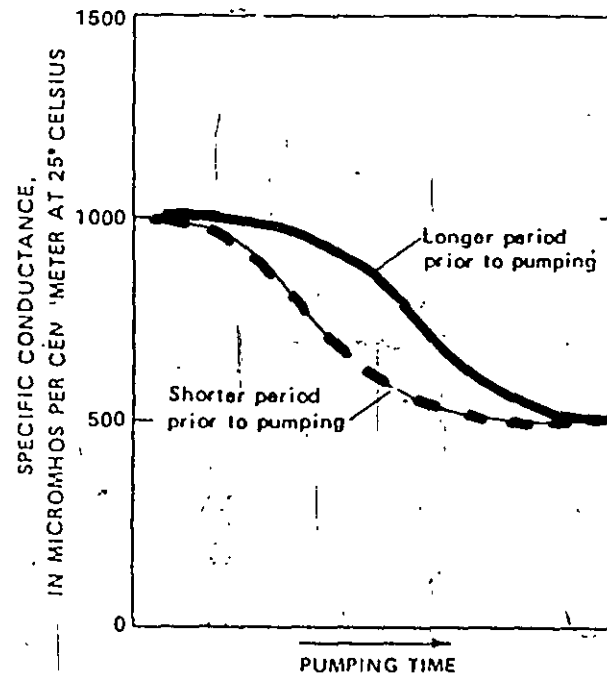








(a) Flow patterns during periods of no pumping



(b) Effect of no pumping periods of different lengths on water quality changes during pumping.

Figure 5.--A. Flow patterns during periods of no pumping; and B. Effect of no-pumping periods of different lengths on water chemistry changes during pumping.

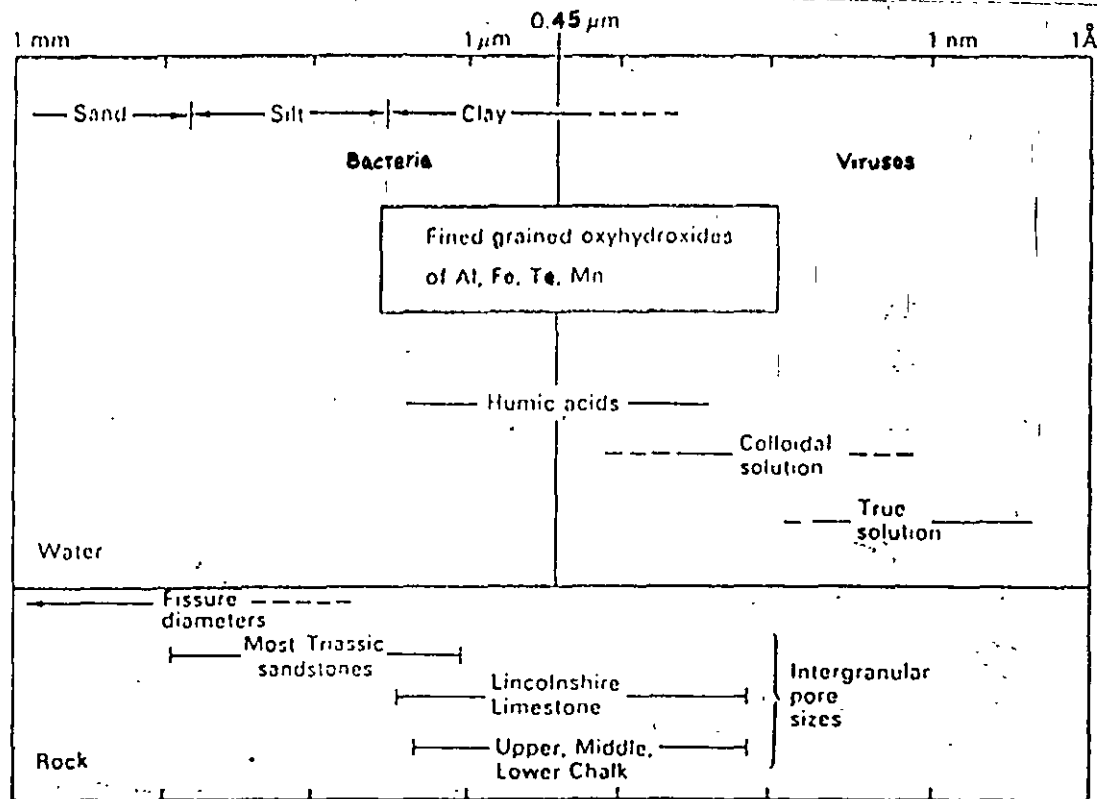
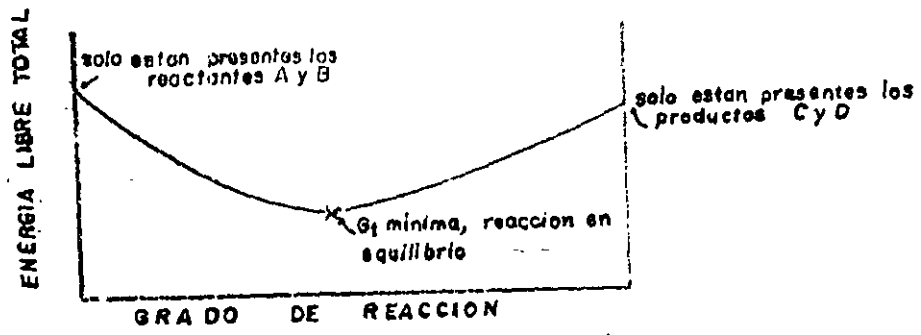


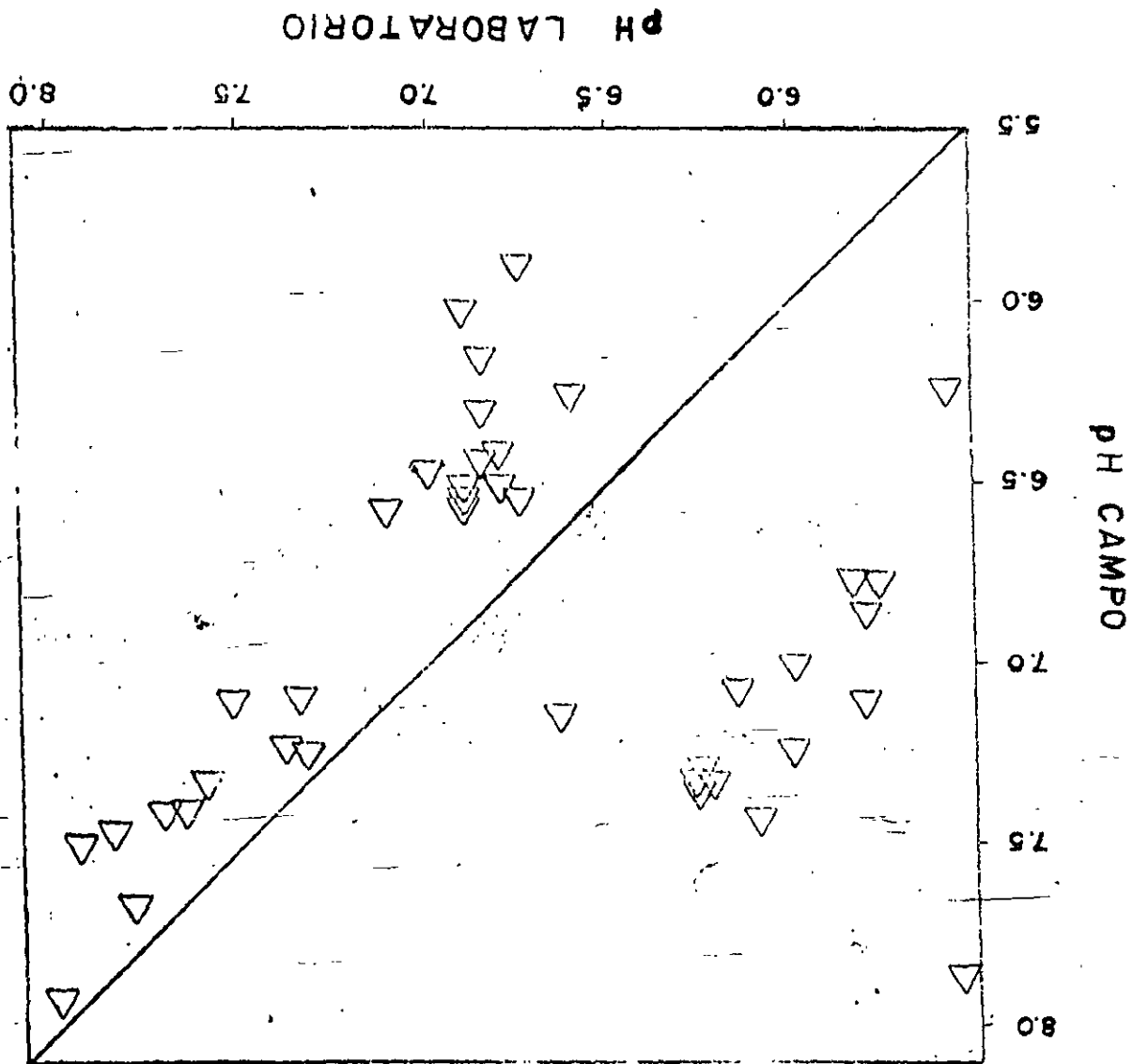
FIG. 6.1 Sizes of solute and suspended particles in natural waters in the range  $10^{-3}$  to  $10^{-10}$  mm compared with mean intergranular pore and fissure diameters for aquifers in the United Kingdom.

(9)

(17)

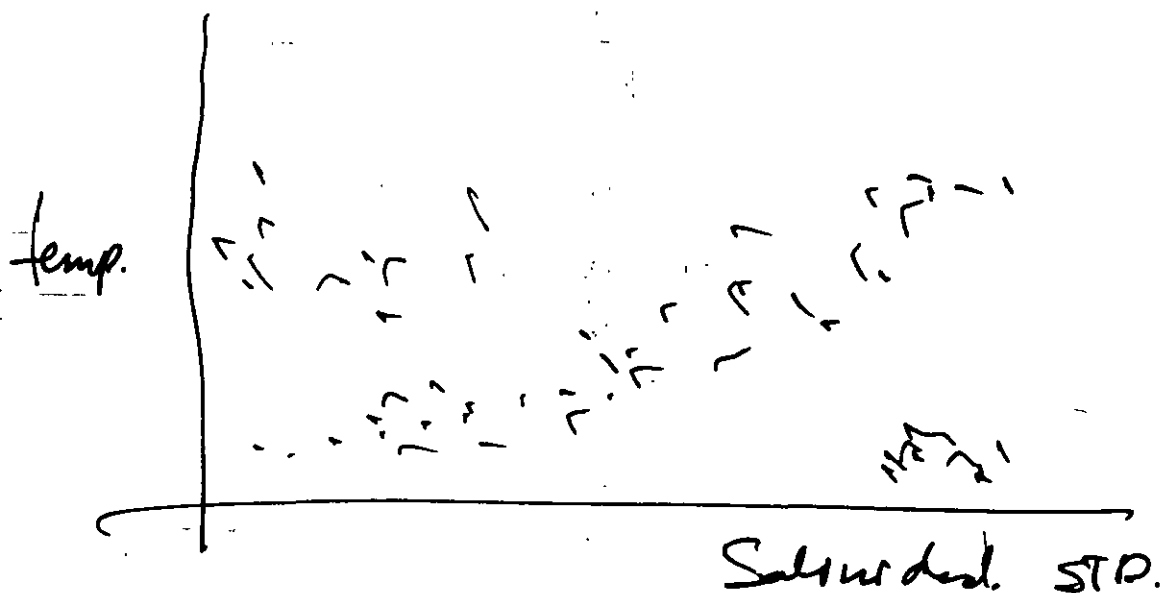


VARIACION DE LA ENERGIA LIBRE DE GIBBS PARA LA REACCION QUIMICA  $aA + bB = cC + dD$



## CONCLUSIONES RELATIVAS A LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA REALIZACIÓN DE ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS

- 1) Los aprovechamientos subterráneos para toma de muestras, se deben de seleccionar con base en criterios geológicos y geográficos
- 2) La selección de las especies a analizar (aniones, cationes elementos traza), estará en función del objetivo específico del estudio
- 3) Se deben de realizar medición de parámetros de campo (temperatura, pH, Eh, oxígeno disuelto, alcalinidad) utilizando técnicas adecuadas, colocar conservadores a las muestras, mantenerlas en refrigeración y llevarlas al laboratorio lo más rápidamente posible.
- 4) En el control de la información obtenida durante el muestreo de agua subterránea, se debe de utilizar formatos adecuados.
- 5) Se debe de realizar una verificación del análisis químico.
- 6) La calidad del agua en pozos generalmente es variable con respecto al tiempo.



# **CURSO DE HIDROGEOLOGÍA DE CAMPO**

## **TOMA DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

Antonio Cardona Benavides  
San Luis Potosí, S.L.P., México. Noviembre 1996

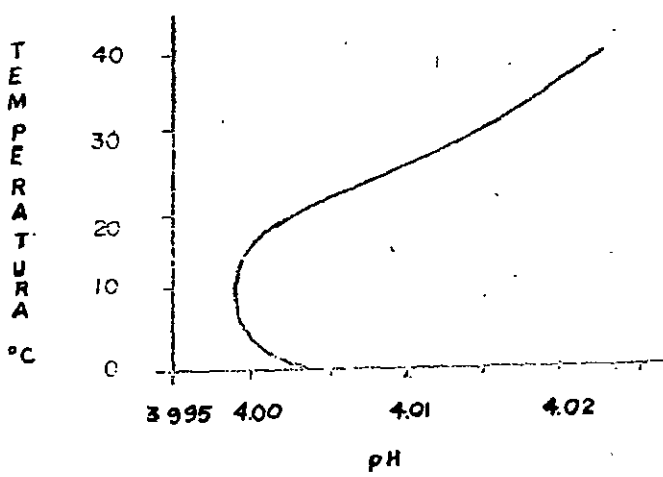
- **TOMA DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

- Criterios de selección de sitios para toma de muestras de agua
- Medición de parámetros de campo
- Precauciones a considerar de acuerdo con las condiciones del aprovechamiento
- Protocolo de medición de la temperatura, pH, Eh, conductividad eléctrica, alcalinidad
- Protocolo de toma de muestras (precauciones y preservación)
- Registro de mediciones realizadas y control en campo.

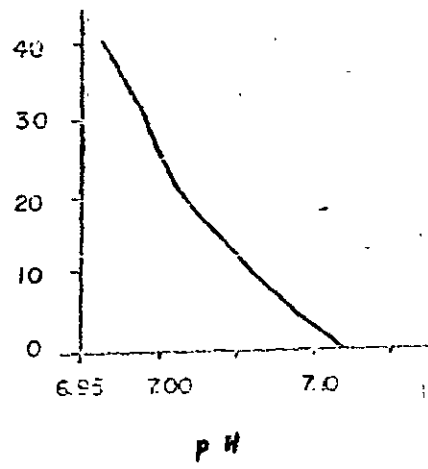
- **VARIACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

- Concepto de muestra representativa
- Muestras tomadas en condiciones estáticas
- Variación de la calidad del agua para diferentes escalas de tiempo
- Causas de la variación espacial y temporal de la calidad del agua
- Interpretaciones teóricas y prácticas
- Conclusiones relativas a la toma de muestras

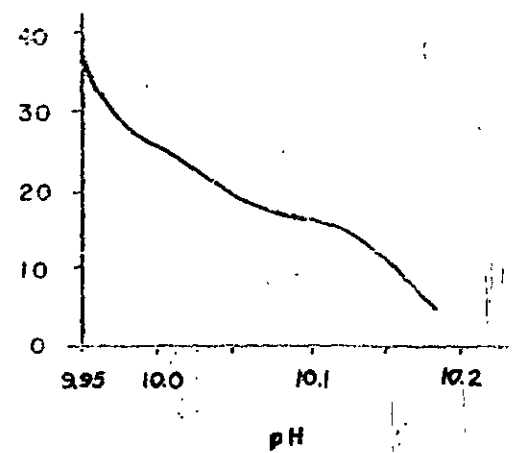
BUFFER 4.0



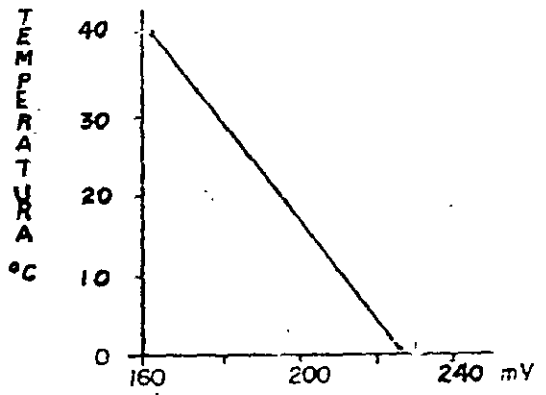
BUFFER 7.0



BUFFER 10.0

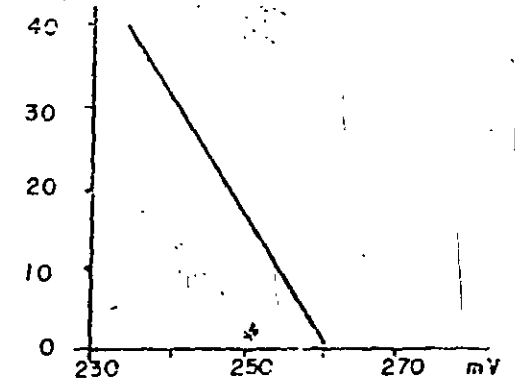


VARIACION DEL E<sub>H</sub> MEDIDO EN LA SOLUCION ZOBELL CON EL ELECTRODO CALOMEL



$E_h = E_{medido} + E_{calomel}$

VARIACION DEL E<sub>calomel</sub> PARA EL ELECTRODO CALOMEL



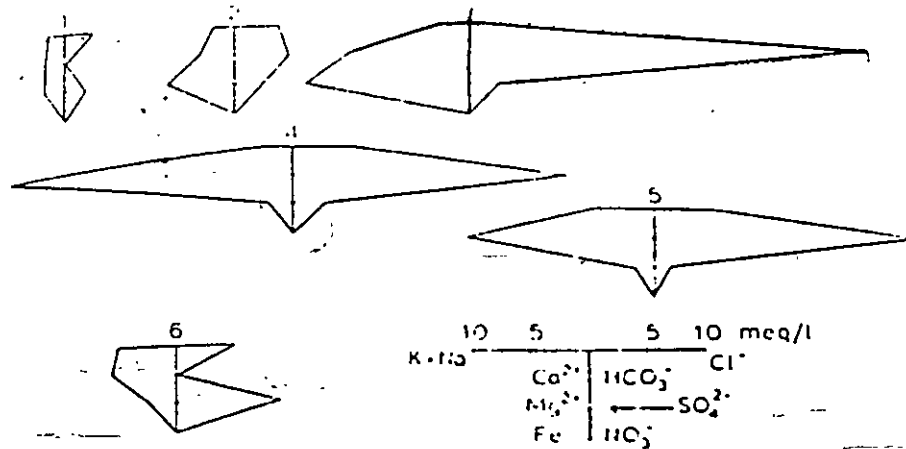


Figure 1.1. Stiff-diagrams of the analyses in Table 1.2.

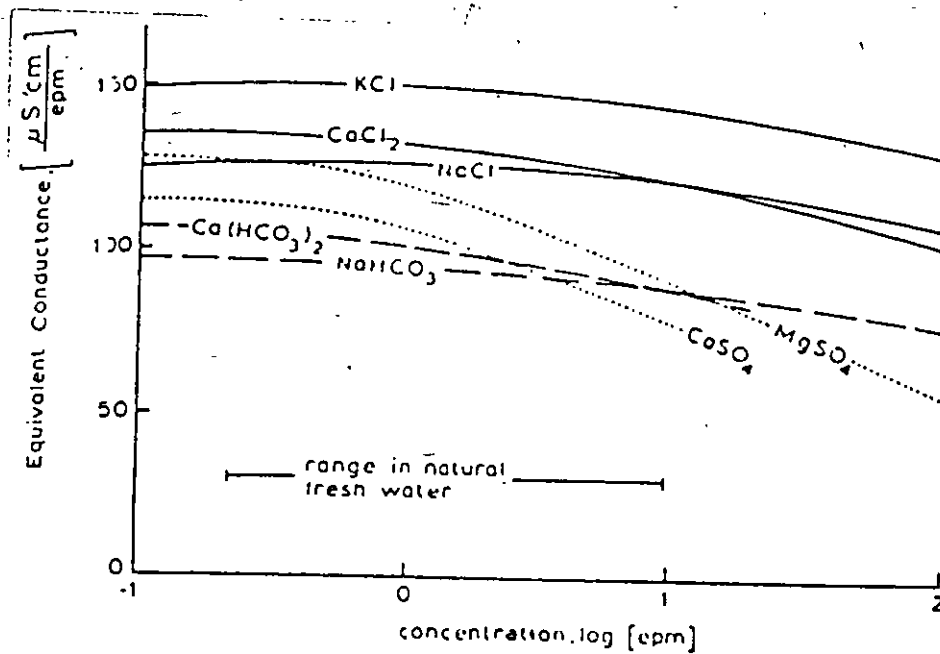


Figure 1.9. The relation between equivalent electrical conductivity and concentration for different salt solutions.

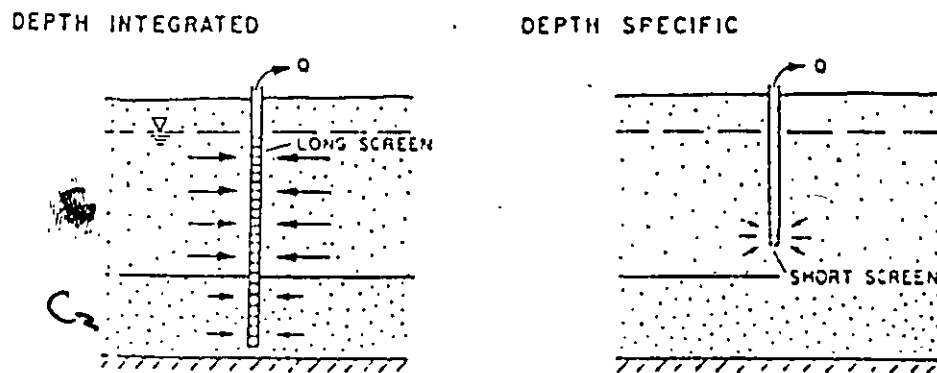


Figure 1.3. Depth integrated versus depth specific groundwater sampling. Coarse dotted areas represent coarse grained sand and densely dotted areas fine grained sand. The size of the arrows reflects the flow rate (modified from Cherry, 1983).

## ESTIMANDO LA EXACTITUD DE UN ANÁLISIS QUÍMICO

Los resultados que recibes del laboratorio son los siguientes:

pH = 8.22            C.E. = 290 mmhos/cm

Na	K	Mg	Ca	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	
13.7	1.18	3.2	42.5	31.2	79.9	39	1.3	(mg/l)

Una condición básica es que cada análisis debe de presentar un razonable balance de cargas entre los aniones y cationes, lo que significa que la solución debe de ser eléctricamente neutra. El análisis se recalcula de mg/l a mmol/l y posteriormente a meq/l

	mg/l	peso fórmula	mmol/l	carga	meq/l
Ca	42.5	40.08	1.06	2	2.12
Mg	3.21	24.31	0.13	2	0.26
Na	13.7	22.99	0.6	1	0.60
K	1.18	39.1	0.03	1	0.03
				$\Sigma =$	+3.01
Cl	31.2	35.45	0.88	-1	-0.88
SO <sub>4</sub>	39.0	96.06	0.41	-2	-0.82
HCO <sub>3</sub>	79.9	61.02	1.31	-1	-1.31
NO <sub>3</sub>	1.3	62.0	0.02	-1	-0.02
				$\Sigma =$	-3.03

La diferencia entre los cationes y los aniones es de 0.02 meq/l, por lo que seguramente se trata de un análisis bien realizado.

El balance eléctrico es el siguiente:

$$B.C. = (3.01 + 3.03) / (3.01 - 3.03) = -0.3 \%$$



## PARÁMETROS COMUNES QUE SE USAN EN EL MUNDO DEL AGUA

**DUREZA:** Suma de las partículas que pueden precipitar como "partículas duras" del agua. Suma del Ca y Mg y algunas veces Fe. Expresado en meq/l de CaCO<sub>3</sub> o en grados de dureza. 100mg CaCO<sub>3</sub>/l = 1mmol Ca/l = 2meqCa/l

**pH:** Logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno

**ALKALINIDAD:** Capacidad de neutralizar un ácido. Se determina por titulación con ácido hasta que se alcanza un pH de 4.5. En la mayoría de las muestras es igual a la concentración  $m_{\text{HCO}_3} + 2m_{\text{CO}_3}$ .

## FORMULAS PARA CÁLCULOS CON LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

$\text{mmol/l} = \text{mg/l} / (\text{peso fórmula gramo})$

$\text{mmol/l} = \text{ppm} (\text{densidad de la muestra}) / (\text{peso fórmula gramo})$

$\text{mmol/l} = \text{meq/l} / (\text{carga del ión})$

$\text{mmol/l} = \text{molalidad M} \cdot \text{densidad} ((\text{peso de la solución} - \text{peso solutos}) / (\text{peso solución})) 1000$

## ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA (PARA USO POTABLE)

ESPECIE	CONTRIBUCIÓN A LA NUTRICIÓN	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE (mg/l)	COMENTARIO
Magnesio	3-10 %	50	diarrea
Sodio	1-4 %	175	
Cloruro	2-15 %	300	sabor salado
Sulfato		250	diarrea
Nitrato		50	metahemoglobina
Nitrato		0.1	
Fluoruro	10-50 %	1.7	fluorosis
Arsénico	30%	0.05	cancer de piel
Aluminio		0.2	
Cobre	6-10 %	0.1	3 mg/l (tuberías nuevas)
Zinc	nulo	0.1	5 mg/l (tuberías nuevas)
Cadmio		0.005	
Plomo		0.05	
Cromo	20-30 %	0.05	

## UNIDADES DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

La concentración de las sustancias disueltas en las muestras de agua pueden presentarse en diferentes unidades dependiendo del propósito y de la tradición. Algunas unidades comunes son las siguientes:

mg/l	miligramos por litro de muestra
ppm	partes por millón por peso de la muestra
ppb	partes por billón por peso de la muestra
mmol/l	milimoles por litro de muestra
meq/l	miliequivalentes por litro de muestra
epm	equivalentes por millón, por peso de muestra
M	Molalidad, moles por kilogramo de agua
mM	milomoles por kilo de agua
N	normalidad, equivalentes por litro

## CLASIFICACIÓN DE LOS CONSTITUYENTES INORGÁNICOS DISUELTOS -EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

Constituyentes mayores (concentración > 5 mg/l)

<b>ANIONES</b>	<b>CATIONES</b>
Bicarbonato	Sodio
Sulfato	Magnesio
Cloruro	Calcio

Sílice  
Acido Carbónico

Constituyentes menores (0.01-10mg/l)

Boro	Nitrato
Carbonato	Potasio
Fluoruro	Hierro

Constituyentes Traza (menos de 0.1 mg/l)

Aluminio	Arsénico	Bario
Litio	Cromo	Manganeso
Bromo	Yodo	Plomo
Berilio	Zinc	Cobre

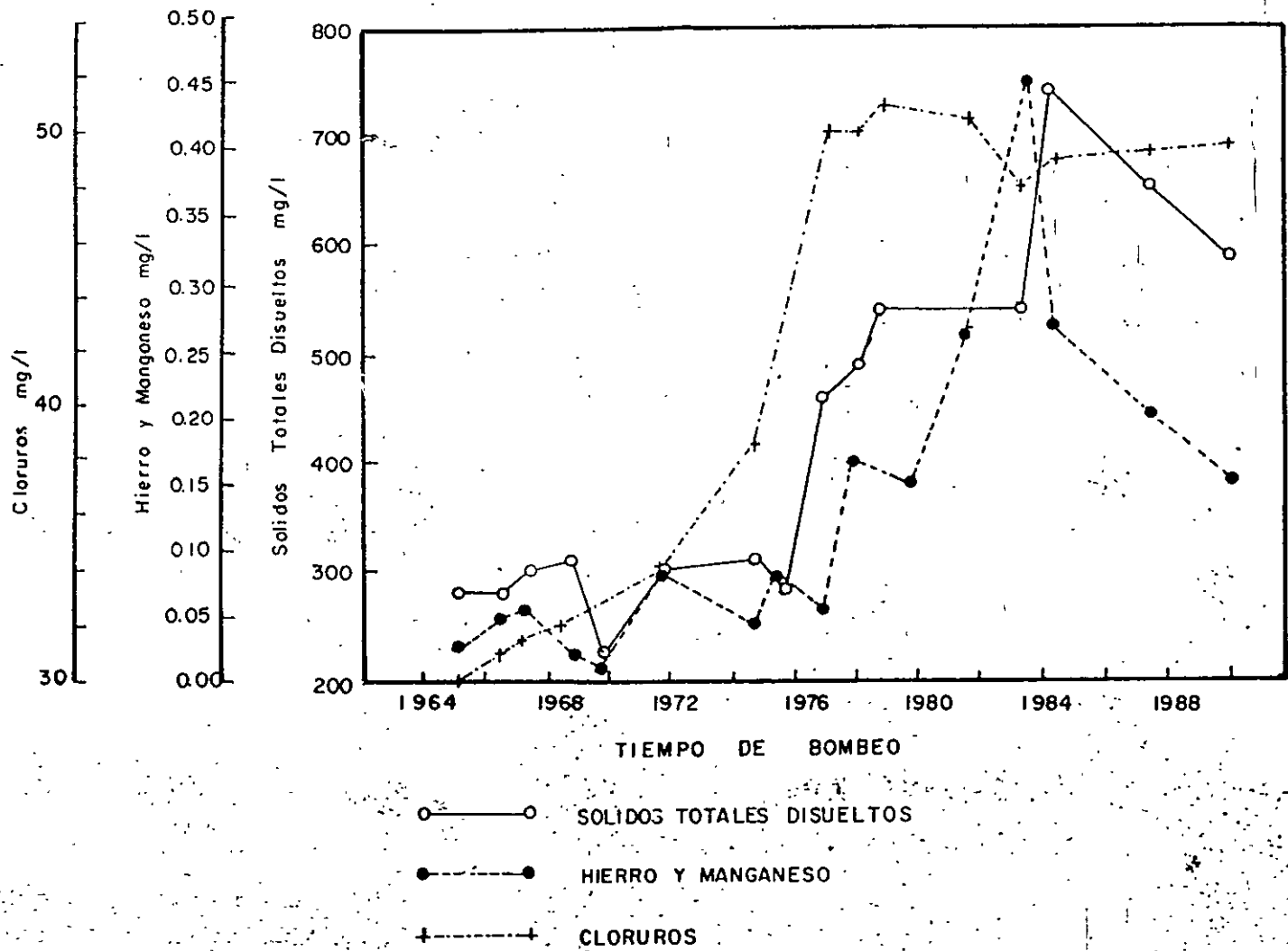
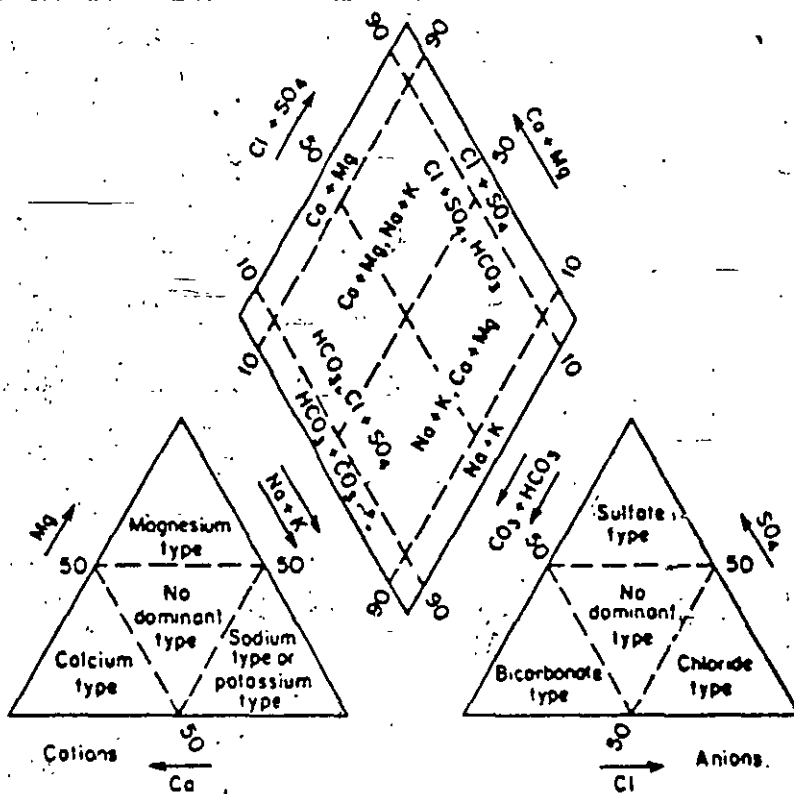


FIGURA 1.5.12. EVOLUCION CALIDAD DEL AGUA POZO 42  
 COLONIA GRANJAS ESTRELLA No.2



(tomado de Back, 1966)

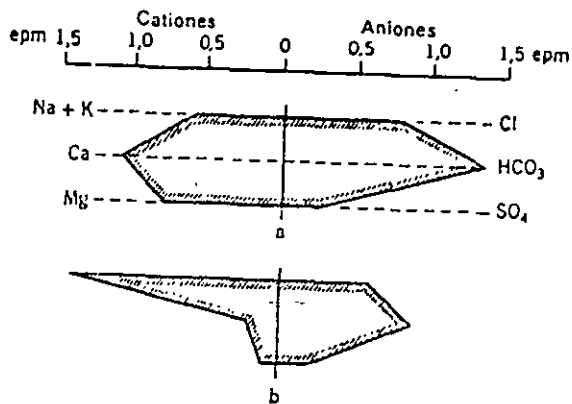


Fig. 3.7. — Diagrama de Stiff. Algunas formas distintivas facilitan una rápida comparación entre distintos análisis.

