




FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



...: Ciencias de la tierra

# CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN  
Y RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS

MODULO I.  
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON  
CONTAMINANTES INORGÁNICOS  
CA 206

DEL 22 DE AGOSTO AL 9 DE SEPTIEMBRE

EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
PALACIO DE MINERÍA



...: Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**MODULO I:  
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON  
CONTAMINANTES INORGÁNICOS CA-206**

**TEMA:  
GEOHIDROLOGÍA EN LA CONTAMINACIÓN**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
DEL 05 AL 09 DE SEPTIEMBRE DEL 2005  
PALACIO DE MINERÍA**

# LA GEOHIDROLOGIA EN LA RESTAURACION DE ACUIFEROS

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

lesserjuanm@infosel.net.mx

## 1.- ROCAS Y ACUÍFEROS

La corteza terrestre se encuentra formada por diferentes rocas y materiales que varían en su capacidad geohidrológica. Mientras que algunas tienen porosidad y permeabilidad, permitiendo el paso del agua, otras se presentan compactadas e impermeables.

Para su explicación, se tomó como ejemplo a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Se agruparon los diferentes tipos de rocas y/o materiales en relación a su composición y a sus características geohidrológicas en: (1) rocas fracturadas y piroclásticas; (2) materiales granulares; (3) rocas impermeables; (4) materiales impermeables y; (5) materiales semipermeables. A continuación se describen estas unidades.

*Rocas fracturadas y piroclásticas.-* Un ejemplo de *roca fracturada* corresponde a los *basaltos*. Estos, son el producto de erupciones volcánicas a partir de centros eruptivos, donde son eyectadas corrientes de lavas de composición basáltica, muchas de las cuales forman los flancos de los volcanes. Algunas de dichas coladas de lava se extiende hacia los valles en donde se encuentran formando acuíferos.

Las coladas de basalto al enfriarse, se enjutan provocando el fracturamiento de la roca, lo que ocasiona que permitan fácilmente la infiltración, circulación y almacenamiento de agua.

Los *piroclásticos* son fragmentos de material expulsados por un volcán durante las erupciones explosivas. Cuando los fragmentos presentan tamaño fino se les denominan cenizas, que al compactarse forman las *tobas*. Fragmentos de mayor tamaño y que son importantes geohidrológicamente son los denominados *tezontles*. Estos, corresponden a la misma roca basáltica que, en el momento de ser eyectada, incluye abundantes gases, lo cual hace que presente una textura de apariencia de esponja. Es común que durante las erupciones volcánicas los fragmentos de la lava sean lanzados al aire, acumulándose sobre los flancos de los conos volcánicos. Los *tezontles* asociados con las lavas

fracturadas, presentan una alta permeabilidad y permiten la fácil infiltración y circulación del agua en el subsuelo.

*Materiales granulares.*- Como su nombre lo indica, los *materiales granulares* corresponden a fragmentos de rocas que semejan granos, los cuales se clasifican de acuerdo a su tamaño. Se originan por la erosión y transporte de rocas que forman elevaciones topográficas. El principal agente erosivo lo constituyen las corrientes superficiales, las cuales mueven o transportan los fragmentos de roca de las partes altas de las sierras hacia las porciones bajas, donde son acumulados o depositados. Durante su trayecto, los fragmentos son redondeados obteniendo la apariencia de granos. El tamaño de estos puede variar desde fracciones de milímetro hasta varios centímetros. Los materiales granulares más finos (con diámetros menores de  $1/256$  y  $1/16$  mm) se conocen con el nombre de *arcillas* y *limos* respectivamente. Los materiales granulares de mayor tamaño (entre  $1/16$  y 2 milímetros) se denominan *arenas*, tamaños mayores de 2 milímetros corresponden a *gravas* y *cantos rodados*. Al encontrarse sueltos estos granos se denominan "materiales". Cuando se encuentran consolidados por cementación u otro proceso reciben el nombre de "roca". Los materiales granulares finos (arcillas y limos) presentan baja permeabilidad y se clasifican como impermeables al flujo subterráneo. Por lo que respecta a las arenas y gravas, éstas presentan permeabilidades altas y constituyen buenos acuíferos. Generalmente las arenas y las gravas incluyen un cierto porcentaje de arcilla; su permeabilidad esta en relación a la mezcla resultante.

*Rocas impermeables.*- Son rocas que impiden el paso de agua a través de ellas. Cuando las rocas se presentan densas y sin fracturamiento, impiden el flujo de agua a través de ellas lo cual hace que se comporten como *impermeables*.

*Materiales impermeables.*- Conforme se mencionó en párrafos anteriores se hizo la distinción entre "roca" (cuerpo de material compacto) y "materiales", siendo estos últimos los constituidos por fragmentos no consolidados. Cuando estos materiales son de tipo arcilloso, como es el caso de sedimentos lacustres arcillosos de lagos, entonces presentan una baja permeabilidad y pueden clasificarse como impermeables. En ciertas zonas, su permeabilidad puede llegar a permitir el paso de reducida cantidad de agua y se clasifican como materiales semipermeables (ver párrafo siguiente). Las arcillas están constituidas por fragmentos de tamaños menores de  $1/256$  mm. El agua que puede saturar a estos materiales, en su mayor parte es retenida por atracción molecular hacia cada uno de los granos de arcilla, como se ilustra en la figura No. 2.1 y solamente un porcentaje

muy reducido de agua circula a través de los espacios sobrantes. En general, las arcillas se consideran como material impermeable, especialmente para propósitos prácticos, ya que los pozos perforados en estos materiales rinden caudales de agua muy reducidos, generalmente menores de 1 lps lo que hace que se clasifiquen como negativos.

*Materiales semipermeables.*- Cuando los materiales granulares consisten en una mezcla de arcillas y arenas, los espacios libres entre granos permiten la circulación de cierta (aunque reducida) cantidad de agua, ocasionando que la permeabilidad del material sea mayor que en las arcillas pero menor que en las arenas.

*Acuífero.*- Se denomina *acuífero* a un cuerpo de roca que se encuentra saturado y presenta una permeabilidad tal que permite la circulación de agua en cantidades económicamente significativas y que puede ser explotada a través de pozos. Existen diferentes acuíferos entre los cuales destacan los siguientes: *Acuífero libre*; es aquel en el que la superficie del nivel estático se encuentra a la presión atmosférica. *Acuífero confinado*; es aquel que se encuentra sujeto a una presión, generalmente ocasionada por el encajonamiento del agua entre dos cuerpos impermeables. *Acuífero colgado*, es aquel que circula sobre una capa impermeable localizada arriba del nivel estático de un acuífero regional. *Acuífero semiconfinado*; es aquel que se encuentra cubierto por un material semipermeable (figura 2.2).

*Acuitardo.*- Es una capa que retiene pero no evita el flujo del agua hacia un acuífero adyacente. El acuitardo no permite un paso rápido del flujo del agua pero puede servir como una zona de alta capacidad de almacenamiento. También se define como un material que acepta la entrada de agua pero que la cede lentamente

## **2.- FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS**

### **Ciclo hidrológico**

En la corteza terrestre el agua en su gran mayoría se encuentra formando parte del ciclo hidrológico.

El agua de lluvia que se precipita sobre los continentes tiene tres caminos a seguir: Evaporarse para formar las nubes; escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar e, infiltrarse en el subsuelo para formar

acuíferos. Esta agua infiltrada posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales, para evaporarse o seguir su camino al mar donde también parte de ésta se evapora y continua en su ciclo natural conforme se ilustra en la figura No. 2.3. Las aguas que no se encuentran en movimiento dentro del ciclo hidrológico se caracterizan por incrementar su contenido salino y se conocen como aguas fósiles; la proporción de agua fósil respecto a agua dentro del ciclo hidrológico es sumamente baja.

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de esta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas donde incrementa su temperatura o puede permanecer atrapada entre sedimentos en forma de agua fósil.

### **Distribución del agua en el subsuelo**

La distribución del agua en el subsuelo se ilustra en la figura 2.4, donde se muestra el límite de la zona saturada que se denomina nivel estático. La porción que se encuentra bajo el nivel estático en la roca saturada se denomina acuífero. La zona no saturada que corresponde a la porción entre la superficie del terreno y el nivel estático recibe también el nombre de zona vadosa. Cuando los acuíferos corresponden a materiales granulares, en los pozos se produce un efecto de capilaridad que permite la ascensión del agua, dando origen a una zona denominada de aguas capilares.

### **Zonas de recarga**

Son las principales áreas donde se infiltra el agua de lluvia. Generalmente corresponden a porciones permeables ubicadas topográficamente altas, permiten la infiltración y circulación de agua hacia los acuíferos. Estas áreas son las principales zonas de recarga.

### **Zonas de descarga**

La salida o descarga natural del agua de los acuíferos, se realiza en forma natural a través de manantiales o del drenado por medio de ríos. Actualmente, la salida del agua de la mayor parte de los acuíferos, se realiza mediante la extracción por el bombeo de pozos.

## **Niveles estático, dinámico y freático**

En un acuífero libre, se define como *nivel estático* a la porción superficial del acuífero (figura 2.6). En contraste, se define como *nivel dinámico* al que se refleja en un pozo al encontrarse operando, razón por la que también se le denomina *nivel de bombeo*.

*Nivel piezométrico* generalmente se utiliza para los acuíferos confinados donde el nivel corresponde a la presión a que está sujeta el agua del acuífero.

Recibe el nombre de *nivel freático* el nivel que presentan los acuíferos someros, cuya agua en ocasiones se denomina también como aguas freáticas.

## **3.- PROPIEDADES DE LOS ACUÍFEROS**

### **Permeabilidad (K)**

Dentro de los conceptos fundamentales de las características de las rocas que forman acuíferos, se encuentra el concepto de *permeabilidad*, el cual es la propiedad de un medio poroso o fracturado para permitir el paso de un fluido. Se define como el flujo de agua por unidad de tiempo que cruza una sección unitaria bajo un gradiente también unitario. Se expresa en metros por segundo. Si el fluido es agua, a la permeabilidad se le conoce también como *conductividad hidráulica*.

En la tabla No. 2.1 se muestran valores de permeabilidad para diferentes materiales, las arcillas tienen una permeabilidad del orden entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m/seg; los materiales granulares  $1 \times 10^{-5}$  m/seg y; los basaltos  $5 \times 10^{-2}$  m/seg.

Porosidad  $n = V_h/V_t$   
 $V_h =$  Volumen de huecos  
 $V_t =$  Volumen total

Porosidad efectiva ( $S_y$ ) = rendimiento

$S_y = V_d/V_t$   
 $V_d$  Volumen drenado  
 $V_t$  Volumen total

---

Coefficiente de almacenamiento

$S =$  Coeficiente de almacenamiento

$S_s =$  Coeficiente específico =  $\frac{S_s}{b}$

$b =$  Espesor del acuífero

Acuífero libre 2 – 30%

Acuífero confinado 0.001 – 0.00001

---

(K) Permeabilidad = Conductividad hidráulica  
Flujo en una sección unitaria

(T) Transmisibilidad  
= Flujo sobre una franja de longitud =  $b$   
 $b =$  Espesor del acuífero

### Transmisibilidad (T)

La *transmisibilidad* es otra forma de expresar la facilidad con que puede circular el agua en un acuífero. Se define como la cantidad de agua que puede fluir a través de una sección unitaria bajo un gradiente unitario y un tiempo instantáneo. En la figura No. 2.5 se muestra la diferencia entre la transmisibilidad y la permeabilidad, siendo la transmisibilidad la descarga que ocurre a través de un segmento unitario respecto a la anchura pero una altura ( $b$ ) que equivale al espesor del acuífero, mientras que la permeabilidad corresponde a una descarga que ocurre a través de una sección unitaria y, para ambos casos, bajo un gradiente hidráulico unitario.



### *Coeficiente de almacenamiento (S)*

Es el volumen de agua que puede contener o almacenar una roca permeable dentro de los huecos que presenta.

### *Rendimiento específico (Sy)*

Es el volumen drenado entre el volumen total (material + agua) en acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento varía por lo general del 2 al 30% (0.02 a 0.30) mientras que en acuíferos confinados va de 0.001 a 0.00001.

## **4. ACUITARDOS**

### **Funcionamiento**

En contraste con el funcionamiento de los acuíferos mostrados en la figura 2.2, en el presente inciso se mencionan las características de los acuitardos.

Un *acuitardo* corresponde a una roca o material de baja permeabilidad que retarda pero no previene el flujo del agua de o hacia el acuífero adyacente. Las arcillas lacustres en muchos casos constituyen acuitardos.

### **Recarga y descarga de los acuitardos**

La recarga de los acuitardos se genera por la infiltración de las aguas de lluvia o bien de las aguas que circulan a través de arroyos y canales, en forma similar a la recarga de los acuíferos pero con la diferencia de que la recarga de un acuitardo es muy lenta.

Su descarga se lleva a cabo también en forma muy lenta, generalmente como “lloraderos” que llegan a formar manantiales incipientes.

### **Permeabilidad de los acuitardos**

La permeabilidad de los acuitardos y en especial de las arcillas que se encuentra cubriendo la parte plana del Valle de México, presentan valores de entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m/seg.

## **Nivel freático**

El nivel de saturación en las arcillas que forman el acuitardo de la Ciudad de México se encuentra muy cerca de la superficie, por lo general a profundidades del orden de 3 metros. A este nivel somero se le denomina nivel *freático*.

## **Asentamientos del terreno**

Las arcillas que 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. En las partes centrales de las zonas de Texcoco y Tlahuac-Chalco, las arcillas se encuentran intercaladas y/o mezcladas con horizontes de arenas, y llegan a presentar espesores de más de 100 metros. Las arcillas están saturadas y presentan un nivel freático a entre 2.5 y 3.5 metros de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que actualmente, funciona como libre, teniendo el nivel estático a cierta profundidad bajo el acuitardo, lo que provoca que éste último presente un “goteo” o drenado vertical hacia el acuífero. La pérdida de agua del acuitardo ocasiona una pérdida de su volumen, que se traduce en el asentamiento del terreno que es típico en la Ciudad de México.

Las arcillas tienen una compresibilidad que va de 0.11 a 6 centímetros cuadrados por kilogramo, una relación de vacíos que varía de 2 a 15 y; una permeabilidad entre  $1 \times 10^{-9}$  m/seg.

## **5.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS NATURALES**

El agua de lluvia que se infiltra al subsuelo circula a través de las rocas disolviendo las sales y minerales que las forman, produciendo cambios en su composición química. Por lo tanto, la composición química del agua subterránea dependerá del tipo y grado de solubilidad de las rocas y sales naturales con las que el agua tiene contacto al circular por el subsuelo.

### **Composición química del agua de lluvia**

El agua de lluvia al precipitarse sobre la corteza terrestre arrastra materiales finos que se encuentran suspendidos en la atmósfera y que en muchos casos son transportados por el

viento. La composición química general del agua de lluvia según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente:

Na	1.98 ppm	Ca	0.09 ppm	HCO <sub>3</sub>	0.12 ppm
K	0.30 ppm	Cl	3.79 ppm		
Mg	0.27 ppm	SO <sub>4</sub>	0.58 ppm		

La contaminación de la atmósfera produce modificación en la composición química de las aguas de lluvia, generalmente ocasionando la presencia de lo que se denomina como “lluvia ácida”. Sin embargo, la concentración total de sales en un agua de lluvia se caracteriza por presentar valores bajos, generalmente menores de 40 miligramos por litro.

### **Calidad del agua en acuíferos basálticos**

Los basaltos son rocas fracturadas constituidas por minerales ferromagnesianos. Presentan bajo grado de solubilidad, la alta permeabilidad de las rocas disminuye la capacidad de disolución de sales por el agua.

Por lo tanto, el agua de lluvia que se infiltra y circula por rocas basálticas se va a caracterizar por presentar bajos contenidos salinos, principalmente de bicarbonatos y sodio (del agua de lluvia), y en algunos casos magnesio, fierro y manganeso (de los minerales ferro-magnesianos).

Durante las erupciones volcánicas son comunes las emisiones de gases que contienen sales, las cuales se acumulan por lo general alrededor de los cráteres o centros eruptivos. Ocasionalmente éstas sales pueden ser transportadas y depositadas a lo largo de fallas y fracturas, por medio de soluciones hidrotermales. Por ello, ocasionalmente el agua de los acuíferos basálticos llega a tener contacto con dichos horizontes salinos e incrementa notablemente su concentración, como es el caso de los flancos de la Sierra de Santa Catarina y algunas porciones del pie de la Sierra del Chichinautzín

### **Origen de acuíferos con agua salada.**

Otro origen de sales en el subsuelo se puede encontrar en la circulación de flujos de agua regional. Es común que estos flujos, después de circular grandes distancias y a gran profundidad, tengan contacto con sales las cuales son disueltas por el agua. Pueden

existir también focos termales que ocasiona el incremento de temperatura en el agua, lo que a su vez facilita la disolución de sales. El agua de flujos regionales puede circular y en muchas ocasiones llegar a ascender hasta la superficie o cerca de ella, a través de fallas o fracturas. El agua con altos contenidos salinos se llega a manifestar en varias formas: (1) la presencia de manantiales, en ocasiones termales, con agua salada; (2) el depósito de sales a lo largo de fracturas con mecanismos semejantes a los que en minería son comunes y se conocen como depósitos hidrotermales y; (3) la acumulación o entrapamiento de agua salada en ciertos horizontes.

Durante la perforación de un pozo, se puede llegar a atravesar una falla o un horizonte donde se encuentre atrapada el agua salina o las sales que se pueden incorporar al acuífero a través del pozo.

Las aguas naturales generalmente tienen un largo tiempo de estancia en el subsuelo. Las aguas saladas naturales, se caracterizan por la ausencia de organismos.

## **6.- VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN (RIESGO GEHIDROLÓGICO)**

### **Riesgo**

El riesgo de que un acuífero pueda ser contaminado está en función tanto de las características propias del acuífero como de los materiales que se encuentren a su alrededor y que en determinados casos puedan servir de protección al acuífero o de permitir en mayor o menor grado su contaminación.

Por definición, el riesgo es la probabilidad de que se presente un efecto indeseable y obtiene como producto de la probabilidad del riesgo por la frecuencia.

El manejo del riesgo es la decisión de las acciones que deben de tomarse ante una contingencia.

El riesgo ambiental es la probabilidad de efectos adversos sobre humanos y otros seres vivos como resultado de agentes químicos, físicos o biológicos que ocurren en el medio ambiente.

El análisis de riesgo a la salud es la determinación de la probabilidad de afectación y mortandad sobre el ser humano.

### **Vulnerabilidad.-**

La forma para medir el riesgo geohidrológico es lo que se conoce como vulnerabilidad de los acuíferos.

Cada lugar presenta diferentes características químicas y físicas que permiten en mayor o menor grado la contaminación de los acuíferos. Un método para calcular la vulnerabilidad es el denominado DRASTIC, publicado por la EPA (Environmental Protection Agency). Este método toma en cuenta los factores siguientes:

- Profundidad al nivel estático
- Recarga neta
- Tipo de roca
- Tipo de suelo
- Pendiente del terreno
- Zona vadosa
- Permeabilidad

Su nombre esta formado por las siglas en ingles de los factores mencionados: **Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact Conductivity.**

### **Profundidad al nivel estático**

La profundidad al nivel del agua es un factor importante en la vulnerabilidad de los acuíferos, debido a que está en relación con la distancia que el contaminante va a viajar antes de alcanzar al acuífero, dando oportunidad para que existan procesos como la oxidación, adsorción y en general la atenuación del contaminante. Por otra parte, las aguas que se encuentran a profundidad implican mayores tiempos de estancia en el subsuelo. Mientras mayor sea la profundidad al nivel estático, la vulnerabilidad será menor.

En la tabla 2.2 se muestran los valores con que el programa DRASTIC de la EPA clasifica la vulnerabilidad de los acuíferos. Cuando la profundidad al agua se encuentra a

entre 0 y 1.5 metros se le asigna un valor de 10 puntos, mientras que cuando el agua se encuentra a profundidades mayores de 30 metros, el valor con que se califica es de 1 punto. Además, la calificación asignada es multiplicada por el peso específico de cada factor, que se consigna en la misma tabla.

### **Cantidad de recarga (recarga neta)**

La recarga típica de los acuíferos es la precipitación pluvial, la cual se infiltra a través del subsuelo hasta el acuífero. La recarga neta consiste en la cantidad de agua que se infiltra por unidad de área. El agua que se infiltra transporta al contaminante. De acuerdo al volumen de agua existirá un parámetro de dispersión y dilución del contaminante. La cantidad de agua que se recarga es el principal vehículo para el transporte de contaminantes. Mientras mayores sean los volúmenes de recarga, mayor será el potencial de contaminación al subsuelo, lo cual se cumple hasta que la cantidad de recarga es tan grande que causa dilución del contaminante. En la tabla 2.3 se muestran valores para calcular la vulnerabilidad a partir de recargas netas de agua al subsuelo.

### **Tipo de roca**

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación está influenciada también por el tipo de materiales que constituyen el subsuelo. Materiales granulares pueden “filtrar” a los contaminantes presentes en el agua al existir procesos de adsorción, reacción o dispersión. En los acuíferos formados en rocas fracturadas prácticamente no se presenta la atenuación de contaminantes, por lo que estos son más vulnerables a la contaminación.

En la tabla 2.4 se presentan las calificaciones que el programa DRASTIC aplica a diferentes tipos de rocas, observándose que los basaltos son muy vulnerables, calificándose con el valor 9, en contraste con otros tipos como se indica en la tabla.

### **Tipo de suelo**

Incluye a la porción superficial del terreno donde generalmente existe una actividad biológica significativa. En esta clasificación, se considera al suelo como la porción superficial de terreno con una profundidad máxima de 2 metros. Los suelos tienen un impacto significativo en la cantidad de agua que se puede infiltrar en el subsuelo y por lo tanto en la habilidad para mover a un contaminante en forma vertical a través de la zona

vadosa. La presencia de materiales finos tales como arcillas, disminuyen la permeabilidad y restringen el movimiento de contaminantes. Por otra parte; existen procesos de filtración, biodegradación, adsorción y volatilización, que remueven partículas contaminantes.

Otra variables es el tipo de suelos, el cual puede variar de una grava a arena y arcilla. En la figura 2.5 se muestra una tabla con calificaciones de acuerdo al tipo de suelos.

### **Pendiente del terreno**

La topografía del terreno ayuda a controlar que el contaminante permanezca en un sitio (donde la pendiente tiende a ser horizontal) o sea arrastrada hacia otros sitios (donde la pendiente es fuerte). Este efecto se encuentra asociado con el grado de infiltración, siendo este menor en las zonas donde la pendiente del terreno es fuerte y mayor donde la pendiente es moderada o nula. En la tabla No. 2.6 se muestran los rangos de calificaciones de acuerdo a la pendiente del terreno.

### **Zona vadosa**

La zona vadosa o zona de aereación, es la que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel estático. En esta porción se producen procesos de biodegradación, neutralización, filtración, reacciones químicas, volatilización y dispersión. El grado de biodegradación y volatilización decrece con la profundidad. De acuerdo a la composición de los materiales que constituyen a la zona vadosa, esta presenta un rango de calificación de vulnerabilidad el cual se muestra en la tabla No. 2.7.

### **Permeabilidad**

La permeabilidad es la facilidad que presenta un medio para que circule el agua a través de él. En zonas donde la permeabilidad es alta, existirá mayor vulnerabilidad a la contaminación. Donde los materiales presentan transmisibilidades bajas, el factor de contaminación disminuye.

Para calcular este factor, inicialmente se mide la permeabilidad del material, ya sea mediante pruebas de bombeo o bien en forma general utilizando tablas como la del tipo de la mostrada en la figura No. 2.8. Posteriormente y conociendo el valor de

permeabilidad, se obtiene la calificación de la vulnerabilidad respecto a este parámetro, la cual se muestra en la tabla No. 2.9.