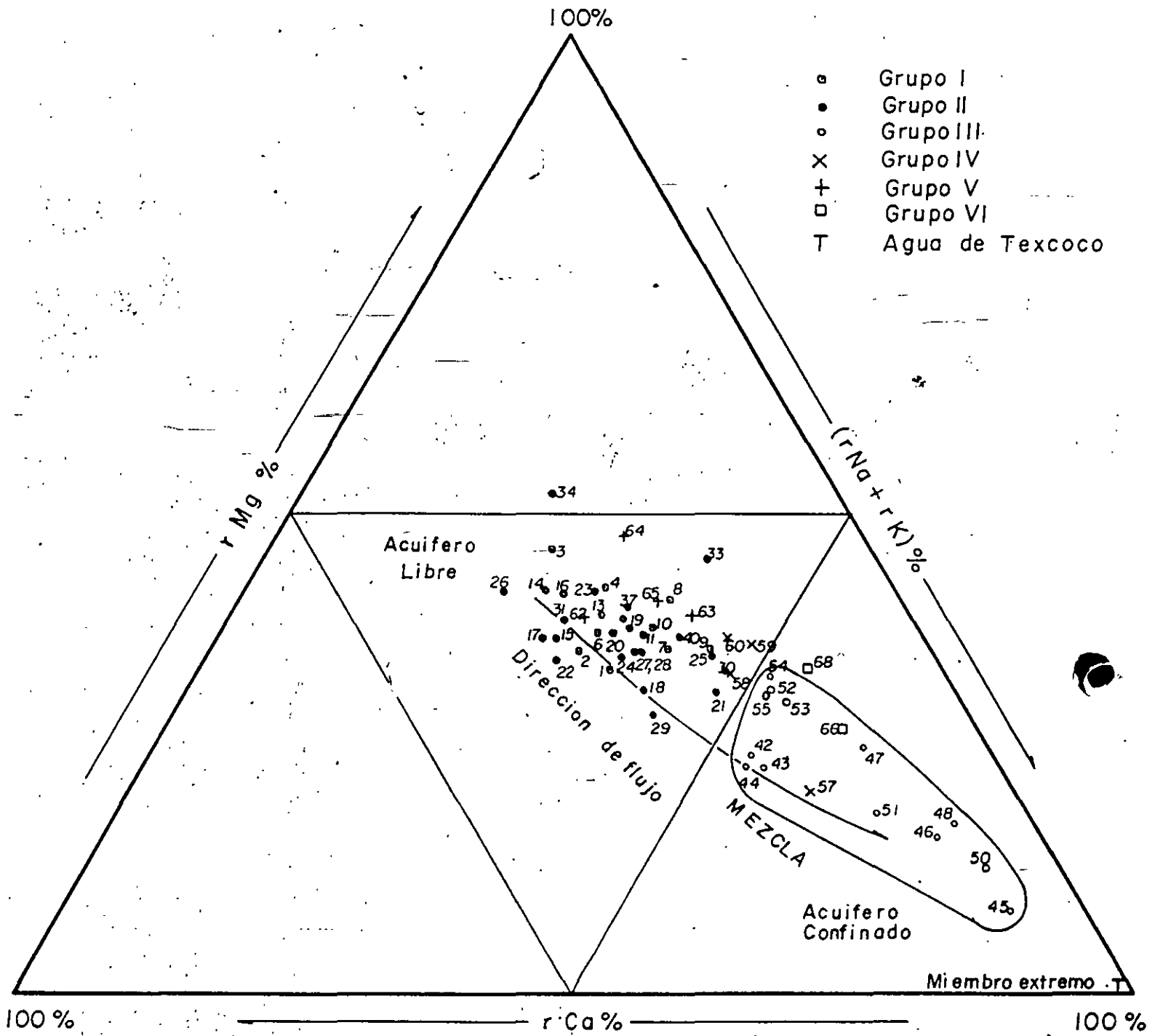
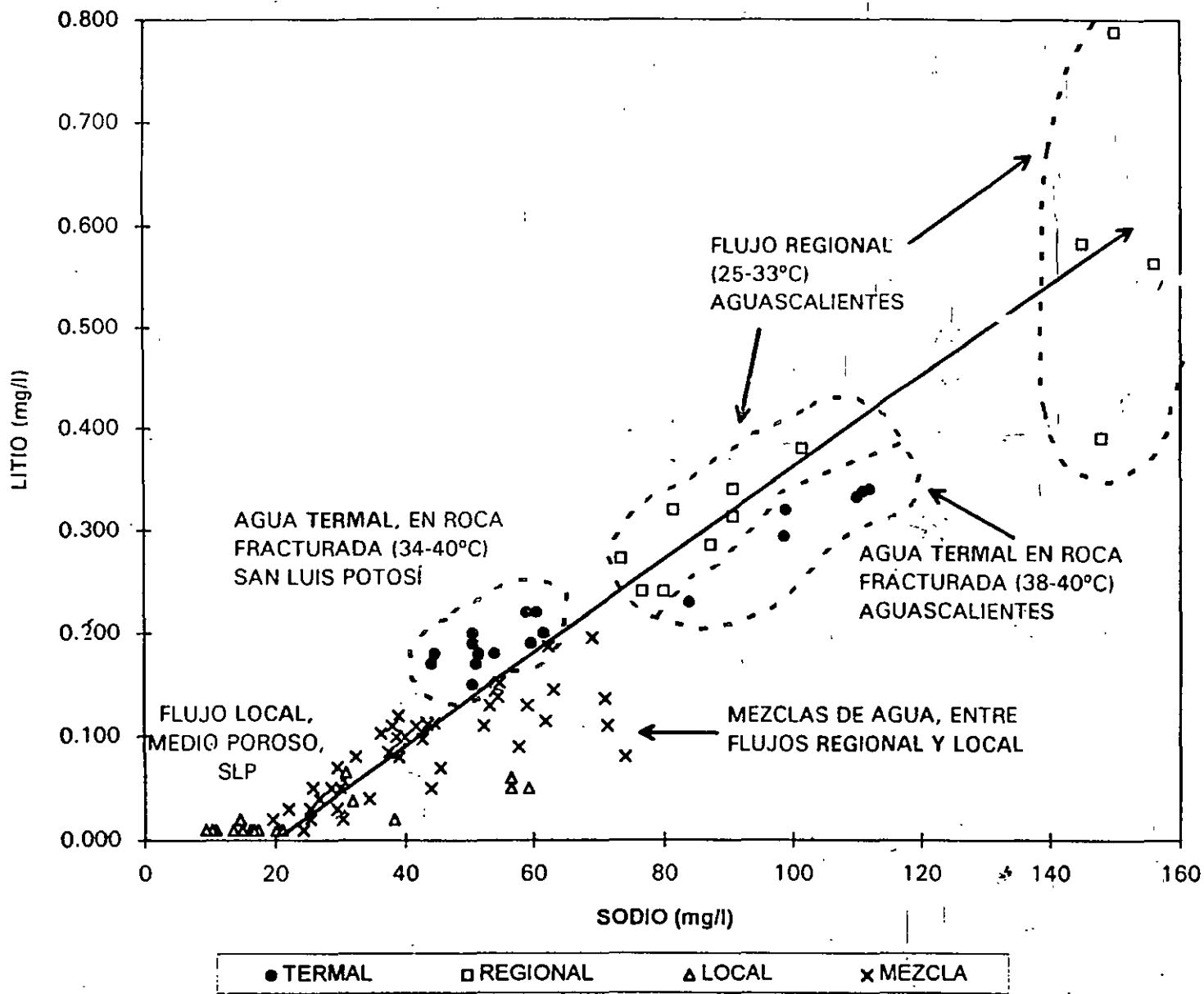
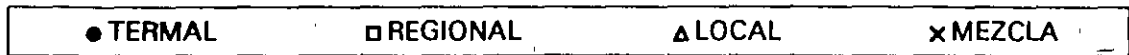
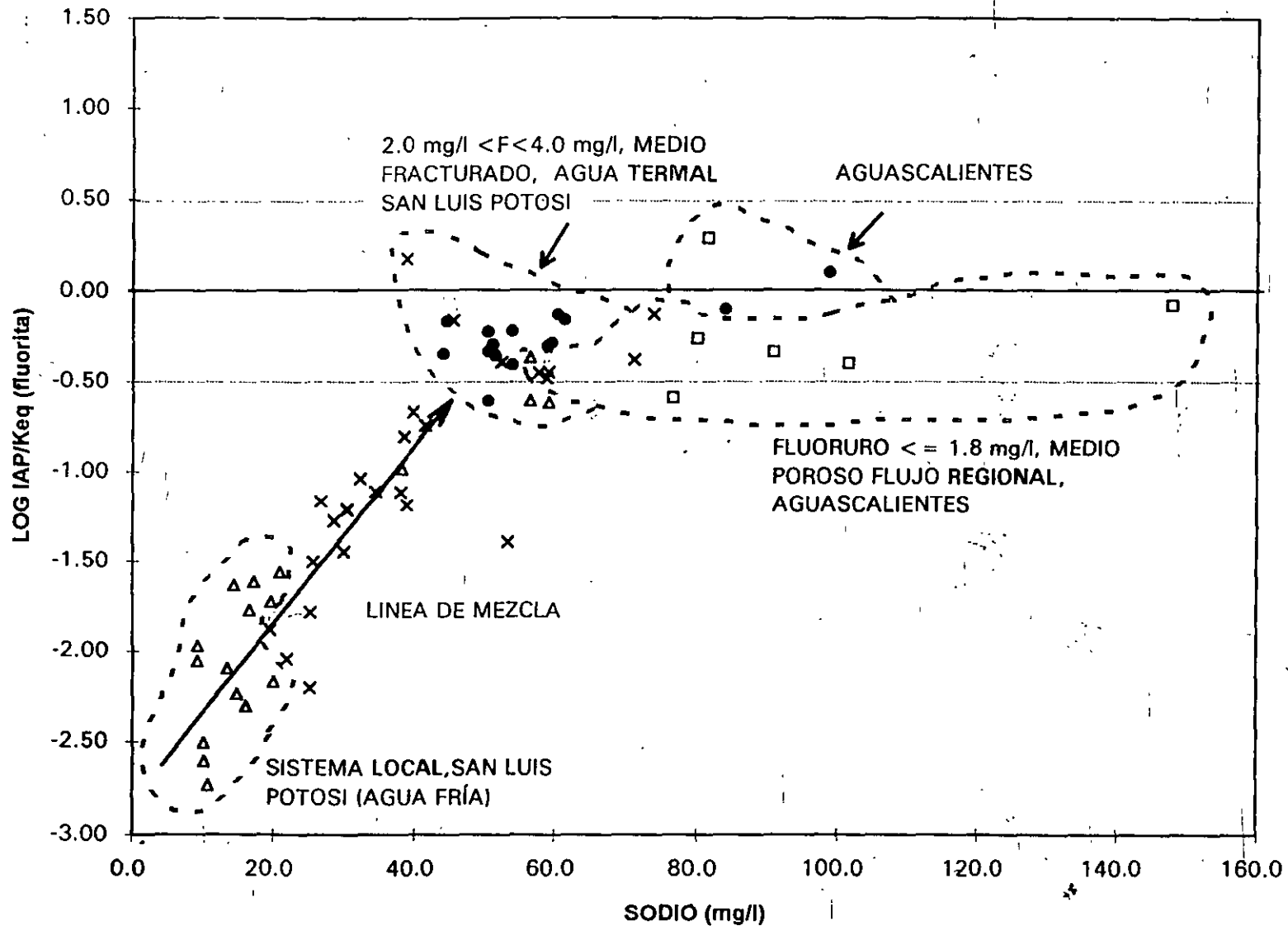
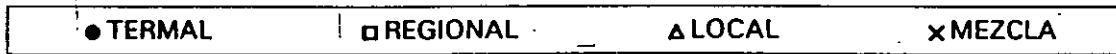
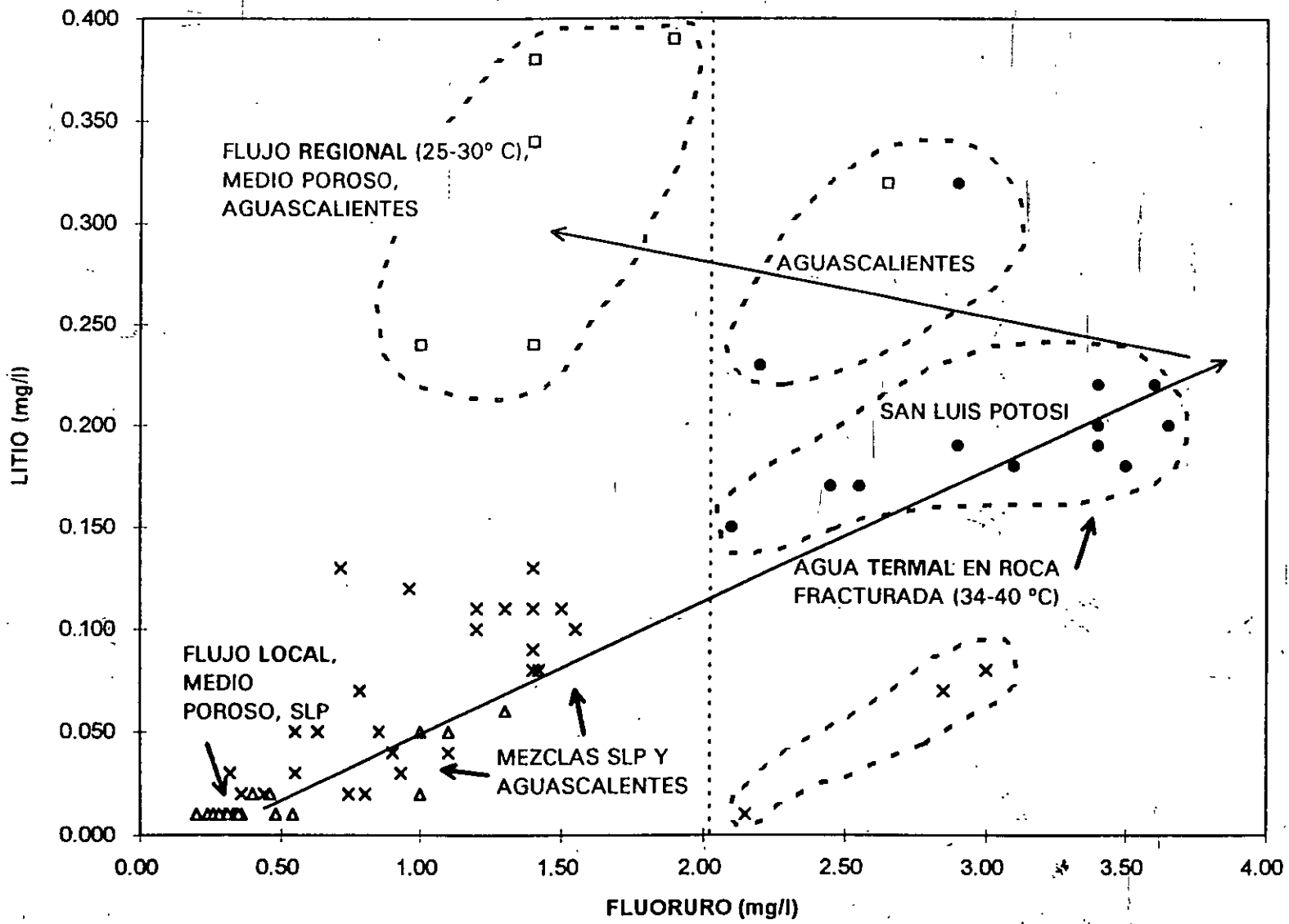


Figura 1.5.3.a. DIAGRAMA TRIANGULAR DE CATIONES



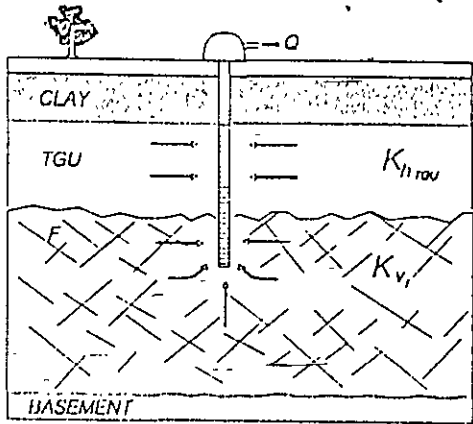


(59)

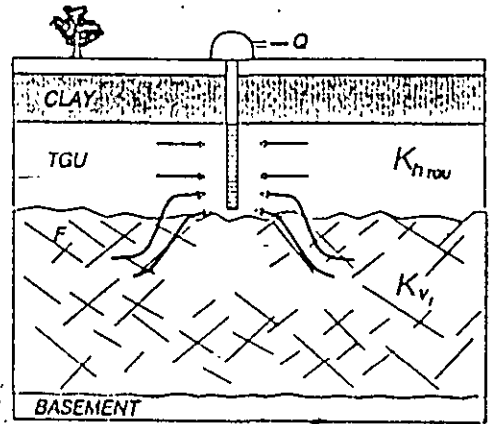


(09)

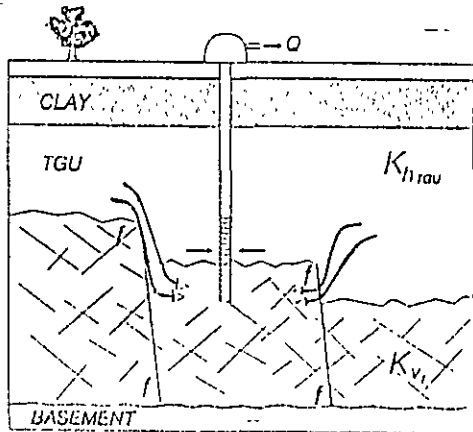




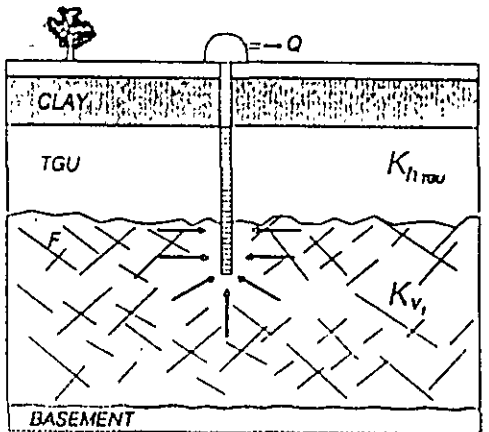
(a)



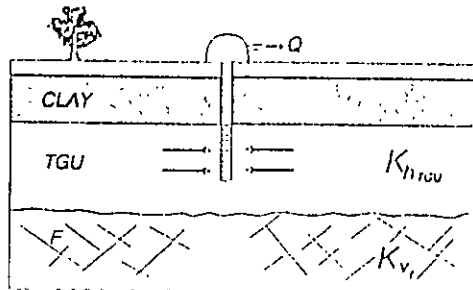
(b)



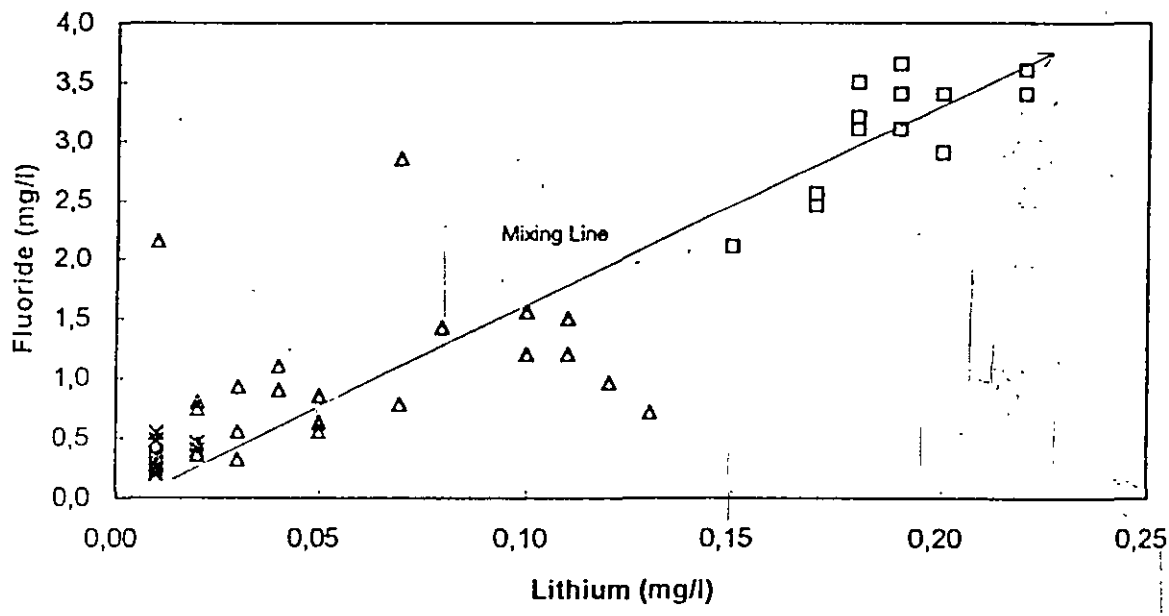
(c)



(d)



(e)



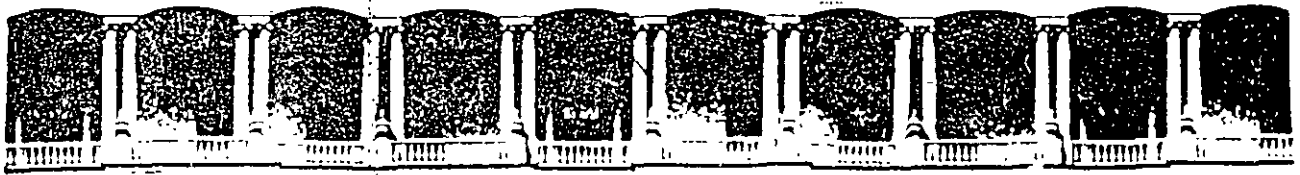
□Regional

×Intermediate

△Mixed

67

FIG. 5



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***EL HUNDIMIENTO DEL TERRENO EN LA CIUDAD  
DE MÉXICO Y SUS IMPLICACIONES  
EN EL SISTEMA DE DRENAJE***

**PRESENTADO POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# EL HUNDIMIENTO DEL TERRENO EN LA CIUDAD DE MEXICO Y SUS IMPLICACIONES EN EL SISTEMA DE DRENAJE

Juan Manuel Lesser Illades  
Lesser y Asociados, S. A. de C.V.

Miguel Angel Cortes Pérez  
Dirección General de Construcción  
y Operación Hidráulica-DDF

## RESUMEN

La Ciudad de México históricamente ha sido una de las áreas más densamente pobladas en el mundo. Actualmente, más de 20 millones de habitantes residen en el área metropolitana, donde se utilizan 60 m<sup>3</sup>/seg de agua potable, de los cuales 40 m<sup>3</sup>/seg provienen del acuífero que se encuentra bajo la ciudad. La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce una subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales. Actualmente, la subsidencia del terreno en la mayor parte de la Ciudad de México varía de 5 a 10 centímetros anuales y existen zonas locales con hasta 35 cm/año en el área de Xochimilco.

El Departamento del Distrito Federal a través de su Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH) desarrolló un plan maestro de drenaje de la ciudad. Una parte importante de dicho programa, fue el análisis histórico de la subsidencia del terreno y la simulación de su comportamiento para los próximos años (DGCOH-DDF, 1994). La subsidencia acumulada de 1891 a 1995 alcanza máximos en la parte central de la Ciudad de México que van de 8 a 10 metros; la mayor parte del asentamiento fue generado en el período de 1940 a 1960. La explotación de agua subterránea se disminuyó en el centro de la ciudad a partir del año 1960 y el ritmo de subsidencia se redujo. Al mismo tiempo que la explotación de agua subterránea se reducía en el centro, se incrementaba en el sur de la ciudad, causando subsidencia del terreno en esta última región.

Gran parte del sistema de drenaje de la ciudad es fuertemente impactado por la subsidencia, debido a que modifica el gradiente ocasionando, en algunos casos, la inversión del gradiente del sistema drenaje. Se elaboró un análisis histórico y una simulación de la subsidencia, poniendo especial atención en los 17 principales drenes de la ciudad, contándose entre ellos al Gran Canal, al Río Churubusco y otros. Con los resultados del trabajo, se programan actividades de rehabilitación del sistema de drenaje en los sitios más afectados, a fin de evitar inundaciones que, por el hundimiento del terreno, podrían ser más severas cada año.

**Palabras clave:** acuitardo, acuífero, abatimiento, nivel freático, superficie piezométrica, compresibilidad, subsidencia.

## INTRODUCCION

En el subsuelo de la Ciudad de México se encuentran una serie de materiales aluviales constituidos esencialmente por gravas y arenas que se encuentran intercalados con productos volcánicos, principalmente lavas y escorias. Estos materiales forman el acuífero de la ciudad el cual es explotado para el abastecimiento de sus habitantes.

Cubriendo al acuífero, se encuentra una capa de materiales arcillosos que funcionan como acuitardo. Se encuentran saturados y presentan una permeabilidad muy baja, del orden de  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  m/seg. Permiten un muy lento flujo del agua a través de ella.

La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México presenta hundimientos del terreno los cuales varían de una zona a otra de acuerdo a la constitución del suelo. Los hundimientos, al ser diferenciales, provocan diversos problemas, entre ellos la operación por gravedad de la red de drenaje subsuperficial.

La zona estudiada comprendió el área metropolitana de la Ciudad de México y de los sistemas y áreas tributarias a las salidas del valle. Dentro de esta zona, se marcaron los principales drenes de la ciudad, correspondientes a: Gran Canal del Desagüe; Dren General del Valle; Río de la Compañía; Río Churubusco incluyendo brazo derecho y brazo izquierdo; Colector Churubusco; Colector 15; Colector Iztapalapa; Canal Nacional-Canal Chalco; Río San Buenaventura; Río de los Remedios; Colector Miramontes; Canal de Garay; Río Consulado y Colector Central.

### Extracción de Agua Subterránea y Hundimientos del Terreno

La Ciudad de México originalmente se abastecía de agua a partir de los muchos manantiales existentes. Al incrementarse las demandas, se recurrió a la extracción de agua del subsuelo, primeramente con varios cientos de pozos someros (norias) de los que en la literatura se mencionan más de 1000 para el año de 1886 (DDF, 1982). Posiblemente el hundimiento de la ciudad se inició en esas fechas. En nivelaciones de 1891 a 1895 ya registran hundimientos de 5 centímetros por año. En el período de 1936-1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de la ciudad de hasta 18 centímetros por año. Entre 1938 y 1948, continúa la perforación en forma intermitente y extendiéndose su localización a los alrededores del Centro Histórico de la Ciudad de México. El año de 1960 se puede marcar como la frontera en que se inició la disminución de la extracción de agua en el centro de la ciudad y a su vez, el inicio de la explotación acuífera en el sur (Xochimilco-Chalco).

En la ilustración I se muestra el hundimiento del terreno y la extracción de agua subterránea en el centro de la Ciudad de México, observándose que la extracción tuvo su mayor nivel en las décadas de 1940-1950, período en el que el hundimiento del terreno se aceleró. A partir de los 60s, la extracción en el centro de la ciudad ha disminuido notablemente; el hundimiento ha continuado aunque en menor grado.

En contraste, hacia el sur del Distrito Federal, en el área de Xochimilco-Chalco, la extracción prácticamente se inició en la década de los 60s, fecha a partir de la cual se ha ido incrementado hasta nuestros días. Por lo que respecta al hundimiento, éste se registra en forma notable a partir de la explotación acuífera de los años 60s (ilustración 2).

Otra observación importante es que la magnitud del hundimiento total del terreno, esta en relación con el espesor de las arcillas. Se formaron secciones geológicas a lo largo de los drenes estudiados, donde se confirmó la relación entre el hundimiento del terreno y el espesor de las arcillas lacustres

### **Características de las Arcillas**

Las arcillas se encuentran cubriendo la parte plana del Valle de México, corresponden a sedimentos de los antiguos lagos. Tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 metros en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas o se incrementa en áreas aisladas.

Las arcillas están saturadas, presentando un nivel freático a entre 2 y 3 metros de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como confinado imprimiendo una presión ascendente a la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la explotación del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel-piezométrico, modificando el tipo de acuífero, de confinado a libre y eliminando la presión hidráulica ascendente que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas.

Diversas pruebas efectuadas a las arcillas más superficiales, han permitido calcular un coeficiente de compresibilidad que va de 0.11 a 6 cm<sup>2</sup>/kg (Cruickshank, *et al*, 1979); una relación de vacíos que varía de 2 a 15 (Cruickshank, *et al*, 1979) y; una permeabilidad entre  $1 \times 10^{-7}$  y  $1 \times 10^{-9}$  m/seg.

### **Hundimiento Histórico**

Existen varias citas históricas sobre nivelaciones en la Ciudad de México (Hiriart F. y R. Marsal, 1969). Es particularmente interesante el levantamiento topográfico de R. Gayol (Hiriart. *et al*. 1969) realizado a fines del siglo pasado, a partir del cual se ha hecho una reconstrucción de la historia del hundimiento de la Ciudad de México. El primer dato encontrado en la recopilación efectuada en este trabajo, corresponde a A. Humbolt, 1803. Existen también citas del monumento a Enrico Martínez en 1862, del Ingeniero Velázquez y Aldasoro en 1876 y de el Ingeniero Roberto Gayol en 1891.

En relación con los hundimientos medidos, hacia el año de 1925, algunos ingenieros sostenían la teoría de que el Lago de Texcoco se estaba azolvando. Posteriormente empezó a lucubrase sobre el secado del lago como factor determinante del asentamiento de la ciudad. Fue Nabor Carrillo quien llamó la atención en 1947 sobre la verdadera causa del proceso, al analizar la influencia de los pozos de bombeo en el hundimiento (Hiriart *et al*. 1969).

En la ilustración No. 3 se observa el hundimiento histórico de varios monumentos de la Ciudad de México de 1900 a 1996, en donde hacen notar que hasta el año de 1968 el hundimiento pasó por 3 etapas. En la primera, de 1898 a 1937, el hundimiento es prácticamente lineal de 4 centímetros por año. La segunda fase del proceso se marca de 1937 a 1947, donde también es de tipo lineal con un hundimiento medio de 14 centímetros por año. De 1947 a 1996, se marcó ya una tercera etapa en la que se registran velocidades de hundimiento de 40 centímetros por año o mayores al inicio de la etapa y que tienden a disminuir en forma progresiva hasta llegar al final de la etapa a valores de 10 centímetros por año.

Datos más recientes del hundimiento fueron registrados a través de un gran número de piezómetros por la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México en las últimas tres décadas. Una nueva época de mediciones se inició por parte del Departamento del Distrito Federal y consiste en nivelaciones cada dos años de 1978 a 1994.

### **Hundimiento 1891-1994**

La ilustración 4 muestra el hundimiento acumulado del terreno de 1891 a 1994, observándose máximos de poco más de 10 metros en el centro de la ciudad; hundimientos entre 6 y 7 metros del centro hacia el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; hundimientos ligeramente mayores a 6 metros entre el Canal Nacional y el Canal de Chalco en el tramo donde se encuentra la batería de pozos Tlahuac-Neza; y hundimientos ligeramente mayores a 5 metros en el área de Tlahuac.

Los hundimientos tienden a desaparecer hacia las elevaciones topográficas correspondientes a la Sierra de las Cruces al poniente, la Sierra del Chichinautzin al sur y, el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina en el centro-este de la ciudad.

### **Hundimiento 1983-1992**

Por ser el período con mayor consistencia en nivelaciones diferenciales, la DGCOH-DDF construyó la configuración del hundimiento del terreno para el período 1983-1992, la cual se muestra la ilustración 5 donde se observa que los mayores hundimientos se registraron en la zona oriental, alrededor del Aeropuerto Internacional Benito Juárez con entre 150 y 250 centímetros; hacia el centro de la ciudad el hundimiento registrado en el período aquí tratado es de alrededor de 100 centímetros. En el sur, entre Xochimilco y Tlahuac, los hundimientos han sido de entre 100 y poco más de 150 centímetros. Se hace notar que esta configuración se construyó con más de 1500 bancos de nivel que se han venido midiendo cada 2 años.

## **Hundimiento Medio Anual**

Tomando en cuenta que la configuración mencionada en el inciso anterior presenta buen control y amplia distribución para un período de 9 años, se consideró que podría tomarse como representativa para la obtención de un hundimiento medio anual.

De esta manera, se dividieron los datos de la configuración entre 9 y se obtuvo el hundimiento medio anual. Observándose valores máximos de 30 centímetros en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcoyotl; entre 20 y 25 centímetros anuales de hundimiento en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; alrededor de 10 centímetros en el centro de la ciudad; entre 2 y 5 centímetros en el área de Azcapotzalco; alrededor de 15 centímetros en los área de Xochimilco y el Canal de Chalco en el tramo donde se ubica la batería de pozos Tlahuac-Neza.

## **Predicción del Hundimiento**

Para la predicción de los hundimientos que se registrarán en los próximos años en la ZMCM, se aplicaron varios métodos de cálculo. Estos, correspondieron a: Un método estadístico lineal; al cálculo de la predicción mediante regresión logarítmica y; a la aplicación de un modelo matemático desarrollado por C. Cruickshank, *et al*, 1979 (DGCOH-DDF, 1992).

## **Predicción de Hundimientos Sobre los Principales Drenes**

De las 25 secciones elaboradas, en el presente trabajo se presenta una de ellas a manera de ejemplo que incluye el hundimiento histórico y predicción al año 2000 a lo largo del Gran Canal de Desagüe, desde su inicio en el kilómetro 0 hasta el túnel del Tequisquiac en el kilómetro 47 (ilustración 6). En los primeros kilómetros del trazo, el hundimiento ha sido considerable y disminuye en dirección al norte. Entre los kilómetros 0 y 18, el hundimiento medio registrado para el período 1963-1993 fue de 2 metros; del kilómetro 18 al 20 el hundimiento fue menor, con una media de 1 metro para el período mencionado. En contraste, en la porción norte del canal entre el kilómetro 20 y el 46, el hundimiento medio fue de 40 centímetros.

Se obtuvo la predicción del hundimiento a lo largo de los principales drenes. Los resultados más sobresalientes, se marcan en la ilustración 7, observándose que existirán asentamientos diferenciales que deberán remediarse a fin de evitar inundaciones.

## **Conclusiones**

La presencia de antiguos lagos en el Valle de México, originó la acumulación de un sedimento arcilloso que actualmente cubre la parte plana de la Zona Metropolitana. Las características de las arcillas y los efectos a que se encuentra sujeta, han sido la causa del hundimiento del terreno.



En secciones geológicas elaboradas a lo largo de los ejes de los principales drenes, se diferenci6 la capa de arcillas que sobreyace al acuífero, observándose que los hundimientos son proporcionales al espesor de las arcillas.

Las arcillas est6n saturadas presentando un nivel freático a entre 2 y 3 metros de profundidad. Bajo ellas se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como semiconfinado, imprimiendo una presi6n ascendente en la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la Zona Metropolitana la explotaci6n del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel piezométrico y eliminado la presi6n hidr6ulica que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas modificando el tipo de acuífero, de confinado a libre.

El hundimiento total acumulado de 1891 a 1994, alcanza máximos de poco más de 10 metros en el centro de la ciudad y hundimientos ligeramente mayores de 6 metros en la zona sur del Distrito Federal.

Se obtuvo el hundimiento medio anual, obteniéndose valores máximos de 30 cm/año en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcoyotl; entre 20 y 25 cm/año en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; alrededor de 10 cm/año en el centro de la ciudad; entre 2 y 5 centímetros en el área de Azcapotzalco y; alrededor de 15 cm/año en el área de Xochimilco y Canal Chalco.

A lo largo de los 47 kil6metros de longitud del Gran Canal de Desagüe, se observa que prácticamente no existe pendiente entre el cadenamamiento km-0 y el km-18 y, que los hundimientos para el año 2000 ser6n de hasta 100 centímetros. Alrededor del kil6metro 18 prácticamente permanecer6 estable. A partir del cadenamamiento km-18 y hasta su salida hacia el t6nel de Tequisquiac, se presenta una pendiente de  $1.5 \times 10^{-4}$ . El hundimiento al año 2000 (al norte del kil6metro 18), ser6 de 40 a 80 centímetros.

## Referencias

Carrillo, Nabor. 1969. *El Hundimiento de la Ciudad de México Proyecto Texcoco*. Secretaria de Hacienda y Crédito p6blico. NAFINSA.

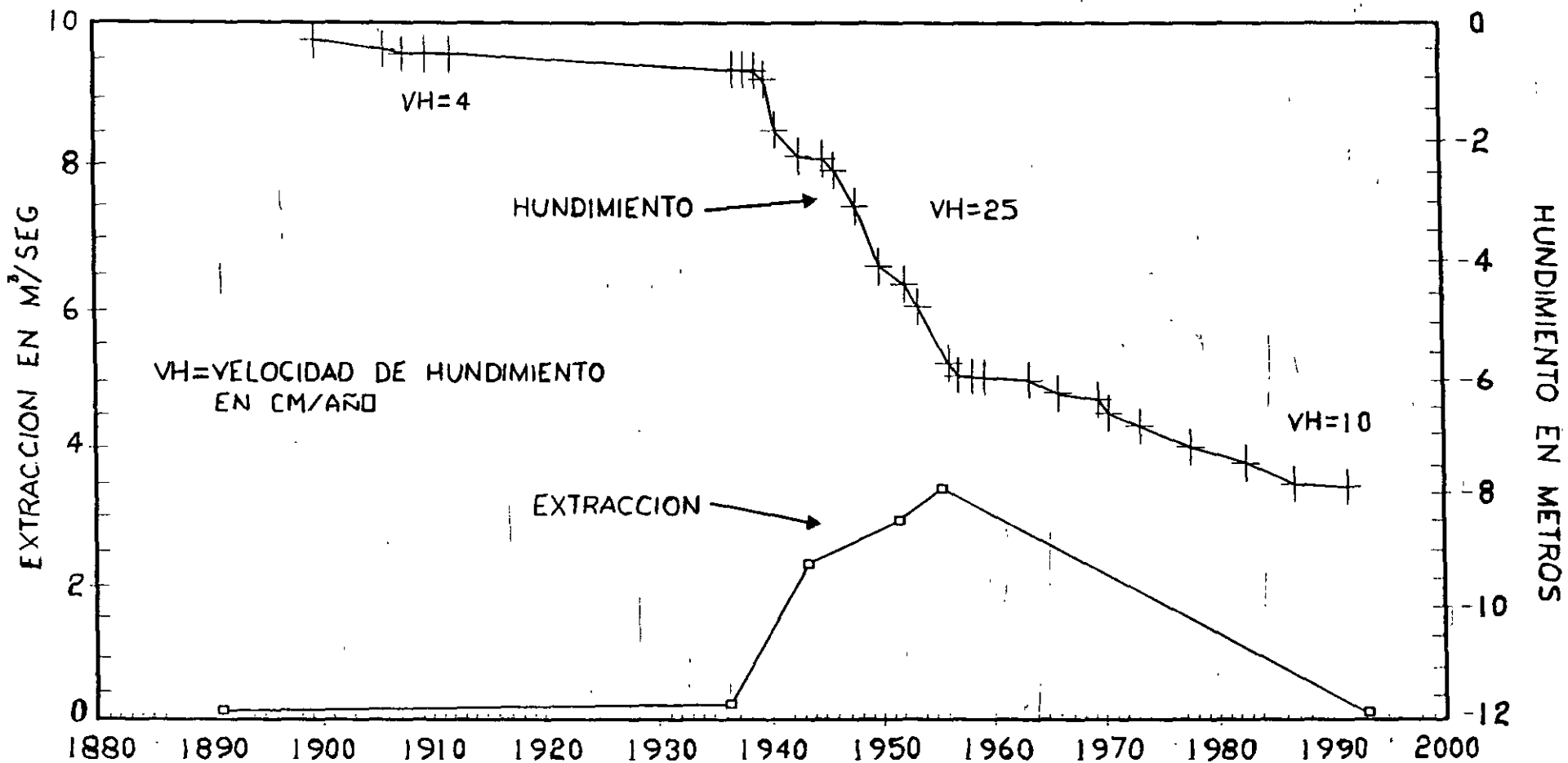
Cruickshank, C., I. Herrera, R. Yates, J.P. Hennart, D.R. Balarezo y R. Magaña, 1979. *Modelo de Predicci6n del Hundimiento del Valle de México*. Estudio elaborado para el D.D.F.

Departamento del Distrito Federal (DDF). 1982. *El Sistema Hidr6ulico del Distrito Federal*. Publicaci6n de la Direcci6n General de Construcci6n y Operaci6n Hidr6ulica.