### **Cálculo de la vulnerabilidad de una zona**

Aplicando los valores de vulnerabilidad para cada uno de los factores mencionados, en los párrafos anteriores se obtiene un valor de vulnerabilidad para un sitio. Así por ejemplo, en una zona con rocas basálticas y una porción de medios granulares las calificaciones serían de 164 y 35 conforme se muestra en la tabla 2.9, siendo los basaltos de mayor vulnerabilidad que los materiales granulares.

Tabla 2.2.- Valores de vulnerabilidad  
De acuerdo a la profundidad al nivel estático

Rango en metros	Valor
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 específico: 5	



Tabla 2.3.- Recarga neta

Rango en mm	Valor
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9
Peso específico: 4	

Tabla 2.4.- Tipo de roca

Tipo	Rango	Valor Típico
Lutita	1-3	2
Rocas ígneas y metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas y metamórficas 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 cástica	9-10	10
Peso específico: 3		

Tabla 2.5.- Tipo de suelo

Tipo	Valor
Capa delgada o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Carbón	8
Agregado de arcillas	7
Mezcla Arenosa	6
Mezcla	5
Mezcla limosa	4
Mezcla arcillosa	3
Abono	2
Arcilla	1
Peso específico: 2	

Tabla 2.6 Pendiente del terreno  
(ángulo de inclinación en %)

Rango	Valor
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1
Peso específico: 1	

Tabla 2.7 Zona vadosa

Tipo	Rango	Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo o arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca		
Horizontes de caliza, arenisca y lutita	4-8	6
Arena y grava con alto contenido de limo y arcilla	4-8	6
Rocas ígneas y metamórficas	4-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza carstica	8-10	10
Peso específico: 5		

Tabla 2.8.- Permeabilidad en varios tipos de roca  
Conductividad hidráulica  
(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 específico: 3	

Tabla 2.9.- Ejemplo del cálculo de vulnerabilidad

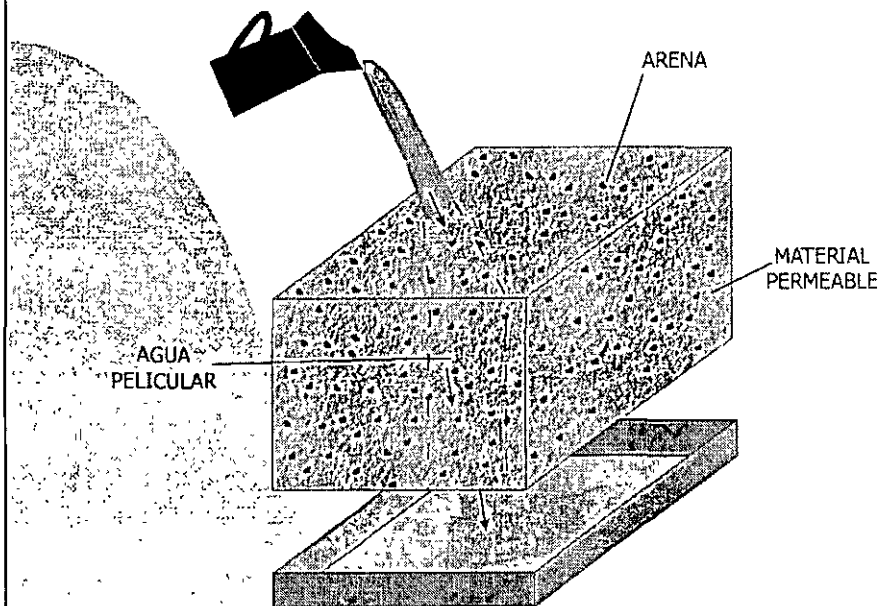
Factor	Sierra de basaltos	Valle de material granular Cubierto por arcillas
Nivel estático	5	5
Recarga neta	36	4
Tipo de roca	27	6
Tipo de suelo	20	2
Pendiente del terreno	1	10
Zona vadosa	45	5
Permeabilidad	30	3
Suma	164	35
Clasificación	altamente vulnerable	reducida vulnerabilidad


# LA GEOHIDROLOGIA EN LA CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE ACUIFEROS

 LESSER, 2004

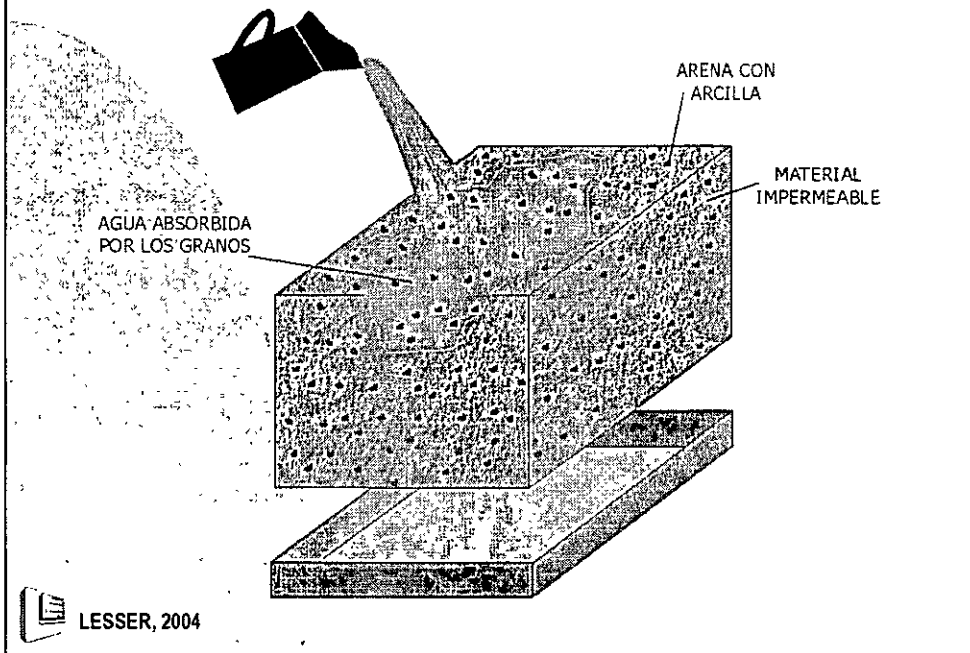


## Material permeable

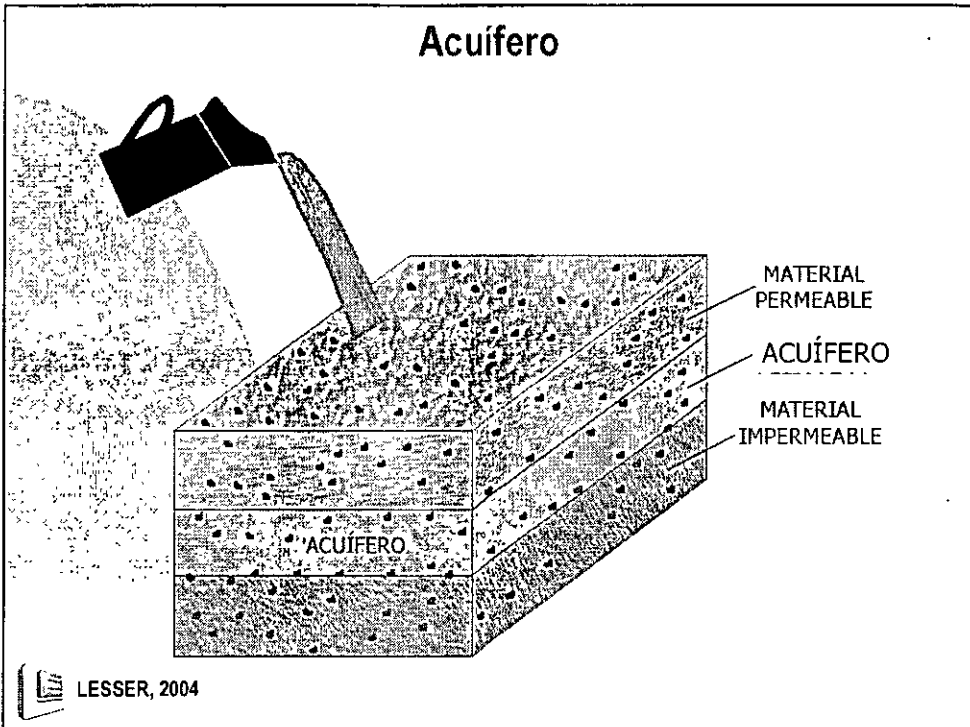


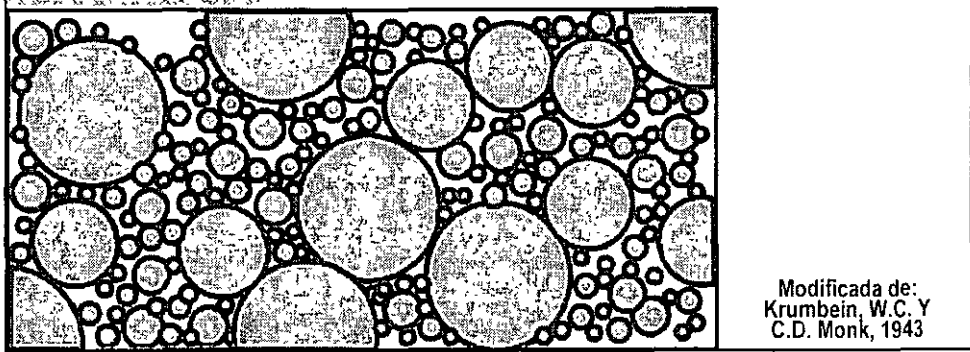
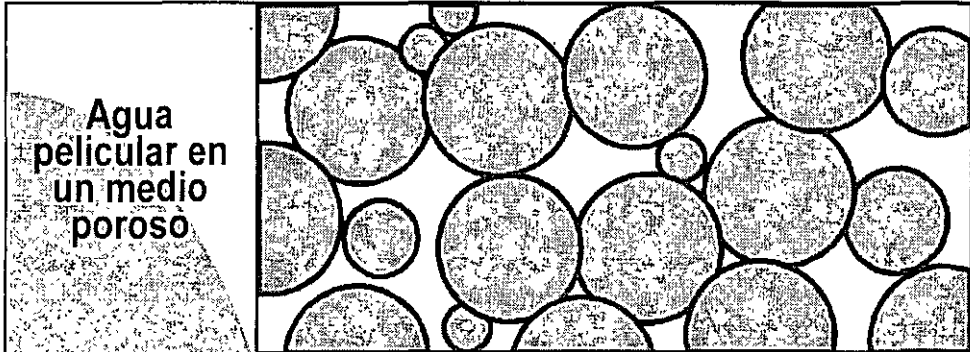
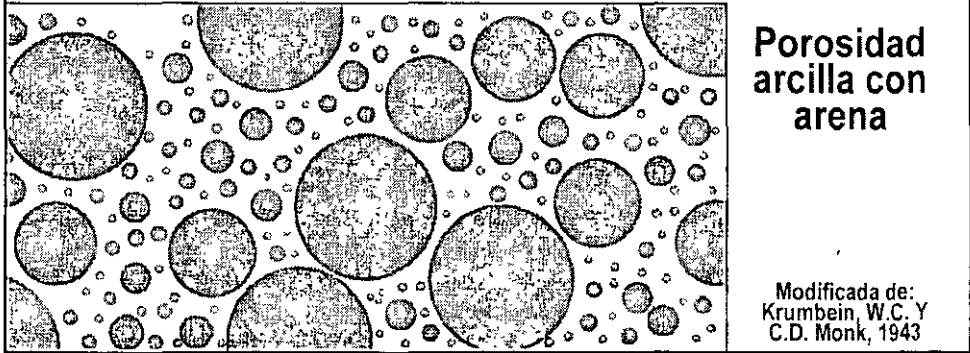
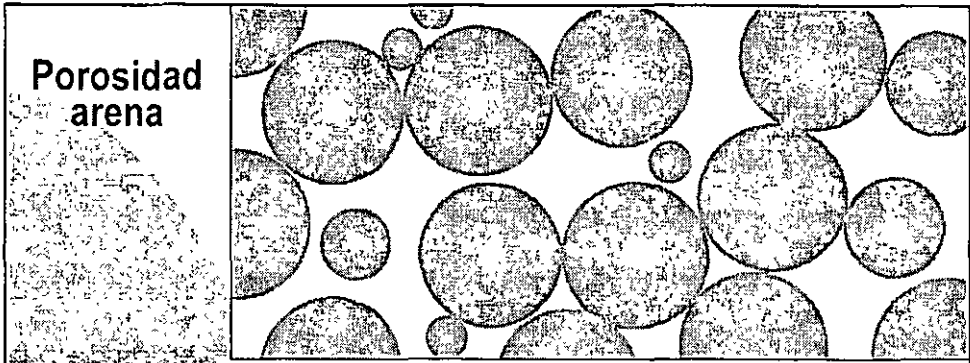
 LESSER, 2004

## Material impermeable

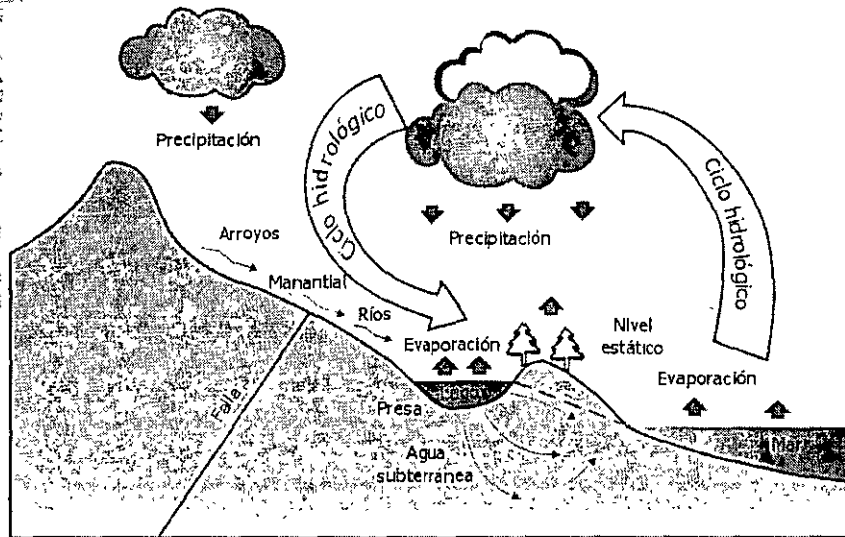


## Acuífero



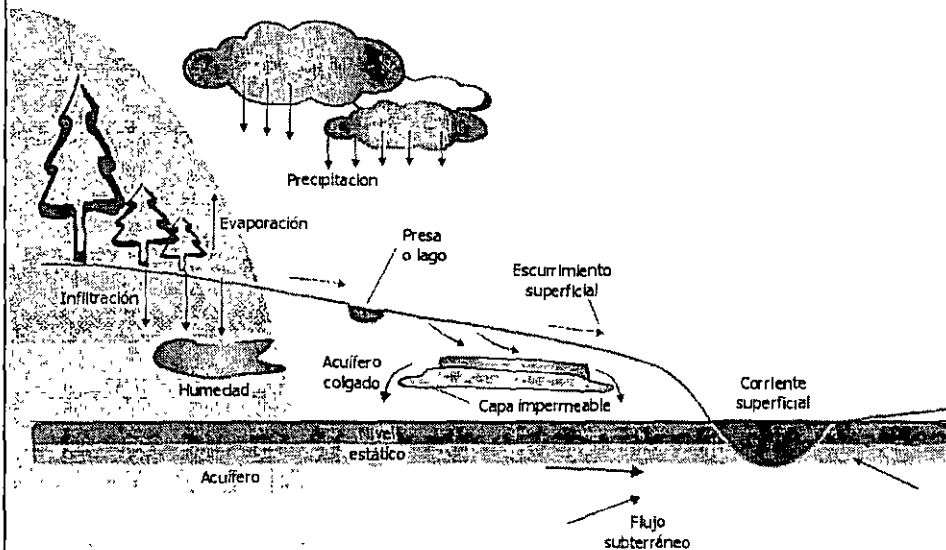


# Ciclo hidrológico



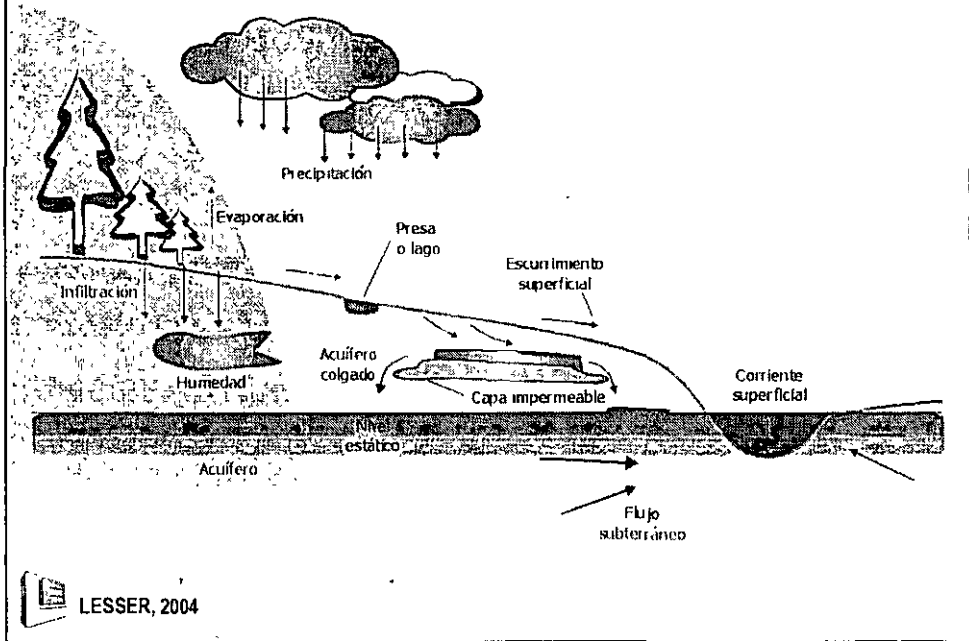
LESSER, 2003

# Ciclo hidrológico

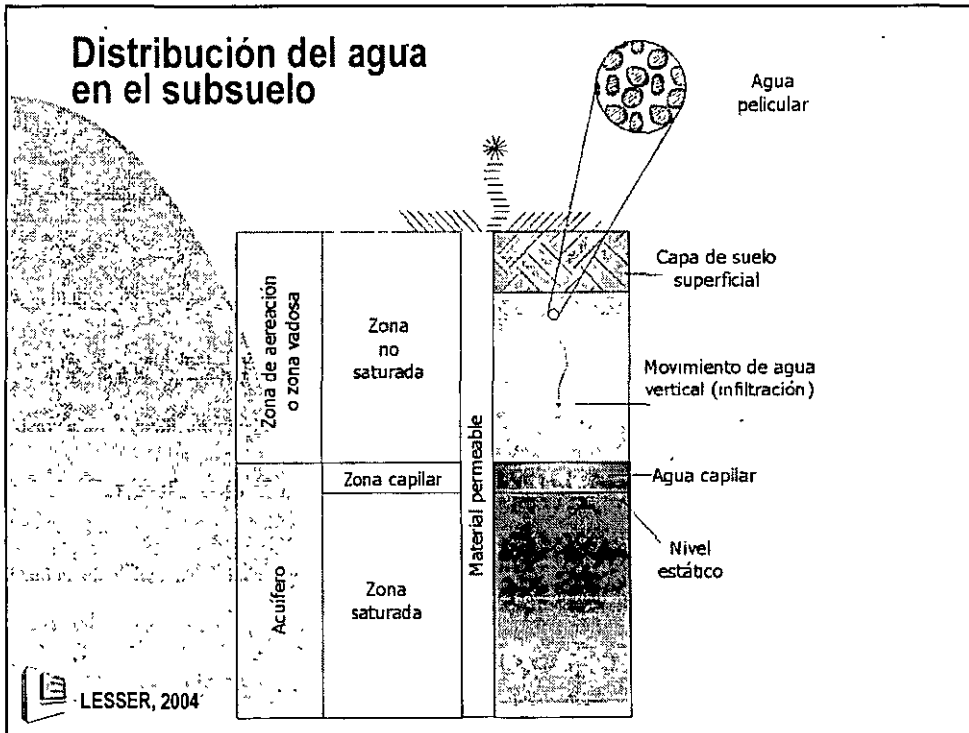


LESSER, 2004

# Ciclo hidrológico

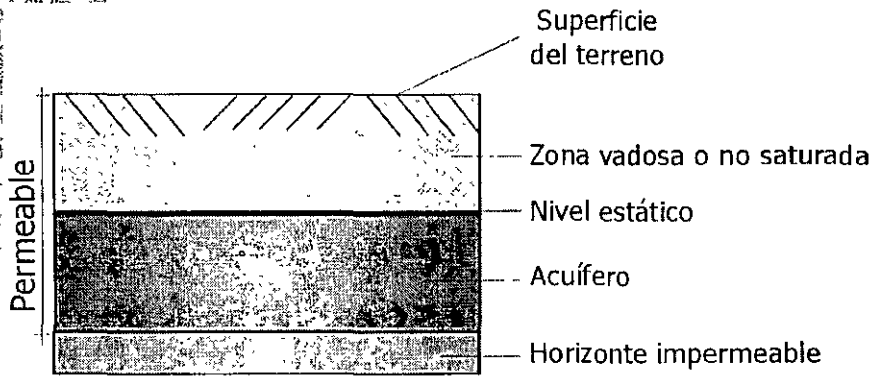


# Distribución del agua en el subsuelo



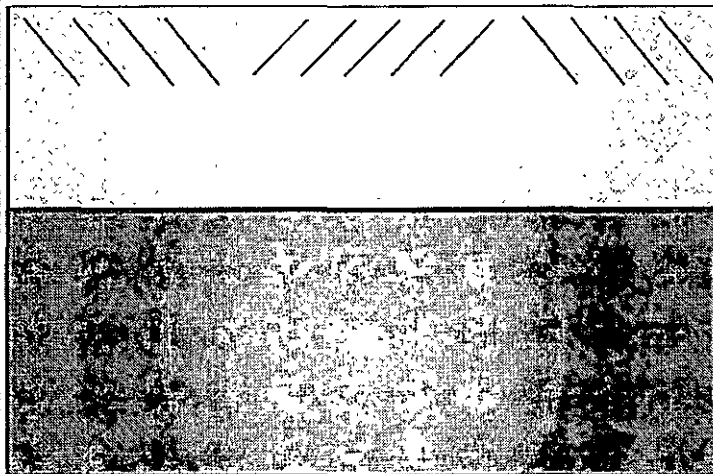


# Acuífero



LESSER, 2004

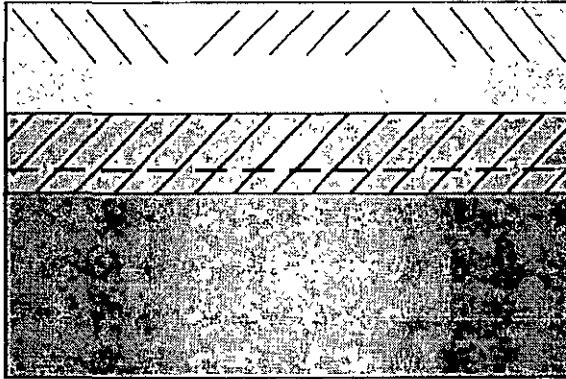
# Acuífero libre



N.E.

LESSER, 2004

## Acuífero confinado

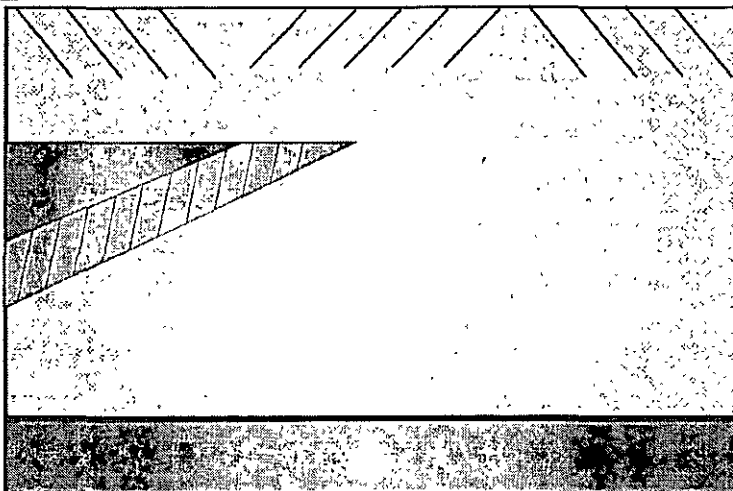


Nivel  
piezométrico



LESSER, 2004

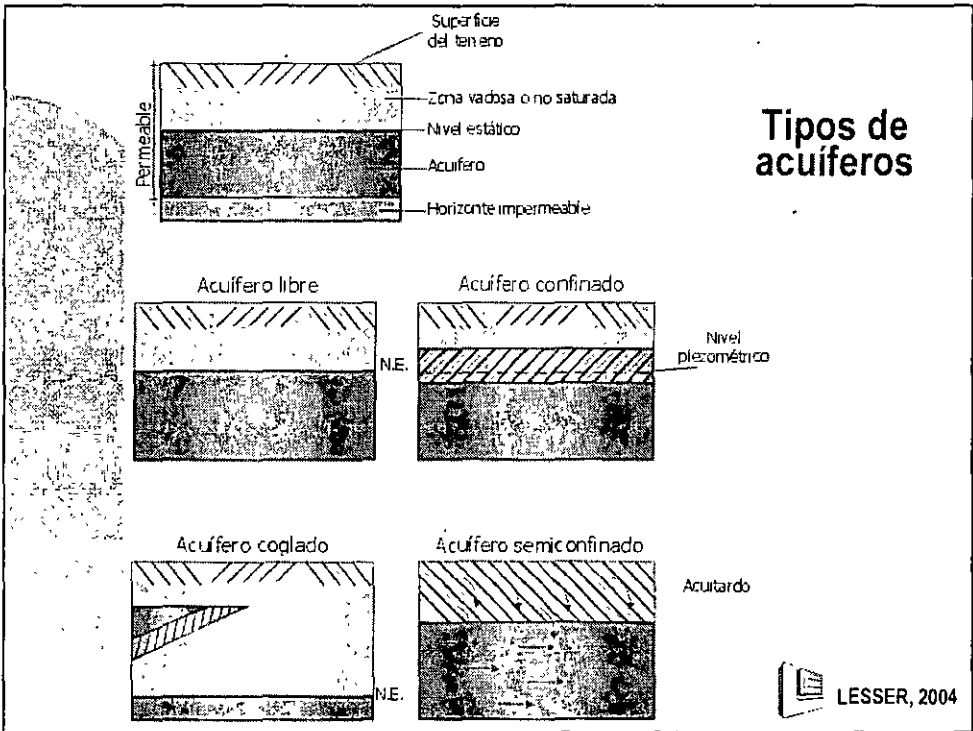
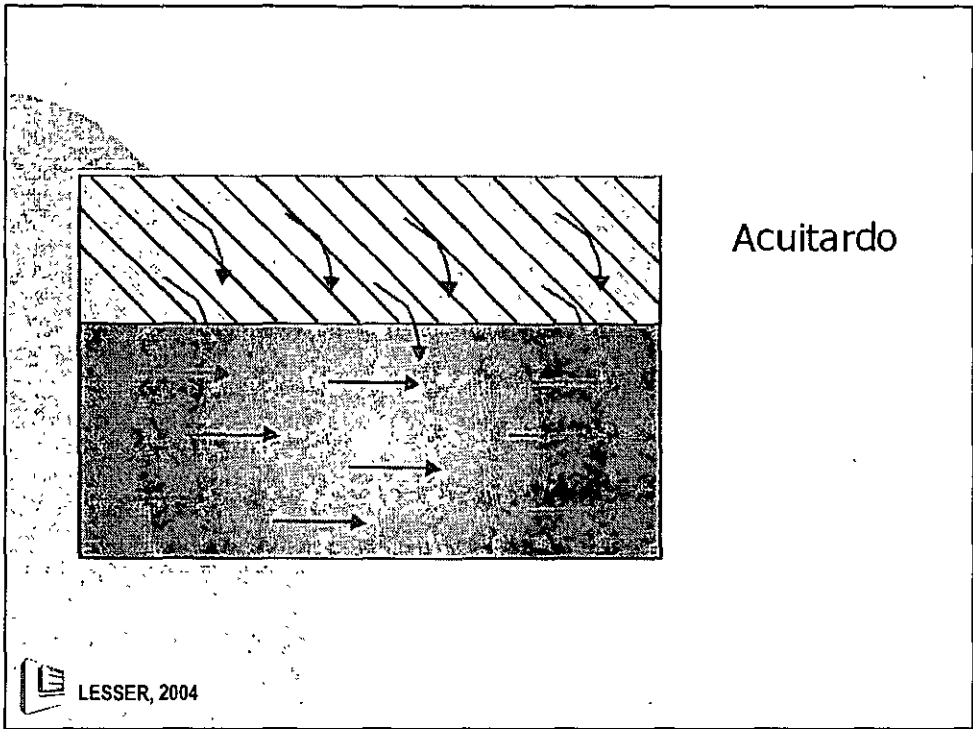
## Acuífero colgado

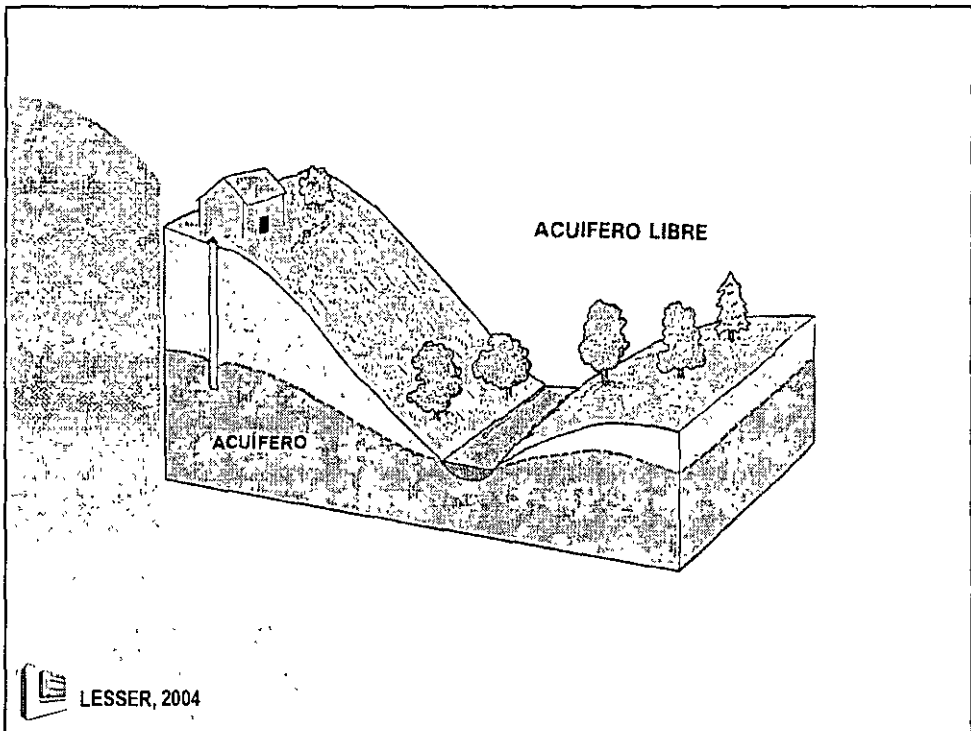
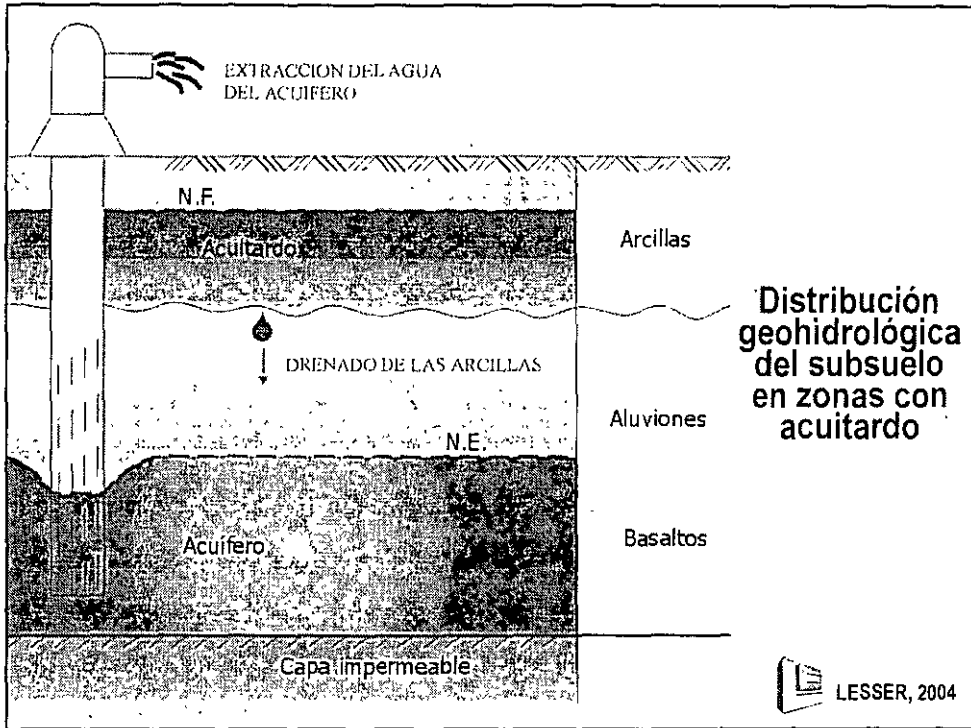


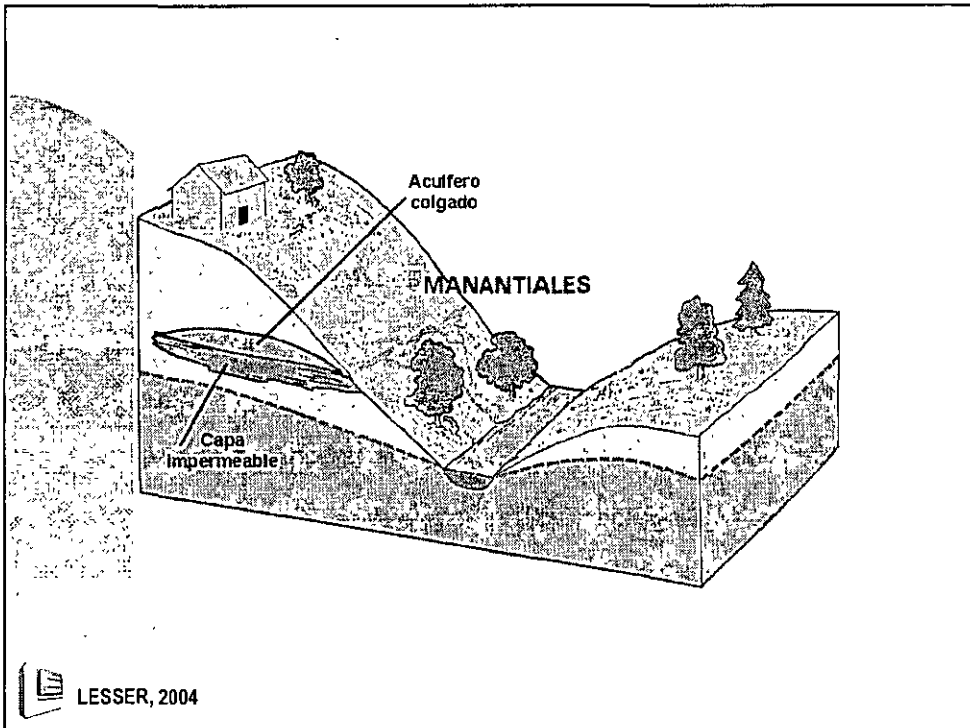
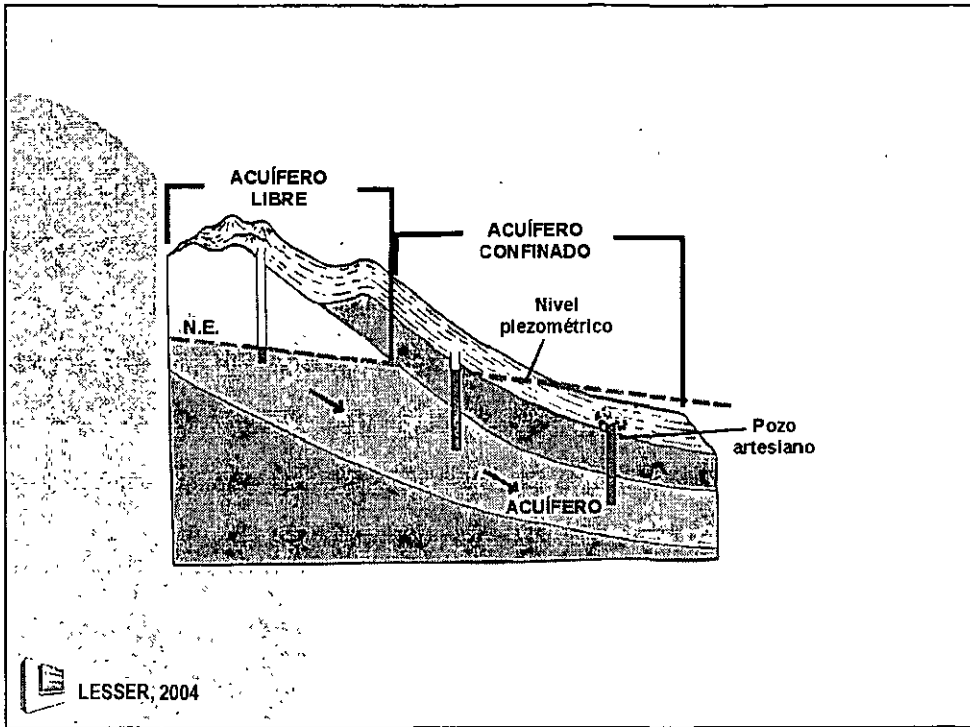
N.E.

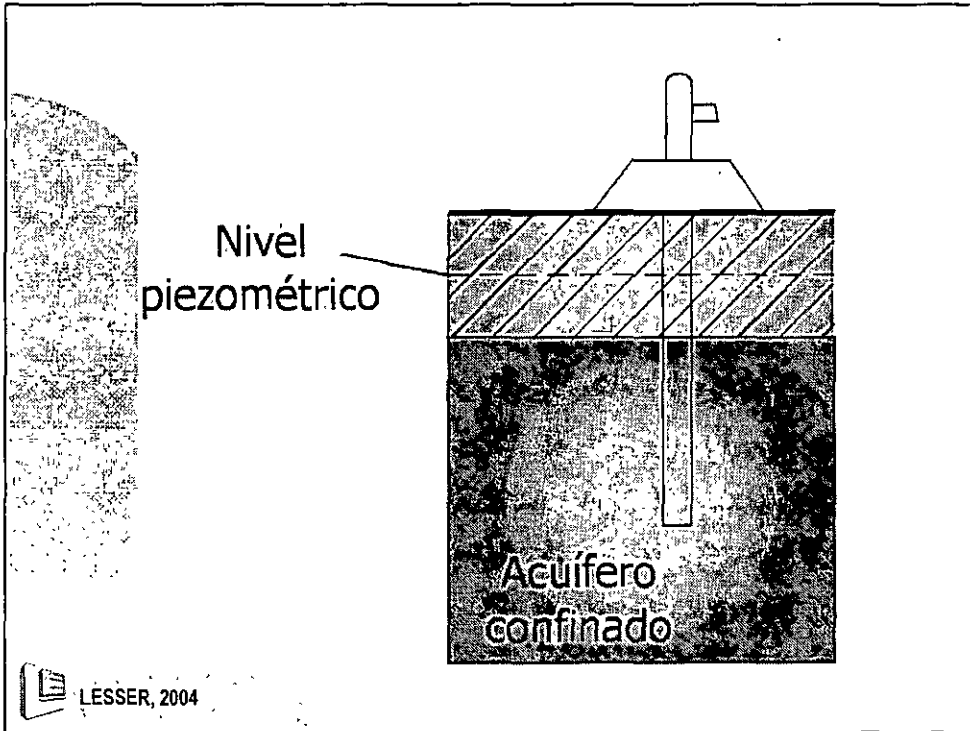
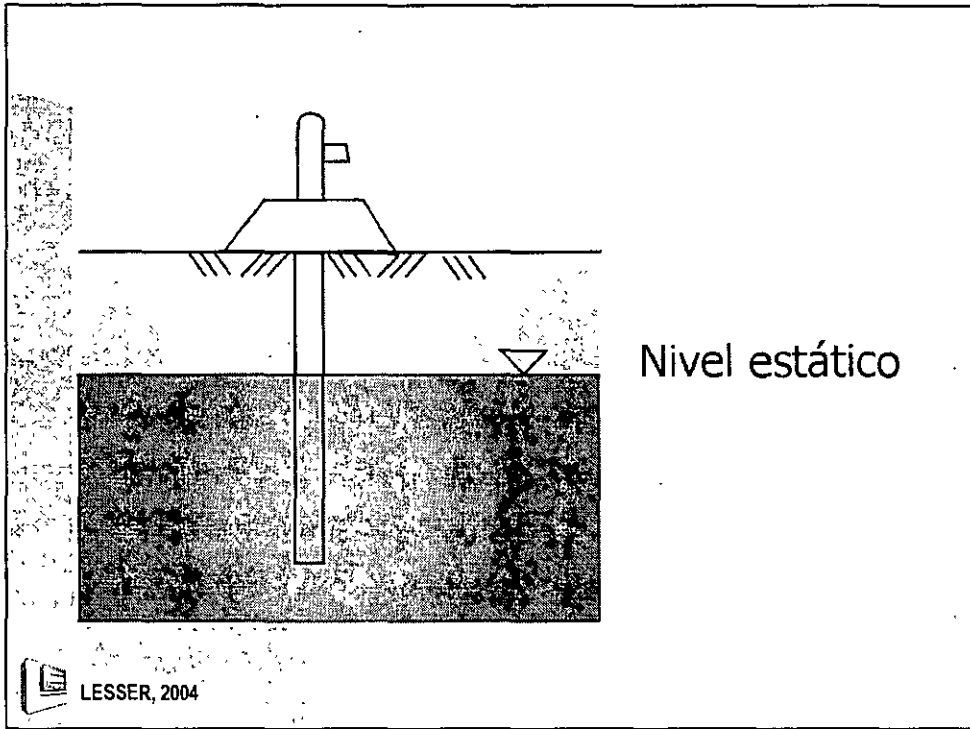


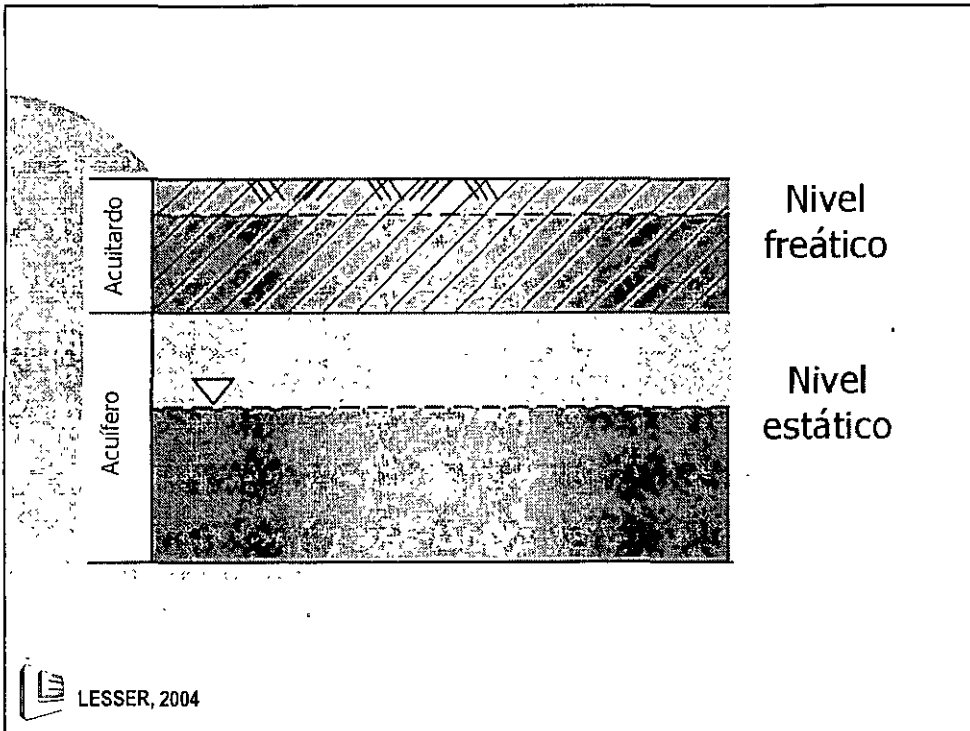
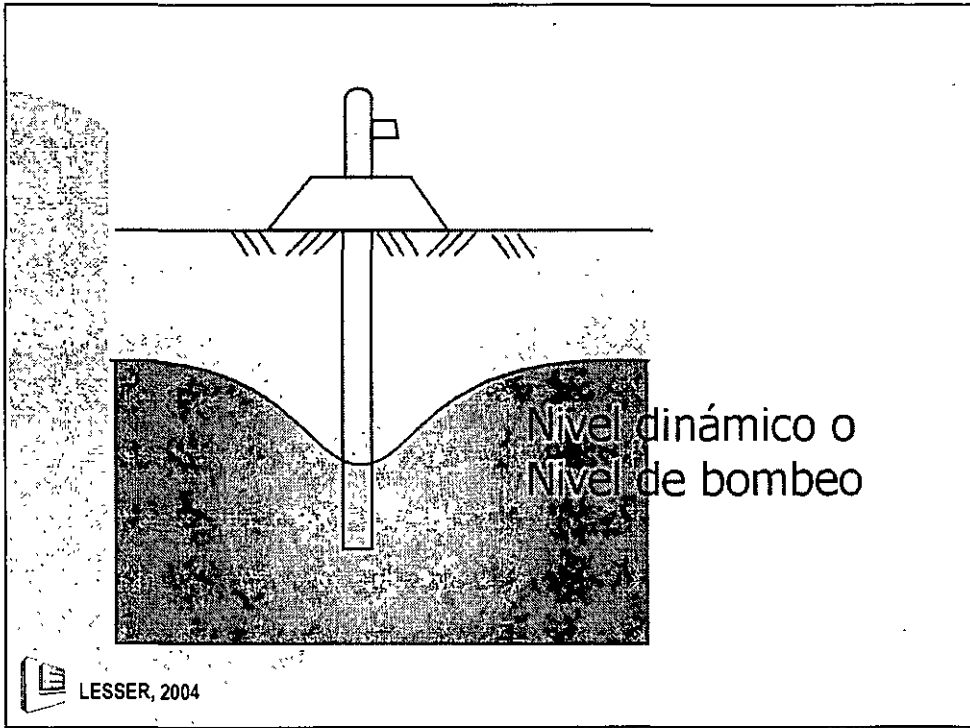
LESSER, 2004