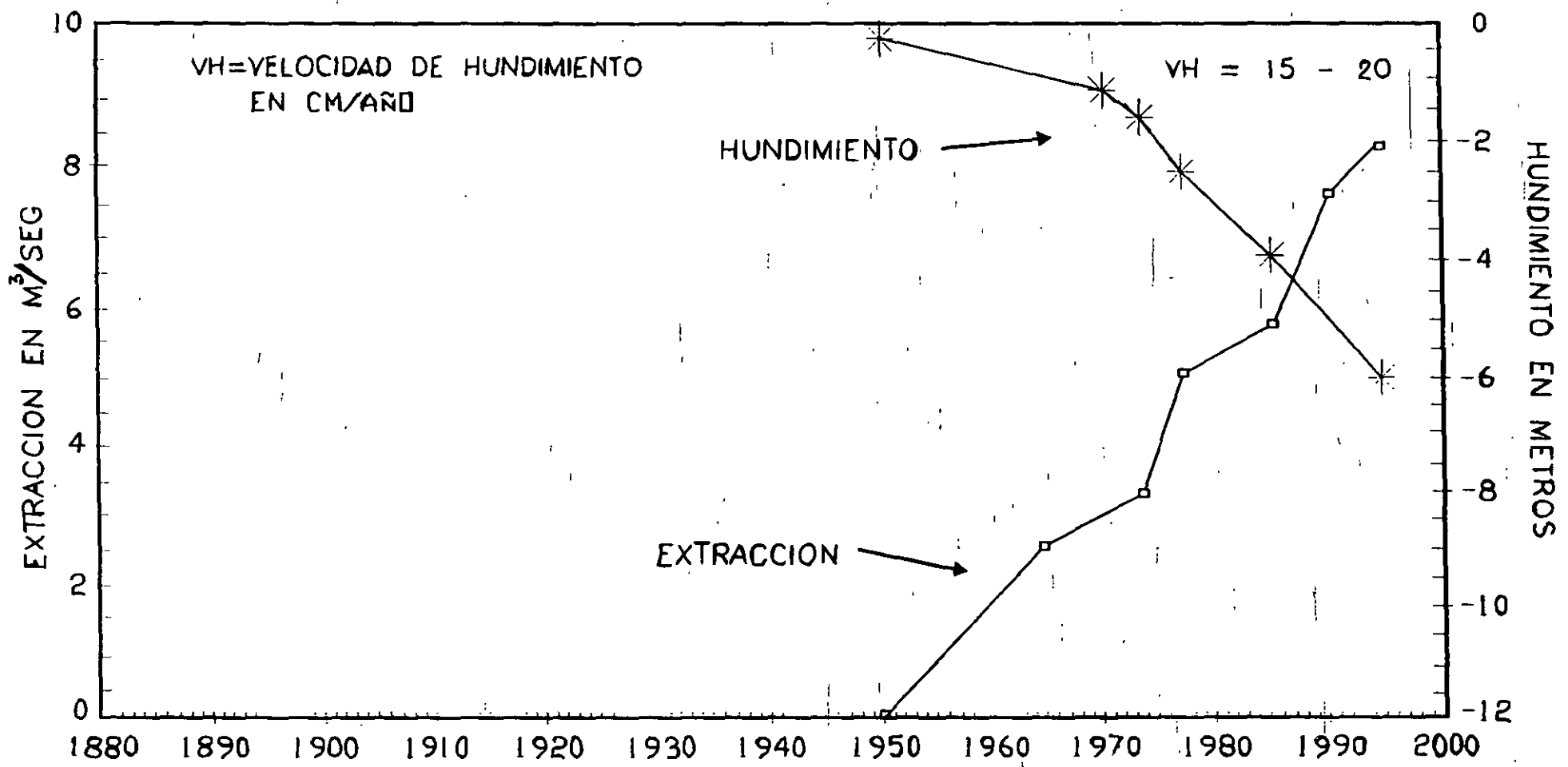
DGCOH-DDF. 1992. *Políticas de Extracci6n de Agua del Subsuelo Mediante el Modelo Matemático de Abatimientos-Hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

DGCOH-DDF. 1994. *Evaluación de los Hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V., como parte del Plan Maestro de Drenaje de la ZMCM.

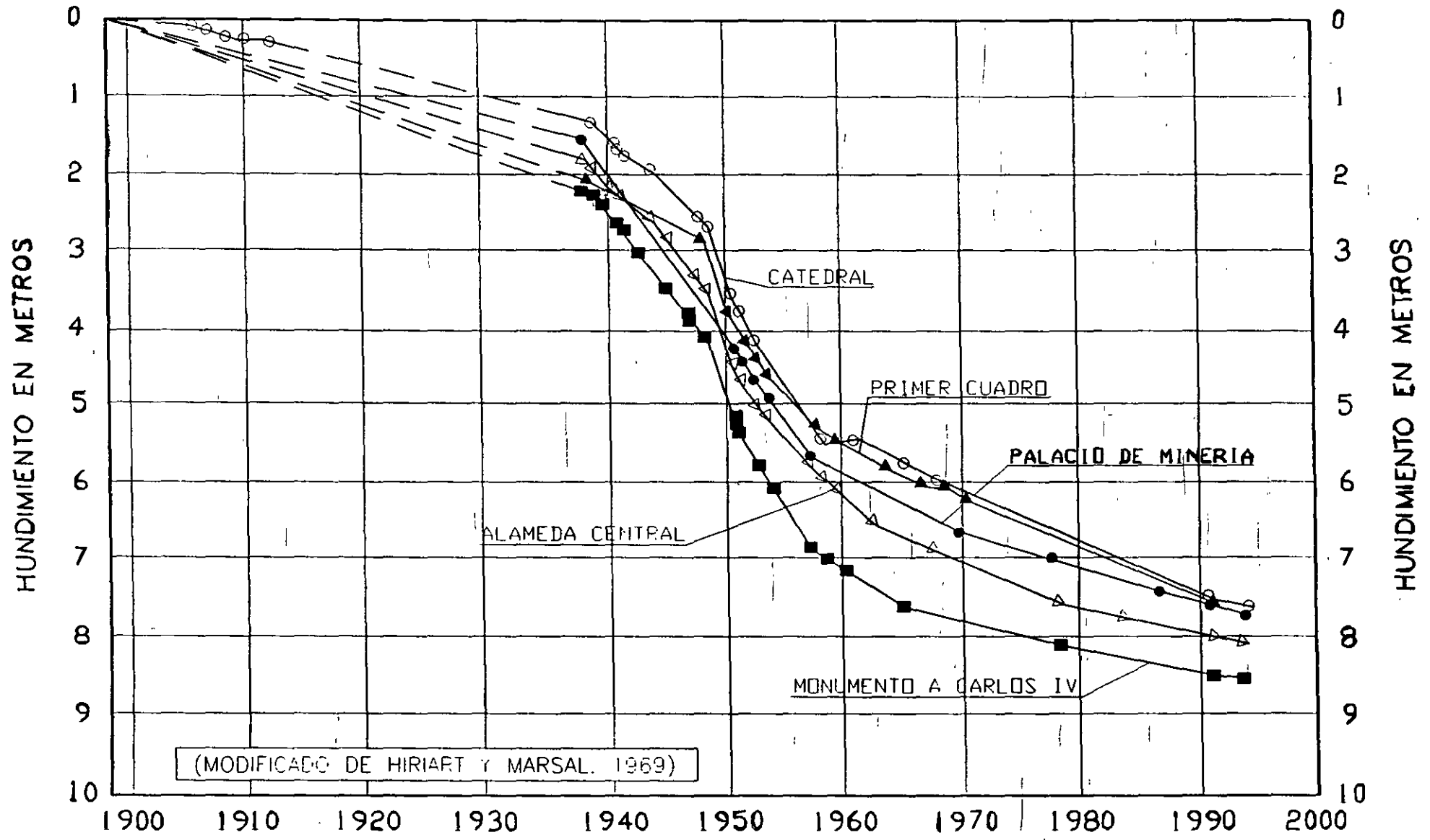
Hiriart, F. y R. Marsal. 1969. *El Hundimiento de la Ciudad de México*. En: *El Hundimiento de la Ciudad de México Proyecto Texcoco*. SHCP, NAFINSA.



1.- EXTRACCION DE AGUA Y HUNDIMIENTOS EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE MEXICO

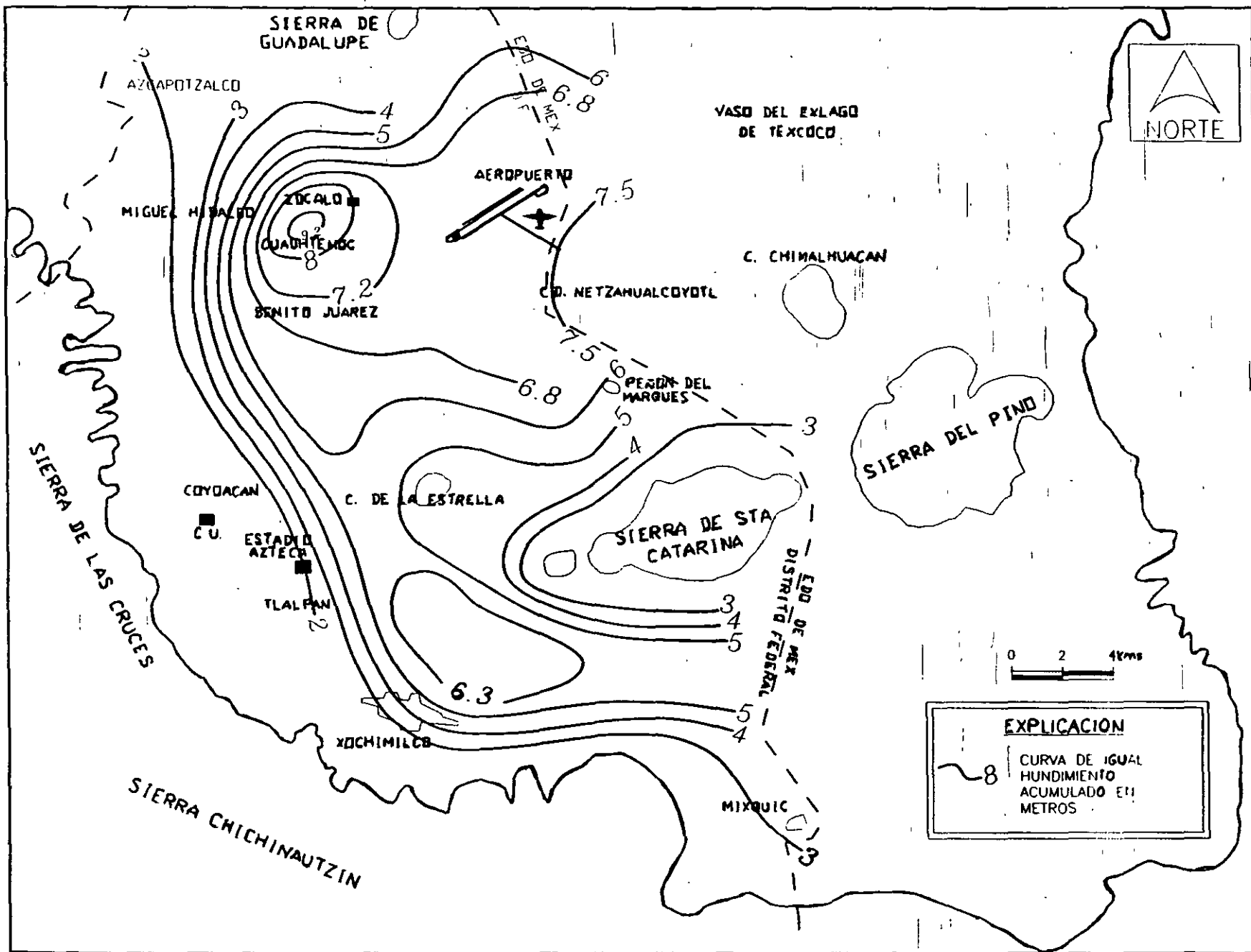


2.- EXTRACCION DE AGUA Y HUNDIMIENTOS EN LA ZONA SUR DEL D.F. (XOCHIMILCO-CHALCO)

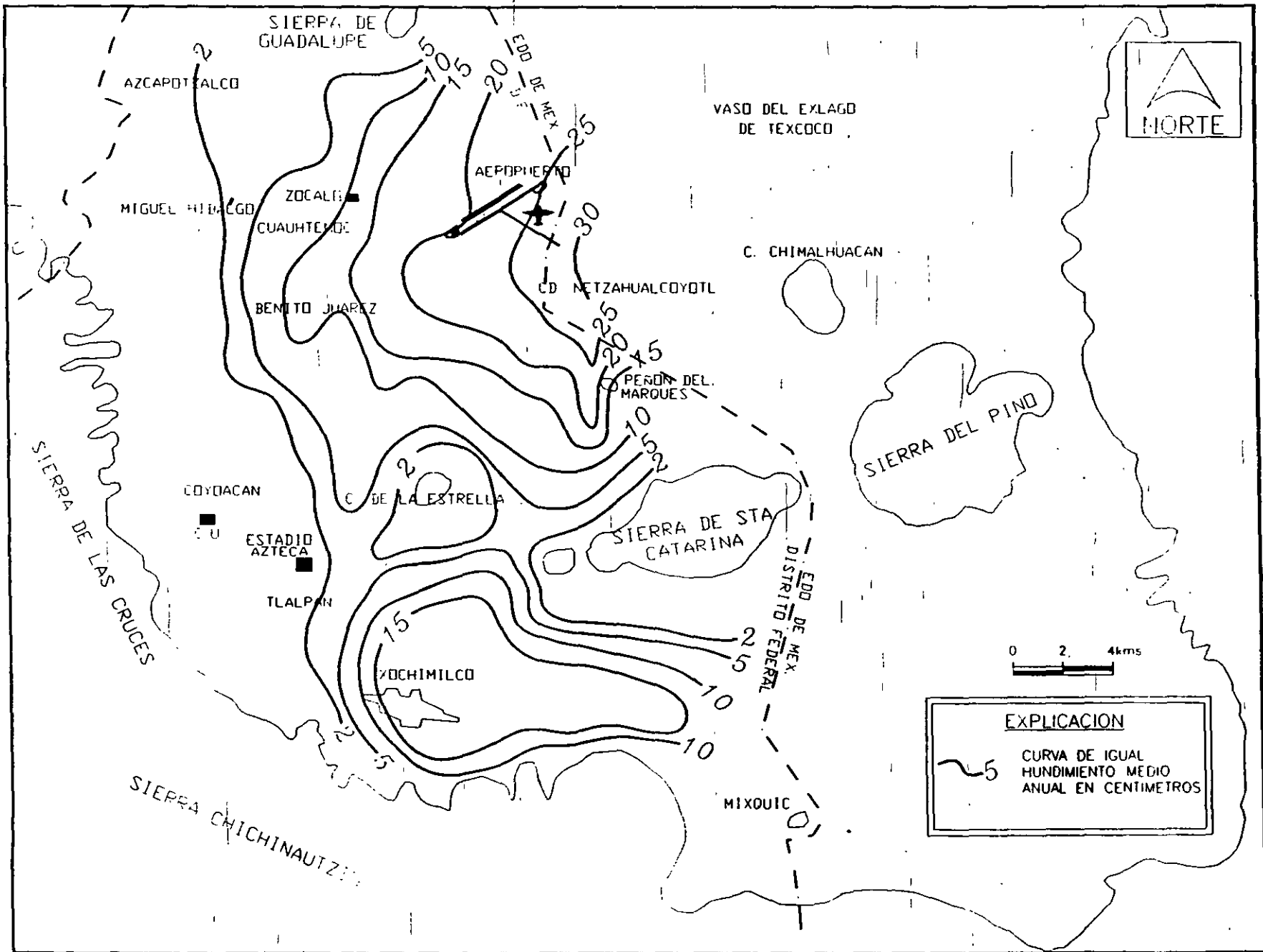


3.- HUNDIMIENTOS EN VARIOS PUNTOS DE LA CIUDAD

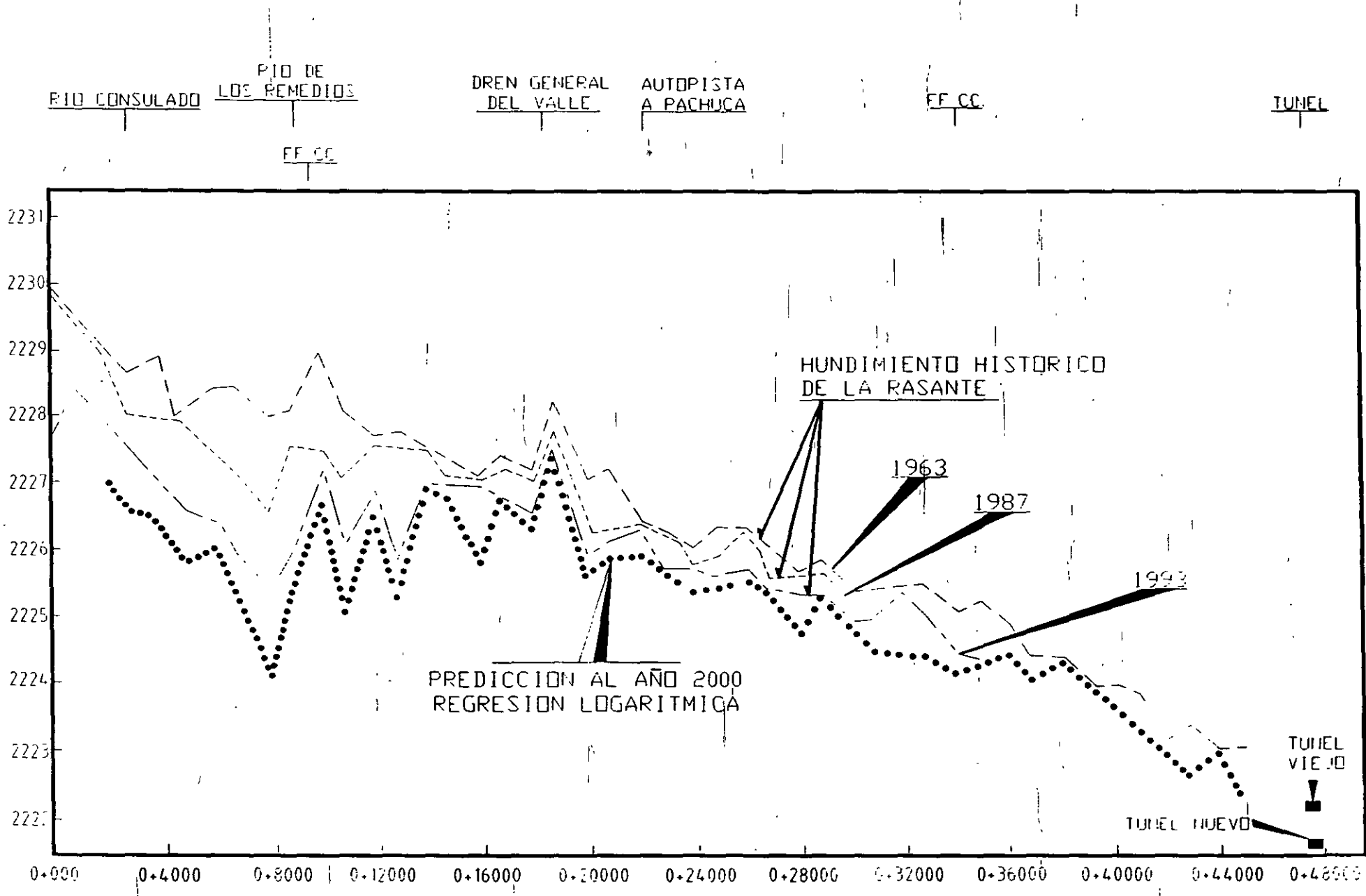
01



4.- HUNDIMIENTO DEL TERRENO PERIODO 1891-1994

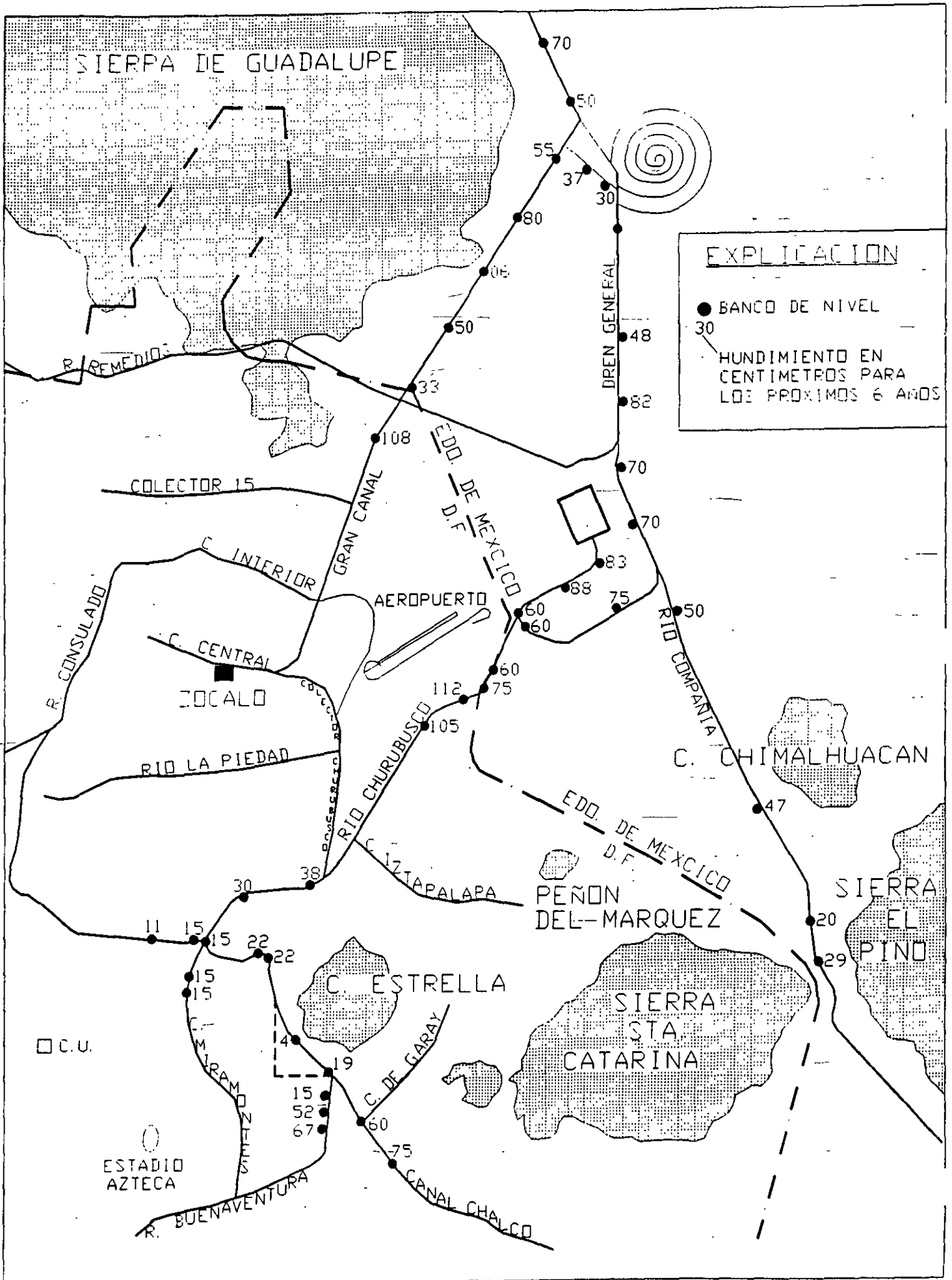


5.4 HUNDIMIENTO MEDIO ANUAL 1983-1992

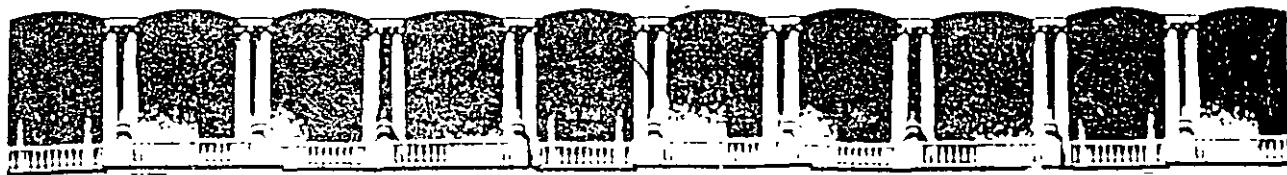


6 - HUNDIMIENTO HISTORICO Y PREDICCIÓN SOBRE EL FONDO DEL GRAN CANAL DEL DESAGÜE





7 - PREDICION DEL HUNDIMIENTO 1991-2000 EN CENTIMETROS.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***REMEDIACIÓN DE SUELOS***

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# IAS

AMBIENTE Y SANEAMIENTO

Jorge Mentruyt  
Empresa  
y Medio  
Ambiente  
**54**  
página

Brasil  
Ley de  
Medio  
Ambiente  
**40**  
página

R. Forro y A. Ouvina  
Gestión  
Ambiental de  
Residuos  
**64**  
página

Las características propias de cada tipo de contaminación, de la zona de trabajo y de la metodología utilizada condicionarán la forma de operación y, en consecuencia, los distintos conceptos teóricos y científicos en los que la remediación se basa.

# Remediación de suelos

# Biorremediación

— Susana Saval (\*)

**La característica más importante de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes; algunos de ellos pueden ser completamente degradados, de forma tal que cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.**

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para el saneamiento de suelos y acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos. El proceso obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos, los cuales se seleccionan de manera natural en presencia de contaminantes y la actividad biodegradadora puede ser estimulada por adición de nutrientes básicos. Entre las alternativas que existen para el saneamiento de sitios contaminados, la biorremediación es la mejor opción desde los puntos de vista ambiental y económico, sin embargo, no puede ser aplicada a todos los casos. En este trabajo se describe el procedimiento para aplicar tecnologías de biorremediación haciendo énfasis en los aspectos más importantes que deben ser tomados en consideración.

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México, son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en una mayoría de casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla y, además, se encuentran intemperizados.

En general, los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes a simple vista cuando se encuentran en la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lisiviados generados por las lluvias arrastran los compuestos solubles. Gasolinas, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo porque su viscosidad es menor a la del agua, durante su trayectoria son adsorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático, ahí se dispersan de acuerdo a la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

# ación

Entre las alternativas que existen en el mercado para el saneamiento de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva por ser relativamente económica, versátil, efectiva y amable al ambiente.

## Características de las tecnologías de biorremediación

La más importante característica de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes, algunos de ellos pueden ser completamente degradados, de forma tal que cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.

En los sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollaron capacidad degradadora. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos.

## Ventajas de la biorremediación

Una ventaja importante de la biorremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos. Es

**Entre las alternativas que existen en el mercado para el saneamiento de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva.**

difícil hacer una comparación de costos, porque es necesario conocer las características de cada sitio en particular, pero en términos generales se puede decir que la biorremediación es por lo menos 10 veces más económica que la incineración y 3 veces más económica que algunas tecnologías fisicoquímicas de inmovilización. Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, que hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo como México.

La biorremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados hasta compuestos inocuos como el bióxido de carbono. Además de que cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La versatilidad de la biorremediación se basa en que puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente



se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona; bioacrecimiento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos; o bien, bioventeo cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para aportar el oxígeno requerido para el metabolismo. En cualquiera de las opciones anteriores, puede realizarse fuera del sitio si la contaminación está en el suelo superficial, pero necesariamente in situ cuando los contaminantes han alcanzado el manto freático.

Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el suelo limpio (Fig. 1). Además, después de la biorremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas.

En el caso de aguas subterráneas, la biorremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento-inyección que consiste en extraer el agua subterránea,

promover la biodegradación de los contaminantes en reactores instalados en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establece una recirculación y el sitio mismo se convierte en un biorreactor (Fig. 2). A pesar de ser la tecnología más empleada a nivel mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación por ejemplo: los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

### Desventajas de la biorremediación

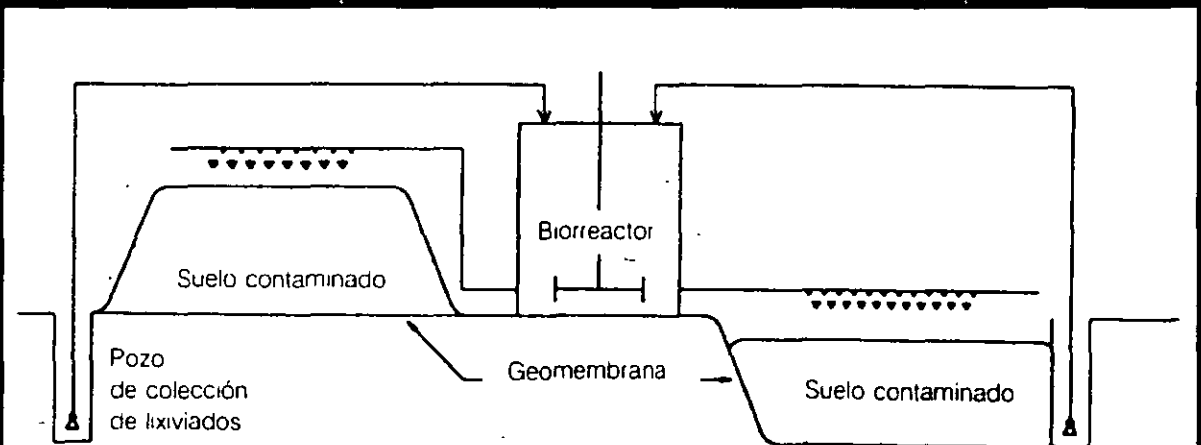
La biorremediación no puede aplicarse en campo cuando:

- se tienen compuestos radioactivos
- los compuestos orgánicos contaminantes son altamente halogenados
- existen metales pesados en concentraciones tales que inhiben la actividad microbiana
- las condiciones microambientales son desfavorables

Debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Puede ocurrir que cuando las concentraciones de los contaminantes orgánicos son muy altas, se observan fenómenos de inhibición de la actividad microbiana.

Cuando el material geológico es netamente arcilloso, no es muy recomendable la biorremediación, porque la baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante

**Figura** Diagrama conceptual de una biorremediación de suelo superficial fuera del sitio: biopila (izquierda) y biocelda (derecha).



cuando la contaminación llega hasta el nivel freático y el tratamiento necesariamente será *in situ*. Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agregan residuos agroindustriales, con lo cual se aumenta la permeabilidad y se favorece así, la transferencia de masa.

### **Desarrollo de proyectos de biorremediación**

En el desarrollo de proyectos en biorremediación es conveniente integrar expertos en las diferentes disciplinas involucradas, como son: biotecnología, geohidrología, ciencias del suelo, ingeniería, química y legislación ambiental, quienes deben integrarse completamente en el problema desde que se inicia la caracterización. Esto permitirá sentar las bases para plantear estrategias que conduzcan a la solución de cada problema en particular.

La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación. El trabajo de campo se inicia con la prospección del sitio y su caracterización en la que se incluyen cuatro enfoques básicos: geohidrológico, fisicoquímico, microbiológico y química de contaminantes. La evaluación integrada de los resultados obtenidos permitirán definir la posibilidad de aplicar una biorremediación mediante estrategias *ad hoc* para cada sitio.

En la práctica común, la caracterización microbiológica es poco considerada, a pesar de que es determinante para definir la aplicabilidad de una biorremediación. Consta de dos tipos de estudios, la cuantificación de los microorganismos presentes incluyendo las pruebas de biofactibilidad, y los estudios de biodegradabilidad o biotratabilidad en el laboratorio. Estos últimos son indispensables para predecir el tiempo que tomará la biodegradación en campo.

La estrategia para el saneamiento de un sitio es única para cada caso, y debe estar bien soportada en los resultados de su caracterización, de la misma forma que el médico que opera a un paciente, es aquel que diagnosticó la enfermedad y después de varios estudios y análisis sugiere una cirugía. Dada la importancia de la caracterización de un sitio, no se debe considerar que ésta es solo un requisito administrativo, sino una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos y se deben involucrar expertos en cada área.

Por lo que respecta al seguimiento de la concentración de contaminantes, existen dos enfoques uno de ellos es seguir la reducción de los compuestos

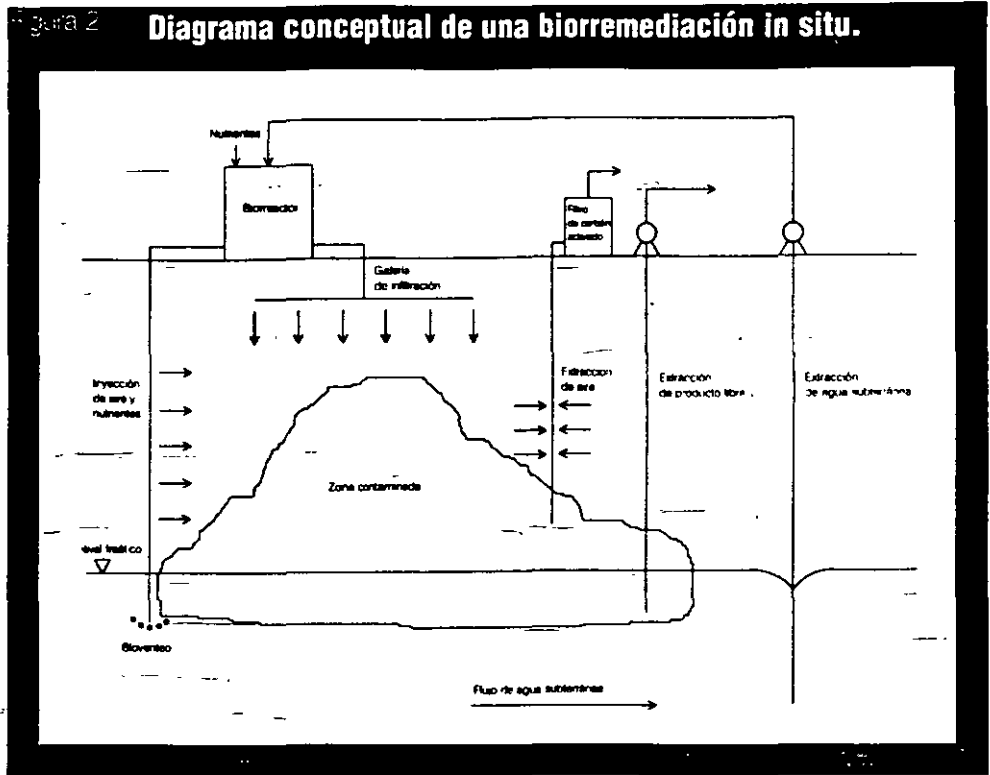
químicos más tóxicos los cuales sirven como parámetros indicadores y el otro es utilizar una medida más general de hidrocarburos totales. Para ejemplificar el primer caso, en sitios contaminados con gasolinas se puede hacer referencia a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles: benceno; tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), mientras que en sitios contaminados con diesel o derivados más pesados, se cuantifican hidrocarburos polinucleoaromáticos entre 2 y 5 anillos. Al establecer los límites de limpieza será necesario definir cuál de los dos conceptos es el más adecuado, dado que el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo al saneamiento del sitio. La tendencia actual parece inclinarse hacia una evaluación de riesgo, pero también se recurre a normativas extranjeras que varían en un amplio margen. La primera opción toma su tiempo y tiene un costo, con la segunda se tendrá la incertidumbre de saber si fue la más adecuada.

### **Riesgos de la biorremediación**

Una de las preocupaciones actuales dentro del campo de la biorremediación, es la constante introducción de productos comerciales patentados de origen microbiano. Desde un punto de vista muy riguroso, se sabe que los microorganismos nativos no son patentables porque son parte de la biodiversidad, solamente se pueden patentar aquellos que han sido modificados genéticamente. Esto deja ver la posibilidad de que varios productos patentados sean producto de la biotecnología molecular.

Por otro lado, se ha visto que existen en el mercado gran cantidad de productos microbianos vendidos como "polvos mágicos" desconocidos capaces de destruir todo tipo de contaminantes, los cuales están siendo comercializados por gente de negocios

**La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación.**



que no tiene conocimientos de microbiología o de biotecnología y mucho menos, de bioseguridad. Una de las recomendaciones de los fabricantes de productos microbianos es realizar aplicaciones consecutivas al suelo contaminado con la finalidad de alcanzar una cierta proporción microbiana, pero la realidad en muchos casos es que los microorganismos que se dicen "mágicos" no logran adaptarse a las condiciones adversas del sitio, y por más adiciones que se hagan no se registra la actividad degradadora.

Además de los productos microbianos, también se venden aditivos que son productos químicos patentados de formulación también desconocida, los cuales pueden ser nutrientes, o bien, agentes tensoactivos (surfactantes). Estos últimos no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo o a cuerpos de agua ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación. Cuando la aplicación de dichos productos se hace en una biopila o biocelda se pueden controlar dentro del sistema, pero si el tratamiento es in situ la dispersión de contaminantes puede llegar hasta las aguas subterráneas o cuerpos de agua superficiales alejados del sitio de tratamiento

### Aplicación de tecnologías de biorremediación

A pesar de que no se cuenta con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la biorremediación en México, es obvio que éste existe por tratarse de un país netamente petrolero. De hecho, esa es la razón por la que un importante número de compañías de servicios ambientales aparecen diariamente con la finalidad de vender sus productos o servicios de biorremediación. En varios casos los resultados han sido poco exitosos, por las bajas eficiencias de limpieza y un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos desconocidos, mientras que otros casos los resultados han sido exitosos.

La necesidad de dar solución urgente a varios problemas ambientales, muchas veces lleva a la aplicación de tecnologías disponibles en el mercado que no siempre aportan los resultados esperados. Para lograr éxito durante la aplicación de cualquier tipo de tecnología, es indispensable adaptar e innovar para casos específicos, o incluso realizar nuevos desarrollos, esta situación aún no se ha

conceptualizado dentro del campo de la biorremediación

Un aspecto al que se le ha dado poca importancia es que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat.

**Un aspecto al que se le ha dado poca importancia es que las características de cada suelo son diferentes, y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat.**



adaptan fácilmente a cualquier hábitat. El suelo de un sitio específico, tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares, que los hacen diferentes a los suelos de otro lugar del mundo. Por lo que respecta a las características de los contaminantes, conviene resaltar dos aspectos que son: su complejidad química y el hecho de que en algunos casos, tienen ya un avanzado grado de intemperismo. Estos aspectos, que por lo general no son tomados en consideración, dificultan el tratamiento de un suelo contaminado y algunas tecnologías probadas exitosamente en otros países no han funcionado en México.

Las compañías que cuentan con un buen respaldo científico deben tener bien identificadas las virtudes y limitaciones de sus tecnologías, con la finalidad de tomar la decisión de cuándo es conveniente sugerir su aplicación y cuándo es mejor recomendar otra opción. Para aquellas tecnologías que se han aplicado en el extranjero es indispensable asegurarse de que hayan tenido experiencias previas al tratar contaminantes de composición conocida y comparables al tipo de contaminantes que comúnmente se encuentran en México.

Un aspecto adicional que se debe considerar que la mejor propuesta económica no siempre corresponde a la mejor alternativa técnica. Es importante realizar buenos trabajos de caracterización del sitio, de la contaminación y de la factibilidad de realizar el proceso por vía biotecnológica, pero en la práctica común éstos son muy limitados y no están encaminados a comprobar que la biorremediación funcionará en campo. Si se le dedicara más tiempo y recursos, permitiría conocer perfectamente el comportamiento del sitio y así plantear estrategias ad hoc para su remediación.

Las oportunidades de negocio para la biorremediación existen, pero dada la gran variedad de opcio-

(\*) La Dra. Susana Saval esta a cargo de la Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (UNAM). El presente artículo fue publicado en la Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales. Año 10, Nº 34, Femisca, México, 1998

**Agradecimientos**

Al Ing. Federico Hach por su ayuda a la elaboración de los esquemas presentados

nes que existen en el mercado y la poca experiencia de las empresas ambientales en este campo, se ha planteado la necesidad de establecer políticas en las que se demuestren aspectos como:

- conocer la base científica de funcionamiento de la tecnología
- las experiencias previas, buenas y malas, en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar
- que se cuenta con el personal técnico idóneo que será responsable del proyecto en campo y que domina la tecnología, de tal forma que pueda solucionar imprevistos durante el proceso
- haber realizado una caracterización completa del sitio, incluyéndolo las pruebas de biofactibilidad para el problema específico que va a ser tratado
- justificar el uso de productos microbianos y de aditivos, dar a conocer su composición y características de seguridad hacia el ambiente
- contar con un protocolo bien elaborado donde se establezca el seguimiento que se dará al proceso durante la aplicación de la tecnología en campo

En los casos donde no se tengan experiencias previas, sería conveniente realizar pruebas piloto de demostración en campo, antes de operar en escala real. **as**

**Bibliografía**

•Alper J., 1993. Biotreatment firms rush to marketplace. *Bio/Technology* 11 973-975

•Aury A.R. and Ellis G.M., 1992. Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Environ. Progress* 11(4) 318-323

•Blackburn J.W. and Halfer W.R., 1993. The impact of biochemistry, bioavailability and bioactivity on the selection of bioremediation techniques. *TIBTECH* 11 328-333.

•Caplan J.A., 1993. The worldwide bioremediation industry: prospects for profit. *TIBTECH* 11: 320-323

•Finnerty W.R., 1994. Biosurfactants in environmental biotechnology. *Curr. Op. Biotechnol.* 5 291-295

•Gibson D.T. and Subramanian V., 1984. Microbial degradation of aromatic hydrocarbons, in Gibson D.T. (Ed.) *Microbial degradation of organic compounds*. Microbiology Series Vol 13 181-252.

•Harvey R.W., 1993. Fate and transport of bacteria injected into aquifers. *Curr. Op. in Biotechnol.* 4: 312-317

•Heitzer A., and Saylor G.S., 1993. Monitoring efficacy of bioremediation. *TIBTECH* 11: 334-343.

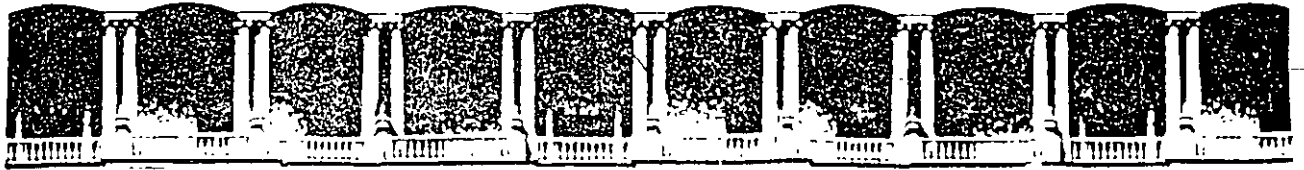
•Liu S. and Sufita J.M., 1993. Ecology and evolution of microbial populations for bioremediation. *TIBTECH* 11 344-352

•Riser-Roberts E., 1992. Bioremediation of petroleum contaminated sites. C.K. Smoley, Boca Raton, FL, USA

•Rogers J.A., Tecaldi D.J., and Kavanaugh M.C., 1993. A screening protocol for bioremediation of contaminated soil. *Environ. Progress* 12(2) 146-156

•Saval S., 1995. Remediación y restauración, en PEMEX: Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro, coedición UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp 151-189

•Sollero J.L. and Castañón R., 1996. Environmental Biotechnologies in Mexico: Potential and Constraints for Development and Diffusion. In *Biotechnology for Sustainable Development*, University of Tennessee, Knoxville, USA.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II: —**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE  
RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS***

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**



Agencia de Cooperación  
Internacional del Japón

**CENICA**

Centro Nacional de Investigación  
y Capacitación Ambiental  
MÉXICO - JAPÓN



INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA  
SEMARNAP

# MEMORIA

En el Marco del Programa  
de Cooperación Técnica  
México - Japón

## SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

MÉXICO  
del 26 al 29 de mayo de 1997



Sociedad Alemana de  
Cooperación Técnica

Québec



Casa abierta al tiempo  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

# LA BIOREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

*Susana Saval  
Investigadora*

*Instituto de Ingeniería, UNAM*

## **-Introducción**

La bioremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados. Ésta puede ser aplicada exitosamente cuando los contaminantes son compuestos orgánicos biodegradables, como es el caso de los hidrocarburos. En bioremediación se aprovecha la capacidad metabólica de microorganismos que en el suelo se encargan de reciclar la materia y la energía.

Cuando ocurre un derrame de hidrocarburos en un sitio, la flora microbiana presente se somete a un proceso de selección natural, en el cual los microorganismos que sobreviven son aquellos que desarrollan capacidad para tolerarlos, e incluso degradarlos. Los procesos de bioremediación no violan la primera ley de la termodinámica, es decir, que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes. Si la transformación de los hidrocarburos llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización.

Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados, la bioremediación se ha perfilado como la mejor opción desde los puntos de vista ambiental y económico. Sin embargo, no puede ser aplicada a todos los casos, por lo que para recomendar su uso deben realizarse estudios de biofactibilidad que comprueben la biodegradación de los contaminantes.

Las tecnologías de bioremediación serias cuentan con un respaldo científico bien establecido, sin embargo, en el mercado ambiental se pueden encontrar productos de todo tipo, que incluso pueden aumentar el riesgo de un problema de contaminación en lugar de reducirlo. En este trabajo se hace un análisis de las tecnologías de bioremediación y se plantea la necesidad de establecer políticas de evaluación para evitar la aplicación de aquellas que no garanticen la limpieza de sitios contaminados.

## **Contaminación por hidrocarburos**

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México, son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en muchos casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla, o bien, se encuentran intemperizados.

En general, los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes a simple vista cuando se encuentran en la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arras-

tran los compuestos solubles. Gasolinas, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo, durante su trayectoria son adsorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático, ahí se dispersan de acuerdo a la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

### Conceptos de remediación y restauración

En el artículo 3 fracción XXXIII de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, *restauración* se define como *el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales*. De manera muy similar, lo establece la Ley Ambiental del Distrito Federal en su artículo 6 fracción XXXIII.

De acuerdo al Diccionario de la Lengua Española, *restaurar* es *reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía; reparar una pintura, escultura o edificio del deterioro que ha sufrido*. Este es el concepto que se maneja en las leyes referidas a la restauración de edificios y monumentos.

Al tratar de interpretar las leyes ambientales, el término restauración sería aplicable solamente en sitios donde antes de que ocurriera una contaminación se apreciaba la evolución y continuidad de los procesos naturales, y podría interpretarse como una actividad meramente cosmética, más que de saneamiento o de limpieza.

El término *remediación*, no está registrado en los diccionarios de la lengua española, tal vez por eso en México no ha sido incluido en documentos oficiales. Sin embargo, se ha vuelto del dominio público como una

traducción de "*remediation*" que en Estados Unidos, Canadá y otros países de lengua inglesa, se ha venido usando para referirse a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados. Un término que sí aparece en los diccionarios de la lengua española es el verbo *remediar*, cuya definición es *poner remedio al daño; corregir o enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; librar, apartar o separar de un riesgo; evitar que suceda algo de que pueda derivarse algún daño o molestia*. Si nos ubicamos dentro del terreno ambiental esta definición es más precisa, ya que después de detectar un problema de contaminación lo que se busca es evitar un riesgo a la salud y al ecosistema en general.

A este respecto, tal vez sería menos grave adoptar el término *remediación*, o bien sus sinónimos técnicos, *limpieza* o *saneamiento*, en lugar de seguir-utilizando el término *restauración* cuya definición puede entenderse como una actividad cosmética. Algo que ilustra lo anterior, es el hecho de enterrar los contaminantes y encima sembrar plantas. En estos casos será visible la evolución de los procesos naturales en la superficie, pero quedará fuera de nuestra vista lo que ocurra en el subsuelo y ahí los contaminantes podrán migrar hacia la profundidad en función de las características del sitio, creando un problema de mayor riesgo para el ambiente circundante y los habitantes de la región.

### Alternativas tecnológicas para la remediación de sitios contaminados

En el mercado ambiental se ofrecen tecnologías de todo tipo para la remediación de sitios contaminados, las cuales se pueden clasificar en diferentes formas. De acuerdo a su base de funcionamiento, se clasifican en térmicas, fisicoquímicas y biológicas.

Las tecnologías térmicas están representadas por la incineración y la desorción. Para las fisicoquímicas existe una gran variedad de opciones como: microencapsulación, lavado, estabilización, solidificación, extracción al vacío y extracción de producto líquido, entre otras. Las tecnologías biológicas son las de bioremediación en las que se utilizan microorganismos y la fitorremediación que consiste en la utilización de plantas para recuperar suelos superficiales.

### **Características de las tecnologías de bioremediación**

La capacidad de ciertos microorganismos para degradar hidrocarburos es lo que dio origen al desarrollo y aplicación de tecnologías de bioremediación, las cuales se han perfilado a nivel mundial como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados.

La más importante característica de la bioremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes, algunos de ellos pueden ser completamente degradados. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la ausencia de otros nutrientes esenciales para la actividad metabólica hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.

En los sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollaron capacidades degradadoras. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora

autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes será necesario recurrir a preparados microbianos.

### **Ventajas de la bioremediación**

Una ventaja importante de la bioremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos (Alper, 1993). Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, esto hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo.

La bioremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados a compuestos inocuos como el bióxido de carbono. Otra característica es que cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La bioremediación es versátil porque puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona; bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos; o bien, bioventeo cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar. Cualquier opción puede realizarse fuera del sitio, si la contaminación es superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado el nivel freático.

Cuando se trata de suelos superficiales y el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre

superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la bioremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas.

En el caso de aguas subterráneas, la bioremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento-recarga que consiste en extraer el agua subterránea, tratarla en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establece una recirculación.

A pesar de ser la tecnología más empleada a nivel mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación, por ejemplo: los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

### Desventajas de la bioremediación

La bioremediación no puede aplicarse en campo cuando:

- se tienen compuestos radioactivos
- los compuestos orgánicos contaminantes son altamente halogenados
- existen metales pesados en concentraciones tales que inhiben la actividad microbiana
- las condiciones microambientales son muy extremas

Debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Puede ocurrir que cuando las concentraciones de los contaminantes or-

gánicos son muy altas, se observen fenómenos de inhibición.

Tampoco es muy recomendable la bioremediación cuando el material geológico es netamente arcilloso, porque su baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante cuando la contaminación está en el nivel freático y el tratamiento es *in situ*. Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agrega arena, o bien, algunos residuos agroindustriales, con lo cual se aumenta la permeabilidad y se favorece así, la transferencia de masa.

### Riesgos de la Bioremediación

Una de las preocupaciones actuales dentro del campo de la bioremediación en México, es la constante introducción de productos comerciales patentados de origen microbiano. Desde un punto de vista muy riguroso, se sabe que los microorganismos nativos no son patentables porque son parte de la biodiversidad, solamente se pueden patentar aquellos que han sido manipulados genéticamente.

Se ha visto que a México han llegado productos microbianos vendidos como "polvos mágicos" desconocidos, capaces de destruir todo tipo de contaminantes, los cuales están siendo comercializados por gente de negocios que no tiene conocimientos de microbiología o de biotecnología y mucho menos, de bioseguridad.

Una de las recomendaciones de los fabricantes de productos microbianos es realizar aplicaciones consecutivas al suelo con la finalidad de alcanzar una cierta proporción, pero la realidad en muchos casos es que los microorganismos mágicos no logran adaptarse a las condiciones del sitio, y por más adiciones que se hagan no se registra la actividad degradadora.

Además de los productos microbianos, también se venden aditivos que son productos químicos patentados de formulación también desconocida, los cuales pueden ser nutrientes, o bien, tensoactivos (Saval, 1995). Estos últimos no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación. Cuando la aplicación de dichos productos se hace en una biopila o biocelda se pueden controlar dentro del sistema, pero si el tratamiento es *in situ* la dispersión de contaminantes ocurre en las aguas subterráneas.

### Desarrollo de proyectos de bioremediación

En el desarrollo de proyectos en bioremediación es conveniente integrar expertos en las diferentes disciplinas involucradas, esto es, biotecnología, geohidrología y ciencias del suelo, quienes deben integrarse completamente en el problema desde que se inicia la caracterización. Esto permitirá sentar las bases para plantear estrategias que conduzcan a la solución de cada problema en particular.

La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación. El trabajo de campo se inicia con la prospección del sitio y su caracterización en la que se incluyen tres enfoques básicos: geohidrológico, fisicoquímico y microbiológico. La evaluación integrada de los resultados obtenidos permitira definir la posibilidad de aplicar una bioremediación mediante estrategias *ad hoc* para cada sitio.

En la práctica común, la caracterización microbiológica es poco considerada, a pesar

de que es determinante para definir la aplicabilidad de la bioremediación. Consta de dos tipos de estudios, la cuantificación de los microorganismos presentes y las pruebas de biofactibilidad en el laboratorio. Estas últimas son indispensables para predecir el tiempo que tomará la biodegradación.

La estrategia para la limpieza de un sitio es única para cada caso, y debe estar bien soportada en los resultados de su caracterización, de la misma forma que el médico que opera a un paciente, es aquel que diagnosticó la enfermedad después de varios estudios y análisis. Dada la importancia de la caracterización de un sitio, no se debe considerar que ésta es solo un requisito administrativo, sino una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos y se deben involucrar expertos en el área.

Por lo que respecta al seguimiento de la concentración de contaminantes, existen dos enfoques, uno de ellos es seguir la reducción de los compuestos químicos más tóxicos, los cuales sirven como indicadores, y el otro es utilizar un parámetro más general. Por ejemplo, en el caso de sitios contaminados con gasolinas, se puede hacer referencia a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), o bien, al contenido de hidrocarburos totales. Al establecer los límites de limpieza será necesario definir cuál de los dos conceptos es el más adecuado, dado que el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo a la limpieza del sitio. La tendencia actual es basarse en una evaluación de riesgo, pero también se recurre a normatividades extranjeras que varían en un amplio margen (Saval, 1995). La primera opción toma su tiempo y tiene un costo, con la segunda se tendrá la incertidumbre de saber si fue la más adecuada.



## Participación del Instituto de Ingeniería en actividades de Bioremediación

La Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería se ha involucrado en diversos proyectos patrocinados por el sector paraestatal, con el interés de aplicar la bioremediación en casos reales. Los contaminantes más estudiados se refieren a combustibles derivados del petróleo, presentes en suelos superficiales y en aguas subterráneas. Durante el desarrollo de estos proyectos se han alcanzado varios logros como son:

- La aportación de elementos para generar una cultura de bioremediación de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos.
- El establecimiento de criterios para la evaluación de tecnologías de remediación de suelos contaminados.
- El desarrollo de metodologías para la caracterización fisicoquímica y microbiológica de suelos contaminados.
- La participación activa en la formación de recursos humanos altamente calificados.
- La interacción con otras disciplinas relacionadas con el área.

## Discusión

A pesar de que no se cuenta en México con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la bioremediación, éste existe (Solleiro y Castañón, 1996). De hecho, esa es la razón por la que un gran número de compañías extranjeras llegan a México con la finalidad de vender sus productos o sus servicios de aplicación de tecnologías. En varios casos los resultados han sido poco exitosos, por las bajas eficiencias de lim-

pieza y un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos desconocidos.

La necesidad de dar solución urgente a varios problemas ambientales, muchas veces lleva a la aplicación de tecnologías disponibles en el mercado que no siempre aportan los resultados esperados. La razón de lo anterior, es que las bacterias contenidas en los productos comerciales que se aplican, son incapaces de sobrevivir en ambientes diferentes a los de su origen. Un aspecto indispensable para lograr éxito durante la aplicación de cualquier tipo de tecnología, es la necesidad de adaptar e innovar, o incluso realizar nuevos desarrollos, situación que no se ha dado para la bioremediación.

Algo que no se ha tomado en cuenta es que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat. En el caso de México, los suelos tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares, que los hacen diferentes a los suelos de otro lugar del mundo. Por lo que respecta a las características de los contaminantes, conviene resaltar dos aspectos que son: su complejidad química y el hecho de que en algunos casos, tienen ya un avanzado grado de intemperismo. Estas situaciones que por lo general no son tomadas en consideración, dificultan el tratamiento de un suelo contaminado y algunas tecnologías probadas exitosamente en otros países no han funcionado en México.

Las tecnologías que cuentan con un buen respaldo científico se deben tener bien identificadas sus virtudes y sus limitaciones. Para aquellas que se han aplicado en el extranjero es indispensable asegurarse de que hayan tenido experiencias previas al tratar contaminantes de composición conocida y comparables al tipo de contaminan-

tes que comúnmente se encuentran en México.

Un aspecto adicional que conviene señalar es que una gran mayoría de instrumentos jurídico-administrativos que se manejan en la práctica cotidiana, perjudican el desarrollo de trabajos ambientales enfocados a la limpieza de sitios. Para tomar una buena decisión se debe considerar que la mejor propuesta económica no siempre corresponde a la mejor alternativa técnica, y por otro lado, aquella empresa que caracteriza un sitio contaminado es quien mejor lo conoce y más rápidamente puede plantear estrategias para su remediación. Algo que está ocurriendo en la práctica es que la empresa que inicia trabajos en un sitio caracterizado tiempo atrás, necesariamente debe repetir el diagnóstico, en virtud de que los contaminantes se han movido de lugar, esto hace que se requiera más del tiempo programado para el proyecto.

## Conclusiones

Los retos actuales más importantes para trabajar en bioremediación en México son: demostrar que funciona en el suelo que pretende ser tratado y que son tecnologías ambientalmente seguras que no causarán alteraciones negativas al ecosistema.

Las oportunidades de negocio para la bioremediación existen, dada la gran variedad de opciones que existen en el mercado y la poca experiencia de las empresas ambientales en este campo, se plantea la necesidad de establecer políticas en las que se revisen los siguientes aspectos:

- descripción detallada de la tecnología
- resultados de experiencias previas en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar
- perfil del personal técnico que será responsable del proyecto y dominio de la tecnología
- revisión de los resultados de la caracterización del sitio
- resultados de las pruebas de biofactibilidad realizadas para el problema específico que va a ser tratado
- justificación del uso de productos microbianos y de aditivos
- parámetros por analizar durante la aplicación de la tecnología en cualquier escala
- hoja descriptiva y de seguridad de los productos a utilizar
- seguridad ambiental en el sitio de tratamiento y sus alrededores

En los casos donde no se tengan experiencias previas bajo las condiciones que imperan en México, conviene realizar pruebas piloto o de demostración en campo antes de operar en escala real.

## Bibliografía

1. Alper, J. (1993). Biotreatment firms rush to marketplace. *Bio/Technology* 11: 973-975.
2. Liu S. and Suflita J.M. (1993). Ecology and evolution of microbial populations for bioremediation. *TIBTECH*. 11: 344-352.
3. Saval, S. (1995). Remediación y restauración, en *PEMEX: Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro*, coedición UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp. 151-189.
4. Solleiro, J.L. and Castañón, R. (1996). Environmental Biotechnologies in Mexico: Potential and Constraints for Development and Diffusion. In *Biotechnology for Sustainable Development*, University of Tennessee, Knoxville, USA, in press.

## MESA REDONDA III

### Requisitos y Técnicas de Restauración

**Presidente y Moderador:** Ing. Sergio Sánchez Martínez,  
Secretaría del Medio Ambiente del Departamento del Distrito Federal.  
**Integrantes:** Los participantes del panel "Requisitos y técnicas de restauración".

#### Objetivo

Originar una discusión sobre los requisitos y técnicas de restauración existentes así como de la forma en que éstas pudieran ser adaptadas o modificadas para generar un avance tecnológico en materia de restauración de sitios de acuerdo a las necesidades, condiciones y características propias del país.

#### Introducción

Algunos de los puntos focales presentados durante el transcurso de las ponencias del día fueron, entre otros, los siguientes:

- ◆ Una adecuada planeación de los trabajos de restauración es determinante para garantizar su eficiencia.
- ◆ La previa realización de estudios de riesgo detallados es indispensable para garantizar una restauración adecuada y reducir sus costos.
- ◆ Los estudios de riesgo deben considerar futuros usos del suelo y no solamente el uso que tienen en la actualidad.
- ◆ Existe una amplia diversidad de tecnologías para la restauración de sitios contaminados, tales como tratamientos físico-químicos y biológicos. Las tecnologías más deseables son las que pueden ser aplicadas a contaminación mixta de suelos y aguas subterráneas.

- ◆ La bioremediación es una tecnología amigable al medio ambiente y sus costos son relativamente más accesibles que el de otras tecnologías, por lo cual está adquiriendo un papel cada vez más relevante a nivel mundial.

- ◆ Existe una gran variedad de tecnologías de bioremediación *in-situ* y *ex-situ*, aunque la más común es el *Landfarming*.

- ◆ La bioremediación es la estrategia más factible para atender casos de contaminación en zonas rurales por su bajo costo y sencillez para aplicarla.

- ◆ Aparte de los factores que generalmente se consideran en la evaluación de una tecnología y que están relacionados con su aplicabilidad, disponibilidad y costos, deben considerarse también los siguientes:

- a) Un riesgo mínimo de aplicación tanto desde el punto de vista ambiental como social.
- b) Un amplio espectro de aplicación a distintas situaciones y contaminantes.
- c) Eficacia para alcanzar los niveles de limpieza establecidos en los estudios de riesgo.
- d) Aceptación pública.

- ◆ Para su aplicación, es necesario:

- e) la caracterización detallada de las condiciones del sitio.

f) un análisis preciso del tipo de contaminantes.

g) la realización de pruebas microbiológicas para evaluar la eficiencia del método y para adaptarlo al caso.

- ◆ Referente a las experiencias en la restauración de sitios en México, resulta prioritario establecer y homogeneizar criterios para la evaluación de las empresas que prestan los servicios de restauración. Por otro lado resulta importante evaluar las experiencias que se han tenido en casos específicos y bajo las condiciones particulares de México, identificando los alcances y limitaciones de las tecnologías aplicadas.

#### Discusión de la mesa redonda:

Se presentarán comentarios y experiencias sobre la calidad de tecnologías para restauración, así como su incorporación para el desarrollo de un marco tecnológico en México. Especialmente se presentaron las siguientes preguntas y respuestas.

**¿Se considera conveniente la certificación de tecnologías en México aun cuando el estado de arte sea suficientemente conocido?**

Esta certificación de tecnología no sería conveniente en el sentido estricto, porque hay que considerar que existe una relación intrínseca entre empresa y tecnología. Además las tecnologías de empresas extranjeras requieren de un socio mexicano para operar en nuestro país, lo que se necesita es permitir la generación de experiencias en México, ya que las tecnologías que llegan del extranjero requieren de grandes esfuerzos para su adaptación, innovación e incluso, nuevos desarrollos. Por lo tanto es conveniente

hacer una evaluación de empresa-tecnología.

Otro requisito importante para seleccionar la tecnología más apropiada es que los estudios de riesgo establezcan un nivel de limpieza que sea real y que la tecnología se pueda aplicar a un costo razonable.

Si queremos establecer requisitos para certificar tecnologías es muy importante determinar la política, es decir, que es lo que se requiere hacer, si se requiere proteger el suelo, evitar la contaminación del agua, evitar una emisión a la atmósfera o evitar la dilución de los contaminantes; por lo cual es necesario crear normas o puntos de referencia en concentraciones de contaminantes para que a partir de ellos se desarrollen los estudios de riesgo.

Para el esquema de certificación planteado por el Instituto Nacional de Ecología podría realizarse una preselección y basándose en estos puntos realizar algunas pruebas de laboratorio a nivel piloto, para que aquellas empresas que superen esas pruebas se les permita realizar pruebas de campo, de manera representativa, para que finalmente a aquellas que aprueben esa última prueba, se les proporcione una certificación bajo ciertos límites con respecto a contaminantes y localidades. Sin embargo, existe el inconveniente de que la realización de estas pruebas generaría costos para dichas empresas, resultando esto en un impedimento para dicha aplicación. Pero un buen principio sería partir de la base de datos de la EPA, sobre tecnologías certificadas para definir las investigaciones necesarias para el desarrollo de tecnología certificada en México.

Ya que en México aún se están generando experiencias en el campo de la certificación, sería más conveniente, crear

lineamientos y procedimientos para que una vez que hayan sido comprobados y demuestren su eficiencia, se proceda a su análisis para la posterior creación de normas.

### **¿Cuáles serían los requisitos prioritarios que deben cumplir las empresas que prestan servicios de restauración para llevar a cabo sus actividades?**

Estos requisitos podrían ser el establecimiento de una responsabilidad compartida entre las autoridades y las empresas; generar experiencias así como adaptar las diversas tecnologías a las condiciones locales; establecer un perfil del personal técnico responsable del proyecto; conocer los alcances y limitaciones de la tecnología sustentados en que ésta se desarrolle con bases científicas; justificar el uso de cualquier tipo de productos o compuestos que se utilicen, específicamente en la bioremediación y finalmente determinar cual será la estrategia de monitoreo basándose en los parámetros a los que se les va a dar seguimiento.

### **¿Cómo avanzar en la adaptación de los estudios que existen ya sobre bioremediación para orientarlos en el desarrollo de una tecnología adecuada a México?**

La bioremediación resulta muy prometedora pensando en el caso de que el principal problema de contaminación que se presenta en México, es por hidrocarburos.

No obstante lo anterior, no convendría a México partir de cero en cuanto al desarrollo de tecnologías porque ya existen tecnologías y experiencias que en el extranjero han sido probadas, por ello habría que partir de éstas y adaptarlas a las

condiciones y características del sitio en México, así como generar un procedimiento en el que se puedan identificar los sitios modelo en los que se pudieran realizar estudios piloto para la evaluación de tecnologías.

Se puede obtener información sobre los avances en la tecnología en la EPA o en las memorias de Congresos Internacionales.

### **¿El esquema de desmantelamiento y posterior restauración del sitio ocupado por la empresa Tetraetilo de México debería ser pluralizado?**

Podría pluralizarse este esquema en algunos aspectos tales como la creación de reservas económicas que se utilizarán para cuando se lleve a cabo el desmantelamiento de la planta y el intercambio de información y experiencias entre universidades y empresas, así como también dependencias gubernamentales y por otro lado, la experiencia de Tetraetilo de México ha mostrado que la elaboración de la metodología de restauración debe ser de restitución integral, que no se limite únicamente al predio de las instalaciones sino que incluya también los alrededores. Como fue el primer caso en que se establecieron parámetros para realizar el estudio de caracterización y restauración en México, se acordó con la PROFEPA y el INE, que este estudio se dejara como un acervo cultural a disposición de los que estén interesados en ello.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***BIOREMEDIATION IN MEXICO:  
CURRENT STATUS AND PERSPECTIVES***

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

WAITRO

World Association of Industrial  
and Technological Research Organizations



INSTITUTO DE  
ECOLOGIA A.C.  
Biotecnología Ambiental



Centro Internacional de Tecnologías  
Limpias y Desarrollo Sustentable A.C.



## **TERCER SIMPOSIUM INTERNACIONAL**

Eugenia J. Olguín, Gloria Sánchez, Sonia Galicia y Elizabeth Hernández  
Compiladores

**8-10 de Junio de 1998**  
**Veracruz.Ver.**

①

## **BIOREMEDIATION IN MEXICO: CURRENT STATUS AND PERSPECTIVES**

Susana Saval

Instituto de Ingeniería, UNAM

Apartado Postal 70472, 04510 México, D.F., Mexico

e-mail: [ssb@pumas.iingen.unam.mx](mailto:ssb@pumas.iingen.unam.mx)

### **Introduction**

Bioremediation technologies have been developed on a worldwide basis as a successful alternative for clean-up of contaminated soils and aquifers because of their economical and safe practices. Hydrocarbon contamination problems that have at present become evident in Mexico have in turn promoted the arrival of a large variety of bioremediation schemes of different types. A gap is however perceived in the knowledge of its benefits and shortcomings. The current status of bioremediation in Mexico is discussed in this paper from their perception as a large-scale application biotechnological process.

### **Current status**

Amendments to the General Act of Ecological Balance and Environmental Protection made at the end of 1996 included the legal definition of environmental liability in Mexico. In doing so the existence of a large number of contaminated sites became evident as a result of countless years of unsuitable practices for handling of materials, particularly in what refers to hydrocarbons. It was therefore possible to welcome an important market for the remediation of contaminated sites, and

particularly the bioremediation techniques.

This awareness has promoted the incorporation of an increasing number of companies, both local and abroad, interested in marketing their products or services of bioremediation in Mexico. Some foreign firms have entered directly into the market and some others through representatives in Mexico by means of strategic alliances. Among the local companies, mention can be made of those devoted to environmental services, geophysical and soil mechanics studies or drilling. A typical and serious concern is that these companies have no experts on microbiology or biotechnology among their staff and therefore their major activity consists in importing foreign formulations to be sold in Mexico as products with a minimal description of their contents.

Some of these companies sell the service as a package that includes earthworks, supply of products and their application. In these cases, the contractors just follow the instructions received from the manufacturer for applying the compounds in the field with no further knowledge of the benefits and risks involved in each of the stages of the procedure. This is what they call "technology".



There exist a wide variety of products available in the bioremediation-related market, among them:

- Liquid bacterial concentrates
- Powdered bacterial concentrates mixed with bran flour as a base
- Liquid enzymatic concentrates
- Liquid concentrates of nutrients
- Powdered fertilizers
- Liquid surfactants
- Mixes of surfactants and nutrients

In general terms, the marketing of these products is by the pack and no previous information prior to their application is required with respect to the type of contaminants, their concentration, type or soil or moisture degree, among other well-known parameters. The recipe is exclusive and if the products from one package are not used, there is no guaranty of a successful performance. The use of these products is commonly oriented to contaminated soils that have been excavated to carry out the treatment of site.

Certain companies provide services that also include the use of equipment designed for specific functions. As an example mention can be made of bioreactors combined with aeration and aerators to inject micro-bubbles of compressed air into the saturated zone. The latter option is applied when pollution has affected the phreatic level and the treatment need to be applied *in situ*. Very few of these processes have been implemented in Mexico.

When confronted to such a large variety of options, the costs also vary widely, but not a single reference parameter can be found.

In what refers to powdered bacterial concentrates, manufacturer's instructions indicate that they should be subjected to a "reactivation process" a few hours prior to their application. This reactivation implies the hydration of bacteria in a predetermined volume of water that may even include some nutrients. For this activity that is performed with no reasonable basis, any type of bucket is used and the mix is prepared with a shovel or even with the hand if no tools are available.

Some products have good performance, but the problem arises in its handling and application to the field.

The problem is in their handling and application.

It is also worth mentioning that genetically engineered bacteria have been used in some bioremediation projects in spite of the risk involved in their handling and dispersion.

Improvements related to the application of bioremediation in the field include the use of fertilizers and surfactants. Powdered fertilizers are spread in the soil with no previous dissolution and with no assurance of a uniform distribution. On the other hand, liquid enzymatic solutions and surfactants are sprayed into the soil or in bodies of water with no dosage or control whatsoever to prevent additional environmental problems.

Some cases have also been observed in which the contaminated soil is mixed with clean soil to decrease the concentration of contaminants and to expedite the bioremediation process.

Another example of the lack of technical background in the area, mention can be

made of the application of strong chemical oxidizers to contaminated soils or a single ventilation of gasoline contaminated soils through the so-called "bioremediation technologies".

The perception received by many of us who have witnessed how several local and foreign companies perform large-scale bioremediation projects falls short of our expectations, particularly when awareness exists about the extreme care required to handle any biotechnological process where the major roles are played by biological entities, bacteria and enzymes which are susceptible of being adversely affected by extreme micro-environmental conditions.

The actual situation is by no means so pessimistic. There are also very reliable companies and some others with a strong technological background, which are quite familiar with this area of endeavor. They are engaged in formulating and proportioning their own products, and they even prepare their own inocula. Other firms profit from the indigenous microbial diversity with degrading capabilities and they only stimulate such an activity with the addition of fertilizers. Some others have discovered a large potential on natural attenuation in certain locations where only a follow up is necessary.

In view of the diversity of techniques for bioremediation and as a result of poor practices that have been detected, the environmental authorities set up programs for the curricular assessment of each of the remediation contractors with the support received from academia; however, it was a time-consumption procedure and the benefits obtained fell short from the expected results.

At present, the trend is to implement in the field the bioremediation techniques with a closer follow up since the very beginning. The problem is that as a result of the lack of sufficient knowledge in the field of bioremediation and in the procedures necessary for follow up, it is possible that the information thus obtained becomes quite limited.

In what refers to the academic sector, during the last two years several task forces have emerged in various universities and research centers to perform studies on biodegradation of petroleum, its distilled fuels and its by-products, each of them with a different approach. The largest percentage of investigations is carried out at laboratory level by using well-controlled ideal models that, although being unrealistic, they constitute the only way to find an answer to many of the queries. In some other cases, large-scale studies are carried out where the greatest challenge is to apply the results of the laboratory research to the contaminated sites.

### **Bioremediation as a biotechnological process**

Because the practice of bioremediation is carried out in the field, its execution should be regarded as an engineering problem of scaling.

By assuming the previous definition, special attention shall be then paid on the most suitable way to implement a bioremediation project. This technique involves three stages, two of them in advance to the scaling-up to field, namely: characterization and biotreatability studies (Fig. 1).

---

CHARACTERIZATION

Geohydrological  
of Contaminants  
Physicochemical  
Microbiological



BIOTREATABILITY STUDIES

Contaminants removal  
Oxygen consumption  
CO<sub>2</sub> generation  
Nutrients consumption



SCALING-UP TO FIELD

---

Fig. 1 Bioremediation project sequence

In what relates to the characterization, it includes four basic aspects: geohydrology, chemistry of contaminants, physicochemistry and microbiology of the soil. In general terms, the characterization process in Mexico is not carried out in depth; only some of the geohydrologic aspects required to determine the volume of soil to be treated are covered with the purpose of determining the cost of the clean-up. There is already a start-up problem because the contaminated site is not yet well known prior to the beginning of bioremediation. From field experience it has been shown that the better emphasis is placed on the characterization, the easier the field problem comprehension; therefore, a large part of the remediation has already been solved.

If the characterization is complete, it would be understood that from the

geohydrological work results it will be possible to determine the size and shape of the contamination plume; such work is likely to become a heterogeneous bioreactor by its own nature. The geohydrological surveys are also beneficial to define the different alternatives for the operation of the bioreactor so as to reduce the degree of heterogeneity of the system and the presence of idle zones, by drilling wells. It will be therefore possible to increase the mass transfer and to achieve a dynamic bioreactor.

On the other hand, the soil characteristics that constitute the microenvironment where the bacteria will play their role can be disclosed by determining the physicochemical soil parameters. The chemical characterization of the contaminants is necessary because those that will perform as substrate could be determined as well as those that might inhibit the metabolic activity.

The microbiologic characterization includes the quantification of both heterotrophic and degrading population. A recent development has been the identification of the degrading capability by means of the catabolic genes involved in the metabolic paths of common hydrocarbons, such as for example, toluene (*xylE*), naphthalene (*ndoB*) and dodecane (*alkB*). These analyses can be performed in soil samples and even in the commercial bacterial concentrates intended to be used.

### Perspectives

If the background referred to above is taken into account, it can be concluded that bioremediation in Mexico needs to be implemented in the field with a better

knowledge of the factors involved and with a higher commitment to consider it as a truly clean biotechnological process. It is therefore required to integrate all the different disciplines involved in a single task force.