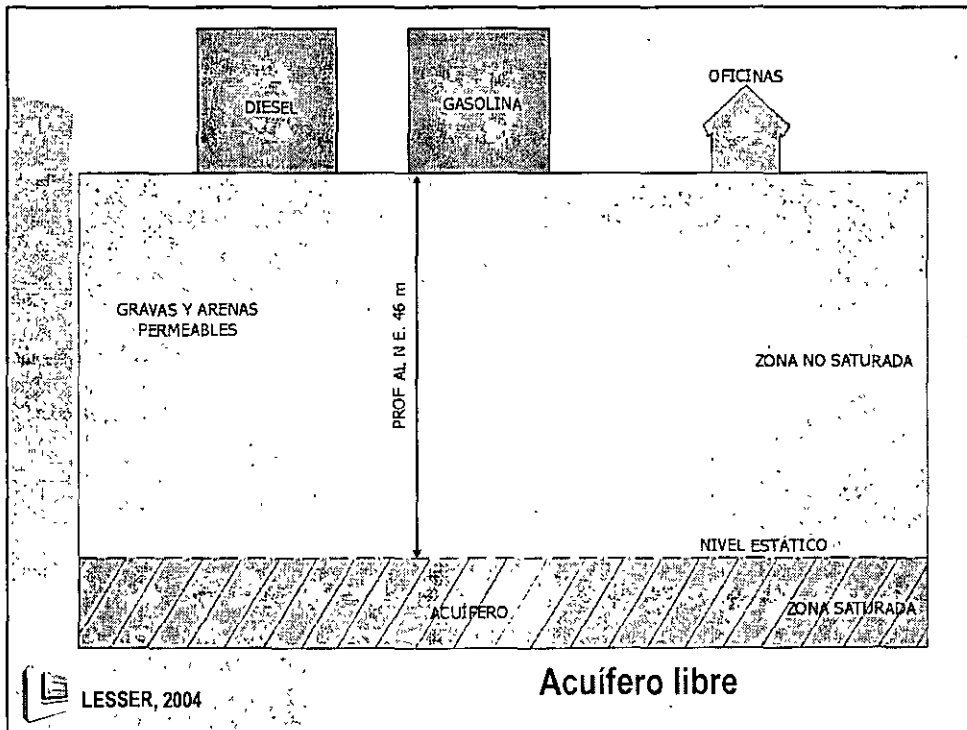
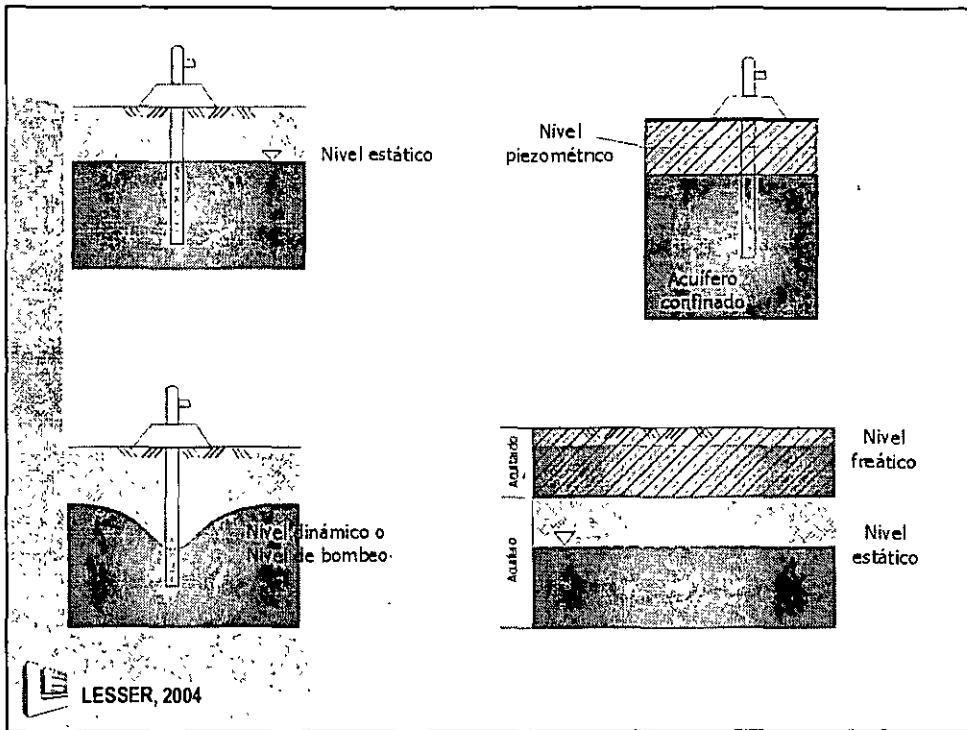




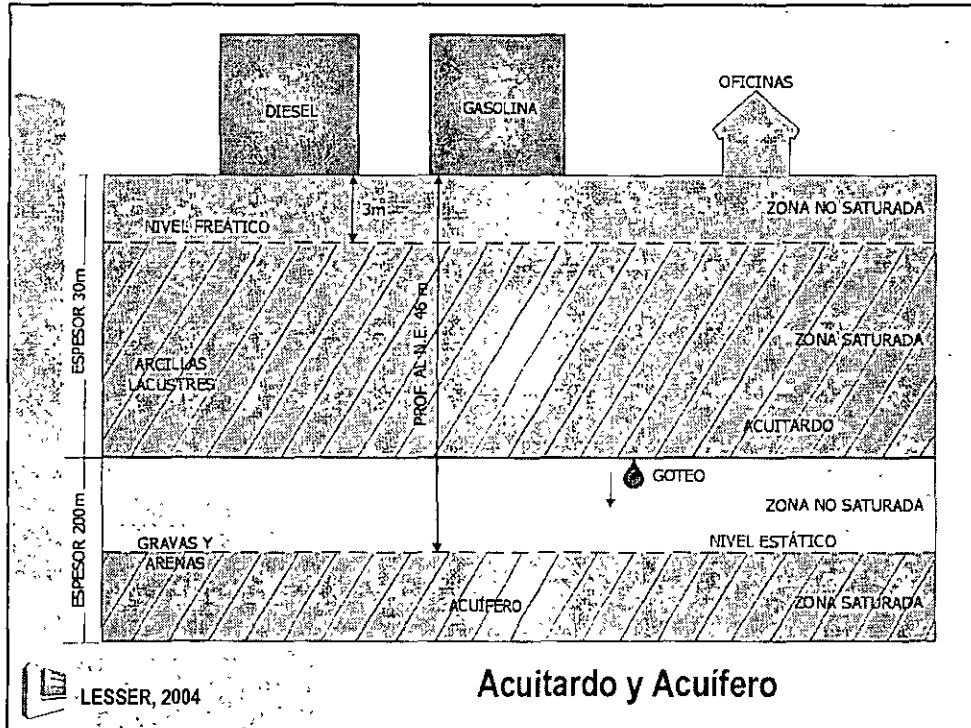
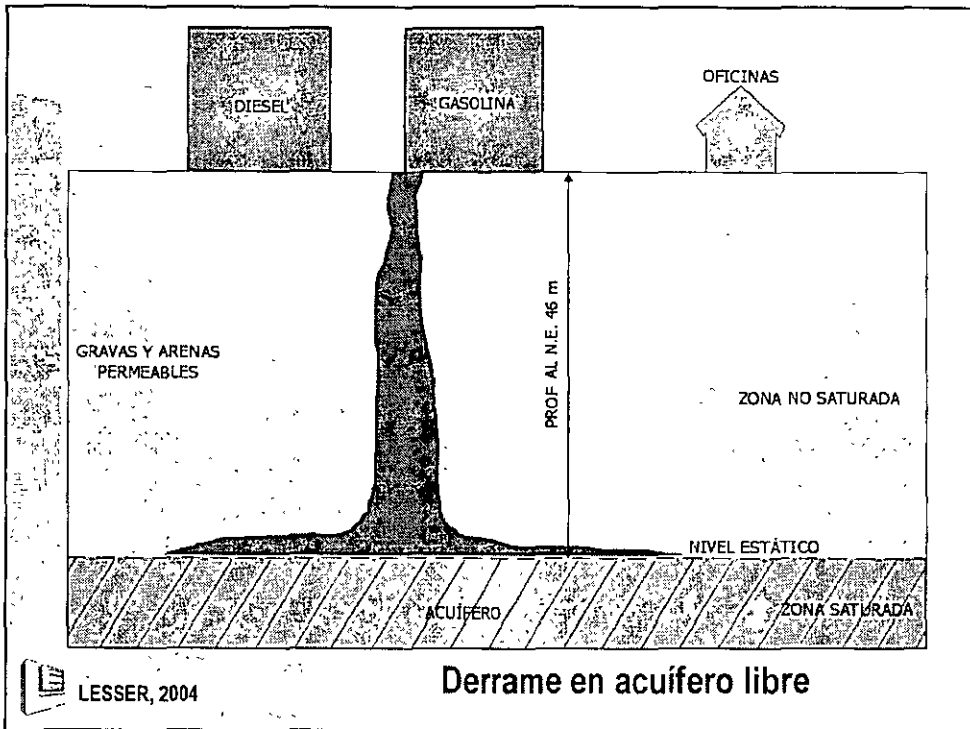


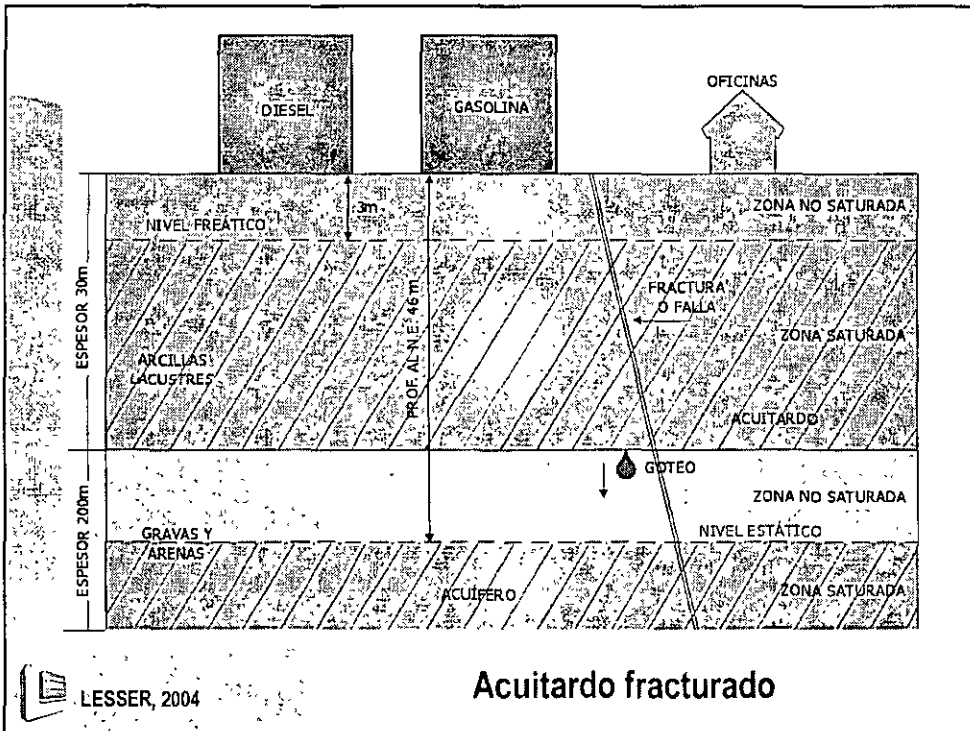
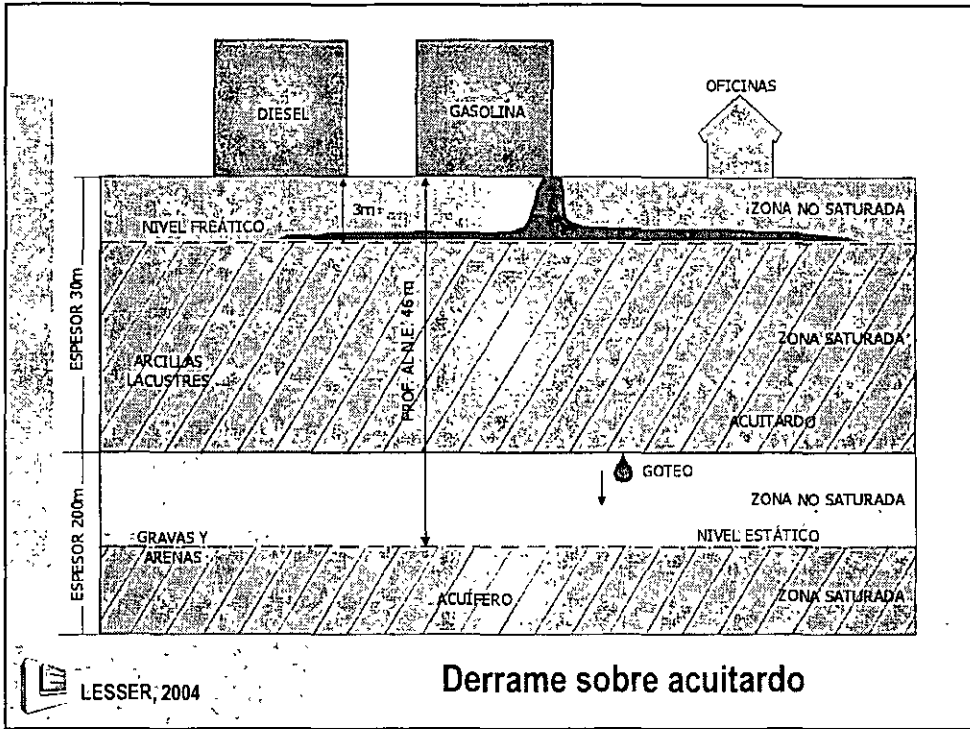


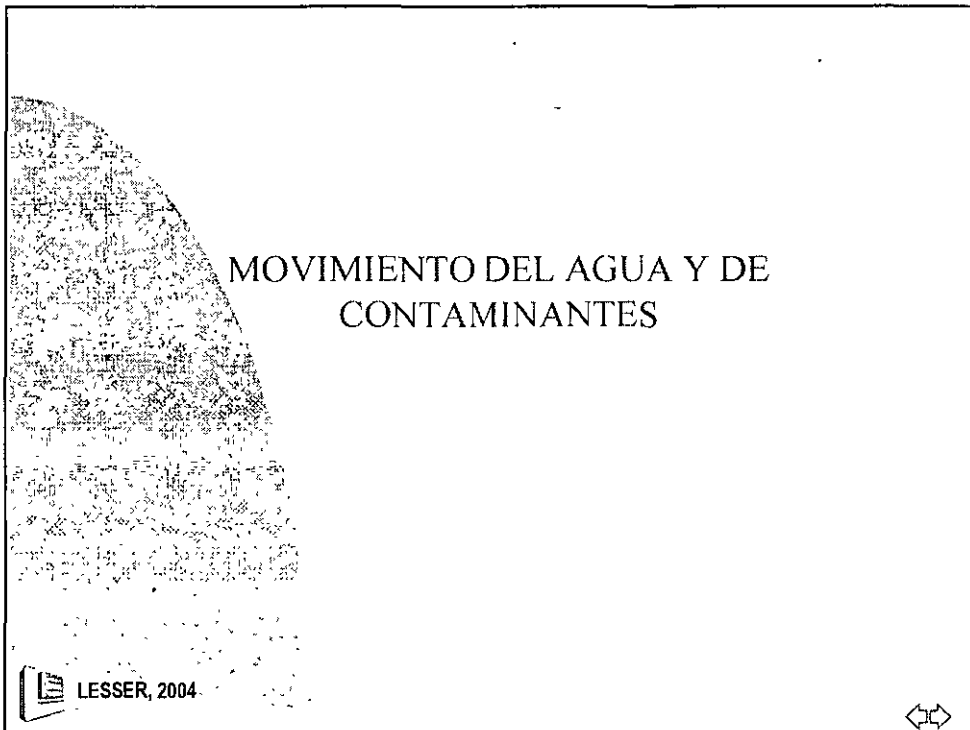
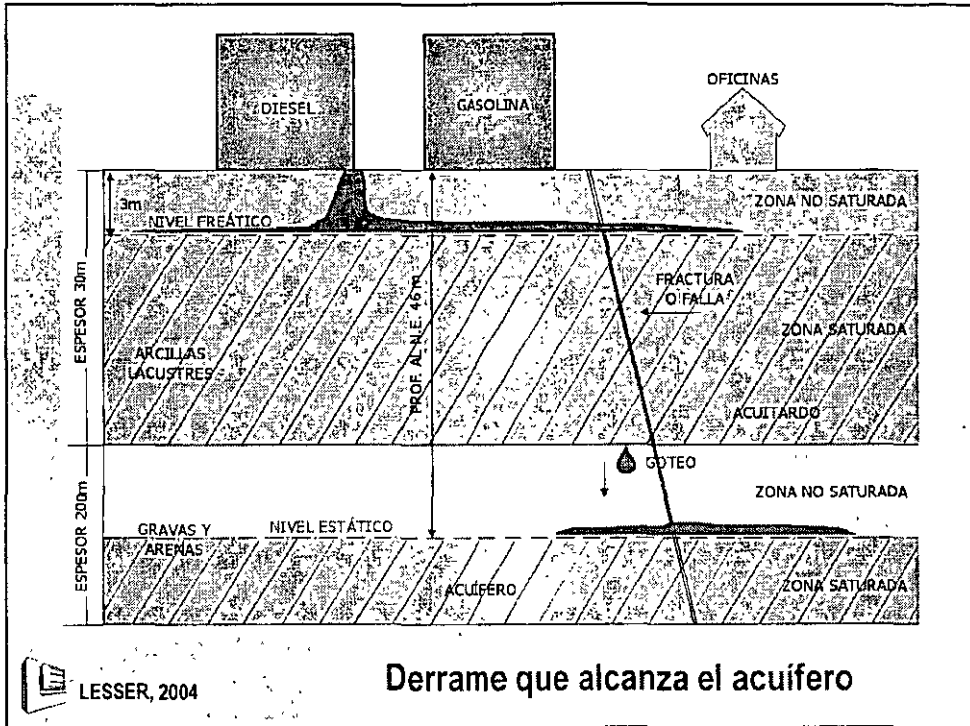


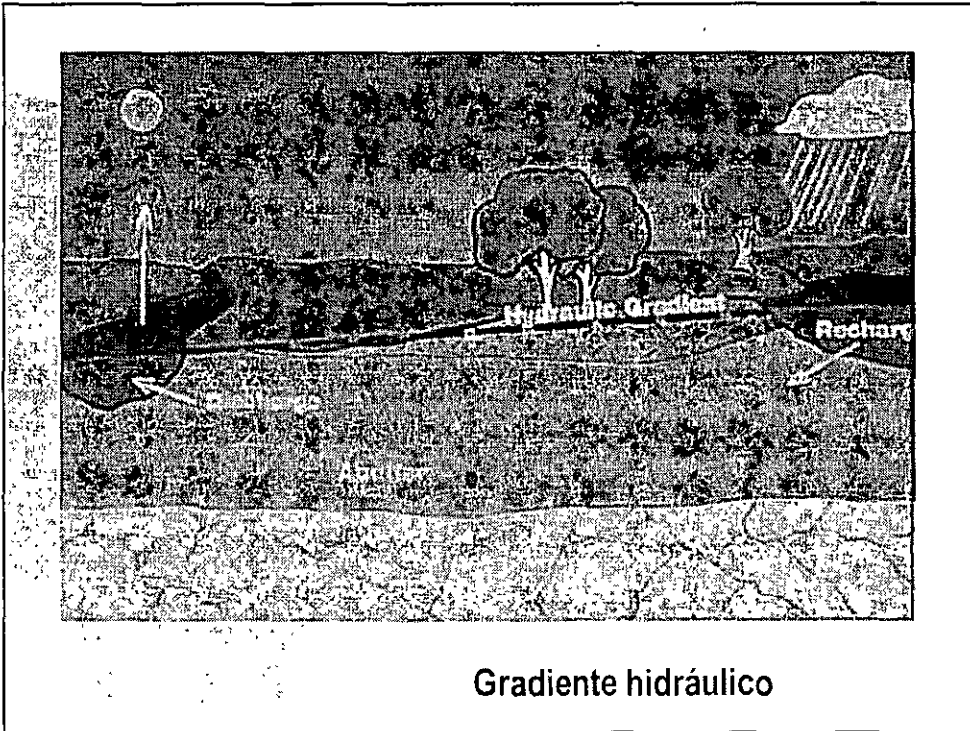
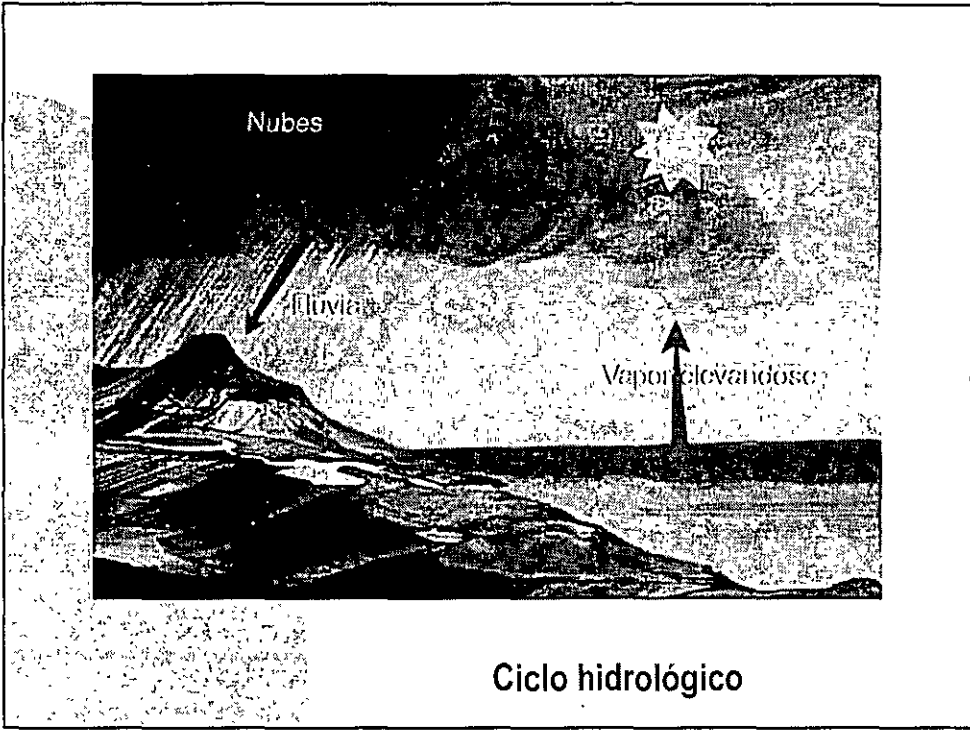