The case histories related to the biological treatment of wastewater provide an example that the success of this technology is just a matter of time and willingness. The oldest wastewater plants with biological treatment were built by civil engineers specialized in sanitary engineering; they handled the process with a lack of knowledge of the benefits and shortcomings of the involved bacteria. Many of the plants commissioned failed to achieve the expected results; the performance of the plants showed a major improvement when microbiologists and biotechnology experts familiar with this area became involved and contributed with new knowledge and experience. A similar situation is expected to occur in the future in what refers to bioremediation.

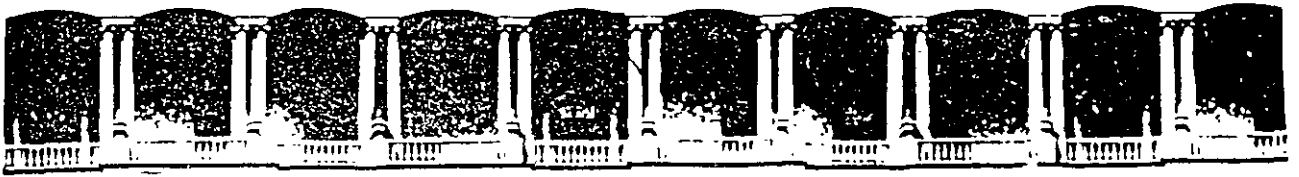
There is still a lot of work to do; it is a known fact that bioremediation of soils and aquifers in Mexico is at an early stage. The participation of interdisciplinary teams is necessary to define operation policies such as soil sampling techniques, chemical analysis techniques, studies of assessment of health and environmental risks, as well as the development of clean-up criteria, just to mention a few of the most important aspects.

### **Concluding remarks**

Within the framework of sustainable development, bioremediation provides important perspectives to solve many of

the problems derived from hydrocarbon contamination of soils and aquifers that occur in Mexico. It is necessary to incorporate biotechnologists into the different disciplines involved as well as to achieve a more decisive participation of the academic sector with the companies that render environmental services for the purpose of achieving an environmentally friendly practice with bioremediation.

As a concluding comment, mention should be made that this paper was not intended to provide statistical figures because the number of companies that offer products or services related to bioremediation is constantly increasing. The interest of integrating this presentation derives from the experience obtained in the course of several years devoted to the assessment of environmental companies and of the execution of bioremediation projects in the field, in which the Institute of Engineering has become involved with different entities of the public and private sectors.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

**CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**TEMA :**

**PEMEX: AMBIENTE Y ENERGÍA  
( Los Retos del Futuro )**

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

Primera edición: 1995

DR. © 1995. Universidad Nacional Autónoma de México

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Circuito Maestro Mario de la Cueva  
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México, D.F.

Impreso y hecho en México

ISBN 968-36-4802-9

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Serie E: Varios, núm. 69

Edición y formación en computadora al cuidado de Isidro Saucedo

# PEMEX: AMBIENTE Y ENERGÍA

## Los retos del futuro



**PEMEX**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PETRÓLEOS MEXICANOS

MÉXICO, 1995

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

**SUMARIO:** I. *Introducción.* II. *El concepto de contaminación;* III. *Fuentes de contaminación en instalaciones petroleras.* IV. *Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos.* V. *La auditoría ambiental como parte de la caracterización de un sitio.* VI. *El concepto de remediación.* 1. *Tomando como referencia normas extranjeras.* 2. *Por evaluación de riesgo.* 3. *En función del uso que se dará al suelo.* VII. *Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos.* 1. *Biorremediación.* 2. *Arrastre por aire (Air Stripping).* 3. *Extracción al vacío.* 4. *Solidificación/Estabilización.* 5. *Lavado de suelo.* 6. *Desorción térmica.* 7. *Por arrastre de vapor.* 8. *Incineración.* 9. *Confinamiento.* 10. *Vitrificación.* VIII. *Costos de remediación.* IX. *Criterios para la selección de tecnologías de remediación.* X. *Acciones para la remediación de suelos en México.* 1. *Las empresas de consultoría ambiental.* 2. *Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental.* 3. *El papel de las universidades.* 4. *Educación ambiental para la sociedad.* XI. *Los compromisos de PEMEX.* XII. *Conclusiones.* XIII. *Bibliografía.*

### I. INTRODUCCIÓN

El suelo y el subsuelo son términos que difícilmente pueden emplearse por separado. En un lenguaje coloquial, suelo es la superficie y subsuelo hacia la profundidad, sin existir una referencia para saber que tan profundo es el suelo y desde donde empieza el subsuelo.

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural que desempeña diversas funciones entre las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos y de protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimentaria, además de ser el espacio donde se realizan actividades agrícolas y ganaderas y áreas verdes de generación de oxígeno.

Aunque se ha venido haciendo mucho énfasis en el establecimiento de medidas preventivas con el fin de reducir o eliminar la descarga de materiales extraños al medio ambiente, no se puede ignorar la contaminación que ocurrió en el pasado.

Ante la inmensa superficie de zonas afectadas por la actividad humana, surge la necesidad de tomar acciones para controlar la dispersión de contaminantes y buscar su eliminación. En los países más avanzados se han desarrollado tecnologías para remediación y restauración de sitios, sin embargo, dado que cada sitio dañado constituye una problemática específica, se requiere el establecimiento de criterios y gran cantidad de información para decidir cómo controlar y eliminar los contaminantes.

Existen varios términos que comúnmente se usan como sinónimos: *remediación (remediation)*, *limpieza (clean-up)*, *restauración (restoration)*, *recuperación (reclamation)*, sin embargo, es necesario entender el contexto en el que estos se emplean, ya que puede hacerse alguna diferenciación entre ellos.

Se entiende por remediación o limpieza a las acciones que se toman para la reducción o eliminación de los niveles de contaminantes en suelo y subsuelo. Restauración o recuperación es la acción de devolver a un sitio, sus características originales. Es decir, rescatar o mejorar la función y la imagen que el suelo tenía antes de haber sido afectado por los contaminantes.

#### *El concepto del suelo*

##### *a) Desde el punto de vista científico-tecnológico*

El suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la tierra, que ha sido formado mediante una dinámica natural a partir de la corteza terrestre con la influencia de factores genéticos y ambientales, proceso que ha tomado miles de años para tenerlo en su estado comúnmente conocido. Es un medio complejo y dinámico en constante evolución.

El suelo y el subsuelo en su conjunto, porque no pueden ser entidades separadas, tienen diversas funciones como: filtro amortiguador y transformador, productor de alimentos, hábitat biológico y reserva genética, medio físico para la construcción, fuente de materias primas y herencia cultural.

Suelo y subsuelo son el filtro que limpia el agua de lluvia que recarga los acuíferos y que los protege contra la contaminación. El agua de lluvia arrastra un sinúmero de compuestos, durante su recorrido éstos son retenidos en el subsuelo, de aquí que se hable de una capacidad amortiguadora. Algunos compuestos son transformados por la microbiota nativa, antes de llegar a los acuíferos. Para resaltar esta importante función del suelo conviene recordar que los acuíferos constituyen la fuente de suministro de agua de las poblaciones.

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida del hombre y los animales, permite la implantación de las raíces de las plantas y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas.

El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico y reserva genética. Se pueden desarrollar gran cantidad de vegetales y animales que forman parte de la cadena alimentaria y constituyen la riqueza de la biodiversidad, por lo que deben ser protegidos de su posible extinción.

Para la construcción, el suelo es la base física de las edificaciones, sean viviendas, industrias, lugares de recreación, sistemas de transporte o sitios para disposición de residuos. También, es fuente de materias primas como arcillas, arena, grava y minerales.

Finalmente, el suelo alberga una importante herencia cultural, representada por tesoros arqueológicos y paleontológicos, que son una fuente única de información que debe ser mantenida como un testimonio de la historia de la tierra y de la humanidad.

Todo lo anterior lleva a pensar en la necesidad de prevenir daño al suelo y recuperarlo cuando éste es afectado, pero nunca destruirlo, debido a que es un recurso natural difícilmente renovable.

##### *b) Desde el punto de vista jurídico-administrativo*

El suelo es parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y de su uso, razón por la que su cuidado es responsabilidad de todos los mexicanos. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que



la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la Nación [por lo que] se dictarán medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El título IV, capítulo III lleva por nombre *Prevención y Control de Contaminación del Suelo*, consta de 11 artículos, del 134 al 144 inclusive, pero en su redacción existe poca precisión. Menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, siendo que son uno de los tantos ejemplos de contaminación. La LGEEPA parece no considerar otros contaminantes que se derraman como parte de actividades industriales, como los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran residuos peligrosos.

Gran parte de los contaminantes del suelo y el subsuelo se generan en instalaciones que cuentan con tanques de almacenamiento de combustibles, los cuales son utilizados como materias primas. También en cementerios industriales que son zonas restringidas o de difícil acceso. Otros ejemplos de contaminantes son las aguas residuales que son vertidas sobre el suelo sin previo tratamiento, los lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento, la infiltración en canales de aguas residuales a cielo abierto, las fugas de alcantarillados y los agroquímicos.

La LGEEPA es el instrumento fundamental de referencia para realizar las auditorías ambientales, si partimos de la base que la legislación ambiental en materia de suelo es deficiente, las auditorías ambientales que oficialmente se realizan deben ser también deficientes. De ahí surge la necesidad de contar con una ley precisa en los aspectos considerados y clara en su redacción para evitar interpretaciones erróneas.

Otros instrumentos de referencia necesarios para que la ley pueda aplicarse y que no existen son: un Reglamento para la Protección del Medio Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y del Subsuelo y las normas oficiales mexicanas correspondientes.

Como producto de estos vacíos en la legislación, no se le ha dado al suelo su valor como un recurso natural y por lo que no se ha enfatizado la necesidad de limpiar las zonas dañadas.

#### c) Desde el punto de vista político y social

En la vida diaria de nuestro México, el suelo es visto con solamente dos ópticas, como el escenario de actividades agrícolas y forestales o bien como una superficie donde se asientan edificaciones.

Prácticamente todos los problemas de contaminación de suelos son ocasionados por actividades antropogénicas, ya sea por derrames accidentales o irresponsables, durante la descarga de subproductos o bien durante el transporte dentro y fuera de instalaciones industriales o de mantenimiento.

Somos una sociedad sin una cultura ambiental, no hemos sido educados para respetar a nuestro ambiente y esto ha sido la consecuencia de una actitud pasiva, que ha llegado incluso a nuestros gobernantes. En el pasado no se exigió a las industrias corregir los daños ocasionados por el derrame de contaminantes y ahora, la carencia de instrumentos legales y regulatorios en materia de suelo envuelve a todos los aspectos involucrados, en un círculo vicioso del que cada vez es más difícil salir.

Para involucrar a la sociedad, necesita haber pruebas de que hay voluntad política y ética detrás de todas las acciones encaminadas a mejorar el ambiente y la calidad de vida. La sociedad pierde cada vez más credibilidad en los funcionarios públicos, los problemas ambientales se han convertido en un tema de discursos políticos y el ambiente está cada vez más deteriorado. Esto ha venido a causar mayor desinterés de la sociedad, la cual asume un papel pasivo y ya no expresa sus ideas.

#### d) Desde el punto de vista internacional

Aparentemente, hasta la fecha no se ha reportado la migración de contaminantes a los países vecinos, que hayan sido vertidos en nuestro territorio. Debemos estar concientes de que los contaminantes no distinguen fronteras y si las condiciones de un sitio favorecen su migración, estaríamos en graves problemas, de ahí la necesidad de tomar acciones antes de que pase más tiempo. Algo que nos ha evitado más problemas es el hecho de que el petróleo, por sus características, penetra muy lentamente

las capas del suelo, más bien se encuentra en la parte superficial. Cuando los derrames han ocurrido en las costas se ha facilitado relativamente su recuperación, dado que el aceite crudo flota en la superficie.

El compromiso que adquirimos recientemente ante la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, es un reto de competitividad ante estas dos grandes potencias en el terreno comercial, pero también ambiental a través de los Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral. Entre los objetivos prioritarios de los Acuerdos de Cooperación Ambiental, quedó establecido: *fortalecer la conservación, la protección y el mejoramiento del ambiente a partir de la cooperación y el apoyo mutuo en políticas ambientales con un alto nivel de protección; esto incluye el establecimiento de las leyes y reglamentos, así como su observancia y cumplimiento.*

El hecho de no contar con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo, nos pone en desventaja, por lo que se hace prioritaria una modificación razonable.

Estados Unidos cuenta con una legislación bien establecida en materia prevención y control de la contaminación de suelo y subsuelo. La ley federal directamente exige la limpieza del sitio contaminado con petróleo, a través del Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA); Otras leyes rigen durante la remediación del sitio, como el Acta Global de Respuesta, Compensación y Responsabilidad (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability, CERCLA) de 1980, mejor conocida como *Superfund* y el Acta de Reautorización a las Mejoras del Superfund (Superfund Amendments Reauthorization Act, SARA) de 1986, así como el Acta de Seguridad de Agua Potable (Safe Drinking Water Act, SDWA) y el Acta de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA). El organismo encargado de que estas leyes se cumplan es la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA).

La EPA tiene varias estrategias para obligar a la limpieza de sitios, una de ellas se refiere a la obligación de reportar derrames o "liberaciones al ambiente", hay enormes multas y hasta encarcelamiento para aquellos que no lo hagan. Cuando un derrame ocurre, a través de la RCRA se obtiene la licencia para aislar el sitio por considerar que en el lugar hay materiales peligrosos, su limpieza se obliga por una resolución que se toma en la corte y los estándares impuestos para la limpieza son sustancialmente más

estrictos y caros. Esto hace más atractivo el limpiar un derrame por voluntad propia en lugar de llevar el asunto a juicio.

Por lo que respecta a Canadá, el gobierno federal ha promulgado varias leyes ambientales de aplicación general, además de que cada provincia tiene sus propios esquemas que regulan la descarga o emisión de sustancias en el ambiente y establecen medidas de protección ambiental y procedimientos de evaluación ambiental. En Canadá ha sido muy fácil la toma de acciones a emergencias ambientales, debido a que como parte de su cultura todos los recursos naturales realmente se protegen de la contaminación. Por ejemplo, la declaración inicial del Acta Canadiense de Protección Ambiental (Canadian Environmental Protection Act, CEPA) de 1988 dice que: *la protección del ambiente es esencial para el bienestar de Canadá, la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es de interés nacional, en parte por aspectos de salud y además porque éstas no pueden ser contenidas dentro de barreras geográficas y es necesario cumplir con las obligaciones internacionales en materia ambiental.*

Por otro lado, los propósitos del Acta Canadiense de Evaluación Ambiental (Canadian Environmental Assessment Act, CEAA, que sustituye a Environmental Review Process Guidelines Order, EARP) de 1992, son *asegurar que los efectos ambientales de proyectos se revisen cuidadosamente antes de que las autoridades responsables inicien su desarrollo, esto asegura también que los proyectos que se realicen en Canadá o en sus territorios federales no causen efectos ambientales adversos ni dentro ni fuera de la jurisdicción en la cual los proyectos son llevados a cabo.* Además de la claridad de esta legislación, la participación pública ha sido un factor fundamental para que se tenga un ambiente verdaderamente limpio que incluye: agua, aire y suelo. El Plan Verde para un Ambiente Saludable (Green Plan for a Healthy Environment) ha establecido objetivos muy precisos para trabajar por un ambiente limpio.

Una situación que vale la pena señalar, es el hecho de que en México la limpieza de sitios contaminados se ha venido dando como una condición de inversionistas extranjeros interesados en la compra de empresas mexicanas. Es decir, para que el inversionista extranjero decida comprar o invertir capital en una empresa mexicana, es necesario demostrar que no hay contaminantes en el subsuelo del terreno donde la empresa ha venido realizando sus actividades desde años atrás, si los hay, se debe limpiar el sitio en un tiempo que legalmente se determina al momento de

la transacción. Esta situación ha abierto mercado a todo tipo de tecnologías y consultoras ambientales extranjeras, de las cuales se hablará más adelante.

## II. EL CONCEPTO DE CONTAMINACIÓN

El término contaminación puede definirse como la introducción al ambiente de un compuesto, en cantidad tal que incrementa su concentración natural y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de la materia y energía.

El petróleo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos, sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geológico y geográfico. El petróleo es un producto natural, por lo que la propia naturaleza es capaz de reincorporar una muy pequeña fracción de éste a los ciclos biogeoquímicos, ya que la complejidad química de algunos de sus constituyentes hace que el proceso requiera de varios años.

Cuando la cantidad de petróleo en el ambiente es mayor de la que puede ser reciclada, el petróleo se convierte en un contaminante presentando un impacto negativo, ya que entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias que son consideradas como residuos peligrosos por su efecto dañino a la salud. Ejemplos de éstos son: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, naftaleno, antraceno, fenantreno, cresoles, fenol, ciclopentano, ciclohexano y etileno. Algunos de ellos son cancerígenos como es el caso de benceno, naftaleno, antraceno y fenantreno. Por lo anterior, los derrames de petróleo son considerados residuos peligrosos.

Otros productos, como los bifenilos policlorados son completamente sintéticos y altamente tóxicos, es decir, muy ajenos a la naturaleza, por lo que no pueden ser degradados de manera natural, ni reincorporados a ésta.

Cada sitio tiene sus características particulares y por lo tanto su propia dinámica, esa es la razón por la que cada región puede tener diferente normatividad relacionada con los límites máximos permisibles para los contaminantes.

## III. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN INSTALACIONES PETROLERAS

Como producto de las actividades petroleras los suelos son alterados por la construcción de rutas de acceso, remoción de la cubierta vegetal o edáfica para la instalación de campamentos y actitudes depredatorias sobre recursos bióticos por parte de los que realizan dichas actividades. Las vías de acceso se convierten en vectores de colonización espontánea y de asentamientos irregulares, sin importar los riesgos de fuga y explosión. Esto causa perturbación de los ecosistemas, desaparición de especies vegetales y desplazamiento de especies animales del lugar.

La contaminación de suelos y acuíferos ocasionada por la industria petrolera se presenta durante actividades de extracción, refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización, por lo que todas las empresas de PEMEX están involucradas, Refinación, Exploración y Producción, Gas y Petroquímica Básica, Petroquímica.

En las actividades de extracción se observan derrames y explosiones de hidrocarburos, acumulación de residuos de perforación y lodos aceitosos. En refinación y petroquímica se requieren grandes extensiones para la construcción de tanques de almacenamiento, así como de plantas industriales de transformación, sistemas para la generación y distribución de fluidos, vapores y de enfriamiento de agua. Se observa un consumo indiscriminado de agua, derrames, explosiones y descargas de residuos industriales de alta toxicidad y no biodegradables. Durante el transporte se presentan riesgos por derrame de residuos peligrosos.

Las redes de ductos de distribución están siempre sujetas a riesgos de accidentes de diversa índole como derrames, explosiones, incendios y fuga de gases. El almacenamiento en tanques es una situación similar.

Las tuberías, ductos y tanques de almacenamiento de combustibles, generalmente no se revisan con la frecuencia requerida, por lo que no se toman las medidas preventivas necesarias y los casos se atienden una vez que ocurre la ruptura de éstos. Además, las instalaciones petroleras están a la intemperie y una gran parte se encuentran en zonas costeras, donde la corrosión acaba con todos los elementos metálicos presentes. Otros derrames de hidrocarburos que ocurren accidentalmente y son menos considerados se refieren a las volcaduras de pipas y son parte de las actividades de transporte.

Los sitios de comercialización manejan menores volúmenes de hidrocarburos y derivados (gas doméstico, petróleo diáfano, diésel, gasolinas, grasas, aceites, solventes, resinas), pero generalmente estos lugares no cuentan con dispositivos adecuados para el control de emisiones y derrames al suelo, así como sistemas de recolección.

Algunos problemas de contaminación que han sido producto de descargas de residuos se encuentran en zonas pantanosas, donde el nivel freático sube de manera sorprendente en la temporada de lluvias. En estas zonas se hace muy difícil el acceso aún para realizar actividades de prospección.

Otro foco de contaminación de subsuelo en las industrias de refinación y petroquímica son las instalaciones antiguas que no fueron completamente desmanteladas y se han convertido en cementerios industriales. En estos sitios, la contaminación con hidrocarburos es mínima, los principales contaminantes son compuestos inorgánicos, muchos de ellos tóxicos, que se lavan fácilmente por efecto de las lluvias y así penetran al subsuelo.

#### IV. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELOS Y ACUÍFEROS

Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, ocurren diversos fenómenos naturales que tienden a dirigirlos hacia las aguas subterráneas. Esto hace necesario el entender la forma en que los contaminantes penetran, migran y se dispersan en el subsuelo.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son el tipo de suelo, su permeabilidad, el tamaño de las partículas, su contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen el tamaño y la distribución tridimensional del bulbo o mancha de contaminación en una zona específica.

De acuerdo a su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor que la del agua se denominan ligeros mientras que a los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos. Esta clasificación es importante ya que es lo que determina el comportamiento de los contaminantes en el acuífero. Los

ligeros tienden a formar una capa en forma de "nata" en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, como las gasolinas, los aceites y el petróleo crudo. Los densos por el contrario, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección al flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad, ejemplo de éstos son los bifenilos policlorados.

La combinación de las características del subsuelo, de los contaminantes y las condiciones climatológicas del sitio pueden dar lugar a los diferentes procesos de transporte y distribución de contaminantes. Para entender el transporte y destino de contaminantes en el subsuelo es necesario realizar una buena caracterización del sitio con la cual se conocerán la carga hidráulica y la estratigrafía, así como los coeficientes de adsorción y la permeabilidad del suelo. Con esta información es posible calibrar modelos matemáticos que sean representativos de la distribución tridimensional de los contaminantes en el sitio.

#### V. LA AUDITORÍA AMBIENTAL COMO PARTE DE LA CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO

Por definición, una auditoría ambiental en materia de suelos se refiere a la identificación y evaluación del estado de la contaminación en suelo y subsuelo, incluyendo las aguas subterráneas.

Por otro lado, la caracterización de un sitio del que ya se sabe que ha sido afectado, se refiere a los estudios que permitirán conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador y el comportamiento de los contaminantes en él. Los estudios preliminares de dicha caracterización corresponden a los de una auditoría ambiental.

En los países avanzados, no se practican las auditorías ambientales de esta forma, basta con detectar la presencia de un contaminante en suelo o aguas subterráneas para proceder directa e inmediatamente a la caracterización geohidrológica y química del sitio y de los alrededores. La meta final de estas actividades es proponer alternativas para la limpieza del sitio.

Las etapas básicas de la caracterización de un sitio, que también corresponden a la de una auditoría ambiental en materia de suelo y subsuelo, se describen a continuación:

*Recopilación de la información.* En principio se requiere un plano del terreno donde se encuentran las instalaciones donde se puedan identificar las instalaciones subterráneas (tanques y ductos), los talleres de mantenimiento, las zonas de disposición de desechos e instalaciones antiguas. Estos datos servirán para detectar la fuente de la contaminación, por lo que es de gran utilidad ubicar las instalaciones en un plano que incluya las zonas circundantes para definir sitios que servirán como control. También se deberán recopilar datos hidrogeológicos, relacionados con la profundidad del nivel freático, la dirección del flujo de la corriente subterránea y la conductividad hidráulica, información que servirá para pronosticar la migración de los contaminantes hacia el acuífero. Un plano de ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción permitirán predecir el efecto sobre la población aledaña.

*Reconocimiento del sitio.* En la visita a campo se podrá contrastar toda la información recabada. En el caso de instalaciones petroleras o petroquímicas, se podrán registrar las áreas visiblemente contaminadas así como instalaciones o zonas potencialmente contaminantes.

*Investigación inicial de la contaminación.* La información obtenida servirá como base para definir los puntos donde se deberán perforar los pozos de monitoreo y donde se habrán de tomar muestras de suelo a las diferentes profundidades. Las muestras deberán ser llevadas a un laboratorio químico para la identificación y cuantificación de los contaminantes presentes. En la actualidad ya existen equipos analíticos para realizar pruebas en campo, lo que evita la pérdida de contaminantes de características volátiles. Con la información obtenida será posible realizar un diagnóstico del sitio, en el que se podrán identificar las manchas de contaminación y los gradientes que se forman en función de las características del suelo. Cuando se determinan las características de permeabilidad y porosidad en las muestras de suelo, se pueden correr modelos de migración de los contaminantes que son una herramienta de gran utilidad para el pronóstico y de seguimiento en las actividades de remediación.

Como resultado de la carencia de una legislación clara en materia de suelo y subsuelo en México, el ejercicio de la auditoría ambiental en esta materia se confunde. En los formatos oficiales lo referente a "*Control de la Contaminación del Suelo*" únicamente cuestiona sobre la generación y disposición de residuos sólidos y peligrosos, mientras que las instalaciones subterráneas que merecen mayor investigación dentro de esta materia, se dejan dentro de una sección titulada *Instalaciones*, a la cual se le da menor

importancia. Tampoco se considera que en los tanques subterráneos o sobre tierra pueden albergar combustibles o solventes que son empleados como materias primas, por lo que no corresponden a residuos, aunque pueden tener el mismo grado de peligrosidad.

En instalaciones petroleras en operación se han practicado auditorías ambientales, con el propósito de identificar áreas afectadas. Esto ha dado como resultado un inventario de los residuos generados, la detección de fuentes de contaminación y zonas de alto riesgo actual y potencial. No obstante, hace falta complementar la información sobre el tipo y la concentración de contaminantes presentes y las características de los suelos afectados, es decir, se requiere una caracterización completa para estimar la extensión de las manchas de contaminación y su posible llegada a las aguas subterráneas.

Durante la realización de las auditorías ambientales es indispensable considerar los terrenos aledaños a las instalaciones petroleras, mismos que en ocasiones han servido como cementerios o como zonas de vertido de desechos petroleros y que por la cercanía de poblaciones representan un alto riesgo para la salud.

## VI. EL CONCEPTO DE REMEDIACIÓN

Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación de un sitio, suelo y subsuelo, se deben plantear alternativas para su limpieza y establecer los niveles de limpieza. Es decir, el límite máximo de contaminantes que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de remediación.

Dado que en México no existen norma oficiales (NOM) que establezcan estos niveles de limpieza, se puede seguir uno de los siguientes caminos: 1) tomando como referencia normas extranjeras, 2) por evaluación de riesgo o 3) en función del uso que se dará al suelo.

La concentración de contaminantes se expresa a través de un parámetro indicador, que corresponde al contaminante que está en mayor proporción o que es el más peligroso. Debido a que tampoco contamos con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes en México, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Los más comunes son los métodos EPA (Environmental Protection Agency) y los ASTM (American Society for Testing

Materials), los cuales son identificados por una clave formada por dos números, el primero es progresivo y el segundo indica el año de publicación que en ciertos casos corresponde a una modificación del procedimiento.

La concentración de los contaminantes se puede evaluar de manera global como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), o bien se elige el más tóxico de sus componentes. En el caso de las gasolinas se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos totales como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) o cada uno de ellos por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Para gasolinas y diésel también se cuantifican los HTP, para el caso del diésel se puede cuantificar alguno de sus hidrocarburos polinucleoaromáticos (HPNA) como naftaleno, antraceno o fenantreno que son también muy tóxicos. Existen varios métodos para cuantificar un mismo parámetro, pero algunos son específicos para muestras de agua y otros para muestras de suelo.

#### 1. Tomando como referencia normas extranjeras

El ejemplo clásico es tomar como referencia los estándares establecidos por la EPA en los Estados Unidos. En ese país, no existe un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. En la Tabla 1 se presentan valores que rigen en algunos de los estados. Podrá observarse que para un mismo parámetro indicador, hay una amplia variación de nivel permisible, también se observa que las concentraciones en suelo (mg/kg o ppm, partes por millón) son mayores a las que se piden en agua (ug/l o ppb, partes por billón) debido a que se emplean los estándares para agua potable. Los niveles de limpieza para el benceno va de 0.005 a 50 mg/kg en suelo y de 0.2 a 71 ug/l en agua subterránea, en el caso del tolueno va de 0.3 a 200 mg/kg en suelo y hasta 200,000 ug/l para agua. La concentración permisible de gasolina en suelo medida como HTP es de 50 a 1000 mg/kg y solamente en dos estados, Georgia y New Jersey, se registra el uso de hidrocarburos polinucleoaromáticos como parámetros indicadores de la presencia de diésel o gasolina.

Tabla 1. Límites permisibles de contaminantes en suelos y aguas subterráneas en algunos estados de los Estados Unidos de Norteamérica

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico	
			Suelo (mg/kg)	Agua subterránea (ug/l)	Suelo	Agua subterránea
Alabama	gasolina	benceno		5		EPA 602,624
		tolueno		1000		EPA 602,624
		etilbenceno		700		EPA 602,624
		xilenos		10,000		EPA 602,624
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071 EPA 418.1	
Arizona	gasolina	HTP		1		EPA 418.1
		benceno	0.13	5	EPA 8 020	EPA 502.2
		tolueno	200	1000	EPA 8 020	EPA 502.2
		etilbenceno	68	700	EPA 8020	EPA 502.2
		xilenos	44	10,000	EPA 8020	EPA 502.2
Arkansas	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
		BTEX	0-400		EPA 8020	
California	gasolina	benceno	0.3-1		EPA 8020	
		tolueno	0.3-50		EPA 8020	
		etilbenceno	1-50		EPA 8020	
		xilenos	1-50		EPA 8020	
Delaware	gasolina diésel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
		BTEX	10		EPA 3010 +8020	

Tabla 1. Continuación.						
Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico	
Florida	gasolina	benceno		1		EPA 602
		BTEX		50		EPA 602
Georgia	diésel	naftaleno		100		EPA 610
	gasolina	benceno		5-71		EPA 8020
		tolueno		1000-200,000		EPA 8020
		etilbenceno		700-28,718		EPA 8020
		xilenos		10,000		EPA 8020
		BTEX		20-100		EPA 8020
Idaho	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-500		California M	
		diésel	benzopireno	0.03-0.2		EPA 550 EPA 8270
		antraceno	110,000		EPA 8270	
		criseno	0.3		EPA 8270	
		fluorantreno	370		EPA 8270	
		fluoreno	14,000		EPA 8270	
		pireno	11,000		EPA 8270	
	gasolina	benceno		5		EPA 8020
		tolueno		1000		EPA 8020
		etilbenceno		700		EPA 8020
		xilenos		10,000		EPA 8020
		HTP	40-200			EPA 9015
	diésel	HTP	100-2000		EPA 8015	
	aceite gastado	HTP	100		EPA 418.1	
Kansas	gasolina	benceno	1.4	5		EPA 502.2
		tolueno		1000		EPA 502.2
		etilbenceno		680		EPA 502.2

Tabla 1. Continuación.						
Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico	
		xilenos		440		EPA 202.2
	gasolina diésel aceite gastado	HTP		100		
		diésel	naftaleno		143	
Kentucky	gasolina	BTEX(c/u)	1	5	EPA 8240	EPA 8240
Louisiana	gasolina	BTEX	100		EPA 8020	
Michigan	gasolina	benceno	24	1	EPA 8020	EPA 8020
		tolueno	16,000	790	EPA 8020	EPA 8020
		etilbenceno	1500	74	EPA 8020	EPA 8020
		xilenos	5600	280	EPA 8020	EPA 8020
Missouri	gasolina	HTP	50-500	5-10	EPA 418.1M	EPA 418.1
Montana	gasolina diésel	HTP	100			
Nebraska	gasolina diésel	benceno	0.005-50	5	EPA 8021	EPA 8021
		BTEX	1-10,000		EPA 8021	
Nevada	gasolina diésel	HTP	100		EPA 8015	
New Jersey	gasolina	benceno	3-13	0.2	EPA SW 846	EPA SW 846
		tolueno	1000	1000	EPA SW 846	EPA SW 846
		etilbenceno	1000	700	EPA SW 846	EPA SW 846
		xileno	110-1000	40	EPA SW 846	EPA SW 846
		antraceno	10,000	2000	EPA SW 846	EPA SW 846
		naftaleno	230-4200		EPA SW 846	EPA SW 846

HTP: hidrocarburos totales del petróleo; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; M: método modificado

## 2. Por evaluación de riesgo

Se refiere a los valores deducidos después de una evaluación de los riesgos específicos del lugar de estudio. Las normas oficiales en los estados de Estados Unidos fueron establecidas bajo este criterio.

Los estudios de evaluación de riesgo son el resultado de estudios de análisis de peligrosidad, de exposición y de riesgo. Con el análisis de peligrosidad se determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio, mientras que con el de exposición se evalúan los medios por los cuales un ser humano encuentra los contaminantes que se generan de un sitio. En el análisis de riesgo, los niveles de exposición humana para un compuesto químico y la toxicidad resultante de tal exposición se compara con un valor de toxicidad crítica para ese compuesto. El valor de toxicidad crítica generalmente representa un nivel de exposición aceptable para el compuesto. Si el valor de toxicidad crítica se excede, las acciones de remediación de un sitio son inminentes.

El análisis de riesgo consta de tres principales criterios:

- la aditividad del nivel de peligrosidad para químicos que tienen efectos tóxicos similares (por ejemplo hemólisis de eritrocitos, daño nervioso o daño hepático);
- la aditividad del nivel de peligrosidad para exposición de un mismo compuesto encontrado en varias fuentes (por ejemplo agua, alimentos de origen vegetal y animal);
- los efectos sinérgicos, que se refiere al nivel de peligrosidad de dos o más compuestos que es mayor cuando están juntos en comparación con la suma de los efectos de los mismos compuestos por separado.

Existen siete metodologías para realizar estudios de evaluación de riesgo que se han desarrollado en los Estados Unidos, todas ellas deben incluir variables que claramente representen los niveles de peligrosidad, de exposición y de riesgo para un sitio en particular. En la Tabla 2 se resumen las diferentes metodologías, los criterios que emplean cada una de ellas están marcados con una cruz.

Las metodologías más interesantes son aquellas que consideran situaciones reales, como la presencia de mezclas de contaminantes tal como el petróleo y sus derivados, además de medios múltiples de exposición (suelo, agua, alimentos de origen vegetal y animal). La única que considera estos

dos aspectos es la desarrollada por la EPA (3) en la cual la evaluación de la salud pública involucra el establecimiento de objetivos y la estimación del riesgo para alternativas de remediación, por lo que toma en cuenta los siguientes aspectos:

- la posibilidad de nuevas formas de exposición causadas por la remediación;
- la necesidad de indicadores químicos;
- las concentraciones tóxicas son determinadas en los puntos de exposición;
- las velocidades de liberación de contaminantes;
- el riesgo crónico de compuestos no-carcinógenos;
- el efecto de la remediación sobre la salud a corto plazo;
- la permanencia de contaminantes por el fracaso de una remediación.

Aparentemente en México se han difundido muy poco este tipo de metodologías, por lo que sería muy conveniente profundizar en ellas para entender la forma en que se establecen los límites permisibles, que finalmente para el caso de los Estados Unidos corresponde al inciso anterior (6.2).

Tabla 2. Comparación de las diferentes metodologías para evaluación de riesgo\*

Criterio	1	2	3	4	5	6	7
<i>Peligrosidad</i>							
Valor de toxicidad	X	X	X	X	X	X	
Toxicidad aguda no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica carcinógena	X		X	X	X	X	
Mezclas de contaminantes			X	X	X		X
Factor de peso del cuerpo	X	X	X	X			
Factores farmacocinéticos	X						



Criterio	1	2	3	4	5	6	7
<i>Exposición</i>							
Inhalación de aire	X	X	X			X	X
Inhalación de polvos	X	X	X				
Ingestión de agua	X	X	X			X	
Ingestión de suelo				X	X		
Absorción dérmica							
Consumo de vegetales	X	X					
Consumo de carne	X	X					
Consumo de pescado	X	X	X				
Destino ambiental	X	X	X				X
Factor de vida media			X	X			X
Factores específicos del sitio	X	X	X			X	X
<i>Análisis de riesgo</i>							
Aditividad del efecto de toxicidad	X		X				
Exposición a medios múltiples	X	X	X				
Efectos sinérgicos							

## \*Metodologías:

1. Departamento de Servicios de Salud de California
2. Rosenblatt D H., Dacre J C., and Cogley
3. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)
4. Ford K L. and Gurba P.
5. Suckman S K. and Dime R.
6. Departamento de Ecología del Estado de Washington
7. Departamento de Servicios de Salud del Estado de California

## 3. En función del uso que se dará al suelo

En esta opción se analizan las propiedades de un suelo en función de algún uso que se le vaya a dar, también se analiza si su contaminación es un riesgo para la salud de los habitantes aledaños a la zona. Lo más común es pensar que el suelo se va a utilizar como medio para el crecimiento de

especies vegetales, aunque no necesariamente como una actividad económica, también se puede usar el suelo como material estructural en una construcción. Este es el criterio que se sigue en Holanda que también tiene alguna base en estudios de evaluación de riesgo. Algunos ejemplos de límites permisibles para contaminantes establecidos por la legislación holandesa se muestran en la Tabla 3, se podrá observar que éstos son más estrictos que los norteamericanos.

Tabla 3. Comparación de la concentración permisible de algunos contaminantes entre Estados Unidos\* y Holanda

Contaminante	Suelo (mg/kg)		Agua subterránea (ug/l)	
	Estados Unidos	Holanda	Estados Unidos	Holanda
Cromo	800	100	50	1
Plomo	500	85	50	15
Benceno	0.1	0.05	5	0.2
Tolueno	50	0.05	1000	0.2

\*Las cifras corresponden a promedios de todos los estados.