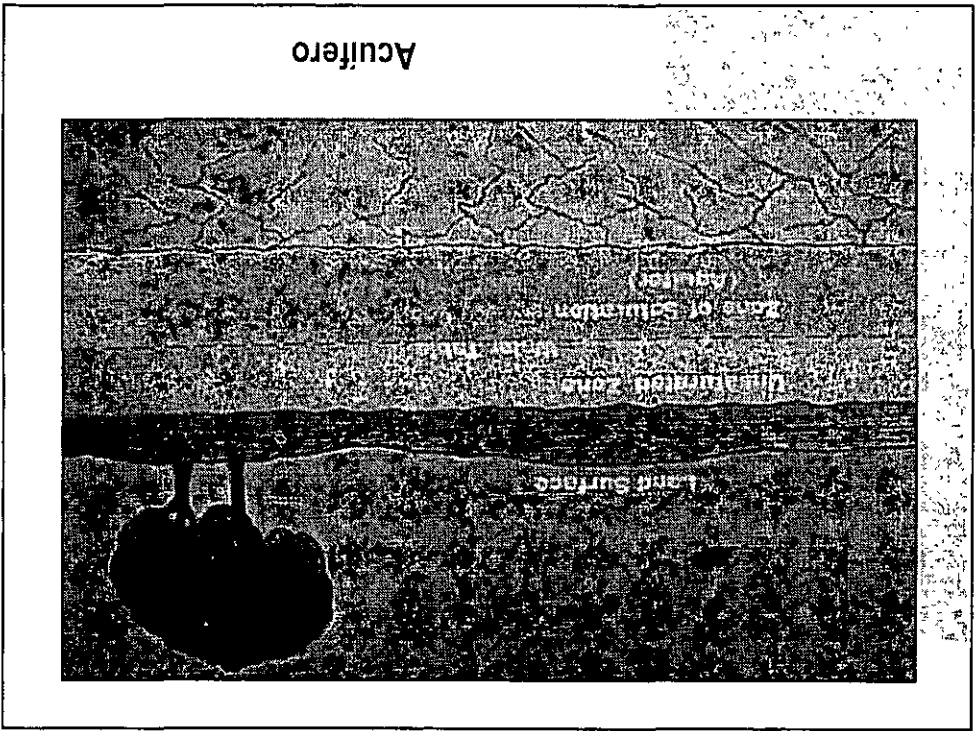
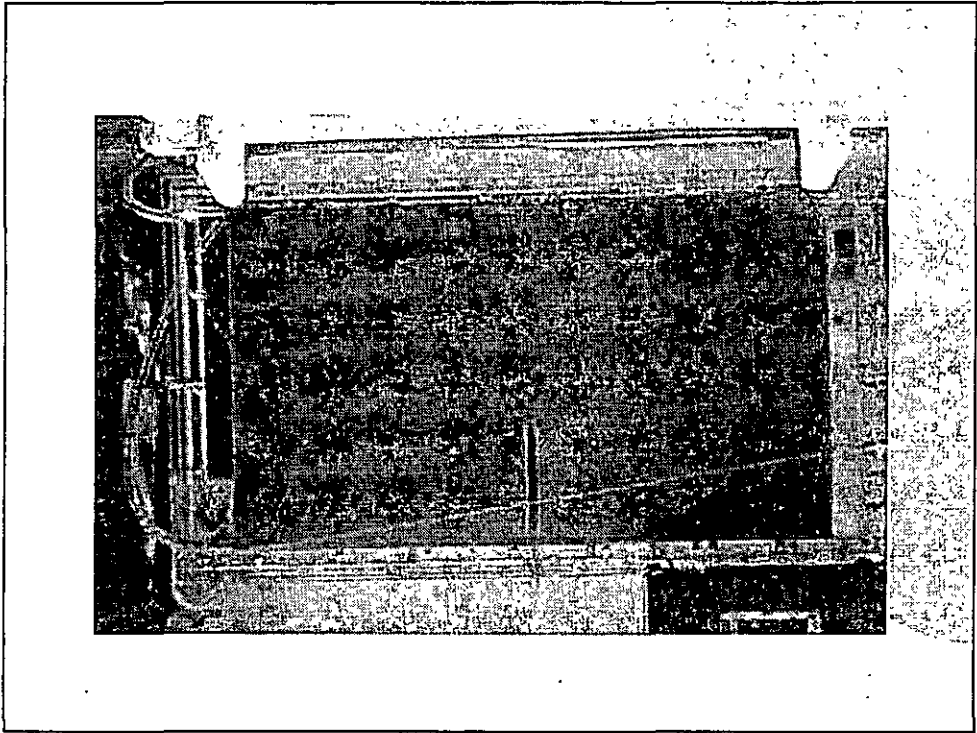




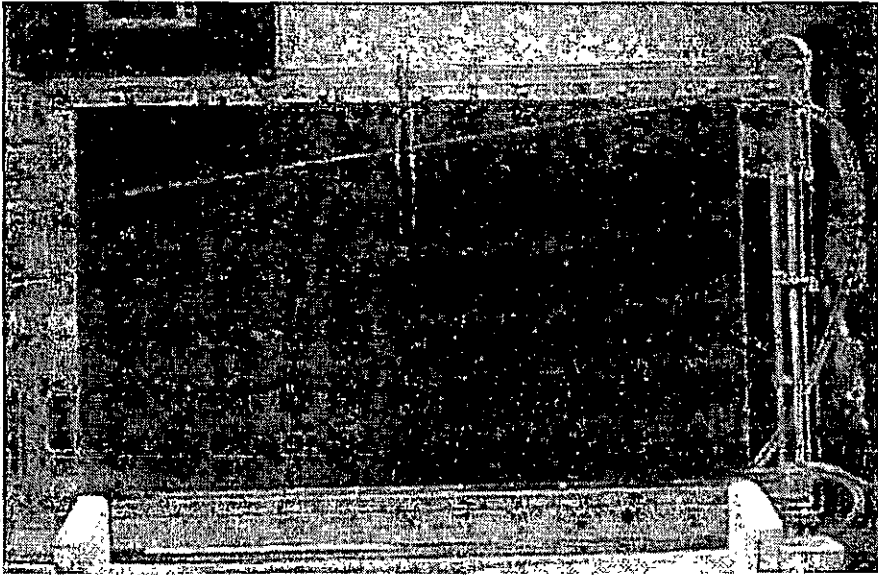






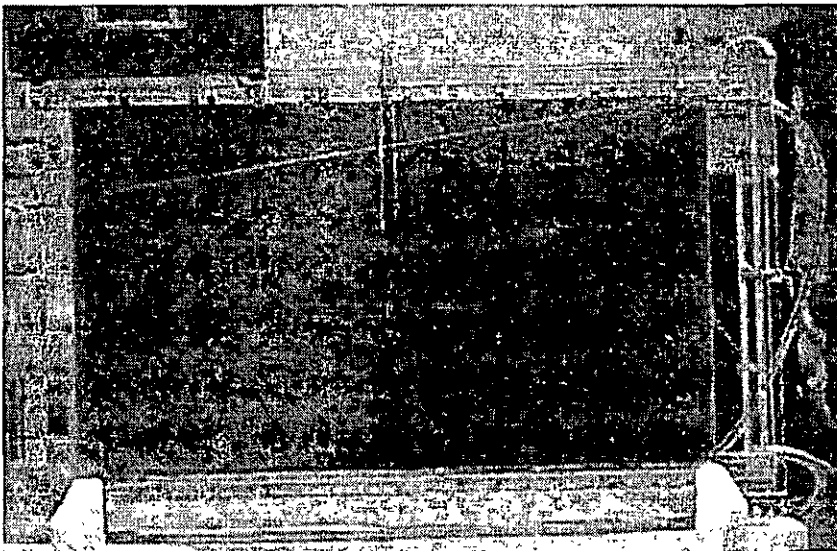


**Modelo de laboratorio**



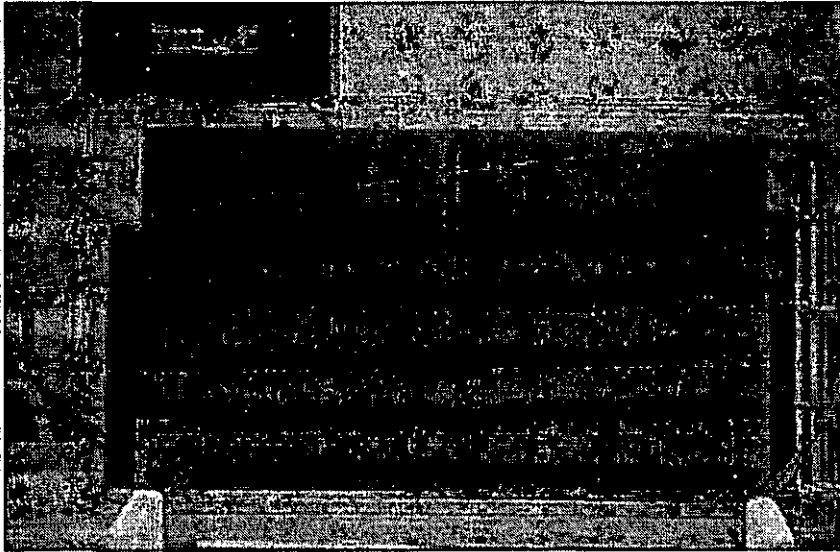
**Continua flujo (2)**

**Modelo de laboratorio**



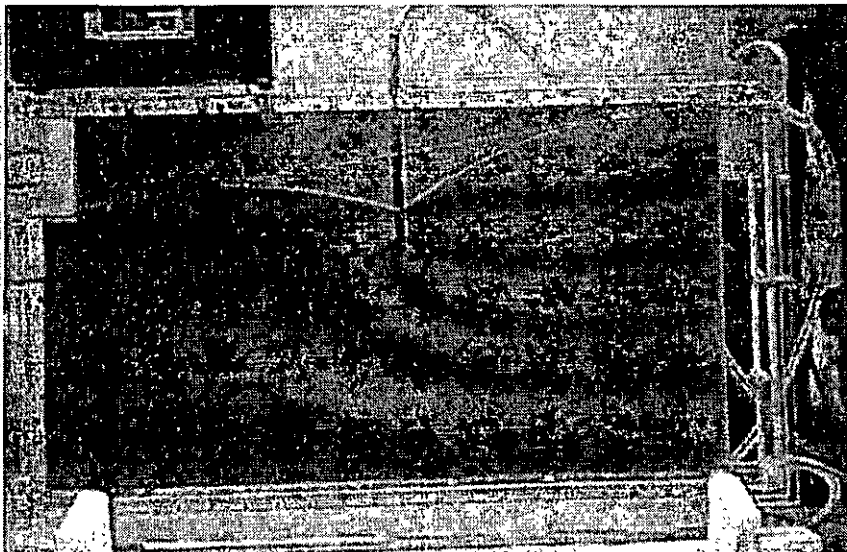
**Continua flujo (3)**

**Modelo de laboratorio**

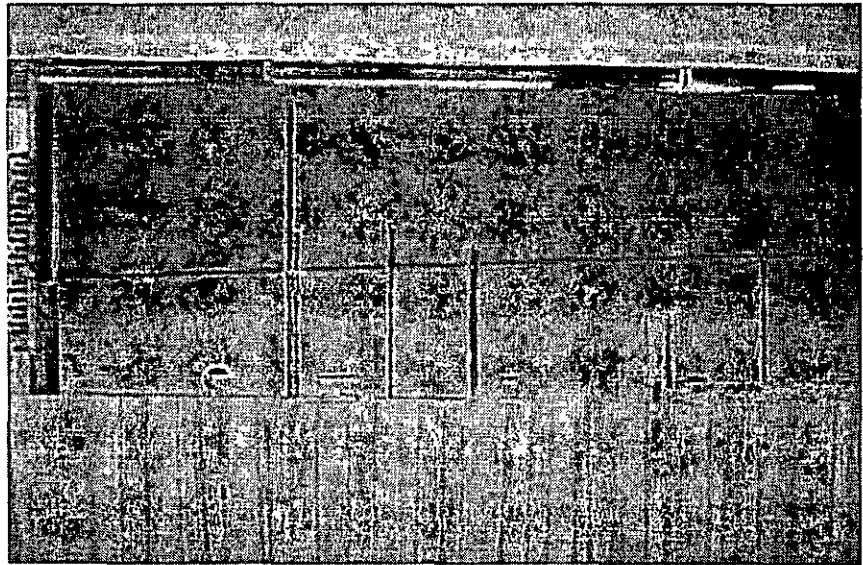
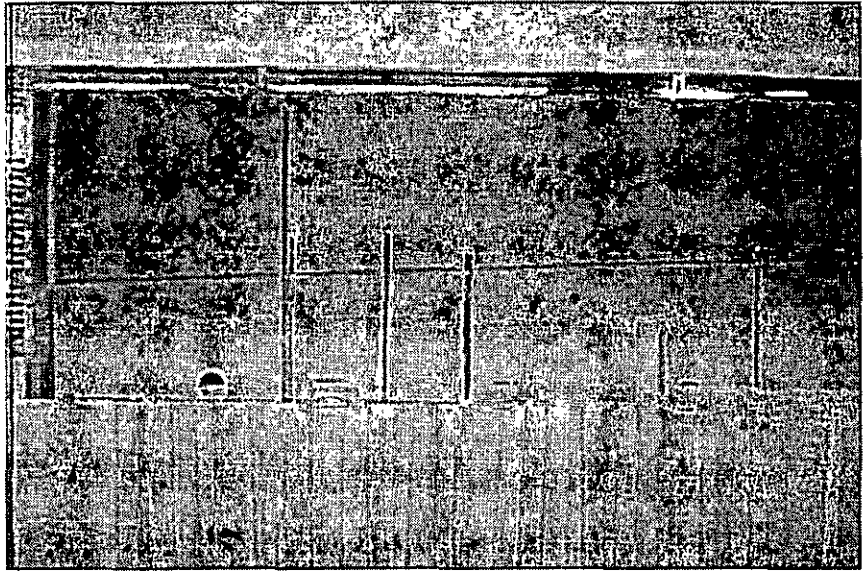


**Continua flujo (4)**

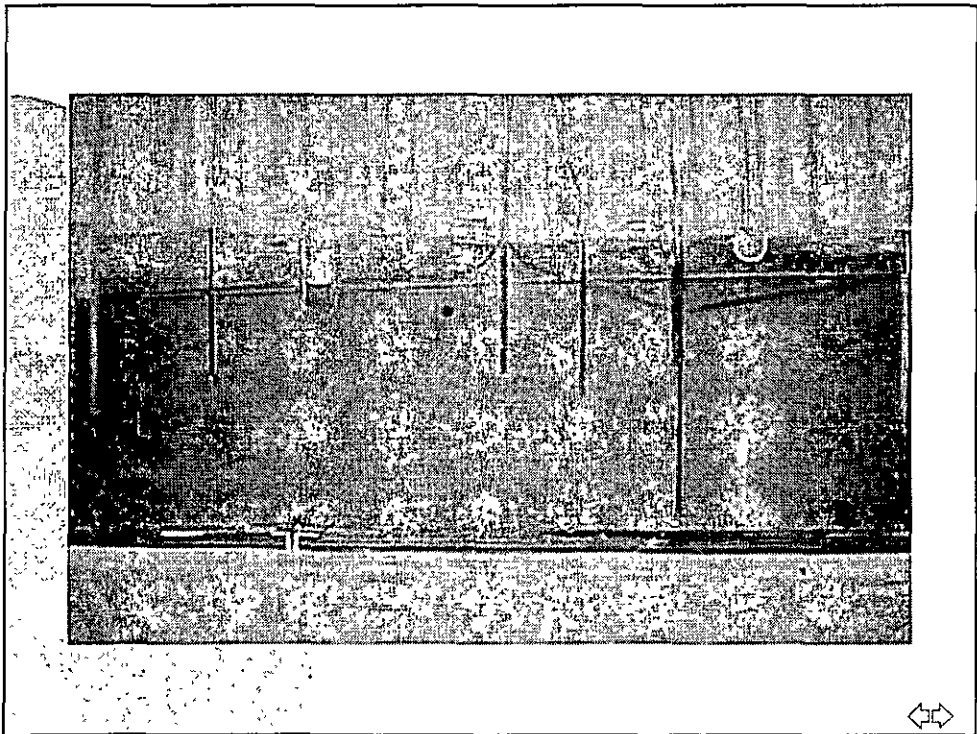
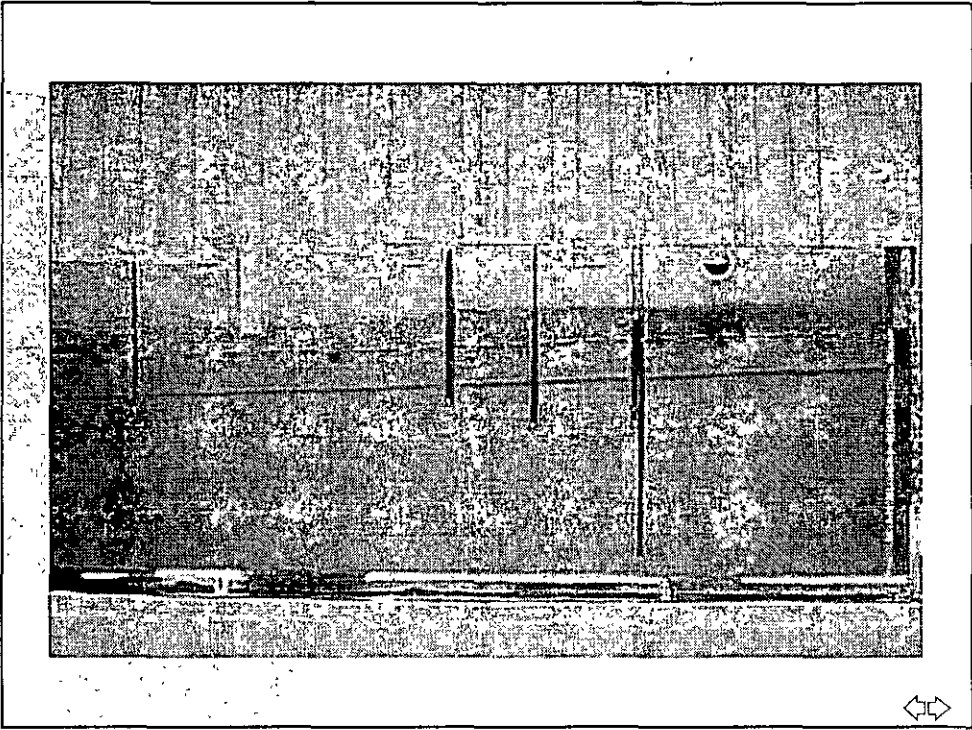
**Modelo de laboratorio**



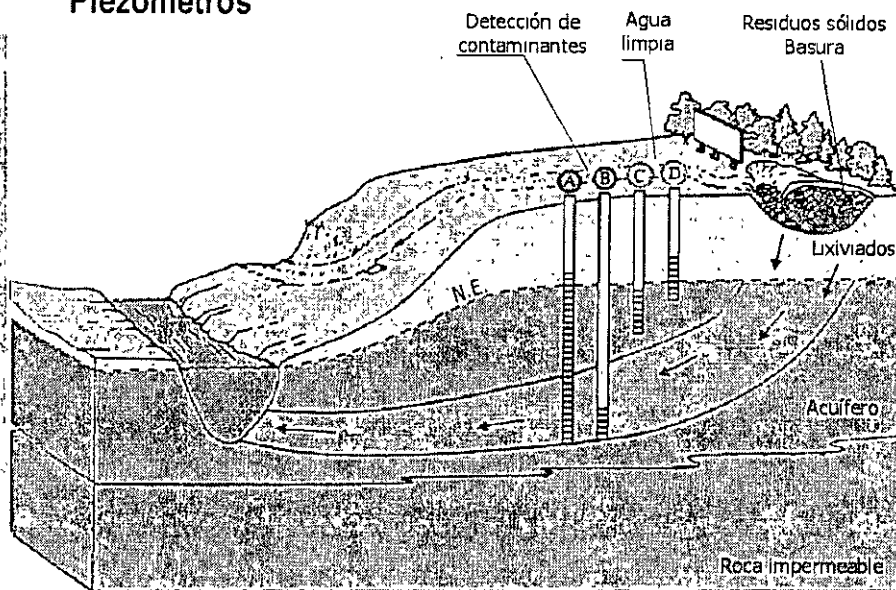
**Modificación del esquema de flujo por bombeo**



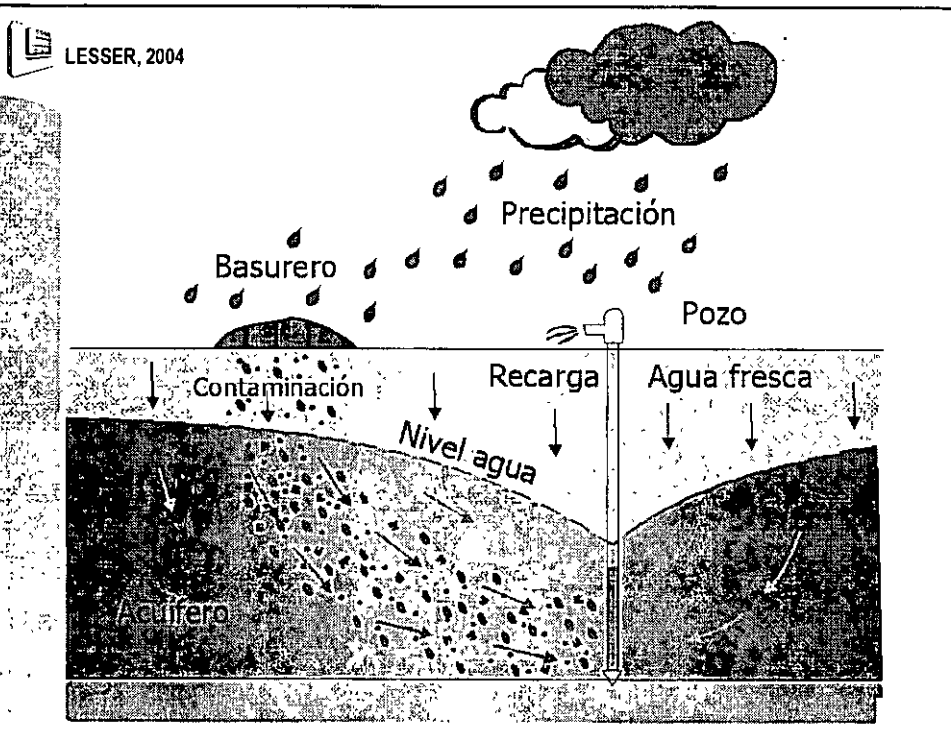




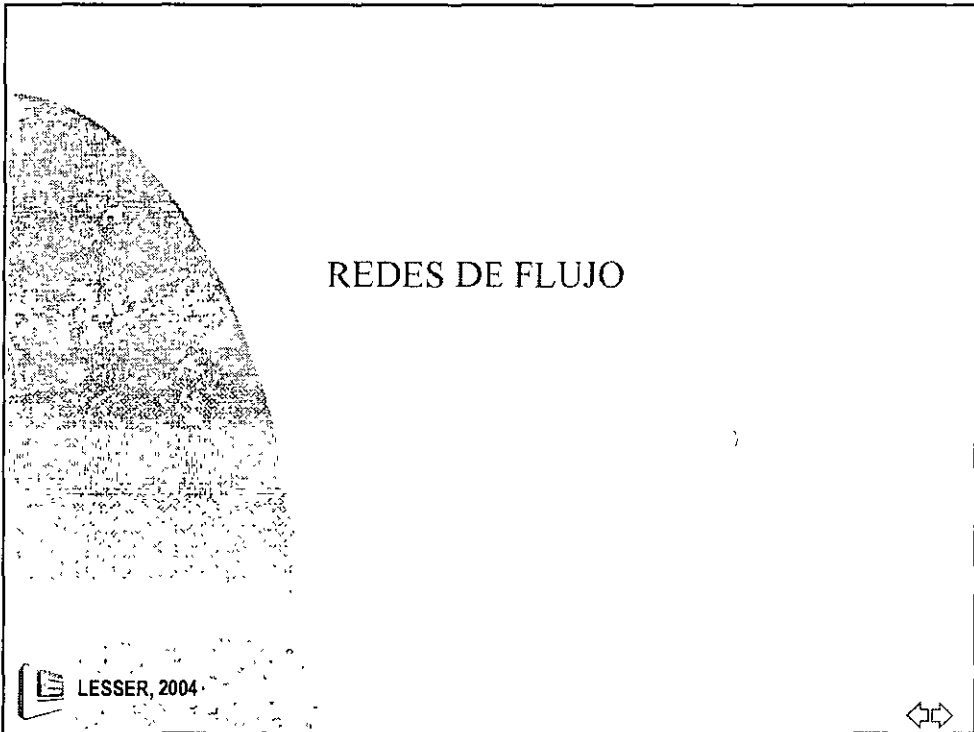
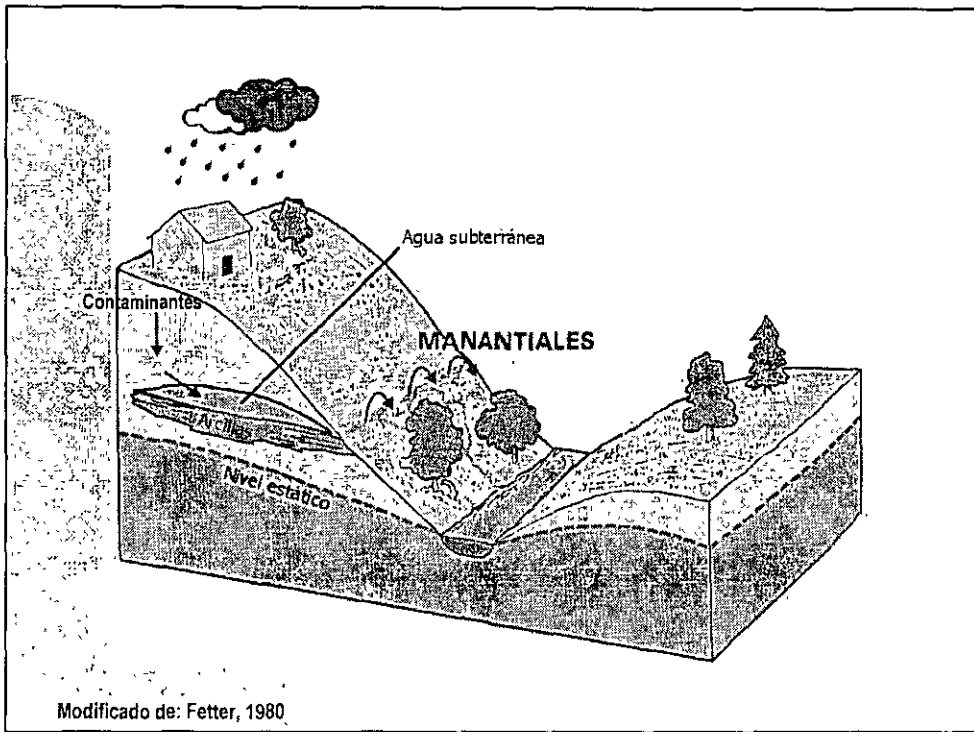
# Piezómetros