## VII: ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS

El desarrollo de las tecnologías de remediación a nivel mundial, se inició en los países desarrollados hace más de 10 años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados peligrosos en concentraciones que sobrepasaban los límites permitidos.

Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de países desarrollados establecieron como una actividad prioritaria, la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos. En el caso de los Estados Unidos de Norteamérica, fueron la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía, a través del Superfund, quienes organizaron a las diferentes instituciones de investigación públicas y privadas para el desarrollo de tecnologías tendientes a la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con desechos militares en las localidades que funcionaron como puntos estratégicos durante la II Guerra Mundial. Otros países desarrollados siguieron caminos similares.

Como parte de las acciones que tomó el Superfund con patrocinio de la EPA, en 1990 se realizó un proyecto para evaluar las tecnologías europeas más exitosas e innovadoras donde se tenía un mayor avance. En la primera fase se identificaron 95 tecnologías innovadoras en uso o en investigación y se seleccionaron las más prometedoras, mismas que se estudiaron en la siguiente fase del proyecto, finalmente en la tercera fase, se seleccionaron las más exitosas tecnologías a gran escala que fueron extracción al vacío de un suelo contaminado con hidrocarburos, lavado *in situ* de un suelo contaminado con cadmio, arrastre con vapor *in situ* y otras tecnologías de biolabranza y lavado de suelo.

Las actividades de investigación realizadas en los Estados Unidos dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo físico-químico, como la incineración, y la solidificación/estabilización. Posteriormente, surgieron otras innovadoras como la desorción térmica, la extracción con vapor, el lavado de suelo y las de tipo biológico. Otras tecnologías más recientes fueron la vitrificación, la encapsulación y el venteo seguido de condensación.

De manera simultánea al desarrollo de tecnologías de remediación se dio el auge de técnicas para la caracterización y monitoreo hidrogeológicos. De esta forma se desarrollaron diferentes arreglos de piezómetros que permitían conocer de una manera rápida la conductividad hidráulica, así como técnicas de perforación para la toma de muestras inalteradas, sin dejar atrás el desarrollo de modelos matemáticos y de paquetes de cómputo para generar mapas tridimensionales de la distribución de contaminantes.

Existen en el mercado mundial, diversas tecnologías para remediación que ya se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas las tecnologías son aplicables a todos los casos. Para estar seguro de esto se deben realizar estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio y de ser posible pruebas de demostración en campo.

Las tecnologías de remediación pueden aplicarse *in situ* ó *ex situ*, generalmente las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en todo el acuífero. Las tecnologías *ex situ* se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo o bien en la zona no saturada hasta donde la maquinaria pesada permita la extracción del material.

Antes de iniciar un proceso de remediación es muy importante cerrar la fuente de contaminación, para asegurar la efectividad de cualquier estrategia planteada.

A continuación se analiza, de una manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación en sitios contaminados con hidrocarburos del petróleo.

### 1. Biorremediación

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de biorremediación, que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente se aplicaron el composteo y la biolabranza (*land-farming*), así como el uso de reactores con cepas puras de bacterias degradadoras combinado con el bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Posteriormente, se aplicaron otras técnicas innovadoras como la bioestimulación y el bioventeo. La diferencia entre las diferentes tecnologías de biorremediación se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Funcionamiento de las diferentes tecnologías de biorremediación

Tecnología	Base de funcionamiento
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Bioaumentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad para degradar contaminantes.
Bioventeo	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular y se revuelve periódicamente.

En general, las ventajas de las tecnologías de biorremediación son:

- los contaminantes son realmente transformados y algunos completamente biodegradados;
- se utilizan bacterias cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir otras potencialmente peligrosas;
- es una tecnología segura y económica;
- el suelo puede ser reutilizado;
- las bacterias mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan.

Entre las desventajas de la biorremediación están:

- que las bacterias pueden inhibirse por la presencia de tóxicos o altas concentraciones de contaminantes;
- el proceso no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad;
- algunos aditivos como los surfactantes pueden tener efecto adverso en aplicaciones *in situ*;
- requiere largos periodos de tiempo;
- no es aplicable en sitios con muy altas concentraciones de hidrocarburos altamente halogenados, metales y desechos radioactivos.

Para los procesos *ex situ* se prefiere utilizar aditivos con actividad de superficie conocidos comúnmente como surfactantes. Dado que los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua, la función de los surfactantes es favorecer su solubilidad y hacerlos con ello más susceptibles de ser degradados por los microorganismos. Los surfactantes pueden ser sintéticos o de origen biológico; estos últimos tienen la ventaja de ser biodegradables por los mismos microorganismos del suelo, por lo que son preferidos sobre los primeros.

## 2. Arrastre por aire (air stripping)

Esta tecnología se aplica a contaminantes volátiles presentes en el agua subterránea. El aire se inyecta a profundidad y la recuperación de los contaminantes se realiza en una torre empacada o en un tanque de aeración y requiere acoplarse a otro tipo de proceso para recuperar o destruir los contaminantes retirados del sitio. Esta tecnología es muy empleada por su

efectividad y tiene la ventaja de tener un bajo costo de operación. Las desventajas son:

- uso limitado a compuestos volátiles;
- generación de ruido;
- los contaminantes no se destruyen por lo que requiere acoplarse a otro tipo de tecnología.

## 3. Extracción al vacío

Este tipo de tecnología se aplica solamente para la extracción de compuestos volátiles, por lo que no es una opción recomendable para la remediación de suelos contaminados con petróleo, pero sí es atractiva para manchas superficiales de gasolinas. Sobre la zona afectada se colocan cubiertas que permiten captar los gases extraídos. Este proceso requiere ser acoplado a otro para eliminar los contaminantes o bien recuperarlos y reciclarlos.

## 4. Solidificación/estabilización

Las tecnologías de solidificación y estabilización son empleadas para la inmovilización de contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados, como es el caso de los compuestos inorgánicos.

El origen de las tecnologías de solidificación es muy antiguo, se conocen como mezclas suelo-cemento y se han empleado para mejorar la capacidad de soporte de carga de un terreno. Dada la experiencia de su uso en la construcción de terraplenes y su facilidad de manejo, fueron adaptadas posteriormente a la remediación de suelos. Para que estas tecnologías tengan éxito, se debe asegurar un perfecto mezclado entre el cemento y el suelo y la humedad necesaria para lograr fraguado. No son adecuadas para suelos con alto contenido de grasas y aceites, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con hidrocarburos. La mezcla suelo-cemento, producto de la solidificación, tiene características de resistencia a la compresión que dependen de los aditivos empleados, que no son más que catalizadores del fraguado. Los valores de resistencia alcanzados son los que determinarán la utilidad del material obtenido, que

puede ser como base de un camino, terreno para recreación o cimiento de una pequeña construcción, aunque en términos generales el suelo tratado pierde algunas de sus propiedades originales.

Las tecnologías de estabilización emplean productos químicos inertes que microencapsulan los compuestos contaminantes, dando como resultado un material sólido en forma de pequeñas partículas. El suelo contaminado debe mezclarse perfectamente para lograr que los contaminantes queden retenidos permanentemente. El material resultante puede utilizarse como suelo o mezclarse con tierra no contaminada para permitir el desarrollo de especies vegetales.

Un aspecto importante que debe cuidarse al emplear este tipo de tecnologías es la composición química de los aditivos empleados, los cuales pueden contener compuestos que en concentraciones elevadas representan un riesgo para la salud. Estas tecnologías tienen la facilidad aplicarse en el propio sitio y la ventaja de requerir muy cortos tiempos de tratamiento, aunque solamente se emplean para manchas de contaminación superficiales!

#### 5. Lavado de suelo

Esta tecnología se utiliza solamente para procesos *ex situ*. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos, puede permitirse una recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto los solventes como los hidrocarburos pueden separarse y reciclarse, sin embargo, implica un gasto importante de solventes, un costo de separación de éstos y un alto riesgo de explosión.

#### 6. Desorción térmica

El proceso se realiza *ex situ*, el suelo contaminado se introduce al sistema con ayuda de un tornillo sinfin y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera similar a una destilación. La desorción térmica tiene un menor costo que la incineración, el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante y tiene la ventaja de que el suelo puede ser reutilizado. Sin embargo, no es una alternativa recomendable para suelos contaminados con petróleo, ya que conforme se va aumentando la tempe-

ratura el manejo del material se hace muy difícil y no se logran recuperar los contaminantes.

#### 7. Por arrastre de vapor

Esta tecnología se basa en el mismo principio que la de arrastre con aire, la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desotberse del suelo son los que se recuperan, pueden recuperarse para reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso para que puedan ser destruidos. No es muy recomendable para suelos contaminados con petróleo.

#### 8. Incineración

La incineración es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva para suelos con alta concentración de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándose en dióxido de carbono el cual se descarga a la atmósfera, pero se genera una alta concentración de partículas suspendidas por lo que un buen equipo debe contar con sistemas de control de emisiones para asegurar que se trata de una tecnología limpia.

El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles (generalmente basado en normas extranjeras). Cuando esto ocurre se debe enviar a confinamiento. La operación de un proceso de incineración implica un alto costo, que está influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento.

#### 9. Confinamiento

El confinamiento no es precisamente una opción de remediación, se recomienda cuando se tienen residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acoplado a otros procesos como la incineración. Para esta opción debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el de transporte al sitio de confinamiento. En México aún no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras opciones antes de pensar en el confinamiento.

### 10. Vitrificación

Consiste en introducir dos electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una muy alta carga eléctrica para lograr la vitrificación de los contaminantes. La tecnología solamente opera en la zona no saturada, es aún más costosa que la incineración, por lo que no ha logrado llevarse a una escala mayor, solamente se ha operado a escala de demostración en campo.

De lo anterior se podría resumir que las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo son la biorremediación, algunas técnicas de estabilización y la incineración. Para asegurarse de cual es la idónea para un sitio en particular, es indispensable realizar pruebas preliminares de tratabilidad en el laboratorio, donde deben simularse las condiciones que prevalecen en el campo. Lo más recomendable es realizar pruebas de demostración en campo a escala piloto, sin embargo, ésta tiene un costo alto por lo que muchas compañías prefieren no hacerlo.

## VIII. COSTOS DE REMEDIACIÓN

Un proyecto de remediación abarca tres etapas principales: la caracterización, las pruebas de tratabilidad y la conceptualización del proceso de tratamiento, es decir, el diseño, adecuación y puesta en funcionamiento del mismo.

Hacer un desglose de los gastos de un proyecto de remediación, es algo muy sano, ya que permite entender lo complejo del problema y la urgente necesidad de progreso que tiene México en esta materia.

Para estimar los costos de un proyecto de remediación se deben considerar los siguientes rubros: equipo, trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete. Los gastos generados en cada uno se desglosan a continuación.

### Equipo

Los gastos requeridos corresponden a inversión, operación y desgaste del equipo, con la consecuente necesidad de mantenimiento. El equipo se

necesita en actividades de prospección y monitoreo, así como durante las propias actividades de remediación:

- prospección: perforación de pozos, toma de muestras;
- operación: bombas, compresoras, sistemas de extracción, mezcladoras, movimiento de materiales, reactores, centrifugas, filtros;
- monitoreo: toma de muestras y análisis *in situ*.

### Trabajo de campo

Este incluye lo siguiente:

- reconocimiento del sitio con ayuda de planos de localización;
- perforación de pozos para toma de muestras, para monitoreo o para procesos de extracción-tratamiento-inyección;
- instalación de equipo de proceso o auxiliares;
- movimiento de materiales común en los procesos *ex situ*;
- operación y supervisión en todas las actividades.

### Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio es de dos tipos analítico y de adecuación a las condiciones de campo:

- análisis químicos para conocer el tipo y concentración de los contaminantes;
- análisis fisicoquímicos para conocer las características del suelo;
- pruebas de tratabilidad para evaluar la capacidad y eficiencia de la eliminación de contaminantes.

### Trabajo de gabinete

Es una actividad de tipo administrativo para integrar todas las actividades referentes al proyecto, a ésta corresponden:

- calendarización;
- planeación;
- diseño;

- análisis e interpretación de resultados;
- elaboración de informes.

### IX. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

El suelo es un recurso natural difícilmente renovable, por lo que para eliminar los contaminantes de un sitio afectado, deben buscarse alternativas factibles y económicas que no lleven a la destrucción o confinamiento del suelo a menos que sea el último recurso.

Hay en el mercado diversas tecnologías de remediación y también diversas compañías que ofrecen sus servicios. En aspectos de remediación de suelos y otros servicios para el control de la contaminación no es recomendable adjudicar un contrato únicamente por licitación, ya que se corre el riesgo de un fracaso en el servicio y consecuentemente una pérdida de recursos y de tiempo.

La selección de una tecnología va acompañada de la selección de la compañía que la aplicará. Hay dos caminos principales para realizar esta selección, una es evaluar los antecedentes curriculares de la compañía y la otra evaluar las bases científicas de las tecnologías. Se puede hacer una selección en trabajo de gabinete, o bien probar las tecnologías en campo a escala de demostración. Un ejemplo de ésta opción se ha venido desarrollando para PEMEX-Refinación a través del servicio EOE-7242, en el que participan el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Ingeniería. Los criterios que se han considerado para la evaluación se presentan a continuación.

Evaluación en trabajo de gabinete:

- experiencia previa avalada por usuarios y por una autoridad ambiental;
- base científico-tecnológica de los desarrollos;
- estrategia para la evaluación técnica del problema;
- antecedentes curriculares del personal técnico.

Evaluación en campo:

- desarrollo de pruebas de tratabilidad en el laboratorio;
- estrategia para las pruebas de demostración en campo;
- capacidad técnica del personal;
- apoyo analítico especializado;
- efectividad en la eliminación de contaminantes;
- tiempo en que se logra la eliminación de contaminantes;
- costo por unidad de volumen tratado;
- impacto ambiental del proceso;
- seguridad ambiental durante y posterior al tratamiento.

A cada uno de los rubros anteriores se le asignó un peso específico con la finalidad de hacer una evaluación objetiva que arrojará cifras y no únicamente estimaciones. A través de la estrategia planteada se ha logrado la evaluación tanto de la eficiencia de la tecnología como del desempeño de la compañía, además de que se han podido probar diferentes tipos de tecnologías. Para la realización de las pruebas en campo se eligió un suelo con altos niveles de contaminación, medida como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), con la idea de que las tecnologías que logren resultados exitosos en los peores casos, puedan hacerlo en suelos menos contaminados. A través de esta evaluación PEMEX-Refinación podrá contar con los elementos técnicos y económicos para asignar contratos con mayores posibilidades de éxito.

### X. ACCIONES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS EN MÉXICO

#### 1. Las empresas de consultoría ambiental

Como se mencionó anteriormente, la remediación de suelos es una práctica que se está dando recientemente en México, para el caso de PEMEX, la institución ya cuenta con listas de prestadores de servicios que han venido realizando trabajos petroleros, dichas compañías cuentan con autorización del Instituto Nacional de Ecología para el transporte y manejo de residuos peligrosos. Esas mismas compañías han encontrado buenas oportunidades de negocio, ofreciendo servicios de remediación, el problema es que sus técnicos no cuentan con los conocimientos necesarios para

realizar dichos servicios. Algunas de ellas se han asociado a través de las llamadas *join ventures* con firmas extranjeras y sus asociados toman participación directa en los proyectos, otras son solamente representantes de firmas extranjeras y aplican las tecnologías como una receta de cocina, pero no pueden dar soluciones a imprevistos porque no tienen el dominio de la tecnología.

Un aspecto que llama la atención, es el hecho de que en una gran proporción, las compañías se presentan como "líderes" en procesos de remediación. En la práctica se ha podido constatar que ese adjetivo es sólo parte de la mercadotecnia y que lo que dicen no siempre es verdad. Aquí es donde debe plantearse una estrategia de selección para no arriesgar con principiantes, dado que el presupuesto para actividades de control ambiental generalmente es limitado, dado que se trata de acciones que no generarán ganancias económicas.

## 2. Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental

Como ya se sabe, en México los aspectos relacionados con el ambiente son competencia directa de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca a partir del presente año. Esta se apoya en el Instituto Nacional de Ecología (INE) para el desarrollo de los instrumentos regulatorios y certificación de actividades para el control del ambiente, y en la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) para los estudios de impacto ambiental y auditorías ambientales. Una situación compleja que se está dando es que estas dos instituciones han establecido ciertas reglas sin que exista un marco jurídico claro. Desafortunadamente es cada vez mayor la cantidad de trabajo que deben atender dichos organismos y menor el presupuesto con el que deben realizarlo, requieren de especialistas que no pueden contratar y no pueden dar opciones de actualización a sus empleados. Lo anterior les ha generado ya una imagen muy politizada reforzada por algunas situaciones poco éticas.

Por lo que respecta a remediación de suelos contaminados, las instituciones citadas no han mostrado un amplio dominio del conocimiento, aunque hay que reconocer que sí se ha logrado mucho. Pero en este caso se deben redoblar esfuerzos ya que suelo y subsuelo no han sido suficientemente abordados. Dichas instituciones deberían apoyarse más en las universidades, sin embargo, el canal de comunicación no se ha dado abiertamente, sólo para algunos casos específicos. Además, el gobierno

federal debería dar un mayor apoyo, sabiendo el compromiso que se tiene a nivel nacional porque ya no es posible descuidar de esa manera nuestros suelos, ni es conveniente la imagen que se da hacia el exterior.

Hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente, y para los cuales sería indispensable trabajar con grupos interdisciplinarios e interinstitucionales, los cuales se citan a continuación:

- la creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de Suelo y Subsuelo que responda a la Legislación Ambiental correspondiente que está en proceso de revisión;
- la preparación de especialistas en evaluación de riesgo en materia de contaminación de suelo y subsuelo, que puedan aportar elementos adecuados a nuestro medio durante la creación de las normas técnicas correspondientes;
- la generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de remediación de suelos, como son, los límites permisibles de contaminantes que se convertirán en los niveles de limpieza para sitios contaminados y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de remediación;
- revisión y adecuación de los formatos oficiales de auditorías ambientales donde se integre en un solo rubro toda aquella información correspondiente a contaminación de suelo y subsuelo incluyendo la existencia de cementerios y zonas fuera de las áreas de proceso (se pueden citar dos ejemplos, la investigación de tanques subterráneos está en el apartado de "Instalaciones" y debe ir en "Contaminación de Suelo", además, el apartado de "Contaminación del Suelo" debe incluir también el "Subsuelo");
- desarrollo de evaluaciones más objetivas donde se le de un peso específico a los aspectos correspondientes a una auditoría ambiental, para arrojar cifras que puedan interpretarse como "calificaciones", esto elimina la subjetividad, permite homogeneizar los diferentes criterios y ahorra muchas horas de interpretación y redacción (algo que podría servir de ejemplo, es una metodología desarrollada en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, para realizar estudios de impacto ambiental con ayuda de computadora, la cual ya ha sido probada en situaciones reales);

— desarrollo de metodologías objetivas para la evaluación de tecnologías para remediación de sitios contaminados (la desarrollada por el Instituto de Ingeniería, UNAM e Instituto Mexicano del Petróleo para PEMEX-Refinación podría servir de ejemplo y como base para ser enriquecida).

Por otro lado, los organismos gubernamentales deberán trabajar mucho en aclarar su interrelación, referida a los aspectos de contaminación de suelo y subsuelo, entre ellos: la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

### 3. El papel de las universidades

*Preparación de personal capacitado.* A pesar de la importancia de los problemas ambientales y de la necesidad de soluciones adecuadas a nuestro medio, no existen carreras a nivel licenciatura que permitan la formación de profesionales de buen nivel, con una visión muy dirigida al control de la contaminación ambiental, mucho menos en lo que se refiere al recurso suelo. Las áreas técnicas donde las universidades necesitan reforzar la formación de profesionistas con enfoque ambiental de muy alto nivel son: hidrogeología, geociencias, geotécnica, fisicoquímica, química analítica y biotecnología, entre otras.

A nivel posgrado existen más opciones para la preparación de personal más especializado, además los estudiantes cuentan ya con una base de licenciatura. Esto hace más fluida la enseñanza, sin embargo, hay poco personal académico a nivel posgrado con experiencia en control de la contaminación, éste generalmente se encuentra realizando trabajos en campo. Otra opción son los cursos de actualización, en donde se tiene la gran ventaja de contratar profesores por un cierto número de horas, las necesarias para impartir temas muy especializados. A este respecto, las universidades han estado realizando una labor importante.

Otra área que requiere de especialistas es la legislación, las universidades deberán preocuparse por generar "abogados ambientales" que adquieran esta visión durante su formación, no que se formen en el ejercicio de su profesión. Los países desarrollados tienen amplia experiencia en esta materia algunos esquemas podrían servir como base para su adecuación en México.

*Desarrollo, adaptación e innovación de tecnologías.* Esta actividad puede desarrollarse de manera institucional o como apoyo directo a empresas de consultoría. Para que la interacción entre las universidades y las empresas de consultoría ambiental se pueda dar fácilmente, se deben contemplar dos aspectos importantes: 1) que el investigador aborde el problema tratando de cumplir con el objetivo del proyecto por el camino más corto, sin desviarse por la curiosidad científica, y 2) que la empresa acepte que los gastos de investigación son altos, que ésta es necesaria y que toma su tiempo.

Con base en lo anterior y considerando que cualquier nuevo desarrollo podría tomar muchos años de trabajo antes de ser llevados a la práctica, lo más recomendable para nuestro país es recurrir a las tecnologías existentes que ya hayan sido probadas en otros sitios contaminados y realizar los ajustes necesarios, innovación o adaptación, para aplicarla en los sitios a remediar, dado que cada uno tiene sus características particulares.

*Evaluación de proyectos de remediación.* En este caso investigadores universitarios se pueden involucrar como evaluadores de tecnologías o desarrollando elementos necesarios para que PEMEX pueda cumplir mejor su función en el cuidado del ambiente. De esta forma, se tiene la ventaja de contar con una asesoría de muy alto nivel y muy versátil, tanto como sea necesario.

Dado que la llegada de tecnologías de remediación a nuestro país se está dando actualmente y se tiene ya la conciencia de remediar, a todas las empresas de PEMEX les convendría seleccionar las tecnologías adecuadas y a las empresas que se encargarán de llevarlas a la práctica, con otros elementos de mayor peso que los que se tienen en un concurso de licitación, donde el criterio más empleado es el presupuesto más bajo, las compañías que presentan presupuestos económicos, no necesariamente son las que tienen una mejor base tecnológica. Este aspecto es un motivo de amplia discusión.

### 4. Educación ambiental para la sociedad

En términos generales, la sociedad carece de muchos conocimientos que son necesarios para comprender la importancia de su participación en la vida diaria, ya sea como actores principales o bien como afectados por acciones tomadas equivocadamente. Los avances que se han logrado para "educar a la sociedad" en materia de aire podrían servir como ejemplo,



en general, la sociedad actualmente se preocupa un poco más por tener un aire limpio. Mucho se tendrá que trabajar en materia de agua todavía y más aún en materia de suelo, donde no está claro el papel de éste como un "recurso natural".

### XI. LOS COMPROMISOS DE PEMEX

El desarrollo de tecnologías ambientales para el control de la contaminación ya permite en la actualidad atender derrames casi de inmediato, por lo que es posible detener el avance de los contaminantes, además de la posibilidad de recuperar el aceite perdido y retornarlo al proceso. En cambio, los derrames que ocurrieron en el pasado son tan antiguos como la industria petrolera, y por el grado de intemperización que tienen se hace muy difícil su tratamiento.

Como parte del marco jurídico de PEMEX en materia ambiental, el artículo 23 del Reglamento de Trabajos Petroleros indica que PEMEX tiene la obligación de mantener todas sus instalaciones en buen estado sanitario y de conservación. Por otro lado, en el artículo 37 se señala que corresponde al organismo permisionario la responsabilidad por los daños y perjuicios que se ocasionen al tránsito terrestre, al fluvial o al marítimo, al ambiente, la pesca, la agricultura, la ganadería o a terceras personas.

En su informe 93-94, PEMEX establece que como resultado de las contingencias ambientales por accidentes ocurridos durante el bienio y que produjeron impactos al ambiente, se llevaron a cabo trabajos de restauración y reforestación orientados a restituir a sus condiciones originales en 450 hectáreas en donde se emplean técnicas de biorremediación, químicas y físicas.

Lo anterior muestra que PEMEX como empresa está conciente de sus obligaciones y su responsabilidad hacia el ambiente, pero hace falta aún más. En algunos casos todavía impera el maquillaje sobre las verdaderas soluciones, y se han enterrado muchos derrames en lugar de tratarlos. Hace falta estimular más la ética y el respeto al medio ambiente a través de la educación que pueda brindarse a los empleados que realizan directamente las actividades en campo, quienes están muy involucrados.

### XII. CONCLUSIONES

En este documento se ha tratado de enfatizar la función tan importante del suelo como barrera de protección de los acuíferos que son la fuente de suministro de agua a las poblaciones y la imperante necesidad de limpiar los suelos contaminados, con la finalidad de proteger la calidad del agua que utilizarán las generaciones futuras.

La diversidad de los aspectos incluidos son una muestra de lo compleja que es la tarea de remediación de un sitio contaminado, no por los aspectos técnicos, ya que los grandes avances de investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras extranjeras han abierto una amplia gama de posibilidades para abordar los problemas de contaminación de suelos y acuíferos. El problema es que como país, aún no estamos preparados para enfrentar con herramientas propias las acciones de remediación, no tenemos el marco jurídico que sirva como el punto de partida, ni los instrumentos regulatorios auxiliares, sin embargo, tenemos que empezar a actuar. El hecho de que no podamos esperar más tiempo, nos puede llevar a tomar decisiones que tal vez no sean las más adecuadas, pero tendrán que modificarse sobre la marcha, como ha sucedido en numerosas acciones para el control de la contaminación ambiental.

Uno de los aspectos que conviene analizar y discutir ampliamente es el hecho de tomar como nuestros, las regulaciones y los procedimientos que han seguido otros países, específicamente Estados Unidos. Tal vez como punto de partida sí conviene hacerlo, porque no tenemos alguna base, pero tendremos que ir generando lo propio y dejar que se vaya retroalimentado de manera constante al poner en práctica algunas acciones. En varias situaciones hemos tomado como referencia, cualquier valor de las concentraciones permisibles de contaminantes que rigen en Estados Unidos, sin saber cómo fueron establecidas y sin entender por qué para un mismo parámetro indicador existe un amplio intervalo para escoger un valor. Para estar seguros que los valores elegidos fueron los adecuados tendremos que prepararnos para realizar los estudios de evaluación de riesgo aplicables específicamente a los sitios donde están los problemas de contaminación de suelos.

Otro aspecto en el que debemos generar herramientas modernas es en las auditorías ambientales, en la evaluación de tecnologías para remediación y en la selección de compañías de servicios ambientales. Aquí,

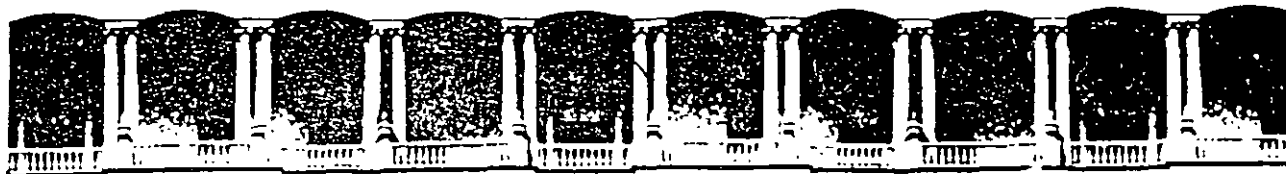
necesitamos crear esquemas más objetivos donde se puedan unificar los criterios de los diferentes especialistas y en los que las opiniones se emitan de una forma cuantitativa con base en los aspectos de mayor peso específico. Esto dará una mayor claridad a las evaluaciones y se podrán tener resultados precisos en un menor tiempo.

Finalmente, la complejidad de los trabajos de remediación de suelos contaminados con petróleo que PEMEX tendrá que dar inicio en un corto tiempo, sugiere la integración de grupos interdisciplinarios e interinstitucionales en los que especialistas de alto nivel en aspectos técnicos y legales aporten nuevas ideas para responder con más confianza a éste que es uno de sus grandes retos.

### XIII. BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, S. A., 1995. "Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI", *Terra* 13(1): 3-16.
- BENIDICKSON J., DOERN G.B., OLEWILER N., Getting the Green Light, Environmental Regulation and Investment in Canada. C.D. Howe Institute.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1995, 22a. edición, Ediciones Delma.*
- EPA, 1991. *Understanding Bioremediation, A Guide for Citizens*, EPA/540/2-91/002.
- KOSTECKI P.T., CALABRESE, E. J., and HORTON, H. M., 1989. "Review of present risk assessment models for petroleum contaminated soils. Chap. 21", in *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. I, De. Kostecki P. T. and Calabrese E.J., Lewis Publishers, Inc. USA.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1994, 3a. ed., Ediciones Delma.*
- OLIVER T., KOSTECKI P., and CALABRESE E., 1993. *State Summary of Soil and Groundwater Cleanup Standards for Hydrocarbons*, Association for the Environmental Health of Soils, for EPA Office of Underground Storage Tanks.
- PHEILTER T.H., NUNNO T. J., and WALTERS, J. S., 1990. EPAs Assessment of European Contaminated Soil Treatment Techniques. *Environ. Progress* 9(2): 79-86.

- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1994. Formato oficial para auditorías ambientales, Subdirección de Auditoría Ambiental.
- RUSSELL D.L., 1992. *Remediation Manual for Petroleum-Contaminated Sites*, Technomic Publishing Co., USA.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, *Tratado de Libre Comercio en América del Norte, Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral*, 1993.
- Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología. 1993-1994. *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente* (Capítulo 7: Suelo y Capítulo 13: Industria Petrolera). México.
- United States Department of Energy, Office of Environmental Restoration and Waste Management, 1993. *Technology Development, A National Program of Demonstration, Testing and Evaluation*.
- United States Environmental Protection Agency, 1993. *Cleaning up the Nation's waste sites: Markets and Technology Trends*.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

***CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS***

**TEMA :**

***LA RESPONSABILIDAD JURÍDICA  
EN EL DAÑO AMBIENTAL***

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# LA RESPONSABILIDAD JURÍDICA EN EL DAÑO AMBIENTAL

Primera edición: 1998

DR. © 1998. Universidad Nacional Autónoma de México

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Circuito Maestro Mario de la Cueva s/n  
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México, D. F.

PETRÓLEOS MEXICANOS  
Av. Marina Nacional 329, Col. Huasteca, C. P. 11311, México, D. F.

Impreso y hecho en México

ISBN 968-36-6574-8

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Septiembre de 1998, Núm. 87

Edición y formación en computadora al cuidado de Isidro Saucedo



**PEMEX**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PETRÓLEOS MEXICANOS

MÉXICO, 1998

## LA REPARACIÓN DEL DAÑO. ASPECTOS TÉCNICOS: REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

SUMARIO: I. *Introducción.* II. *Remediación y restauración.* III. *El suelo como recurso natural.* IV. *Materiales y residuos peligrosos.* V. *Impactos ambientales de la industria petrolera.* VI. *Evaluación del daño.* 1. *Análisis del sitio y sus alrededores.* 2. *Análisis geohidrológico.* 3. *Análisis químico del (los) contaminante (s).* 4. *Análisis fisicoquímico.* VII. *Alternativas técnicas para la reparación del daño.* 1. *Medidas de mitigación.* 2. *Remediación.* 3. *Confinamiento.* 4. *Restauración.* VIII. *Procedimiento administrativo para la limpieza de sitios contaminados.* 1. *Acreditación de la tecnología.* 2. *Evaluación del plan de remediación.* 3. *Establecimiento de los niveles de limpieza.* IX. *Marco legal para la limpieza de sitios contaminados.* X. *Instrumentos legales de apoyo.* XI. *Conclusiones.* XII. *Bibliografía.*

### I. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera en México tiene un significado estratégico de primera magnitud, que se manifiesta por los niveles de contribución a la economía nacional. La necesidad de satisfacer, día con día, una mayor demanda de energéticos ha ocasionado el crecimiento de esta industria, y con ello el impacto sobre los recursos naturales, los ecosistemas y las zonas urbanas.

Ante las reformas de la Ley Federal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, donde se camina hacia la responsabilidad por daño ambiental, se requieren elementos técnicos que faciliten la interpre-

tación de las causas que ocasionaron el daño y de las posibles formas para la reparación del mismo, que sirvan de apoyo en el campo jurídico.

El objetivo del presente capítulo es precisamente aportar los elementos técnicos que puedan servir como base para evaluar el daño que ha sufrido un sitio debido a la presencia de contaminantes de la industria petrolera y la manera como debe proceder la reparación del mismo. Entendiendo al daño, no solamente como lo que se aprecia a simple vista, sino también los efectos que ocurren en el subsuelo.

## II. REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

En el artículo 3 fracción XXXIII de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), *restauración* se define como *el conjunto de actividades tendentes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales*.

De acuerdo al *Diccionario de la Lengua Española* (1992) *restaurar* es *reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía; reparar una pintura, escultura o edificio del deterioro que ha sufrido*. Esta definición aplica perfectamente en la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, cuando se refiere a la protección, conservación, restauración y recuperación de monumentos arqueológicos, artísticos e históricos.

En las reformas hechas a la LGEEPA,<sup>1</sup> no se aprovechó la oportunidad para dar más precisión a las definiciones, y desafortunadamente se corre el riesgo de interpretar la restauración de sitios contaminados, como una actividad meramente cosmética, más que de saneamiento o limpieza.

El término *remediación* no está registrado en los diccionarios de la lengua española, es por eso que en nuestro país no ha sido incluido en documentos oficiales. Se ha vuelto del dominio público como una traducción de *remediation* que en Estados Unidos, Canadá y otros países de lengua inglesa, se ha venido usando para referirse a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados.

Un término que sí aparece en los diccionarios de la lengua española es el verbo *remediar*, cuya definición es *poner remedio al daño; corregir o*

*enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; librar, apartar o separar de un riesgo; evitar que suceda algo de que pueda derivarse algún daño o molestia*. Si nos ubicamos dentro del terreno ambiental, esta definición es precisamente lo que se busca una vez que se detecta un daño por contaminación.

En una propuesta de anteproyecto de norma,<sup>2</sup> se hizo un intento para definir *remediación* de la siguiente forma: *conjunto de acciones necesarias para llevar a cabo la limpieza de cualquier descarga o sospecha de descarga de contaminantes, incluyendo mas no limitado, a la realización de una evaluación preliminar, investigación del sitio, determinación del alcance del problema, estudio de factibilidad y acciones correctivas*. La definición es muy completa, pues contempla la limpieza de un sitio contaminado en todo su concepto.

Con base en lo anterior, se puede decir que los términos, *restaurar* y *remediar*, aplican en el terreno ambiental sólo si son empleados en el contexto de su definición. Para ilustrar lo anterior, se presentan tres casos:

1. Únicamente restaurar, es el hecho de hacer crecer plantas en un sitio dañado sin haber eliminado o destruido los contaminantes previamente. Esto suena extraño, sin embargo, se hace depositando una importante capa de desechos agroindustriales y de suelo limpio encima de derrames de petróleo o de descargas de lodos aceitosos, de tal forma que éstos quedan enterrados y encima se siembran pastos y especies vegetales de raíz corta. Cuando estas especies se desarrollan y crecen, se restablecen condiciones para la evolución de procesos naturales, a pesar de que no se haya limpiado el suelo. Otro ejemplo que no se relaciona con la industria petrolera se presenta en los rellenos sanitarios, donde todos los desechos sólidos quedan enterrados y en la superficie se construyen alamedas y lugares de recreación, sin importar el efecto de materiales contaminantes en la profundidad.
2. Únicamente remediar, es decir, limpiar el suelo sin devolverle su función biológica. Esto se practica principalmente dentro de instalaciones industriales en operación o que van a ser desmanteladas, que son sitios en donde no se observaba el desarrollo de especies vegetales o animales antes de ser contaminados.

<sup>1</sup> Diario Oficial de la Federación, 1997.

<sup>2</sup> INE, 1996

3. Remediar y restaurar, esto es, limpiar y demostrar que el suelo recobra su actividad biológica. Un ejemplo de este caso es cuando se logra la eliminación de contaminantes o su transformación en compuestos menos dañinos, y posteriormente se permite el crecimiento y proliferación de especies vegetales y/o animales. Esto se aplica a suelos y cuerpos de agua que antes de ser contaminados cumplían con una función biológica.

Para ser congruentes con el título y el contenido del presente trabajo, así como con las definiciones correctas, se hará distinción entre los dos conceptos: *remediación y restauración*.

### III. EL SUELO COMO RECURSO NATURAL

Un recurso natural es un elemento natural que se presenta sin la inducción del hombre y es susceptible de ser aprovechado en beneficio de éste. El suelo entra en esta definición de recurso natural, y además tiene la característica de ser no renovable. Tiene diversas funciones, como servir de filtro amortiguador al limpiar el agua de lluvia que recarga los acuíferos, es un medio productor de alimentos, es hábitat biológico y de reserva genética, es el medio físico para la construcción, además de fuente de materias primas y herencia cultural.<sup>3</sup>

En la LGEEPA, la importancia del suelo está más bien dirigida hacia actividades agrícolas y forestales, esto es, a la capa superficial del suelo. Para ser una ley federal, es muy poco el énfasis que se hace en relación al subsuelo y llama la atención que en ninguno de los artículos referidos a la Prevención y Control de la Contaminación del Suelo (título IV, capítulo III) se menciona el término subsuelo. En la Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental que llevó a cabo la Comisión de Ecología de la Cámara de Diputados en julio de 1995, se presentó una propuesta de modificaciones al capítulo citado.<sup>4</sup> Uno de los aspectos principales de dicha propuesta era dejar asentado "suelo y subsuelo" cada vez que en la redacción de la ley original se hablara de "suelo" en casos específicos de prevención y control de la contaminación, pero desafortunadamente ésta

<sup>3</sup> Saval, 1995.

<sup>4</sup> Saval, 1995a.

no fue tomada en cuenta. La Ley Ambiental del Distrito Federal en cambio, sí refiere a los dos términos en conjunto, "suelo y subsuelo", incluso, en muchas ocasiones menciona también a los acuíferos, cuando se habla prevención y control de la contaminación.

Por otra parte, cuando se habla del uso que se le va a dar al suelo, comúnmente se cita el término de vocación natural. Este concepto, por definición, se refiere a las condiciones que presenta un ecosistema para sostener una o varias actividades sin que se produzcan desequilibrios ecológicos. La aplicación correcta de este término, debe enfocarse a suelos de uso agrícola y forestal, cuando se estudian las especies vegetales que pueden desarrollarse en sitios específicos, cuyo material geológico posee características fisicoquímicas particulares. En el caso de sitios contaminados, su aplicación se debe referir a las actividades que se van a desarrollar en el sitio después de la limpieza del sitio, como suelo recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación.

### IV. MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

De acuerdo a la LGEEPA, un material o residuo peligroso por sus características representa un peligro para el ambiente, la salud o los recursos naturales. Para calificar a un material o residuo como peligroso se debe aplicar el análisis conocido como CRETIB. El nombre de este análisis lo conforman las siglas que corresponden a cada una de las características del material como sigue: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico-Infecioso. Dicho análisis se debe practicar de acuerdo a la normatividad<sup>5</sup> y se considera confiable únicamente cuando se realiza en los laboratorios reconocidos por el Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba.<sup>6</sup> Cualquier material o residuo cuyo resultado sea positivo para alguna de las características citadas, se considera peligroso.

Los suelos contaminados con hidrocarburos se consideran materiales peligrosos, por lo que anteriormente se solicitaba el análisis CRETIB. Sin embargo, el INE, a través de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, se ha dado a la tarea de rescatar al suelo como

<sup>5</sup> NOM CRP-052-ECOL/1993 y NOM CRP-053-ECOL/1993.

<sup>6</sup> SINALP, 1997.

recurso natural y establecer nuevos criterios basados en análisis químicos. En la actualidad, lo que procede es identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento.<sup>7</sup> Lo anterior también está fundamentado en que la información que aportan los análisis CRETIB en relación con los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, no es representativo en el caso de hidrocarburos intemperizados, porque éstos seguramente se volatilizaron durante la toma de muestra. Además, algunas de las características naturales de los suelos pueden dar reacciones positivas y generar interpretaciones equivocadas. Lo que sí se sigue aplicando para muestras de suelo y agua contaminados, es la cuantificación de metales pesados de acuerdo con la normatividad,<sup>8</sup> el cual se debe practicar simultáneamente con una muestra de suelo limpio, para saber si se trata de una característica natural del suelo o de una contaminación. Los resultados que se obtengan formarán parte de la caracterización de los contaminantes, como se verá más adelante, y servirán para evaluar las alternativas de tratamiento.

## V. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA INDUSTRIA PETROLERA

El impacto ambiental ocasionado por la industria petrolera comprende los efectos de todas y cada una de las fases involucradas en las etapas que son: exploración, explotación, transformación, distribución y comercialización. Las actividades en cada una de ellas han afectado los recursos naturales, representados básicamente por agua, aire, suelo y biota.<sup>9</sup>

Durante la exploración terrestre, se habla de desmontes para la construcción de rutas de acceso y eliminación de la cubierta vegetal y edáfica para la instalación de campamentos, que trae como consecuencia el desplazamiento de especies animales. Se presentan problemas de contaminación por derrames y explosiones. En la exploración marina, además de la alteración de los ecosistemas marinos, existen mayores posibilidades de dispersión de contaminantes que en el medio terrestre.

En la explotación terrestre, la perturbación de los ecosistemas se da por los asentamientos irregulares que se instalan a las orillas de las vías de

acceso, deforestación por la construcción de caminos y cambios en la dinámica del flujo de las aguas superficiales. Se presenta una mayor acumulación de desechos industriales como recortes y lodos de perforación, lodos aceitosos, aditivos químicos y aceites gastados, las posibilidades de derrame de crudo son mayores y se observa también la emisión de contaminantes a la atmósfera. El establecimiento de asentamientos humanos genera aguas negras que también tienen impacto sobre los ecosistemas. Una situación similar se presenta en la exploración marina, además de la acumulación de los sedimentos de dragado.

Una gran parte de terrenos localizados cerca de las zonas de explotación, en el pasado albergaban abundante flora y fauna, cuyo desarrollo se veía favorecido por el clima cálido-húmedo. La destrucción de estos ambientes naturales se inició hace varias décadas, cuando tomó auge la actividad petrolera.

La industria de refinación requiere de grandes espacios para la instalación de tanques de almacenamiento. Su actividad es básicamente la separación de los productos del petróleo, en diferentes fracciones de acuerdo con sus características químicas y usos. Los principales productos que se procesan son: crudo pesado, ligero, superligero y reconstituido, gas seco y licuado, gasolinas, querosenos, diésel, gasóleos, combustóleo, asfaltos, grasas y lubricantes. Las actividades de proceso requieren líneas de distribución para fluidos, vapores y gases, se tiene un importante consumo de agua de enfriamiento y el vertimiento de aguas residuales conteniendo compuestos tóxicos. Aumentan las posibilidades de fugas, derrames y explosiones.

La actividad de la industria petroquímica requiere instalaciones de proceso más sofisticadas que la refinación, dado que es básicamente una industria de transformación. Produce una gran variedad de sustancias complejas entre las que destacan: anhídrido carbónico, amoníaco, metanol, etileno, dicloroetano, polietileno, acetaldehído, cloruro de vinilo, xileno, tolueno, benceno, etilbenceno, estireno, acrilonitrilo, propileno, dodecibenceno y pentano. Dentro de las instalaciones se tienen también riesgos de fugas, derrames y explosiones, así como descarga de aguas residuales muy contaminadas, tal como ocurre en refinación, pero en petroquímica los compuestos que se manejan son aún más tóxicos. Por lo general, los residuos de la petroquímica están considerados peligrosos y en una importante mayoría no son susceptibles de ser sometidos a tratamiento. Se tienen además, emisiones gaseosas que afectan la calidad

<sup>7</sup> Sánchez, 1997

<sup>8</sup> NOM CRP 053-ECOL/1993

<sup>9</sup> SEDUE-INE, 1994



del aire de los alrededores, e incluso, ocasionan corrosión de materiales metálicos empleados en la construcción de viviendas.

La distribución de productos a través de ductos y pipas, así como su almacenamiento en grandes tanques, presenta un alto riesgo por las posibilidades de fugas y derrames que afectan principalmente el suelo y los cuerpos de agua aledaños al sitio de trabajo.

## VI. EVALUACIÓN DEL DAÑO

La evaluación del daño es realmente un diagnóstico que debe ser muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las medidas de mitigación, limpieza y, en su caso, restauración. Es una actividad en la que necesariamente confluyen diversas disciplinas, las cuales deben interactuar para arrojar resultados completos.

Cuando ocurre un derrame en suelo o en cuerpos de agua, los contaminantes inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio físico lo permite. Las características fisicoquímicas del contaminante, así como las propias del sitio, determinan su permanencia o migración. Esta es la razón por la que derrames subterráneos que ocurrieron en el pasado, años después se detectan fuera del predio donde acontecieron, y alejados varios metros o incluso kilómetros, en dirección de la corriente de agua subterránea. Ejemplos de lo anterior se presentan comúnmente en zonas aledañas a poliductos, centros de almacenamiento y distribución de combustibles, así como en estaciones de servicio. En estos casos se pone en riesgo la salud de los habitantes de la zona, debido a que el agua de los pozos por estar contaminada con hidrocarburos deja de ser apta para consumo humano.

Todos los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua y por ser menos densos que ésta tienden a flotar, esta característica es importante porque marca la estrategia del diagnóstico en un sitio contaminado. Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Otros productos químicos no se ven, tampoco huelen, únicamente son detectados por análisis químicos. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de ser completamente visibles por su color y aspecto. Tal

vez éstos son los que más daño han ocasionado a los ecosistemas, y el daño puede empezar a ser estimado por las claras evidencias.

PEMEX tiene bien identificados los sitios afectados en las zonas de exploración y explotación, de hecho, ha realizado muchos estudios para cuantificar los daños. Específicamente en Tabasco, se han reportado daños a los ecosistemas, que incluso han afectado otras actividades económicas de la región. Los daños han afectado zonas de cultivo, de caza y de pesca, se dice incluso que se han violado zonas decretadas como reserva ecológica y de amortiguamiento, donde se concentra la mayor parte de las especies de flora y fauna protegidas, por lo que es necesario redefinir dichas áreas. Desafortunadamente, la situación no ha podido ser controlada, y en la actualidad se manejan tantos intereses políticos que dejan poco espacio para la toma de decisiones bien fundamentadas.

La evaluación del daño constituye un estudio completo de caracterización que incluye: un análisis del sitio y sus alrededores, un análisis geohidrológico, un análisis químico de los contaminantes y un análisis fisicoquímico de suelo o agua contaminados.

### 1. Análisis del sitio y sus alrededores

Para esta actividad es indispensable visitar el lugar, una parte importante de la información se puede obtener cuando se entrevista a los trabajadores y a los pobladores del lugar, pero también es necesario recurrir a los acervos bibliográficos. A continuación se enlistan los conceptos que deben ser investigados:

- Ubicación geográfica del sitio afectado
- Tipo de instalación que dio origen a la contaminación (sitio de exploración o explotación, industria de proceso, centro de almacenamiento, terminal marítima, centro de abastecimiento, estación de transferencia o ducto de transporte, entre otros)
- Plano de las instalaciones superficiales y vías de acceso (terrestre, fluvial y marítimo)
- Plano de instalaciones subterráneas con identificación
- Ubicación de las zonas urbanas aledañas
- Resultados de estudios previos que se hayan realizado (auditorías ambientales, gasometrías, mediciones de la profundidad del nivel freático)

- Apariencia del material contaminante (materia prima, producto o residuo de proceso)
- Ubicación de la(s) fuente(s) de contaminación (obra subterránea o superficial)
- Antigüedad de la contaminación
- Precipitaciones pluviales (frecuencia y nivel)
- Escurrientas
- Ubicación de los cuerpos de agua aledaños
- Clima y temperatura ambiente del sitio
- Pozos de extracción de agua aledaños (en uso, clausurados y planeados)
- Uso del suelo afectado (agrícola, forestal, recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación)
- Topografía
- Tipo de vegetación

Como sucede en todo trabajo de investigación, las evidencias documentadas, como las fotografías con un mismo punto de referencia, o bien, fotografías aéreas o imágenes de satélite tomadas tiempo atrás, son de gran utilidad. En este último aspecto, el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), así como Petróleos Mexicanos a través de su propio sistema de información geográfica (SICORI) constituyen un gran apoyo para conocer aspectos muy generales de las zonas en estudio.

## 2. *Análisis geohidrológico*

La importancia del análisis geohidrológico del sitio, es que aporta elementos para entender la forma en la que se han movido los contaminantes, del punto específico donde ocurrió un derrame y hacia dónde se tienen zonas afectadas. Esta investigación ayuda a conocer si la migración de los contaminantes ha sido producto de un proceso natural, o bien, ocasionado por la acción del hombre. Durante la caracterización geohidrológica se debe obtener la siguiente información:

- Profundidad del nivel freático
- Dirección y velocidad del flujo del agua subterránea
- Espesor de producto libre (cuando éste ha alcanzado el nivel freático)

- Definición tridimensional de la mancha de contaminación subterránea
- Perfiles estratigráficos

Cuando se trata de un derrame antiguo, esta información es útil para entender cómo se ha desplazado la mancha de contaminación hacia fuera del predio de las instalaciones, o bien, en el caso de derrame recientes, se puede predecir hacia dónde migrarán los contaminantes y el tiempo en que alcanzarán pozos de abastecimiento o zonas urbanas.

Durante la recopilación de la información se debe definir un sitio que servirá como control cuyas características físicas, químicas y biológicas, se considere sean similares a las del sitio, antes de que haya sido afectado. Este sitio control debe estar libre de contaminación, de ahí deberán tomarse muestras, las cuales serán procesadas simultáneamente a las muestras del sitio contaminado.

### a. *Diagnóstico de la contaminación in situ*

El diagnóstico *in situ* permite obtener información de una manera relativamente rápida y simple. Se puede conocer la ubicación de la mancha de contaminación en el suelo, sobre un plano y a profundidad, con estas técnicas se pueden detectar varios niveles de concentración de contaminantes. Existen varios métodos para el diagnóstico *in situ*, dos de los más comunes son los geoelectrónicos y la gasometría; de ahí se derivan otros. Lo que es importante es saber cuál es el método más adecuado para cada caso.

Los métodos geoelectrónicos crean muy poco disturbio en el sitio, porque solamente se encajan los electrodos a una profundidad no mayor a 20 cm, mientras se toman las lecturas. A través de estos electrodos se hace pasar una señal eléctrica y en cada punto se toman lecturas para medir la conductividad o resistividad. Aparentemente, el método se puede aplicar con éxito a diversos tipos de derrames y tiene la ventaja de dar información sobre el tipo de material geológico que se encuentra en el subsuelo. La toma de lecturas en campo es relativamente sencilla, pero la interpretación de los resultados requiere de personal muy especializado.

Las gasometrías se aplican exitosamente cuando los contaminantes son compuestos volátiles y semivolátiles, básicamente combustibles. Para esta determinación es necesario hacer perforaciones someras, de un diámetro

reducido, que puede ser incluso de 2.5 cm, y pueden llegar hasta 3 m de profundidad. Las lecturas se toman con gasómetros portátiles que cuantifican la concentración de hidrocarburos volátiles. Simultáneamente, se pueden tomar lecturas de explosividad, con explosímetros también portátiles. En los puntos donde se presenta una alta concentración de hidrocarburos volátiles corresponde a un alto grado de explosividad. El trabajo en campo es un poco más laborioso que en el método geoelectrico, pero la interpretación es más sencilla, incluso en el momento de las lecturas se pueden ubicar las manchas de contaminación más importantes, en las que es conveniente tomar muestras para realizar los análisis pertinentes.

#### b. Muestreo directo

Las muestras de suelo y agua que se tomen deben ser inalteradas y representativas del problema que se está analizando. Una vez que éstas se toman, deben protegerse de la intemperie para conservar sus características originales, si es posible, se mantienen en refrigeración durante su traslado al laboratorio, y deben procesarse lo más pronto posible.

#### 3. Análisis químico del (los) contaminante(s)

Los análisis químicos se practican en muestras de suelo y agua, para identificar el tipo de contaminantes y su concentración. Los resultados que se obtengan serán complementarios al diagnóstico *in situ*, así se podrá conocer la forma en cómo están distribuidos entre la zona no saturada y la saturada en el caso de suelo, así como la concentración de contaminantes disueltos cuando es agua. Para el análisis químico de los contaminantes se utilizan métodos que son del dominio público. Algunos de los más utilizados son:

- Compuestos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), método EPA 8020 por cromatografía de gases o método EPA 8060 o EPA 8240 por espectrometría de masas
- Hidrocarburos totales de gasolina y diésel, método EPA 8015
- Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), método EPA 418.1 M
- Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310
- Bifenilos policlorados, método EPA 8080

- Metales pesados: arsénico, bario, cadmio, cromo VI, níquel, mercurio, plata, plomo y selenio, de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
- Plaguicidas de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993

La decisión de los métodos a utilizar está en función de cada caso en particular, por ejemplo, el análisis de plaguicidas se realiza simultáneamente al análisis de hidrocarburos o de metales pesados, cuando se dice que un terreno cultivable ha dejado de serlo por la presencia de hidrocarburos contaminantes. En este caso en particular conviene probar si hay presencia de plaguicidas y si éstos han afectado la fertilidad del suelo.

#### 4. Análisis fisicoquímico

El análisis fisicoquímico del suelo se realiza para conocer qué tan afectado se encuentra un suelo por la presencia de contaminantes. Este análisis se practica simultáneamente a una muestra de suelo no contaminado que sirva como control, con la finalidad de hacer comparaciones. La muestra control se toma de una zona no contaminada, cercana a la zona dañada para asegurar que comparta sus características. Las determinaciones que se realizan son:

- pH
- humedad
- capacidad de retención de agua
- concentración de materia y carbono orgánicos
- contenido de materia inorgánica (sólidos fijos)
- contenido de carbono inorgánico (carbonatos y bicarbonatos)
- porosidad
- permeabilidad
- tipo de suelo (tamaño de partículas)

Los tres últimos parámetros se practican únicamente en la muestra del suelo control, porque la presencia de algunos contaminantes, como el aceite crudo, no permiten la realización del análisis. Su utilidad es básicamente para evaluar las alternativas de limpieza del sitio.

Cuando se tienen muestras de agua las determinaciones a realizar son:

- pH
- demanda química de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- alcalinidad
- concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
- concentración de bacterias coliformes totales y fecales

La determinación del último parámetro se realiza para descartar una contaminación por aguas residuales, debida a descargas en cuerpos de agua o infiltraciones hacia los acuíferos.

## VII ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA LA REPARACIÓN DEL DAÑO

Desde el punto de vista técnico, la estrategia para la reparación del daño es única para cada caso, y debe estar bien soportada en todos los resultados de caracterización. Se debe hacer una muy buena planeación para evitar que el tratamiento pueda afectar aún más el ambiente que ya se encuentra dañado. Se puede hablar de varios niveles de reparación del daño, que son: mitigación, remediación y restauración. La reparación del daño se debe realizar de manera inmediata a su evaluación, de lo contrario la información obtenida puede ser poco confiable, dado que los mismos eventos naturales, como las lluvias, modifican las características del sitio contaminado.

### 1. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación son todas aquellas acciones inmediatas que se toman para evitar un daño mayor. Ejemplos de éstas son: la clausura de pozos de extracción de agua que estén contaminados, la extracción de combustibles en pozos de abastecimiento de agua, la colección de aceite crudo derramado en cuerpos de agua, o bien, la excavación de zanjas o introducción de cortinas para evitar la dispersión de los contaminantes.

Con estas acciones se puede retirar la mayor cantidad de contaminantes, pero queda una fracción asociada a la estructura del suelo, o bien, disuelta

en el agua, por lo que es necesario aplicar tratamientos de remediación más avanzados.

### 2. Remediación

En el mercado ambiental existen diversas tecnologías para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua. La opción tecnológica más conveniente, se define de acuerdo a criterios técnicos establecidos para cada caso particular. De las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar: biorremediación, extracción, fijación, incineración y filtración. En la literatura se han descrito gran cantidad de opciones tecnológicas, pero no han sido llevadas a gran escala en campo.

No todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo que siempre se recomienda la realización de estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con su efectividad, su aplicación a gran escala en campo, la estrategia de operación, así como tiempo y costo de operación. Para ello, se requiere que la escala a la que se realizan los estudios de tratabilidad sea representativa de la superficie que se pretende tratar, y que los modelos experimentales representen el comportamiento físico del sitio. El costo de aplicación de una tecnología es un punto muy importante en la toma de decisiones, pero es conveniente hacer un balance, ya que por lo general, la mejor opción económica no corresponde a la mejor alternativa técnica.

La aplicación de cualquier tipo de tratamiento a un sitio contaminado implica un riesgo que debe ser evaluado de manera muy particular. Es muy importante llevar un registro periódico durante el tratamiento para confirmar su efectividad, es decir, que la superficie de la mancha de contaminación y las concentraciones de contaminantes se estén reduciendo. La aplicación de los métodos de diagnóstico *in situ* y los análisis químicos en el laboratorio son la herramienta principal.

Los aspectos referentes al establecimiento de los niveles de limpieza se discutirán en el inciso VIII, debido a que esta actividad se realiza en conjunto con las autoridades ambientales.

Cuando se tienen muestras de agua las determinaciones a realizar son:

- pH
- demanda química de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- alcalinidad
- concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
- concentración de bacterias coliformes totales y fécales

La determinación del último parámetro se realiza para descartar una contaminación por aguas residuales, debida a descargas en cuerpos de agua o infiltraciones hacia los acuíferos.

## VII ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA LA REPARACIÓN DEL DAÑO

Desde el punto de vista técnico, la estrategia para la reparación del daño es única para cada caso, y debe estar bien soportada en todos los resultados de caracterización. Se debe hacer una muy buena planeación para evitar que el tratamiento pueda afectar aún más el ambiente que ya se encuentra dañado. Se puede hablar de varios niveles de reparación del daño, que son: mitigación, remediación y restauración. La reparación del daño se debe realizar de manera inmediata a su evaluación, de lo contrario la información obtenida puede ser poco confiable, dado que los mismos eventos naturales, como las lluvias, modifican las características del sitio contaminado.

### 1. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación son todas aquellas acciones inmediatas que se toman para evitar un daño mayor. Ejemplos de éstas son: la clausura de pozos de extracción de agua que estén contaminados, la extracción de combustibles en pozos de abastecimiento de agua, la colección de aceite crudo derramado en cuerpos de agua, o bien, la excavación de zanjas o introducción de cortinas para evitar la dispersión de los contaminantes.

Con estas acciones se puede retirar la mayor cantidad de contaminantes, pero queda una fracción asociada a la estructura del suelo, o bien, disuelta

en el agua, por lo que es necesario aplicar tratamientos de remediación más avanzados.

### 2. Remediación

En el mercado ambiental existen diversas tecnologías para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua. La opción tecnológica más conveniente, se define de acuerdo a criterios técnicos establecidos para cada caso particular. De las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar: biorremediación, extracción, fijación, incineración y filtración. En la literatura se han descrito gran cantidad de opciones tecnológicas, pero no han sido llevadas a gran escala en campo.

No todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo que siempre se recomienda la realización de estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con su efectividad, su aplicación a gran escala en campo, la estrategia de operación, así como tiempo y costo de operación. Para ello, se requiere que la escala a la que se realizan los estudios de tratabilidad sea representativa de la superficie que se pretende tratar, y que los modelos experimentales representen el comportamiento físico del sitio. El costo de aplicación de una tecnología es un punto muy importante en la toma de decisiones, pero es conveniente hacer un balance, ya que por lo general, la mejor opción económica no corresponde a la mejor alternativa técnica.

La aplicación de cualquier tipo de tratamiento a un sitio contaminado implica un riesgo que debe ser evaluado de manera muy particular. Es muy importante llevar un registro periódico durante el tratamiento para confirmar su efectividad, es decir, que la superficie de la mancha de contaminación y las concentraciones de contaminantes se estén reduciendo. La aplicación de los métodos de diagnóstico *in situ* y los análisis químicos en el laboratorio son la herramienta principal.

Los aspectos referentes al establecimiento de los niveles de limpieza se discutirán en el inciso VIII, debido a que esta actividad se realiza en conjunto con las autoridades ambientales.

### a. Biorremediación

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos, ya que en su mayoría éstos son biodegradables. Los contaminantes son transformados en compuestos químicamente más simples, por ejemplo, en bióxido de carbono cuando hay una completa mineralización. Uno de los retos de las tecnologías de biorremediación es acelerar la actividad microbiana para reducir los tiempos de biodegradación de contaminantes en suelo y agua.

El éxito de la biorremediación obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos involucrados. La opción más segura es aprovechar la flora autóctona, y su actividad se estimula mediante la adición de nutrientes. A pesar de que la biorremediación toma tiempo, tiene la ventaja de que el suelo tratado puede recuperar su actividad biológica natural. Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos, la biorremediación es de las mejores desde los puntos de vista ambiental y económico, no obstante, las altas concentraciones de hidrocarburos o la presencia de otros contaminantes como metales pesados y compuestos clorados pueden limitar el tratamiento.

La biorremediación es muy versátil, existen opciones para tratar suelo y agua, subterránea o retenida en presas, lagos y lagunas. El tratamiento puede aplicarse *in situ* o fuera de él, y la adición de nutrientes y microorganismos exógenos está en función de las características del material geológico. En el caso de agua subterránea, la biorremediación se aplica mediante la técnica de bombeo-tratamiento-inyección, con ayuda de reactores en donde se proporciona a los microorganismos condiciones que estimulan su actividad. En otros cuerpos de agua se suministra oxigenación a través de aeradores, y concentraciones limitadas de nutrientes, también se aplica recirculación para favorecer la homogeneidad del sistema.

Una tecnología de biorremediación sería debe contar con un respaldo científico, sin embargo, en el mercado ambiental se comercializan productos microbianos y aditivos químicos de composición desconocida, que no son efectivos e incluso pueden aumentar el riesgo de un problema de contaminación, más que remediarlo.

### b. Extracción

Se han desarrollado diversas tecnologías para la extracción de hidrocarburos pesados que se asocian a la estructura del suelo, como el aceite crudo. Mediante estas tecnologías se puede separar el producto para reciclarlo, si en el suelo queda hidrocarburo residual puede aplicarse otro tratamiento para alcanzar los niveles de limpieza.

### c. Fijación

Los métodos de microencapsulación y solidificación son ejemplos de tecnologías para la fijación de los hidrocarburos a las partículas de suelo. Mediante éstas se pretende inmovilizar los contaminantes en la estructura del suelo, de tal forma que no puedan migrar. Algunas tecnologías de este tipo aseguran que después del tratamiento, se puede proceder a la siembra de especies vegetales.

Otra opción de fijación es la incorporación de asfalto a suelos contaminados con petróleo, y su utilización en la construcción de caminos.

En ambos casos es necesario hacer un seguimiento posterior al tratamiento para asegurarse de que los contaminantes permanecen retenidos a través del tiempo y que no están lixiviando.

### d. Incineración

Se recomienda únicamente para suelos con muy altas concentraciones de contaminantes que no puedan ser sometidos a otro tipo de tratamiento, pero se tiene la desventaja de que junto con los contaminantes, el suelo también se destruye.

### e. Filtración

Algunos hidrocarburos pueden solubilizarse en el agua, por lo que no pueden ser separados de ésta durante la extracción de la capa de producto libre. En el caso de aguas subterráneas se aplica el bombeo-tratamiento-inyección, el tratamiento consiste en filtrar a través de carbón activado, en el cual se quedan retenidos los hidrocarburos solubles y se obtiene agua libre de ellos. Los filtros tienen una cierta capacidad de retención, por lo que deben ser renovados periódicamente. El carbón activado con hidro-

carburos puede someterse a tratamiento biológico para transformar los contaminantes, o bien, llevarse a confinamiento.

Aspectos más detallados sobre tecnologías de remediación fueron descritos previamente.<sup>10</sup>

### 3. Confinamiento

Cuando los suelos están contaminados con altas concentraciones de metales pesados, bifenilos policlorados o compuestos altamente clorados, generalmente se recomienda su confinamiento. En estos casos, se requiere aplicar un pretratamiento para eliminar la fase líquida, en virtud de que no se permite el confinamiento de materiales peligrosos en estado líquido.

### 4. Restauración

Acordes con las definiciones establecidas en el primer inciso de este capítulo, la restauración de un suelo viene después de su remediación, cuando los niveles de contaminantes permiten el desarrollo de especies vegetales propias del lugar. En cuerpos de agua, se depositan especies acuáticas propias de la región, las cuales también cumplen la función de indicadores. Cuando se observa el restablecimiento de los procesos naturales, se puede comprobar la restauración de un sitio.

## VIII. PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS

En los términos de la legislación vigente, el responsable de un derrame o fuga de materiales peligrosos, debe realizar las actividades enfocadas a la limpieza del sitio. Para ello, generalmente los contaminadores recurren a empresas prestadoras de servicios ambientales. Debido a las diversas alternativas que existen para la limpieza de sitios contaminados, es de vital importancia evaluar y analizar las diferentes tecnologías que pueden ser aplicadas a problemas específicos.

Con base en lo anterior, la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del Instituto Nacional de Ecología, en febrero de

este año, dio a conocer formalmente la nueva política a seguir para la limpieza de sitios contaminados. En dicha reunión, a la que asistieron representantes de todos los sectores involucrados, se entregó un documento donde se describe de manera detallada cada uno de los pasos que deben seguir las empresas para cumplir con los requisitos técnico-administrativos (INE, 1997). Básicamente, se habla de dos trámites, que son los siguientes.

### 1. Acreditación de la tecnología

Para este trámite es necesario llenar los formatos correspondientes a la *Solicitud de acreditación para la empresa y la(s) tecnología(s) que ofrece servicios de restauración de sitios*, a la cual se debe anexar la información correspondiente a la tecnología y a la empresa, es decir, la descripción detallada de la tecnología propuesta, los documentos que avalen su certificación o aplicación satisfactoria en el extranjero, un listado de experiencias previas y los datos curriculares de la empresa prestadora de servicios y de su personal. Con esto se conforma un expediente que deberá ser evaluado por un órgano colegiado reconocido en la materia, el cual será designado por la dirección general citada. Cuando se ha cumplido con este trámite se pasa al siguiente.

### 2. Evaluación del plan de remediación

Para este trámite se debe integrar un documento que lleva el título de *Presentación del plan de restauración de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos*, el cual debe contener los estudios de caracterización del sitio, el programa de trabajo calendarizado, el protocolo de pruebas a nivel laboratorio y en campo, y el estudio de riesgo a partir del cual se definen los niveles de limpieza a alcanzar. En este caso, el protocolo de pruebas deberá estar avalado por un órgano colegiado reconocido en la materia.

Las empresas que con anterioridad iniciaron trabajos de remediación, deberán ajustarse a los nuevos procedimientos, de lo contrario, no se les permitirá continuar con la aplicación de las tecnologías en campo.

Con los dos procedimientos descritos, se abren las puertas para realizar la reparación del daño a la luz de las autoridades ambientales, quienes tendrán que realizar muchos ajustes no sólo con las empresas de servicios ambientales, sino también con las empresas contaminadoras. La práctica

contadana ha dejado ver que otros instrumentos administrativos, como la Ley de Adquisiciones y Obras Públicas, limitan el desarrollo de trabajos contables y de buena calidad, que en general, no cumplen con los compromisos ambientales establecidos. Bajo el esquema de las licitaciones públicas, se debe tener claro que las mejores ofertas económicas, no siempre corresponden a las mejores alternativas técnicas, y una manera de abajar costos es maquillar los problemas de contaminación. Otros dos ejemplos de lo que ocurre en las licitaciones públicas y que desde el punto de vista ambiental requiere algunos ajustes, son: cuando se establece que la empresa que realiza la caracterización del sitio, no puede encargarse de la restauración, o bien, cuando se solicitan ofertas de la aplicación de tecnologías de remediación específicas de las cuales no se tienen buenos antecedentes.

### 3 Establecimiento de los niveles de limpieza

El INE es quien fija los niveles de limpieza por alcanzar, en acuerdo con la empresa contaminadora y con la empresa de servicios ambientales.<sup>11</sup> Los elementos que sirven como referencia para establecer estos niveles de limpieza son estudios de riesgo, pero es necesario contar con la caracterización completa del sitio.

En los estudios de riesgo se consideran dos aspectos básicos que son: la peligrosidad de la contaminación y el tipo de exposición. Para ello es necesario conocer los componentes tóxicos del producto contaminante, el cual se considera un parámetro indicador. Por ejemplo, el benceno es el indicador de contaminación con gasolinas porque tiene características de persistencia, bioacumulabilidad y riesgos de cáncer, por lo que se recomienda reducir a un mínimo la exposición humana. De manera similar, el naftaleno se utiliza como parámetro indicador de contaminación con diésel. La base para la realización de los estudios de riesgo es un anteproyecto de norma,<sup>12</sup> el cual empieza a ser utilizado con el fin de realizar los ajustes pertinentes antes de hacerlo oficial.

En algunas ocasiones se manejan estándares oficiales extranjeros, pero es conveniente conocer la base de razonamiento que llevó a esas cifras con la finalidad de tener elementos que permitan definir su aplicabilidad

a otro sitio. Por ejemplo, en los Estados Unidos de Norteamérica cada gobierno estatal tiene sus propios estándares, los cuales fueron definidos después de una evaluación de los riesgos específicos. Las cifras que se utilizan para el benceno están dentro de un intervalo que va de 0.005 a 50 mg/kg para suelo, y de 0.2 a 71 mg/l para agua subterránea.<sup>13</sup> La amplitud de estos intervalos indica que cada región se maneja de manera particular en función de sus propias características.

Un instrumento que puede servir de apoyo para el caso de aguas son los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89). Estos criterios establecen el uso que se le puede dar al agua en función de su calidad, la cual está en función de los compuestos químicos que en ella se encuentren. Los usos del agua están clasificados como: agua potable, agua para actividades recreativas de contacto primario, agua para riego agrícola, agua para usos pecuarios y agua para la protección de la vida acuática en agua dulce y agua marina. Si se toma nuevamente el benceno como parámetro indicador, el límite permisible para agua potable es de 10 mg/l, de 50 mg/l para vida acuática en agua dulce y de 5 mg/l para especies de agua marina en áreas costeras. Algunas otras cifras de interés para este trabajo, se presentan en la tabla 1, en la que también se incluyen intervalos de límites permisibles que manejan gobiernos estatales en los Estados Unidos de Norteamérica.

Tabla 1. Límites permisibles de algunos compuestos tóxicos en agua

Parámetro indicador	Criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89			Intervalos permisibles
	Agua potable	Protección de la vida acuática		En Estados Unidos de Norteamérica
		agua dulce	áreas costeras	
BTEX <sup>a</sup>	—	—	—	5 - 50
Benceno	10	50	5	0.2 - 71
Tolueno	14 300	200	60	790 - 1000
Etilbenceno	1 400	—	500	74 - 700
HPNA <sup>b</sup>	0.03	—	100	—

<sup>11</sup> Sánchez, 1997  
<sup>12</sup> INE, 1996

<sup>13</sup> Saval, 1995.



Naftaleno		20	20	100 - 143
Acenftaleno	20	20	10	
Fluoranteno	40	40	0.4	370
Bifenilos polibromados	0.0008	0.01	0.03	

<sup>14</sup> HTEX: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos en mezcla.

<sup>15</sup> HPNA: mezcla de hidrocarburos polinucleoaromáticos de la familia del naftaleno

### IX. MARCO LEGAL PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS

El marco legal dentro del cual se realizan las actividades de limpieza de sitios contaminados está conformado por: artículo 1 fracciones III y V; artículo 5 fracción II, artículo 98 fracción V; artículo 134 fracción V; artículo 136, fracciones I a IV; artículo 151 bis, fracciones I a III y artículo 152 bis, de la nueva Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.<sup>14</sup> Adicionalmente, el artículo 10 y artículo 42 fracción VI del Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos.<sup>15</sup>

El artículo 134 fracción V de la LGEEPA dice que *en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.* La redacción del artículo 152 bis es similar, pero hace referencia a que los responsables de la contaminación del suelo ocasionada por el manejo de materiales o residuos peligrosos deben llevar a cabo las acciones de limpieza.

En el artículo 139 se involucra a la Comisión Nacional del Agua, mencionando que *toda descarga, depósito e infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley (LGEPA), la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas.* Respecto a la Ley de Aguas Nacionales, título séptimo, capítulo único, Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas, en su contenido de 12 artículos, hace referencia principalmente a la descarga de aguas residuales que pueden

contaminar cuencas hidrológicas y acuíferos. Por lo que respecta a la contaminación por hidrocarburos, interpretados como materiales peligrosos, únicamente en el artículo 86, fracción VI, se menciona que *la Comisión Nacional del Agua tendrá a su cargo: promover y realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos, materiales y sustancias tóxicas, y lodos producto de los tratamientos de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo.* De la misma forma el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, en su artículo 150 reafirma lo anterior diciendo que *en el caso de que el vertido o infiltración de materiales y residuos peligrosos que contaminen las aguas superficiales o del subsuelo, la Comisión Nacional del Agua determinará las medidas correctivas que deban llevar a cabo personas físicas o morales responsables o las que, con cargo a éstas, efectuará la comisión.* Cabe mencionar que estos dos documentos legales referidos a aguas nacionales, consideran que el vertimiento de aguas residuales es el factor más importante de la contaminación del subsuelo y acuíferos.

Finalmente, la participación del sector académico en las actividades de limpieza y restauración de sitios contaminados se enmarca en el artículo 59 fracción VIII, del Reglamento Interior de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), el cual cita que una de las atribuciones de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas es *promover la celebración de convenios con universidades y centros de investigación, para la realización de estudios sobre tecnologías y sistemas de manejo de residuos peligrosos.*

### X. INSTRUMENTOS LEGALES DE APOYO

Existen otros instrumentos legales de apoyo para la limpieza de sitios contaminados, como son:

- el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, que data de 1979.
- el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, de 1988.
- el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, de 1988.

<sup>14</sup> D. O. Oficial de la Federación, 13 de diciembre de 1996.

<sup>15</sup> INE, 1997

No obstante, estos reglamentos requieren ser actualizados para estar acordes con la nueva legislación ambiental. Un aspecto que llama la atención es que prácticamente todos los documentos hablan de residuos y materiales peligrosos en términos generales, pero en especial el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar, en su anexo I, inciso 5, si es muy específico respecto a los derrames de la industria petrolera (petróleo crudo, *fuel-oil*, aceite pesado diésel, aceites lubricantes, fluidos hidráulicos y mezclas que contengan hidrocarburos). Sin embargo, no es muy común hacer referencia a este reglamento cuando se tratan aspectos ambientales.