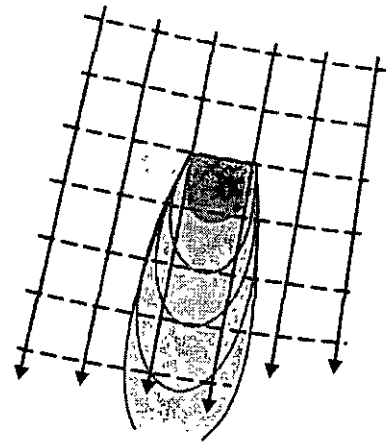
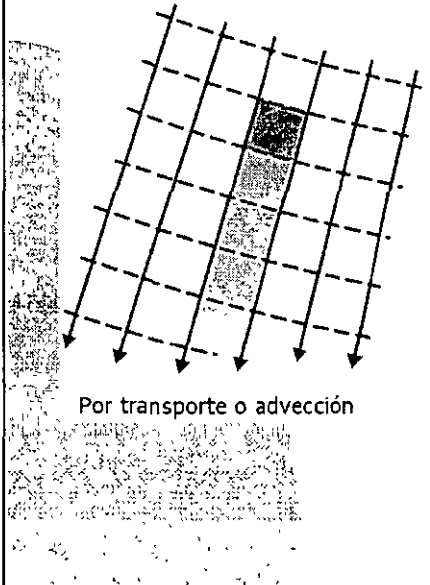
Modificado de: Fetter, 1993



LESSER, 2004

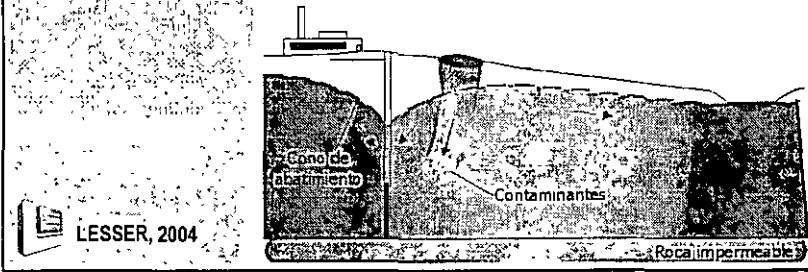
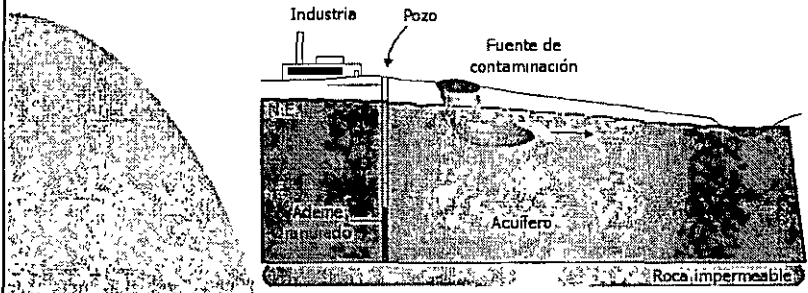


# Movimiento de contaminantes

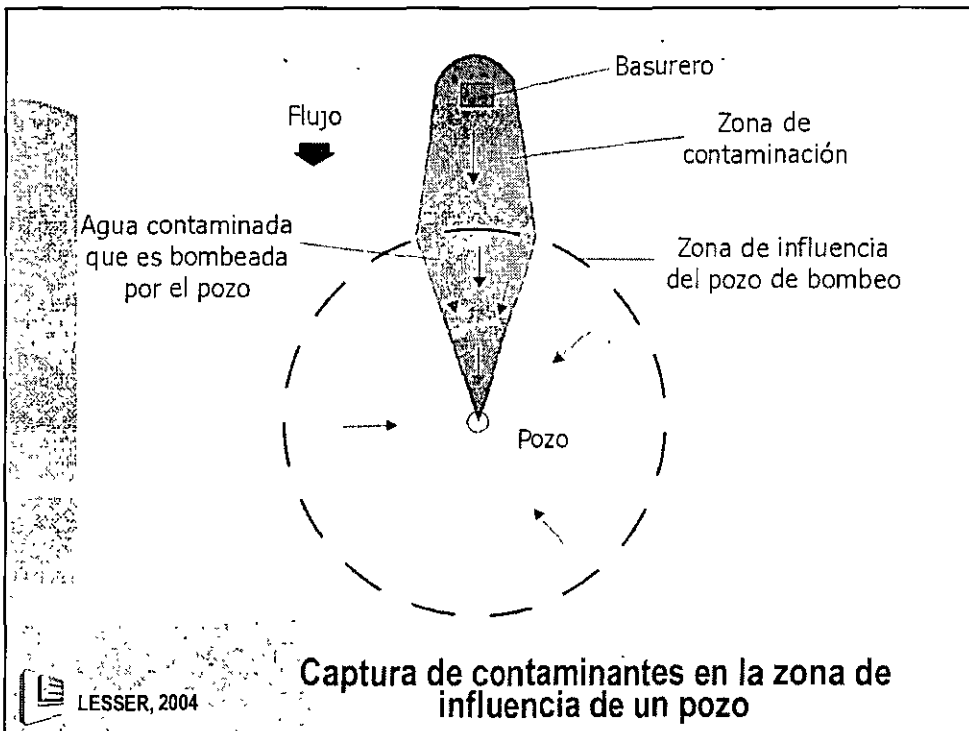
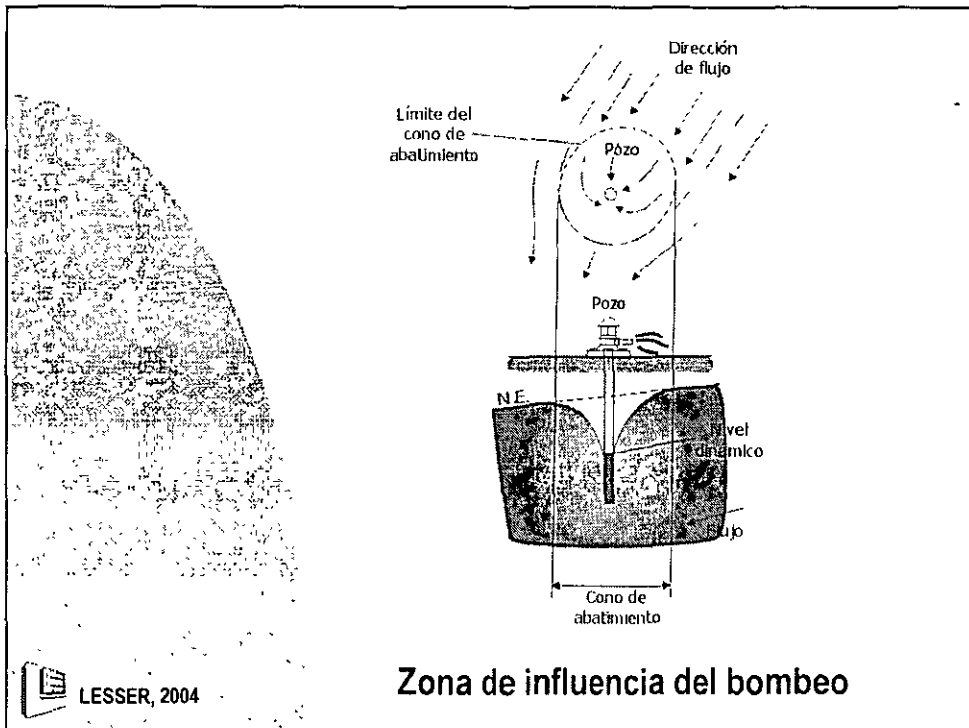


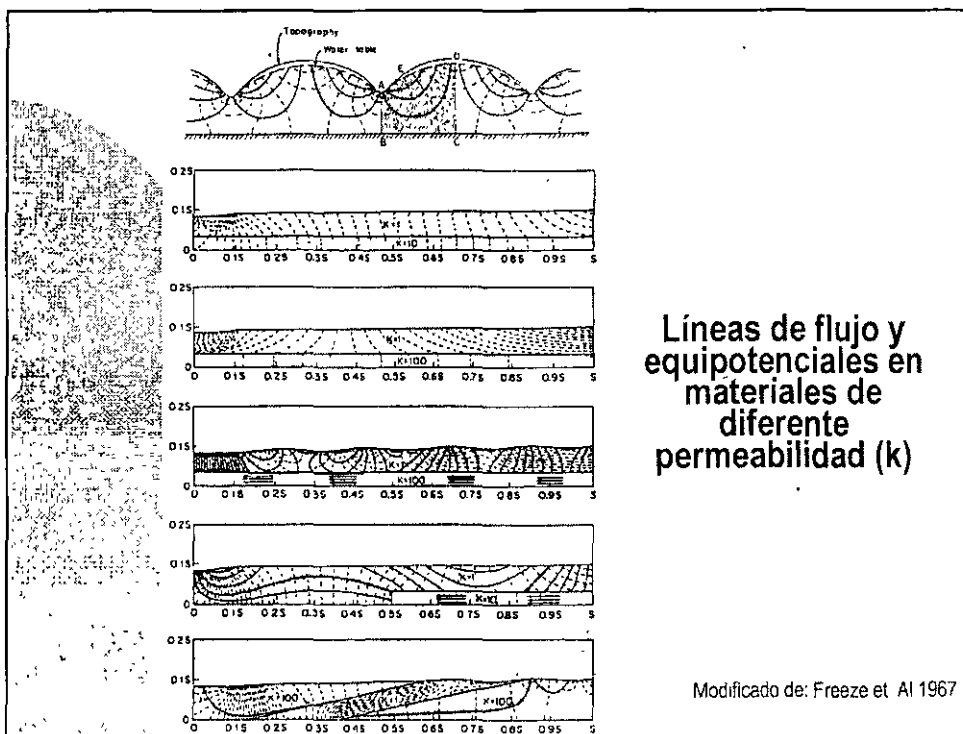
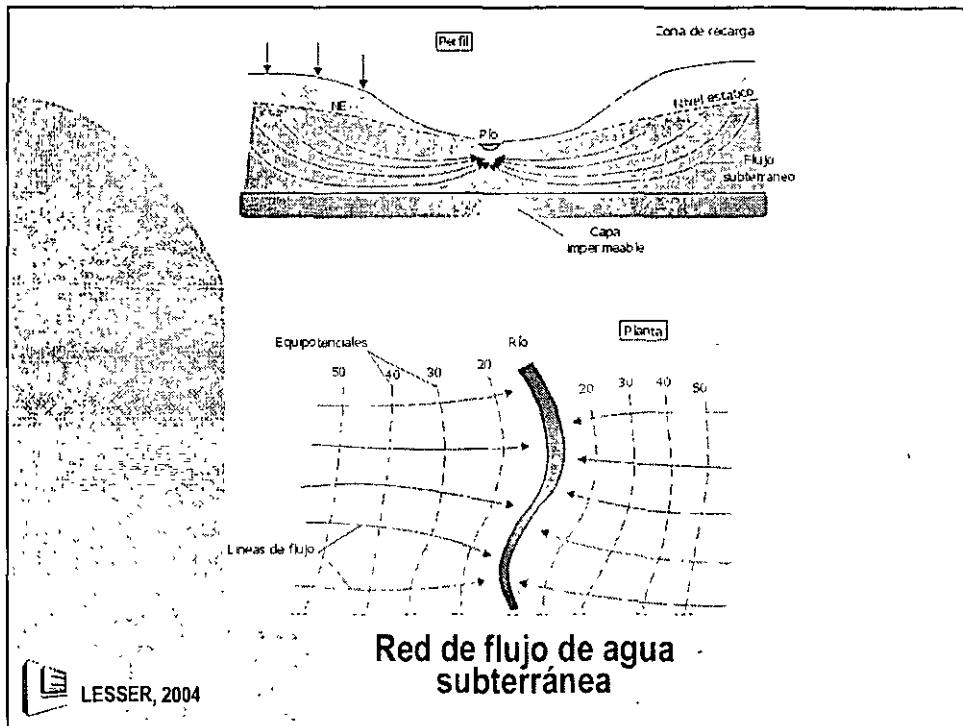
LESSER, 2004

# Contaminación y dirección del flujo subterráneo




LESSER, 2004





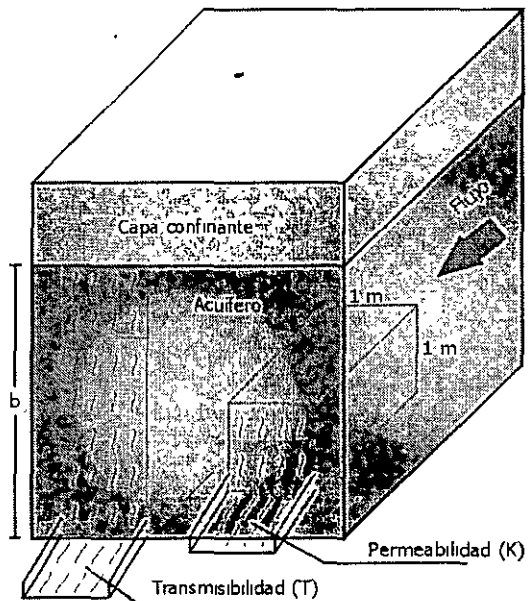
## DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

 LESSER, 2004



## Transmisibilidad y Permeabilidad

$b$  = Espesor del acuífero  
 $S$  = Coeficiente de almacenamiento  
 $S_s$  = Coeficiente específico =  $S/b$



 LESSER, 2004

# Rangos de permeabilidad

Table 2.2 Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability

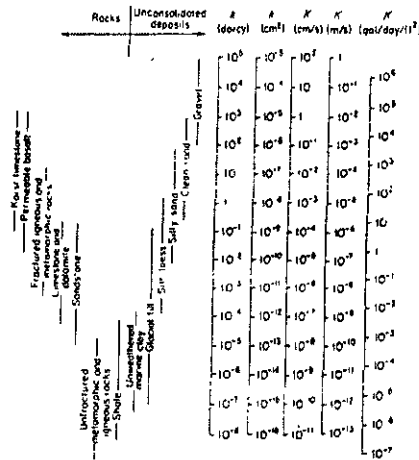


Table 2.3 Conversion Factors for Permeability and Hydraulic Conductivity Units

	Permeability, $k^*$			Hydraulic conductivity, $K$		
	cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	dy	m/s	ft/s	US gal/cm <sup>2</sup> -hr
cm <sup>2</sup>	1	$1.02 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^4$	$9.80 \times 10^{-1}$	$3.22 \times 10^2$	$1.85 \times 10^4$
m <sup>2</sup>	$9.29 \times 10^2$	1	$9.42 \times 10^{10}$	$9.11 \times 10^3$	$2.99 \times 10^4$	$1.71 \times 10^{13}$
darcy	$9.87 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-11}$	1	$9.66 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-5}$	$1.82 \times 10^4$
m/s	$1.02 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^4$	1	3.28	$2.12 \times 10^4$
ft/s	$3.11 \times 10^{-4}$	$3.55 \times 10^{-7}$	$3.15 \times 10^4$	$3.05 \times 10^{-4}$	1	$6.46 \times 10^4$
US gal/cm <sup>2</sup> -hr	$4.2 \times 10^{-18}$	$4.83 \times 10^{-21}$	$4.49 \times 10^{-7}$	$4.71 \times 10^{-11}$	$1.55 \times 10^{-8}$	1

De: Freeze y Cherry, 1979

\*To obtain  $K$  in ft/s, multiply  $k$  in cm<sup>2</sup> by  $1.05 \times 10^{-3}$ .

Porosidad (n)

$$n = V_h/V_t$$

$V_h$  = Volumen de huecos  
 $V_t$  = Volumen total

Porosidad efectiva ( $S_y$ ) = Rendimiento específico

$$S_y = V_d/V_t$$

$V_d$  = Volumen drenado

Coefficiente de almacenamiento (S)

Acuífero libre entre 0.02 y 0.30

Acuífero confinado entre 0.001 y 0.00001

(K) Permeabilidad = Conductividad hidráulica

(T) Transmisibilidad

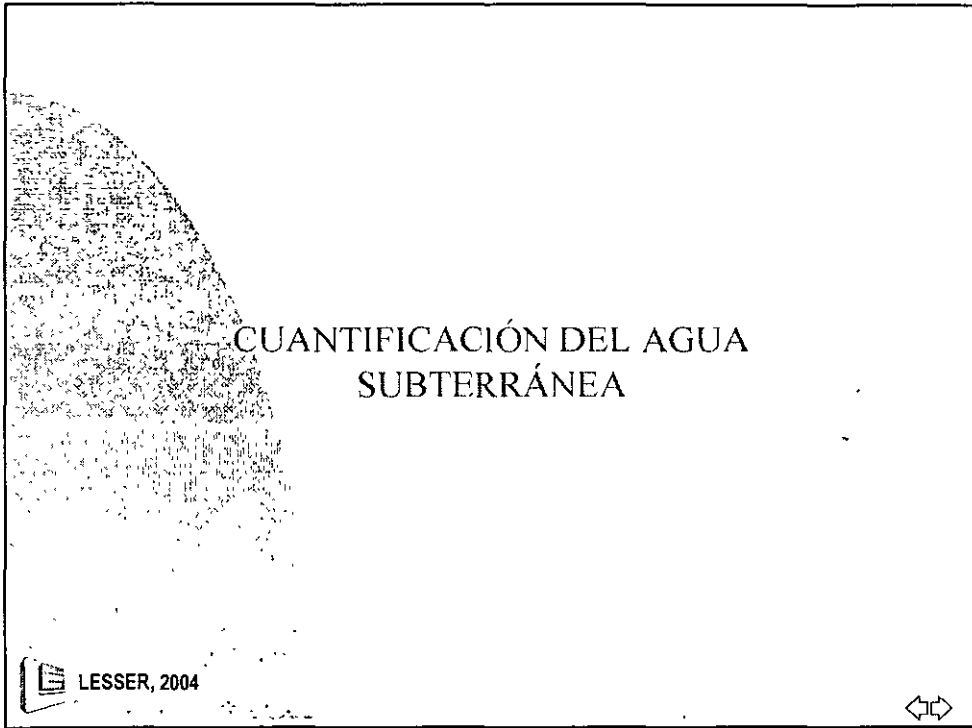
Flujo en una franja de espesor  $b$  (ver figura)

$b$  = espesor del acuífero;  $T=kb$


$S_s$  = Coeficiente específico =  $S / b$

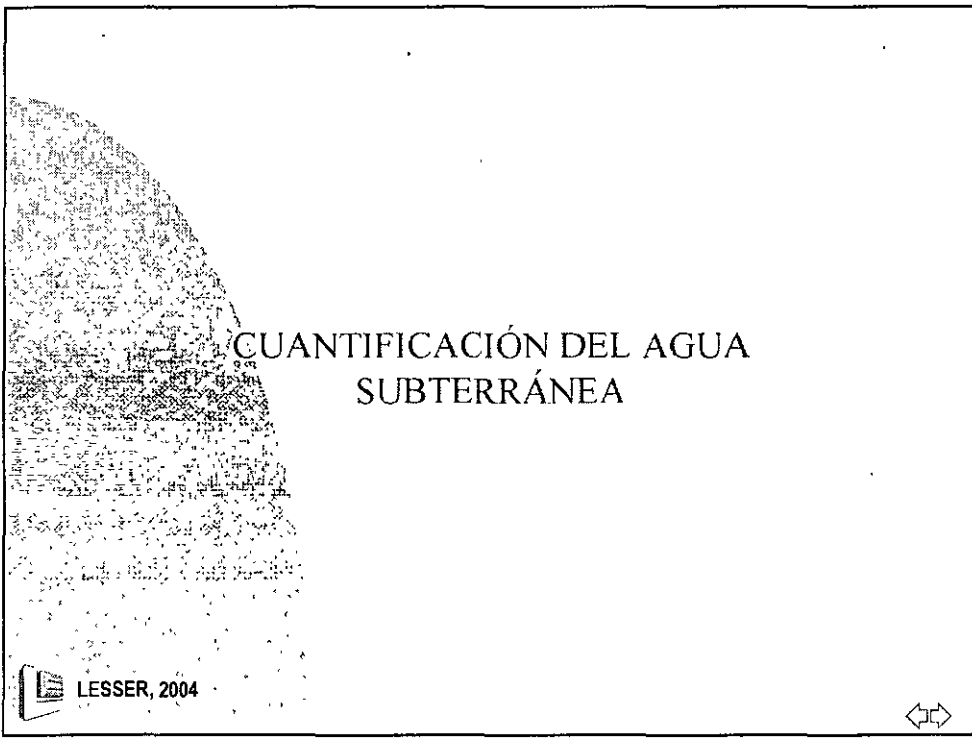







CUANTIFICACIÓN DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA

 LESSER, 2004

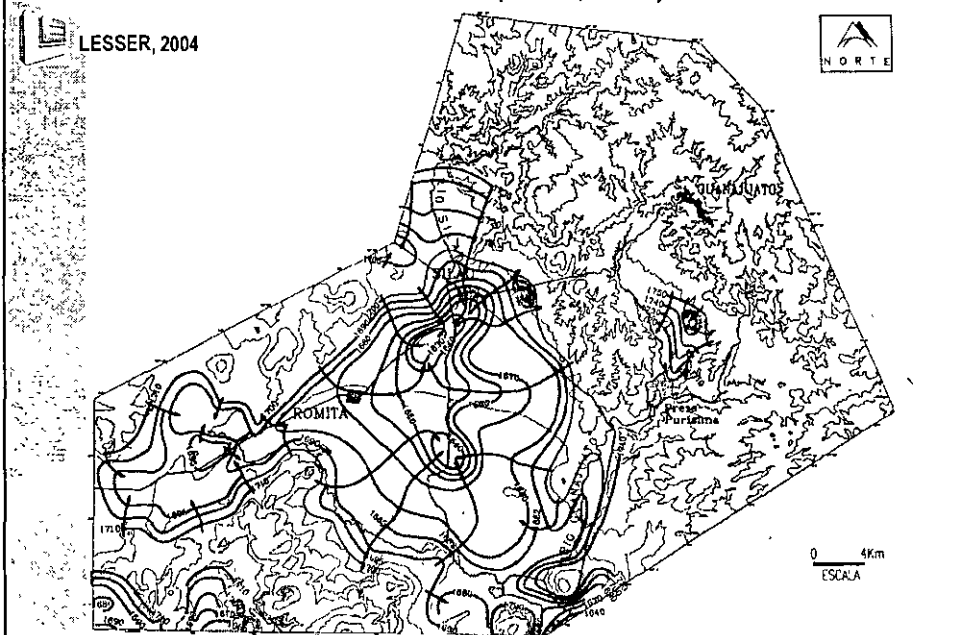


CUANTIFICACIÓN DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA

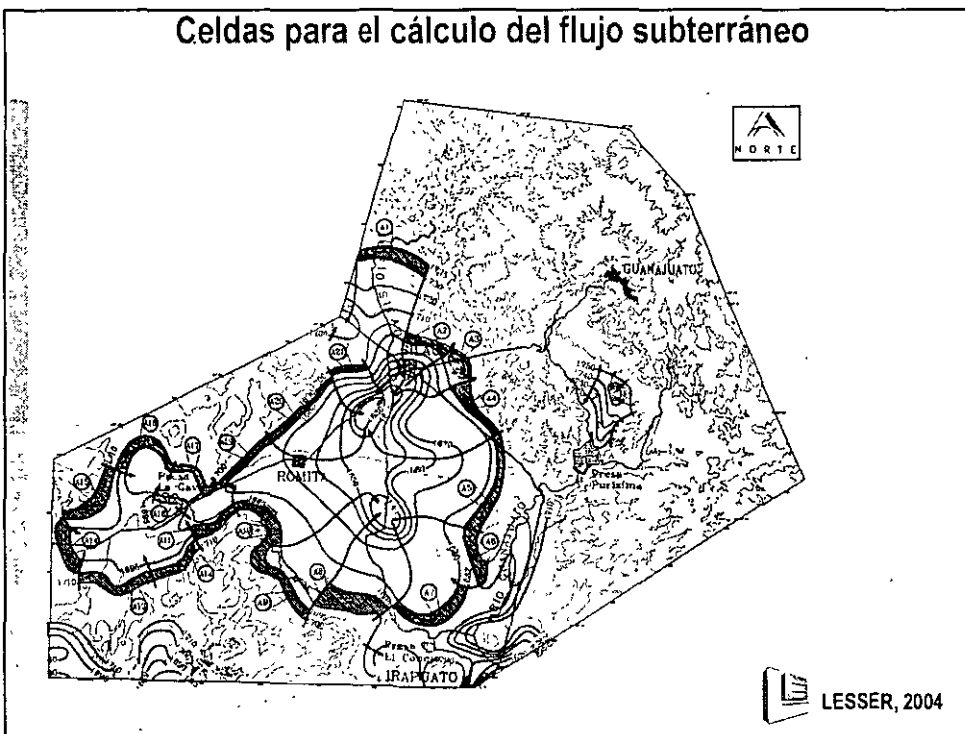
 LESSER, 2004



### Configuración de la elevación del NE y dirección del flujo subterráneo (Silao, Gto.)



### Celdas para el cálculo del flujo subterráneo



## Cálculo de entradas de agua por flujo subterráneo

CELDA	LARGO (L) km.	ANCHO (b) km.	GRADIENTE HIDRAULICO x E-03	TRANSMISI- BILIDAD m <sup>2</sup> /seg x 10	CAUDAL m <sup>3</sup> /seg.	VOLUMEN x 10 <sup>6</sup> M <sup>3</sup> /año
A-1	1 000	6.500	5.00	0 0030	0 098	3 074
A-2	0 700	4 000	14 28	0 0015	0 086	2 701
A-3	0 250	3 100	40 00	0 0010	0 124	3 910
A-4	0 750	5 500	13 33	0 0010	0 073	2 312
A-5	0 750	8 700	13 33	0 0010	0 116	3 657
A-6	1 000	4 500	10 00	0 0020	0 090	2 838
A-7	0 900	7 200	2 22	0 0040	0 064	2 016
A-8	1 500	5 500	3 33	0 0040	0 073	2 310
A-9	0 800	8 000	6 25	0 0040	0 200	6 306
A-10	0 900	6 000	11 11	0 0030	0 200	6 305
A-11	0 700	4 300	14 28	0 0030	0 184	5 808
A-12	0 700	5 000	14 28	0 0040	0 286	9 005
A-13	0 750	6 500	13 33	0 0040	0 347	10 928
A-14	1 000	4 000	5 00	0 0030	0 060	1 892
A-15	1 100	6 300	9 09	0 0040	0 229	7 223
A-16	0 700	7 000	14 28	0 0030	0 300	9 455
A-17	0 500	5 200	20 00	0 0030	0 312	9 837
A-18	0 500	3 500	20 00	0 0030	0 210	6 621
A-19	0 600	5 800	16 66	0 0040	0 387	12 187
A-20	0 600	7 500	16 66	0 0040	0 500	15 759
A-21	0 500	3 200	20 00	0 0030	0 192	6 054
						130.197



LESSER, 2004

## VULNERABILIDAD O RIESGO GEOHIDROLÓGICO



LESSER, 2004



## Vulnerabilidad o riesgo geohidrológico

### PARÁMETROS UTILIZADOS

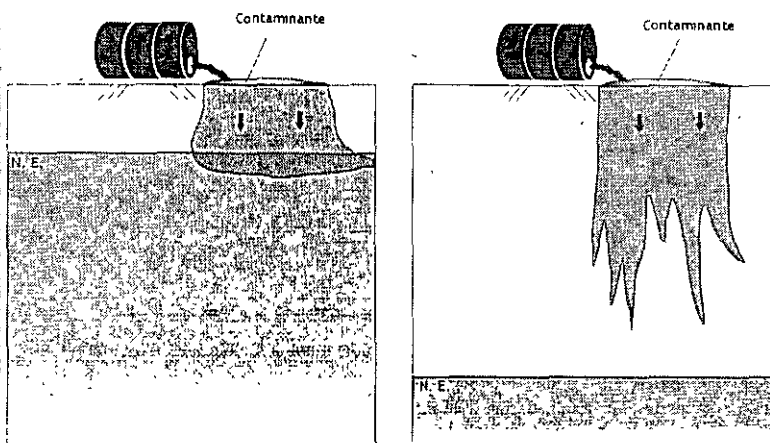
Profundidad al nivel del agua	D
Recarga	R
Tipo de roca	A
Tipo de suelo	S
Pendiente del terreno	T
Zona vadosa	I
Permeabilidad	C

 LESSER, 2004

## Valores de vulnerabilidad de acuerdo a la profundidad al nivel estático

Rango en metros.	Valor
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 específico: 5	

### Profundidad al nivel estático



Nivel estático somero  
contaminación directa

Nivel estático profundo  
disminuye el grado de  
contaminación al acuífero

LESSER, 2004



LESSER, 2004

### Valores de vulnerabilidad de acuerdo a la profundidad al nivel estático

**EJEMPLO**

Profundidad al nivel del agua  
3m  
 $9 \times 5 = 45$

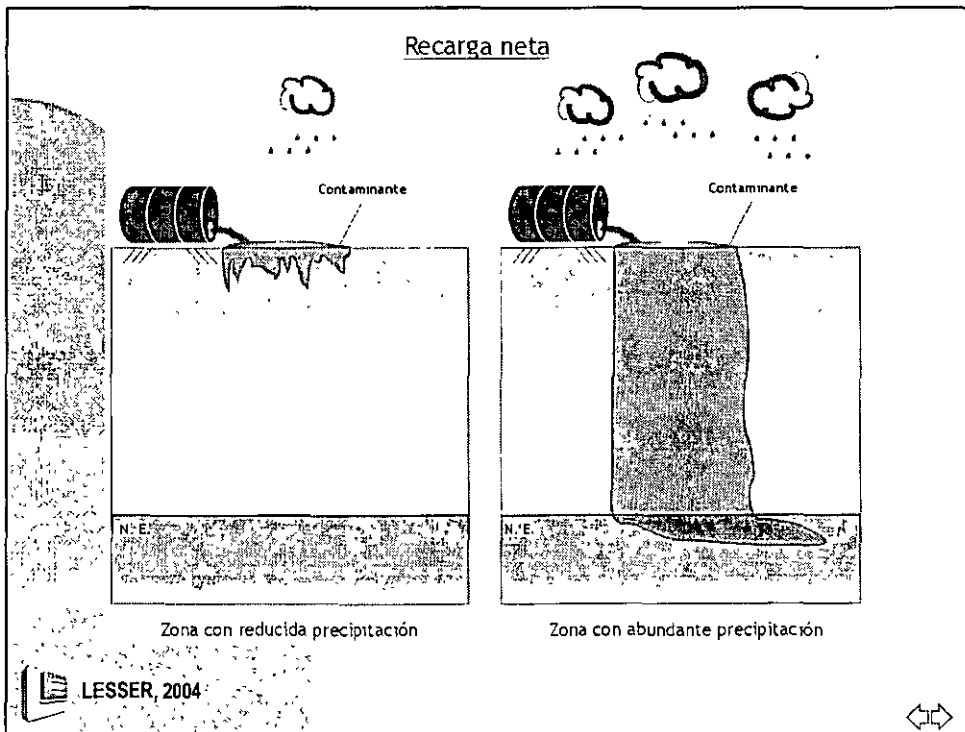
Rango en metros	Valor
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1
Peso específico: 5	



LESSER, 2004

## Recarga neta

Rango en mm	Valor
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9
Peso específico: 4	



### Recarga neta

Rango en mm	Valor
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9
Peso específico: 4	

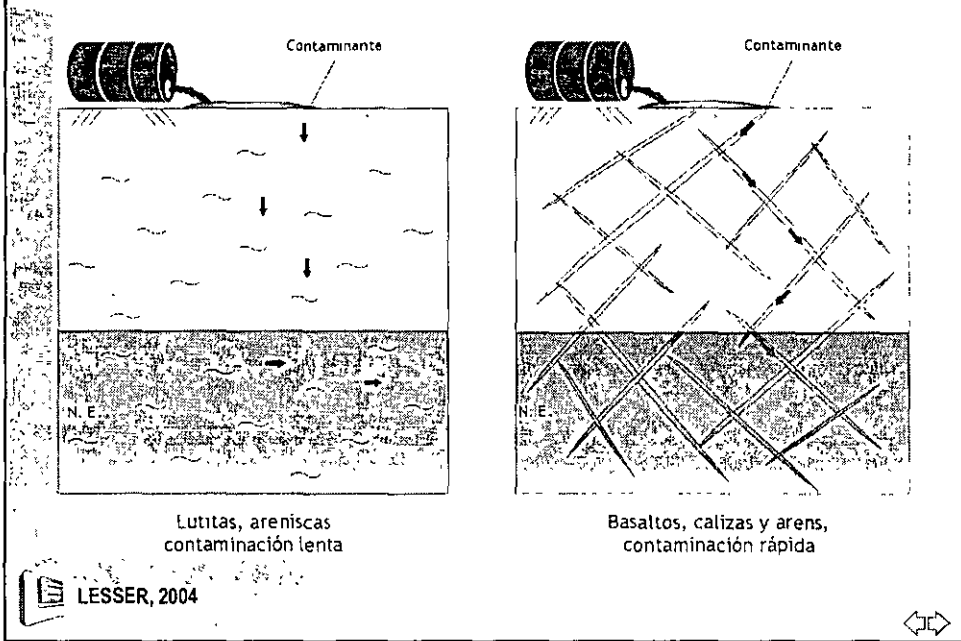
Recarga  
300m  
 $9 \times 4 = 36$

EJEMPLO

### Tipo de roca

Tipo	Rango	Valor Típico
Lutita	1-3	2
Rocas ígneas y metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas y metamórficas 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 cástica	9-10	10
Peso específico: 3		

### Tipo de roca acuífera



LESSER, 2004

### Tipo de roca

Tipo	Rango	Valor Típico
Lutita	1-3	2
Rocas ígneas y metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas y metamórficas 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 cástica	9-10	10
Peso específico: 3		

**EJEMPLO**

Tipo de roca  
Arena y grava  
 $6 \times 3 = 18$



### Tipo de suelo

Tipo	Valor
Capa delgada o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Carbón	8
Agregado de arcillas	7
Mezcla Arenosa	6
Mezcla	5
Mezcla limosa	4
Mezcla arcillosa	3
Abono	2
Arcilla	1
Peso específico. 2	

### Tipo de suelo

Tipo	Valor
Capa delgada o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Carbón	8
Agregado de arcillas	7
Mezcla Arenosa	6
Mezcla	5
Mezcla limosa	4
Mezcla arcillosa	3
Abono	2
Arcilla	1
Peso específico. 2	

#### EJEMPLO

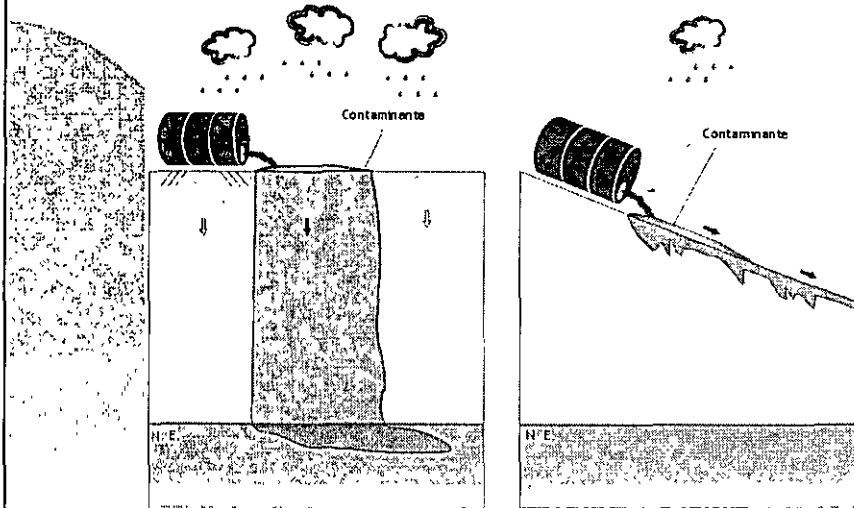
Tipo de suelo
Arcilla
1x2=2

## Pendiente del terreno (ángulo de inclinación en %)

Rango	Valor
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1
Peso específico: 1	



### Pendiente del terreno



Baja pendiente  
facilita infiltración

Fuente pendiente  
agua tiende a escurrir  
por la superficie



**Pendiente del terreno  
(ángulo de inclinación en %)**

Pendiente  
del terreno

0-2%

10x1 10

EJEMPLO

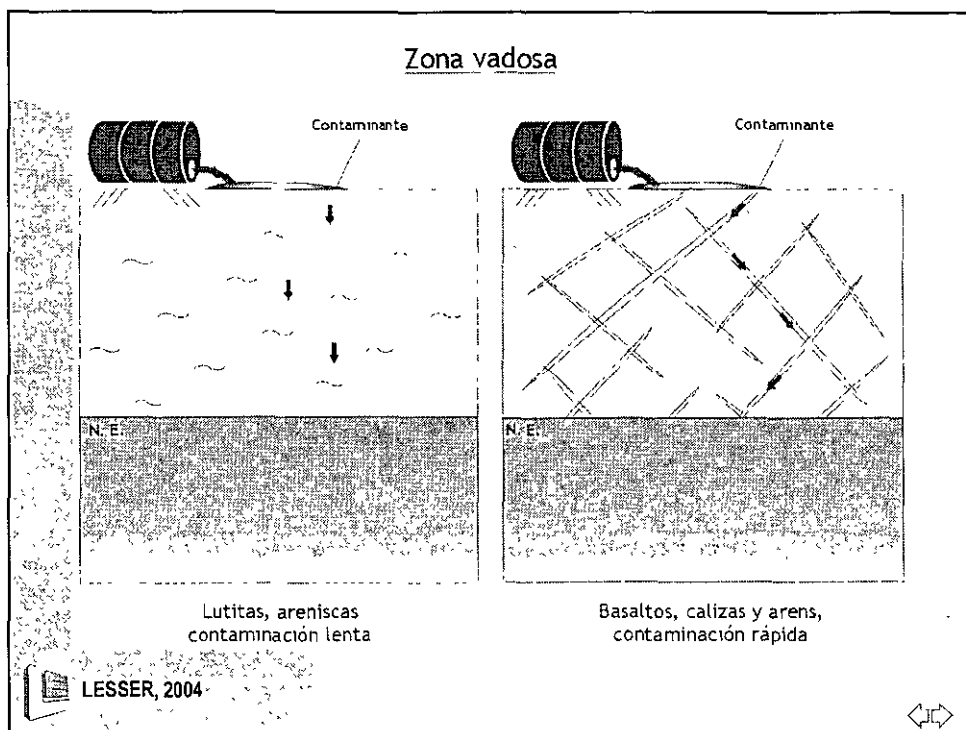
Rango	Valor
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1
Peso específico: 1	



**Zona vadosa**

Tipo	Rango	Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo o arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca		
Horizontes de caliza, arenisca y lutita	4-8	6
Arena y grava con alto contenido de limo y arcilla	4-8	6
Rocas ígneas y metamórficas	4-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza carstica	8-10	10
Peso específico: 5		





### EJEMPLO

Zona vadosa  
Arena y grava  
8x5- 40

### Zona vadosa

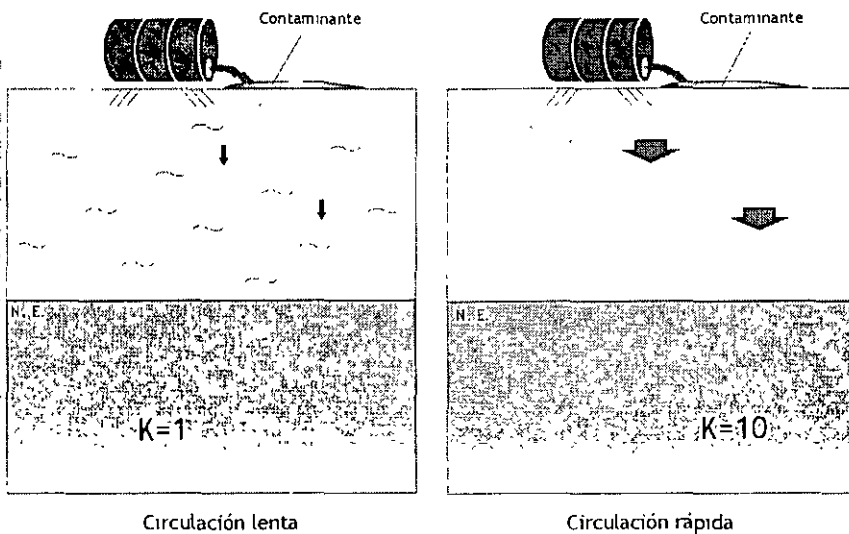
Tipo	Rango	Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo o arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca		
Horizontes de caliza, arenisca y lutita	4-8	6
Arena y grava con alto contenido de limo y arcilla	4-8	6
Rocas ígneas y metamórficas	4-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza carstica	8-10	10
Peso específico: 5		

LESSER, 2004

### Permeabilidad en varios tipos de roca Conductividad hidráulica (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 específico: 3	

### Permeabilidad



Permeabilidad

$1 \times 10^{-4}$  m/seg

$4 \times 10^{-12}$

EJEMPLO

**Permeabilidad en varios tipos de roca  
Conductividad hidráulica (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 específico: 3	

**Ejemplo de cálculo de vulnerabilidad**

Factor	Sierra de basaltos	Valle de material granular Cubierto por arcillas
Nivel estático	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
Clasificación	altamente vulnerable	reducida vulnerabilidad

## CLASIFICACIÓN PROPUESTA

- MENOR DE 50, VULNERABILIDAD BAJA
- ENTRE 50 Y 100, VULNERABILIDAD MEDIA
- ENTRE 100 Y 150, VULNERABILIDAD ALTA
- MAYOR DE 150, VULNERABILIDAD MUY ALTA



## LA GEOHIDROLOGIA EN LA CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE ACUIFEROS

- TIPOS DE ACUÍFEROS
- MÓVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÉNEA
- REDES DE FLUJO
- DEFINICIÓN DE TÉRMINOS
- VULNERABILIDAD





... Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

## **MODULO I: RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES INORGÁNICOS CA-206**

**TEMAS:  
COMPORTAMIENTO DE COMPUESTOS  
INORGÁNICOS Y NORMATIVIDAD  
RIESGO A LA SALUD Y ALTERNATIVAS  
DE REMEDIACIÓN**

**COORDINADOR: DRA. SUSANA SAVAL  
DEL 05 AL 09 DE SEPTIEMBRE DEL 2005  
PALACIO DE MINERÍA**



**HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS  
NATURALES**

**POR: ING.**

**JUAN MANUEL LESSER ILLADES**

MODULO

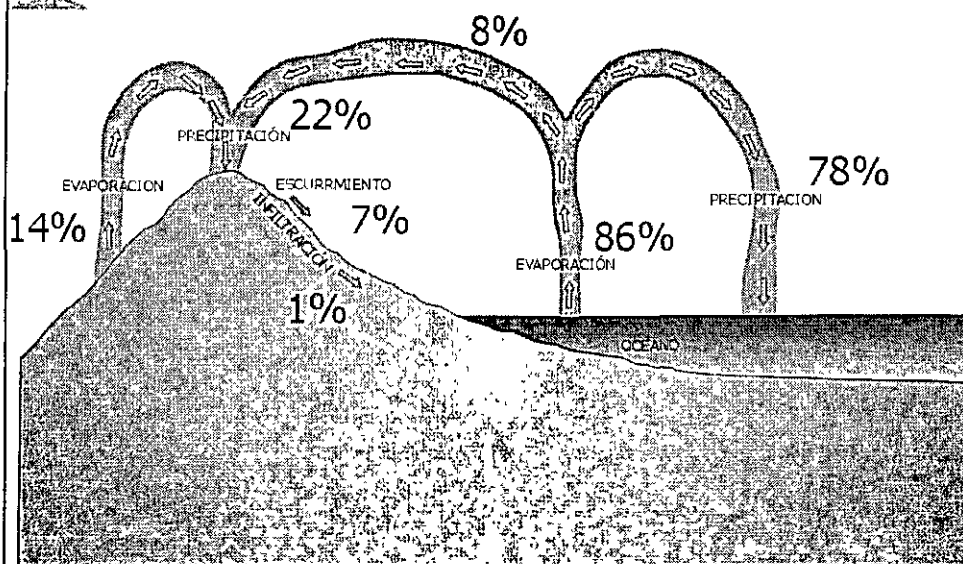
# HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS NATURALES