Por otro lado, se ha venido insistiendo en la necesidad de contar con un Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Suelo, el cual no existe. Si éste se tuviera, se podría establecer un verdadero espíritu sobre la prevención y control de la contaminación. Además, se podrían instrumentar procedimientos para tener un control sobre su limpieza y restauración en términos muy específicos y refórzan la vinculación con otros instrumentos legales como la Ley de Aguas Nacionales y su respectivo reglamento, en los que hace falta un mayor énfasis en lo referente a la contaminación de acuíferos por derrame de hidrocarburos y compuestos químicos.

## XI. CONCLUSIONES

La evaluación del daño causado por derrames de contaminantes es una actividad que debe realizarse con mucha seriedad y una muy buena planeación. La información que se integra con el análisis químico de los contaminantes, la dinámica del sitio afectado y las evidencias encontradas durante la caracterización, servirá como respaldo para la definición de responsabilidades. Dicha información será también útil para establecer la estrategia de limpieza del sitio, que es parte de la reparación del daño.

Con las reformas a la LGEEPA, donde se camina hacia el reconocimiento de la responsabilidad ambiental, es indispensable el establecimiento de una vinculación entre el campo jurídico y el técnico. Tal vez en un futuro cercano, los jueces que atiendan demandas ambientales soliciten opiniones de académicos expertos en la materia, las cuales serán determinantes en la resolución de responsabilidades y obligaciones. En este sentido, conviene resaltar que los contaminantes no son estáticos, migran

de acuerdo a lo que les permite el medio físico y cada día crece la zona afectada, por lo que la definición de responsabilidades se debe realizar en tiempos cortos.

Por otro lado, hay muchos sitios que han servido como escenario de actividades petroleras, y están tan afectados, que no es fácil establecer estrategias de recuperación en el corto plazo. Los estudios de impacto ambiental o auditorías ambientales tradicionales en las zonas donde a simple vista se observa una afectación, no son suficientes, se requieren estudios muy completos que sean útiles para la toma de decisiones.

Se sabe que la industria petrolera cuenta con tecnología de punta y personal especializado para la extracción de petróleo, sin embargo, no hay evidencias de una conciencia ecológica en los trabajos de campo. También se sabe que gran parte de los derrames accidentales son resultado de una falta de mantenimiento de instalaciones que tiene una relación muy directa con lo referente a seguridad industrial. Tal vez algo que ha fallado es una verdadera vinculación entre la toma de decisiones detrás de un escritorio ejecutivo y la supervisión de las actividades que se realizan en campo.

Para finalizar, conviene resaltar que la evaluación de un daño ambiental no es un requisito administrativo, es una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos. La protección del ambiente y la salud deben ser compromisos éticos de todo ser humano.

## XII. BIBLIOGRAFÍA

- Criterios Ecológicos de Calidad de Agua, CE-CCA-001/89, *Diario Oficial de la Federación*, 2 de diciembre de 1989.
- INE, 1996. Propuesta de Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana "Restauración de suelos contaminados: metodología para la determinación de criterios de limpieza en base a riesgos", Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.
- INE, 1997. Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas. Febrero 1997.

- Ley de Aguas Nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, 1 de diciembre de 1992.
- Ley de Adquisiciones y Obras Públicas, *Diario Oficial de la Federación*, 30 de diciembre de 1993.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Real Academia Española, 1992. *Diccionario de la Lengua Española*, Madrid.
- Reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, *Diario Oficial de la Federación*, 1996, diciembre 13.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, *Diario Oficial de la Federación*, noviembre 23 de 1988.
- Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, *Diario Oficial de la Federación*, enero 11 de 1979.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, *Diario Oficial de la Federación*, junio 6 de 1988.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, enero 12 de 1994.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, J., 1997. Comunicación personal durante la reunión informativa sobre los Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, Instituto Nacional de Ecología, México.
- SAVAL BOHÓRQUEZ, S., 1995. "Remediación y restauración", en *PEMEX Ambiente y energía. Los retos del futuro*, México, UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SAVAL BOHÓRQUEZ, S., 1995a. Propuesta de cambios a la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en lo referente al Título IV, Capítulo III: Prevención y Control de la Contaminación del Suelo.

- Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental, Comisión de Ecología, Cámara de Diputados, México, julio de 1995.
- SEDESOL-INE, 1994. "Industria Petrolera", en *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente*. Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología, México, capítulo 13.
- SINALP, 1997. Relación de laboratorios acreditados y en proceso de acreditamiento en caracterización de residuos peligrosos CRETIB, Sistema Nacional de Laboratorios de Pruebas, Departamento de Acreditamiento de Laboratorios de Pruebas Químicas, enero 21 de 1997.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**X CURSO INTERNACIONAL  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**MÓDULO II:**

**CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**TEMA :**

**BIOREMEDIACIÓN DE UN SUELO  
CONTAMINADO CON DIESEL**

**PRESENTADO POR: DRA. SUSANA SAVAL  
SEPTIEMBRE/ OCTUBRE 1998  
PALACIO DE MINERÍA**

# Biorremediación de un suelo contaminado con diesel

**Susana Saval**

Coordinación de Bioprocesos Ambientales  
Instituto de Ingeniería, UNAM,  
AP 70472, CU, 04510, México, DF

## Resumen

Se presenta una experiencia de biorremediación en campo, la cual se realizó mediante bioestimulación de la flora microbiana autóctona. Con el muestreo inicial se evaluaron las características del suelo y el grado de contaminación. De manera simultánea, se iniciaron actividades en una superficie de 2.625 m<sup>2</sup> para remover el suelo manualmente y con maquinaria, con el fin de aflojar y homogeneizar la capa superior. Posteriormente, se aplicaron fertilizantes y riego constante. Después de dos meses, la concentración de diesel se redujo en 80 por ciento y a los seis meses alcanzó 98 por ciento de eliminación, quedando una concentración residual en el suelo de 10.24 mg/kg. Durante la temporada de lluvias, se observó crecimiento masivo de especies vegetales autóctonas, además de las que se habían sembrado. Con la bioestimulación se proporcionó al suelo una actividad biológica que no tenía, por lo cual se considera lograda la biorremediación del suelo y la restauración del sitio.

**Palabras clave:** biorremediación, bioestimulación, biorrestauración, saneamiento de suelos.

## Introducción

**L**a industria petrolera contribuye de manera importante a la economía de México, razón por la cual las actividades de exploración, explotación, refinación, transporte y consumo de productos del petróleo se ven incrementadas cada día. Los malas prácticas de manejo de los hidrocarburos, los accidentes durante el transporte de combustibles y otros productos procesados, así como la toma clandestina de combustibles han traído como consecuencia problemas ambientales en los que se ha hecho evidente la contaminación de grandes extensiones de suelo superficial y la afectación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Como una alternativa de solución para el saneamiento de suelos y acuíferos contaminados, a nivel mundial se ha dado un gran impulso a las tecnologías de biorremediación, las cuales se basan en la utilización de microorganismos capaces de transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos, e incluso lograr una completa mineralización llevándolos hasta bióxido de carbono. En los suelos existe una importante diversidad microbiana autóctona que se aclimata de manera natural a los contaminantes, dando como resultado una actividad biodegradadora que se ve estimulada cuando están presentes

otros nutrientes básicos para el metabolismo, como son las fuentes de nitrógeno y de fosfatos.

El objetivo de este trabajo es presentar una experiencia de biorremediación en campo, la cual se realizó mediante bioestimulación de la flora microbiana autóctona, de un suelo contaminado con diesel.

### **Antecedentes**

El suelo que fue sometido a bioestimulación, había sido contaminado como consecuencia de la ruptura accidental de ductos que pasaban debajo de una calle pavimentada. Como una medida de emergencia el suelo contaminado fue excavado y transportado a un predio ubicado a varios kilómetros de la población. Se extendió en una superficie aproximada de 2,625 m<sup>2</sup>, con un espesor promedio de 23,5 cm, se mezcló con cal viva, y se dejó a la intemperie. Algunos meses después, se invitó al Instituto de Ingeniería a desarrollar este proyecto cuya meta fue sanear y regenerar el suelo afectado.

### **Metodología**

Las características del suelo se evaluaron a través de la cuantificación de materia orgánica, nitrógeno total, fosfatos, carbonatos, bicarbonatos, capacidad de retención de agua, densidad y textura. Una muestra de suelo no contaminado obtenida de un sitio cercano a donde ocurrió la fuga, se utilizó como control. Los análisis se realizaron de acuerdo a Velázquez y León (1974), Jackson (1982), Kute y Lee (1986), y Carter (1993).

El grado de contaminación del suelo se evaluó mediante dos aná-

lisis diferentes, la determinación de hidrocarburos totales de gasolina y diesel a través del método EPA 8015 M por cromatografía de gases con detector de ionización de flama y la cuantificación de hidrocarburos totales del petróleo por el método EPA 418.1 M por espectrometría en infrarrojo (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993).

De manera simultánea, se iniciaron actividades en campo para remover el suelo manualmente y con maquinaria, con el fin de aflojarlo y homogeneizarlo. Posteriormente, se aplicaron nutrientes, nitrógeno y fosfatos en forma de fertilizantes, además de agua para estimular la actividad microbiana. Estas actividades se realizaron siguiendo las recomendaciones de Autry y Ellis (1992), Riser-Roberts (1992) y Rogers *et al.*, (1993).

Para el seguimiento de la biorremediación se prepararon muestras compuestas de diferentes puntos, retirando material geológico de los primeros 24 cm a partir de la superficie. Las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio con tapa de sello hermético y cubierta de teflón hasta su transportación al laboratorio. Se tomaron muestras a mayor profundidad para comprobar que no había migración de los contaminantes hacia estratos más profundos. Adicionalmente, se tomaron muestras de agua de las norias aledañas al lugar.

### **Resultados y discusión**

#### *Características físicoquímicas del suelo*

La determinación de textura del suelo indicó que se trataba de una mezcla de arcilla y arena (57 y 43 por ciento, respectivamente), con

una densidad real de 1.0526 kg/m<sup>3</sup>, densidad aparente de 1.2113 kg/m<sup>3</sup> y una porosidad del 15 por ciento. Las características del suelo y los parámetros determinados durante la biorremediación se resumen en la tabla 1.

El pH del suelo control fue de 7.53 y el pH del suelo afectado fue más alto, de 8.14. Esto fue consecuencia de la adición de cal viva durante la disposición del suelo contaminado en el lugar.

El contenido de materia orgánica fue similar en el suelo afectado y el control, alrededor de 2 por ciento, aquí no se reflejó la aportación de los contaminantes al contenido de materia orgánica, porque el suelo control había tenido un aporte natural de materia orgánica.

Las concentraciones de nitrógeno amoniacal y total, así como los fosfatos no fueron detectables en el suelo contaminado. Los bicarbonatos estuvieron presentes como componentes naturales del suelo, en una concentración ligeramente superior a 170 mg/kg.

La capacidad de retención de agua fue 393 y 358 ml/kg para los suelos control y contaminado, respectivamente. Esto indicó que en condiciones de saturación, el suelo contaminado podía alcanzar una humedad de 35 por ciento.

#### *Caracterización microbiológica del suelo*

A pesar de las malas prácticas a las que fue sometido el suelo, el conteo de bacterias heterótrofas no fue tan bajo como se esperaba, 2.5 x 10<sup>5</sup> ufc (unidades formadoras de colonias)/g suelo, tres órdenes de magnitud por debajo de lo comúnmente encontrado para suelos típicos, que es del orden de 10<sup>8</sup> ufc/g

Tabla 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL SUELO

Parámetro (resultados en base seca)	Suelo control	Suelo contaminado		
		Antes del tratamiento	Después de 2 meses de tratamiento	Después de 6 meses de tratamiento
pH	7.53	8.14	7.87	7.87
Materia orgánica (%)	2.17	1.96	1.44	1.39
Carbono orgánico (%)	1.25	1.14	0.84	0.81
Nitrógeno total (mg/kg)	ND	ND	1.420	650
Nitrógeno amoniacal (mg/kg)	ND	ND	146.2	11.07
Fosfatos (mg/kg)	0.42	ND	8.33	2.66
Carbonatos (mg/kg)	ND	ND	ND	ND
Bicarbonatos (mg/kg)	175.1	172.3	-	185.8
Capacidad de retención de agua (ml/kg)	393	358	-	-
Cuenta de bacterias heterótrofas aerobias (ufc/g suelo)	9.8 E6	2.5 E5	3.2 E6	5.6 E6
Cuenta de bacterias degradadoras de gasolina (ufc/g suelo)	ND	D	-	2.35 E4
Cuenta de bacterias degradadoras de diesel (ufc/g suelo)	ND	D	-	3.89 E4
Consumo de oxígeno (mg O <sub>2</sub> /g suelo)	-	0.31	-	0.56
Generación de bióxido de carbono (g CO <sub>2</sub> /g suelo)	-	80.33	166.32	596.64

ND: Significa que no fue detectable. D: Significa que fue detectable pero difícil de cuantificar.

suelo. Aún en el suelo control, el contenido de bacterias fue bajo, seguramente debido a la ausencia de nutrientes y a la reducida humedad.

Las mediciones de consumo de oxígeno y generación de bióxido de carbono, los cuales son parámetros que reflejan la actividad biológica del suelo, indicaron una baja actividad, pero con posibilidad de ser incrementada por la adición de nutrientes.

La presencia de bacterias degradadoras de los hidrocarburos en el suelo antes de tratar fue detectable, pero difícil de cuantificar porque el crecimiento fue difuso. El desarrollo de un cultivo en medio líquido,

en presencia del contaminante, sugirió las posibilidades de aumentar la proporción de microorganismos degradadores.

#### Características de los hidrocarburos contaminantes

En el momento que ocurrió el derrame se habló de una fuga de gasolina. Los análisis realizados por cromatografía de gases indicaron la presencia de diesel, en gran proporción, mezclado con los hidrocarburos pesados de la gasolina. En las figuras 1A y 1B se presentan los cromatogramas obtenidos para es-

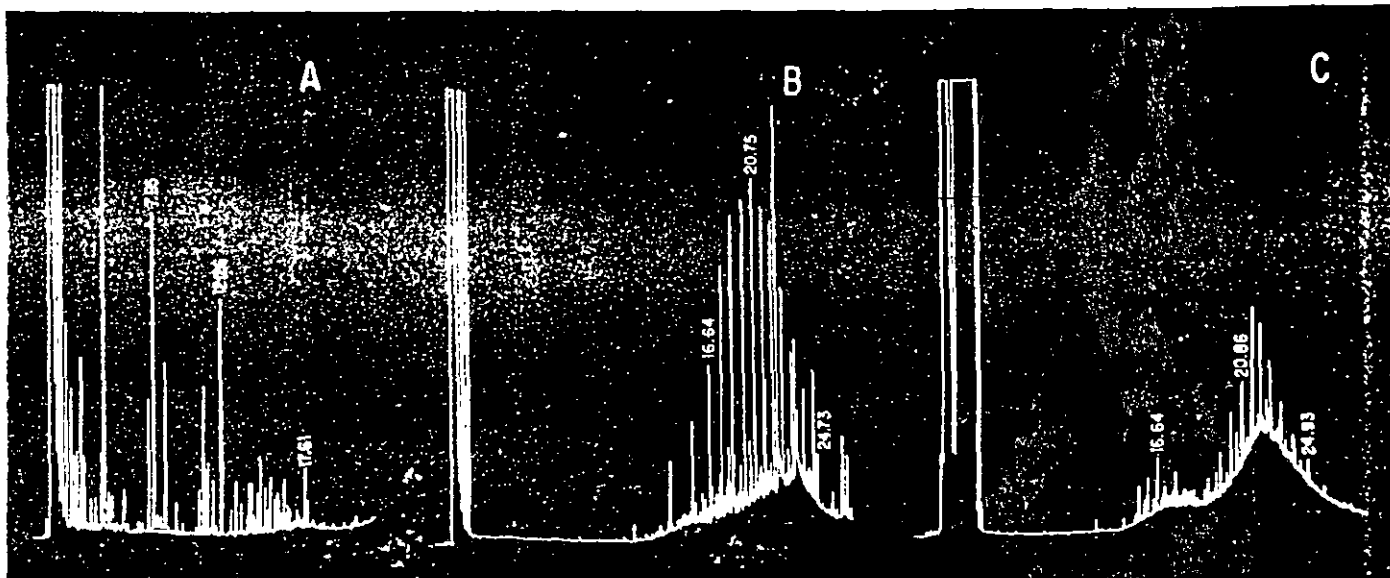
tándares de gasolina y diesel, respectivamente. En ellos se observa que los hidrocarburos contenidos en la gasolina son más ligeros y volátiles, por lo que presentan tiempos de retención cortos (figura 1A). Por el contrario, los hidrocarburos del diesel tienen mayor peso molecular y consecuentemente, presentan mayor tiempo de retención comparado con la gasolina. En el caso del diesel, estos tiempos de retención son muy cercanos entre sí, razón por la que la línea base presenta una forma de campana (figura 1B). La figura 1C corresponde al cromatograma obtenido para la muestra de suelo contaminado en la que se observa la presencia de los hidrocarburos pesados de la gasolina, además de los hidrocarburos del diesel. Seguramente, los hidrocarburos ligeros de la gasolina ya habían sido volatilizados de manera natural a causa del intemperismo.

La concentración de hidrocarburos de gasolina y diesel en el suelo contaminado fue de 992.64 mg/kg, de los cuales 485.72 mg/kg correspondían a gasolina intemperizada, y 506.92 mg/kg a diesel (tabla 2).

La determinación de hidrocarburos totales del petróleo (HTPs) por espectrometría en infrarrojo es inespecífica, sin embargo, se realizó para tener un control adicional. La concentración de HTPs obtenida fue de 4,460.78 mg/kg (tabla 2).

#### Seguimiento de la biorremediación del suelo

Meses después de la adición de nutrientes se realizaron muestreos para el seguimiento de la biorremediación. El pH del suelo afectado, después del tratamiento se redujo a 7.87, y se mantuvo en esa cifra. A



**Figura 1.** (A) Cromatograma de gasolina estándar. (B) Cromatograma de diesel estándar. (C) Cromatograma de la muestra de suelo contaminado antes del tratamiento

los 2 meses, el contenido de materia orgánica disminuyó como un reflejo de la reducción de contaminantes, y más aún a los 6 meses.

La concentración de nitrógeno total al momento de la adición de nutrientes fue de 2,000 mg/kg y los fosfatos quedaron en 12 mg/kg. Estas concentraciones corresponden a suelos ricos en nutrientes. Después de 2 meses de tratamiento se había consumido el 29 por ciento del nitrógeno total y a los 6 meses 67.5 por ciento. En cuanto a los fosfatos, a los 2 meses se había consumido el 30 por ciento y a los 6 meses el 77 por ciento. Esta reducción fue producto de la actividad microbiana autóctona.

Por lo que respecta a la cuenta de bacterias heterótrofas, a los 2 meses de tratamiento se incrementó en un orden de magnitud como una respuesta a la estimulación de la actividad biológica del suelo. Después de la aplicación de nutrientes, la generación de bióxido de carbono y el consumo de oxígeno también aumentaron notablemente, con lo cual se confirmó que

la actividad biológica del suelo había sido estimulada.

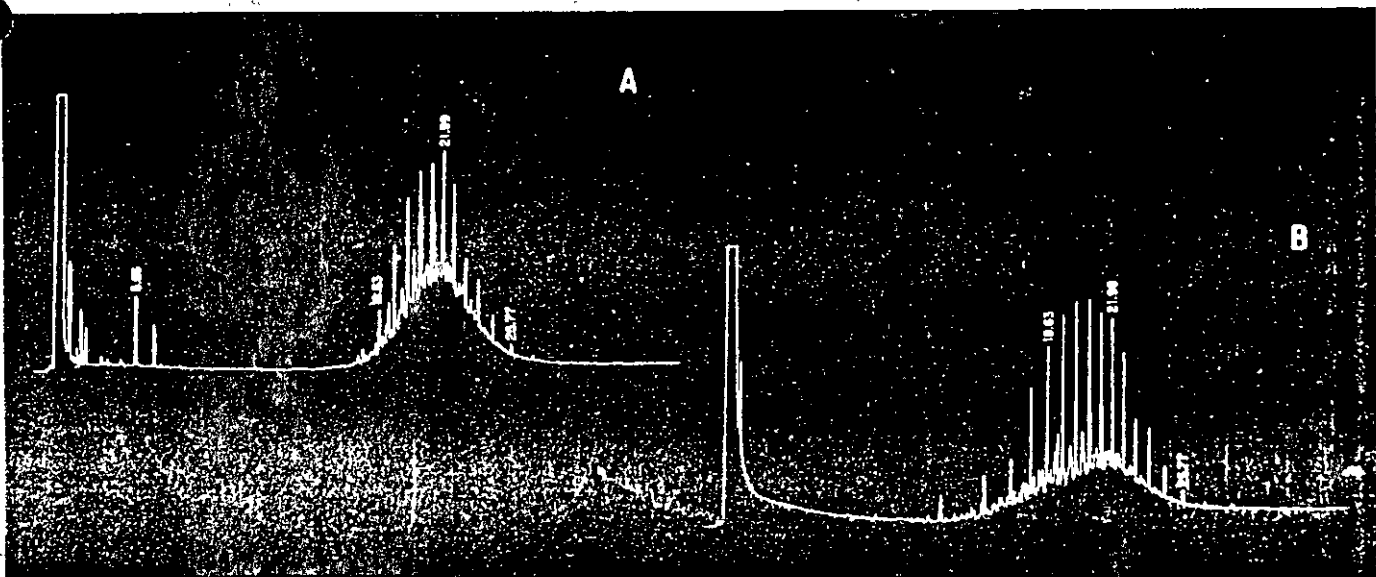
Después de 2 meses de tratamiento, la concentración de hidrocarburos totales de gasolina y diesel en el suelo se redujo en 89.97 por ciento, que correspondía 99.6 por ciento a gasolina y 80.76 por ciento a diesel. A los seis meses la concentración de diesel se redujo en un 97.98 por ciento, quedando únicamente 10.24 mg/kg de hidrocarburos residuales. La presencia de hidrocarburos de gasolina ya no fue detectada.

En la figura 2A, se presenta el cromatograma obtenido para el suelo después de 2 meses de tratamiento. Aquí se observan picos con tiempos de retención cortos que corresponden a hidrocarburos de bajo peso molecular y de menor complejidad química, los cuales corresponden a los productos de biodegradación constituidos por menos de 10 átomos de carbono. En la figura 2B se presenta el cromatograma de diesel estándar para facilitar la comparación.

**Tabla 2.** ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS

Método de análisis	Suelo contaminado				
	Antes del tratamiento	Después de 2 meses de tratamiento		Después de 6 meses de tratamiento	
(Resultados en base seca)	(mg/kg)	(mg/kg)	% Eliminación	(mg/kg)	% Eliminación
Gasolina EPA 8015 M	485.72	2	99.60	ND	100
Diesel EPA 8015 M	506.92	97.54	80.76	10.24	97.98
Hidrocarburos totales de gasolina y diesel EPA 8015 M	992.64	99.54	89.97	10.24	98.97
Hidrocarburos totales del petróleo EPA 418.1 M	4,460.78	454.86	89.80	87.64	98.04





**Figura 2.** (A) Cromatograma de la muestra de suelo contaminado después de 2 meses de iniciada la bioestimulación. (B) Cromatograma de diesel estándar.

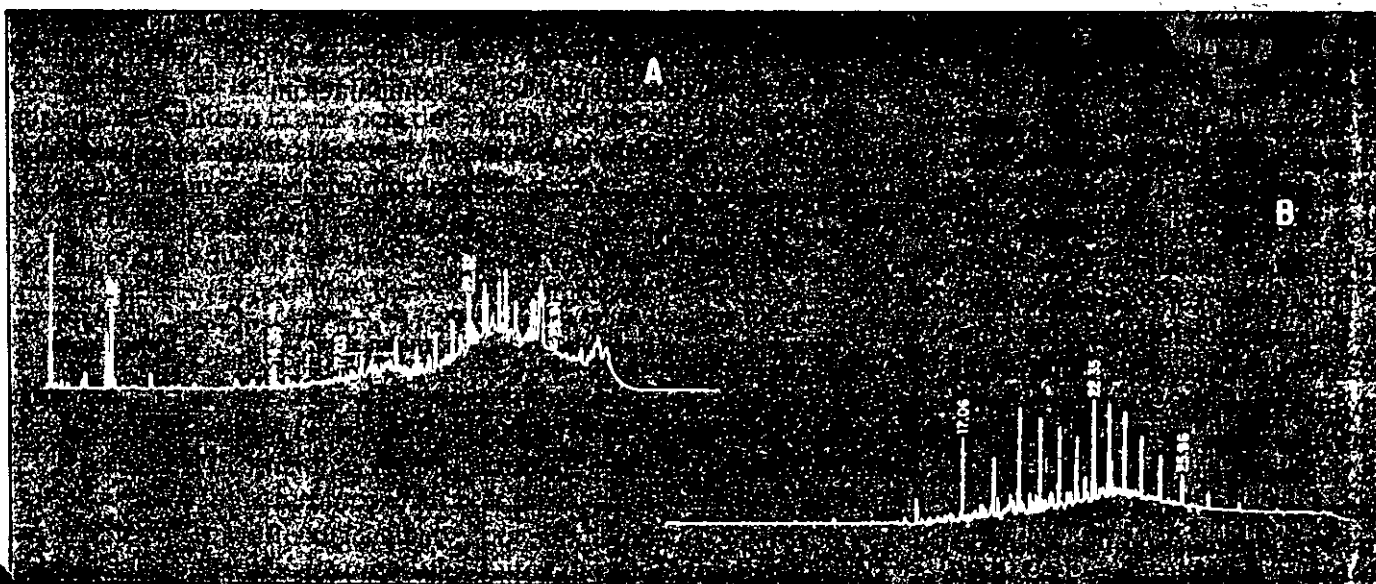
En el cromatograma obtenido con la muestra de suelo a los 6 meses de tratamiento (figura 3A) se observa una notable reducción en la incidencia y tamaño de los picos, así como de la forma de campana que presentaba la línea base, esto se debe a una reducción en la concentración de los hidrocarburos de diesel. También se observa

un mayor número de picos con tiempos de retención cortos, que corresponden a los productos de la biodegradación con menor peso molecular. Nuevamente se hace la comparación con diesel estándar obtenido para la misma fecha del análisis, en la figura 3B.

Mediante el método EPA 418.1, la concentración de HTPs a los 2

meses de tratamiento se redujo en un 89.80 por ciento, y a los 6 meses en un 98 por ciento. Estas cifras coinciden con los porcentajes de reducción reportados para la concentración de diesel por el método EPA 8015'M.

A los 4 meses de tratamiento se empezó a observar el desarrollo natural de algunas especies vegetales



**Figura 3.** (A) Cromatograma de la muestra de suelo contaminado después de 6 meses de bioestimulación. (B) Cromatograma de diesel estándar.

propias de la región, por lo que al siguiente mes, se sembraron otras especies más, las cuales empezaron a crecer y a desarrollarse rápidamente. Después de la temporada de lluvias, a 8 meses de la bioestimulación, se observó el crecimiento masivo de especies autóctonas, que incluso invadieron las que habían sido sembradas con anterioridad. En las figuras 4A y 4B se presentan fotografías del sitio antes y después de la biorremediación.

Después de un año de haber iniciado la bioestimulación con nutrientes, se tomó otra muestra de suelo para realizar un análisis cromatográfico. El perfil obtenido, se presenta en la figura 5A, donde se puede apreciar con mucha claridad la desaparición de los hidrocarburos del diésel y una mayor incidencia de productos de la biodegradación. La figura 5B corresponde al diésel estándar correspondiente al análisis de la misma fecha.

De los análisis realizados, se puede establecer que el método más confiable para el seguimiento de la concentración de hidrocarburos, fue el EPA 8015 M, dado que se pudo determinar que se trataba de una mezcla, además, de que se pudo constatar la transformación de algunos hidrocarburos en otros de menor peso molecular.

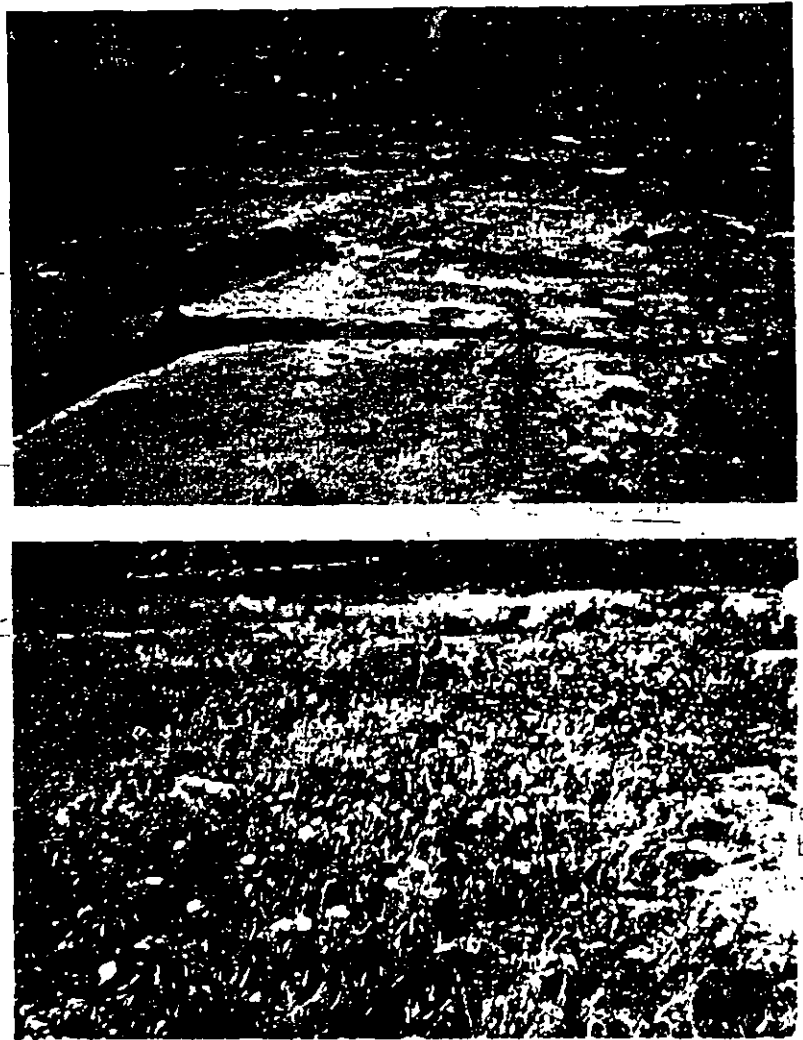
Los resultados obtenidos demostraron que se alcanzó la limpieza del sitio, en virtud de que no solamente se eliminaron del suelo los hidrocarburos contaminantes, sino que además la concentración residual es tan baja que podría incluso considerarse como insignificante. En virtud de que en México no existe una normatividad que establezca los límites de limpieza para suelos, en el caso particular de este trabajo se hizo referencia al límite inferior de lo establecido por las

normatividades de los estados de Arkansas, Delaware e Idaho en los Estados Unidos de Norteamérica, que es de 100 mg/kg, en virtud de que se utilizó el mismo método analítico para la cuantificación de los hidrocarburos (Saval, 1995).

Si bien la concentración de contaminantes en el suelo contaminado no era muy alta, si representaba un problema de contaminación al cual había que darle una solución. Con el trabajo realizado se demostró el gran potencial de los microorganismos autóctonos para ser utilizados en la degradación de contaminan-

tes. La experiencia del trabajo en campo, combinada con el seguimiento analítico en el laboratorio, permitió demostrar claramente cómo fue ocurriendo la transformación de los hidrocarburos. La estrategia establecida podría servir como referencia para futuros proyectos de biorremediación.

El procedimiento realizado, sencillo y económico, permitió dar a un suelo una actividad biológica que no tenía antes de haber sido contaminado, por lo cual se considera haber logrado la remediación del suelo y la restauración del sitio.



**Figura 4.** Vista del sitio donde se realizó el estudio: antes del tratamiento (arriba); ocho meses después de la bioestimulación (abajo).

## Conclusiones

Se demostró una reducción de hidrocarburos muy cercana al 100 por ciento, mediante los métodos de análisis EPA 8015 M y EPA 418.1 M.

Se demostró la transformación de hidrocarburos de diesel en unidades con peso molecular de menos de 10 átomos de carbono.

Los hidrocarburos residuales de gasolina con peso molecular más alto, fueron completamente eliminados.

El suelo tratado fue capaz de soportar el desarrollo y crecimiento de especies vegetales típicas de la zona.

Después de seis meses del tratamiento, en el suelo se confirmó la presencia de bacterias heterótrofas con características degradadoras de diesel y gasolina.

Se confirmó que el suelo tiene actividad biológica propia, la cual estimuló por la adición de nutrientes y el desarrollo de especies vegetales.

El procedimiento realizado, sencillo y económico, permitió dar a un suelo una actividad biológica que no tenía antes de haber sido

contaminado, por lo cual se considera haber logrado la remediación del suelo y restauración del sitio.

## Reconocimientos

Este proyecto fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial, la Gerencia de Ductos y la Superintendencia de Ductos Pacífico de Pemex Refinación. Adriana Domínguez, Alma Guadalupe Guzmán y Martha Carrasco participaron en el trabajo de laboratorio en el Instituto de Ingeniería. Miguel Ángel Juárez y Eleazar Rojas realizaron los análisis de hidrocarburos.

## Bibliografía

- Autry A.R. and Ellis G.M., 1992. *Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil*. Environ. Progress 11(4): 318-323.
- Baugh A.L. and Lovegreen J.R., 1993. "Differentiation of crude oil and refined petroleum products in soil", en *Principles and practices for petroleum contaminated soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 25-47.

- Carter M., 1993. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- Dragun J., 1989. "Recovery techniques and treatment technologies for petroleum and petroleum products in soil and groundwater", en *Petroleum contaminated soils*, vol. I. Calabrese E.J. & Kostecki P.T. eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 211-217.
- Jackson M. L., 1982. *Análisis químicos de suelos*. Ediciones Omega, 4a. edición. Barcelona, España.
- Kute A. and Lee A., 1986. "Methods of soil analysis", en *Agronomy*, No. 9. Society of Agronomy, Soil Science Society of America, USA, 545-567.
- Potter T., 1993. "Analysis of petroleum contaminated soil and water", en *Principles and practices for petroleum contaminated soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 1-14.
- Riser-Roberts E., 1992. *Bioremediation of petroleum contaminated sites*. C.K. Smoley, Boca Raton, FL, USA.
- Rogers J.A., Tedaldi D.J., and Kavanaugh M.C., 1993. "A screening protocol for bioremediation of contaminated soil", *Environ. Progress* 12(2): 146-156.
- Saval S., 1995. "Remediación y restauración en PEMEX: Ambiente y energía. Los retos del futuro", co-edición UNAM-Petróleos Mexicanos, Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM, México, 151-189.
- Velázquez A. y León R., 1974. "Comparación de métodos en la determinación de textura". VI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México.

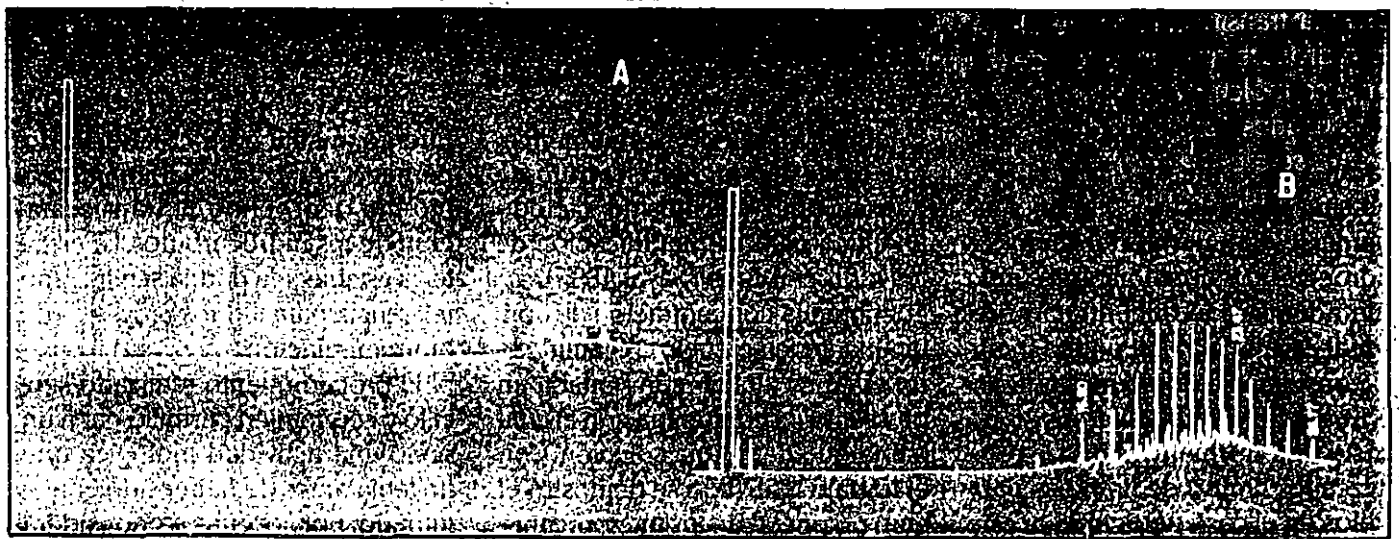


Figura 5. (A) Cromatograma de muestra de suelo contaminado 1 año después de la biostimulación. (B) Cromatograma de diesel estándar