Por Ing. Juan Manuel Lesser

Voltear a la primera página

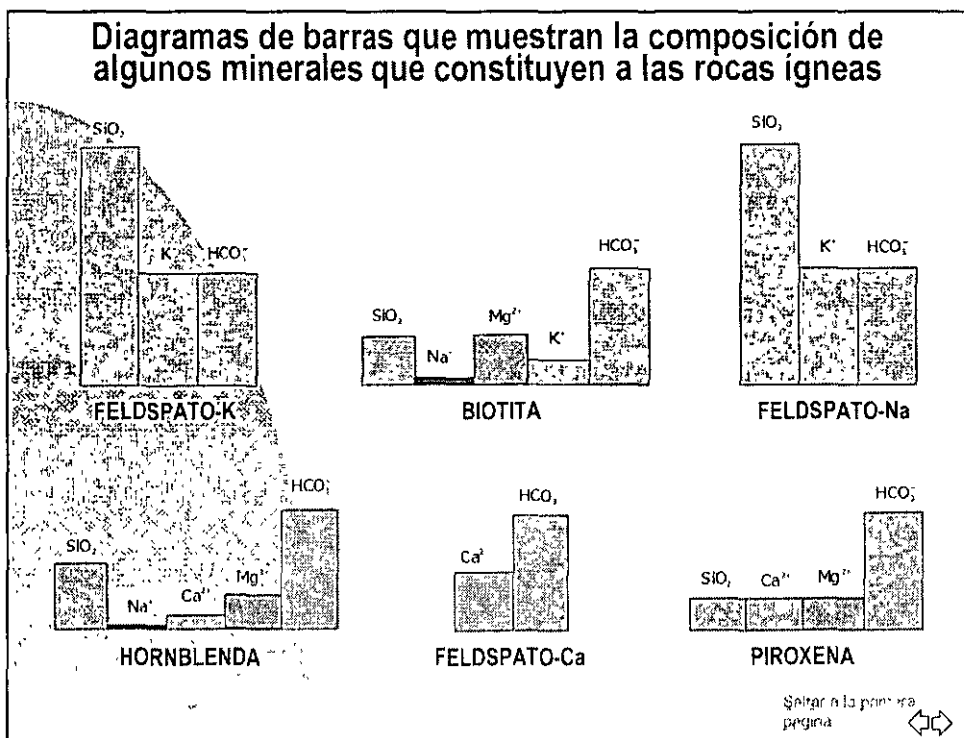
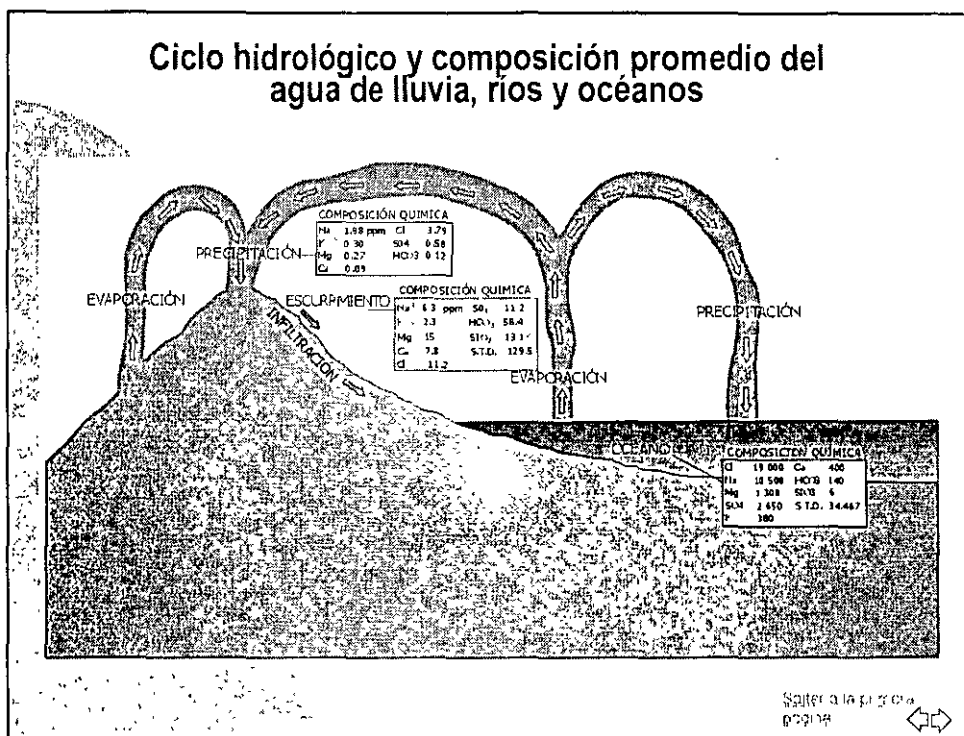


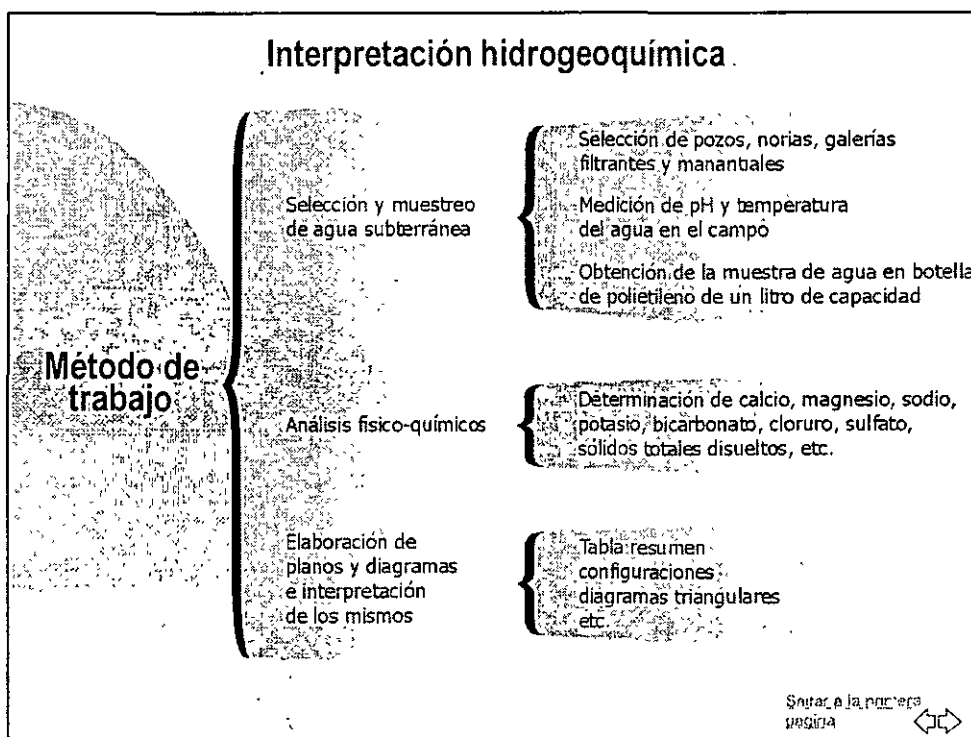
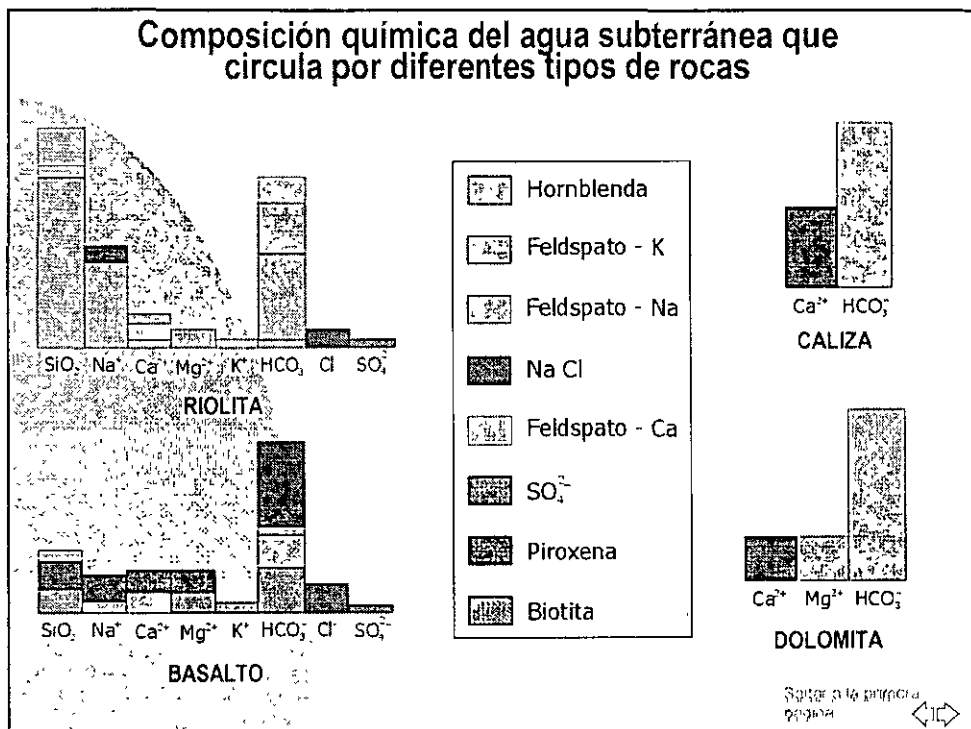
## Ciclo hidrológico

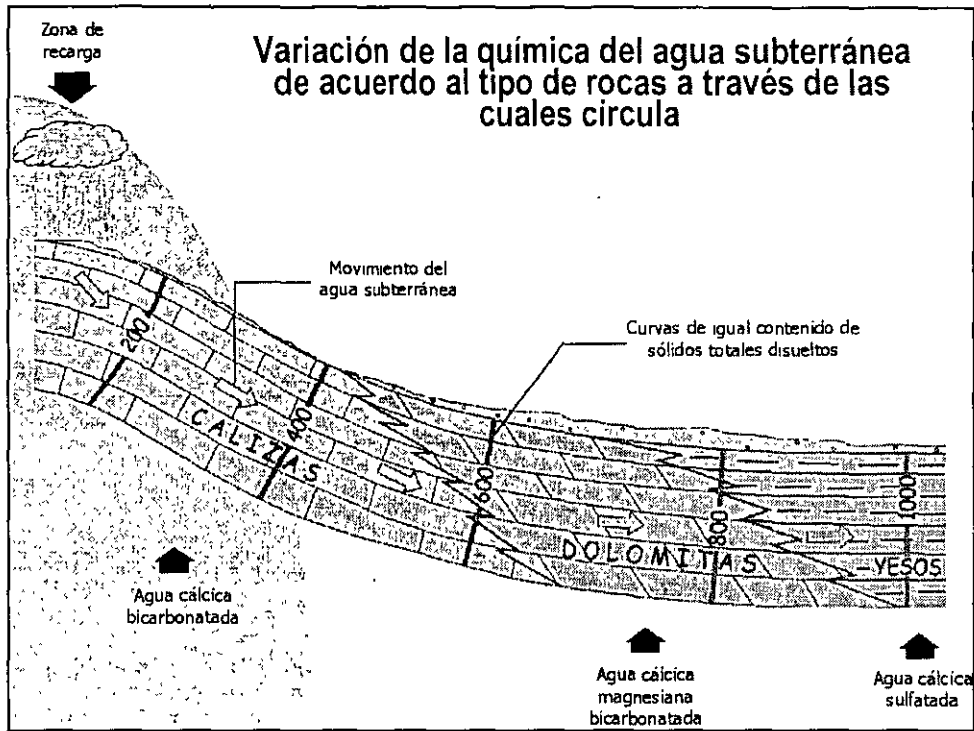


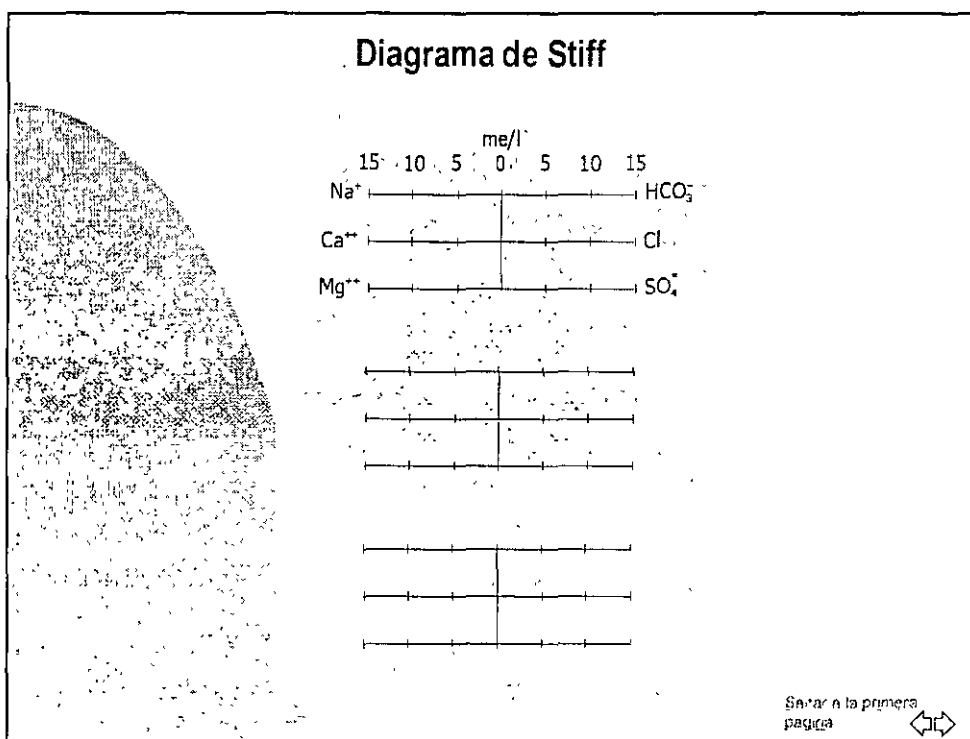
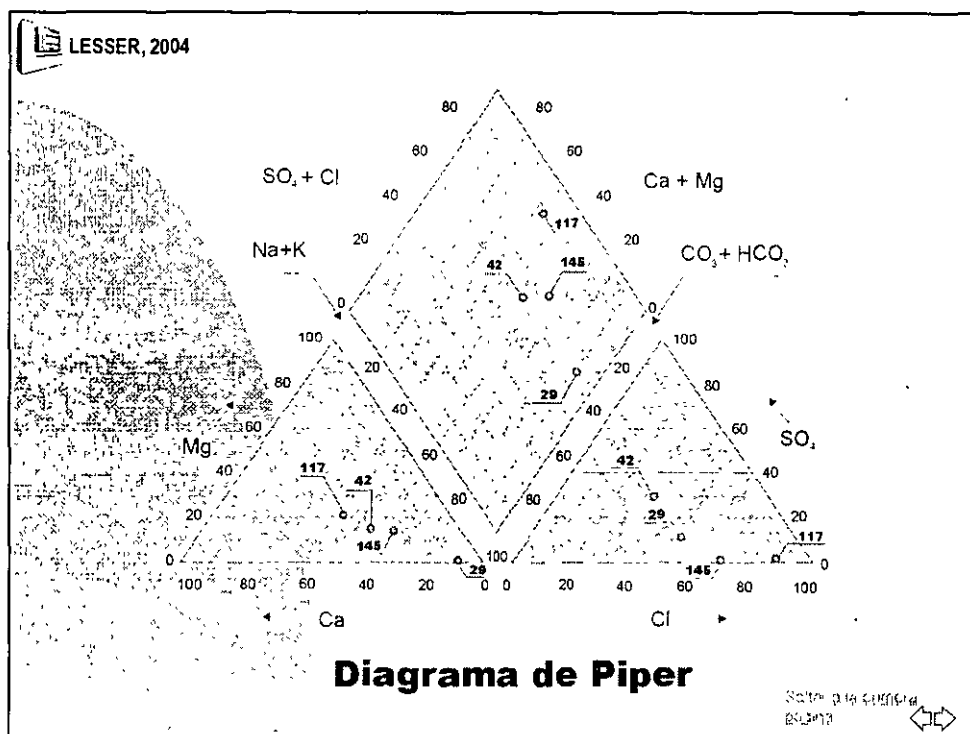
Voltear a la primera página

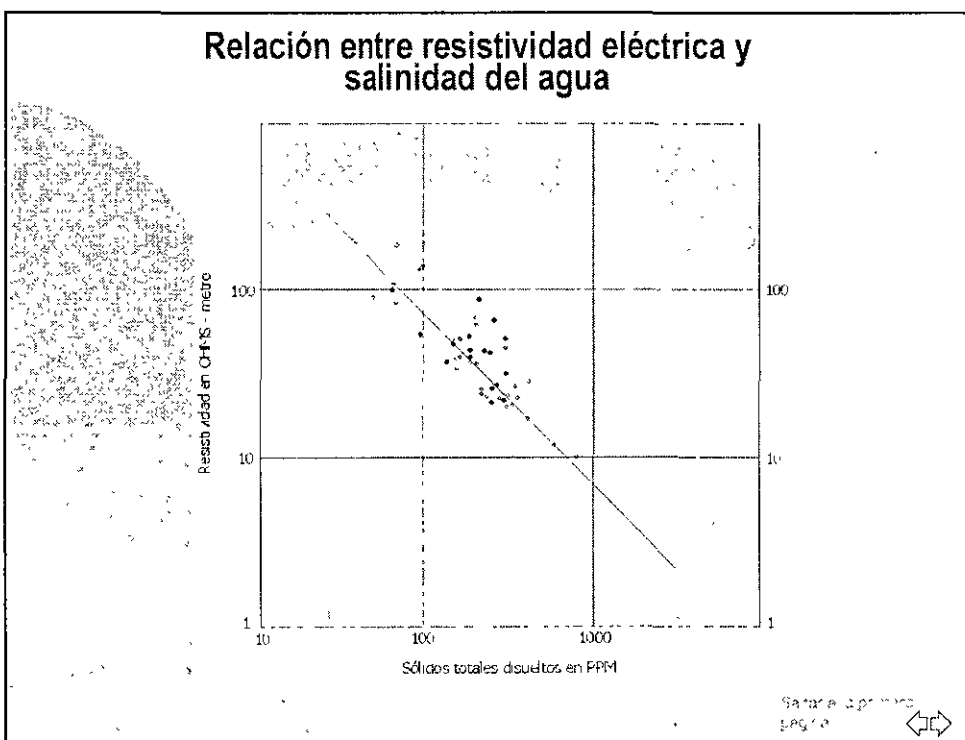
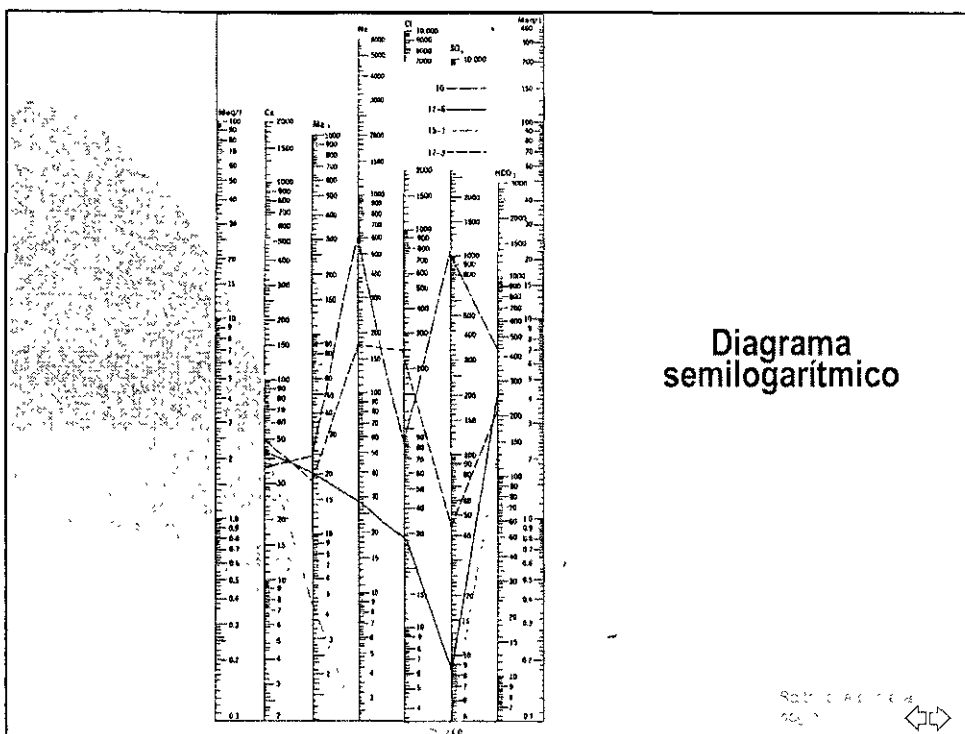


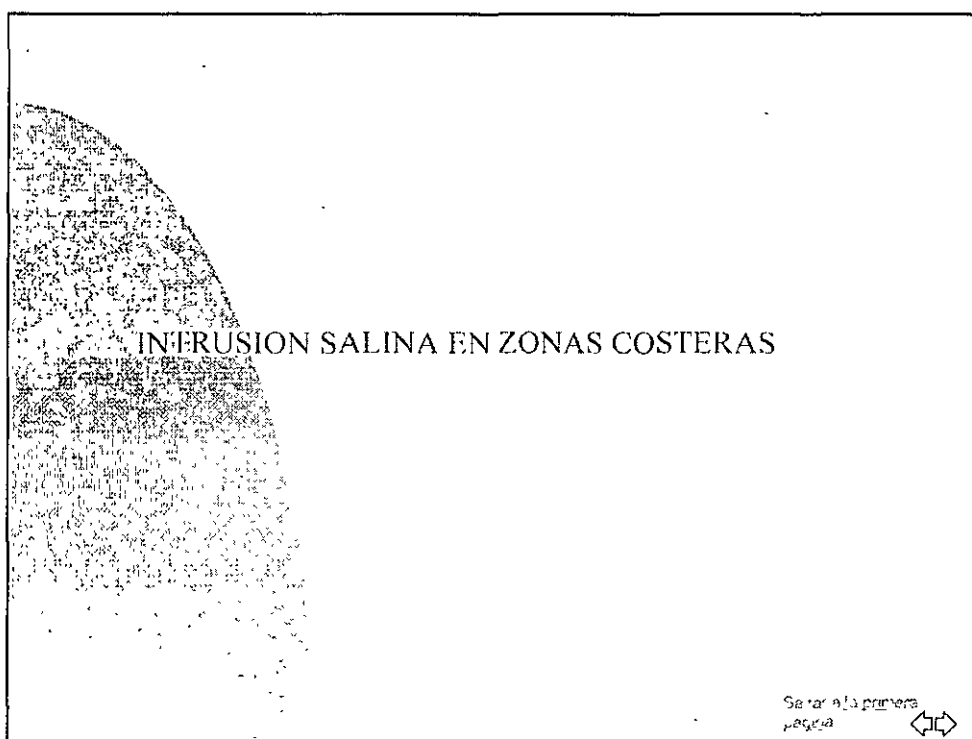
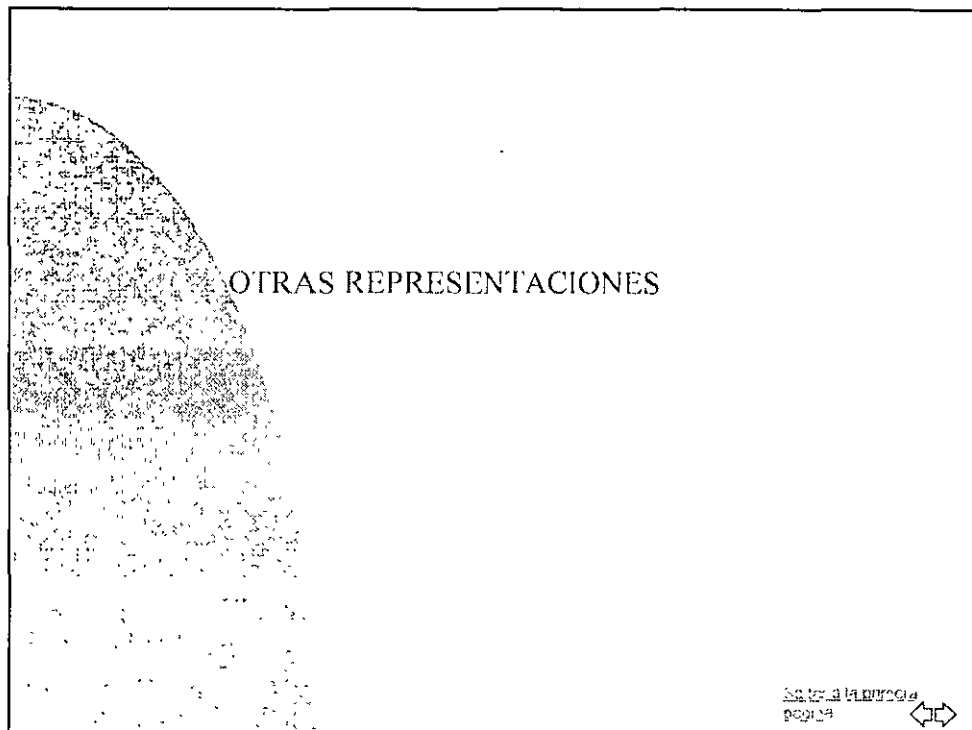






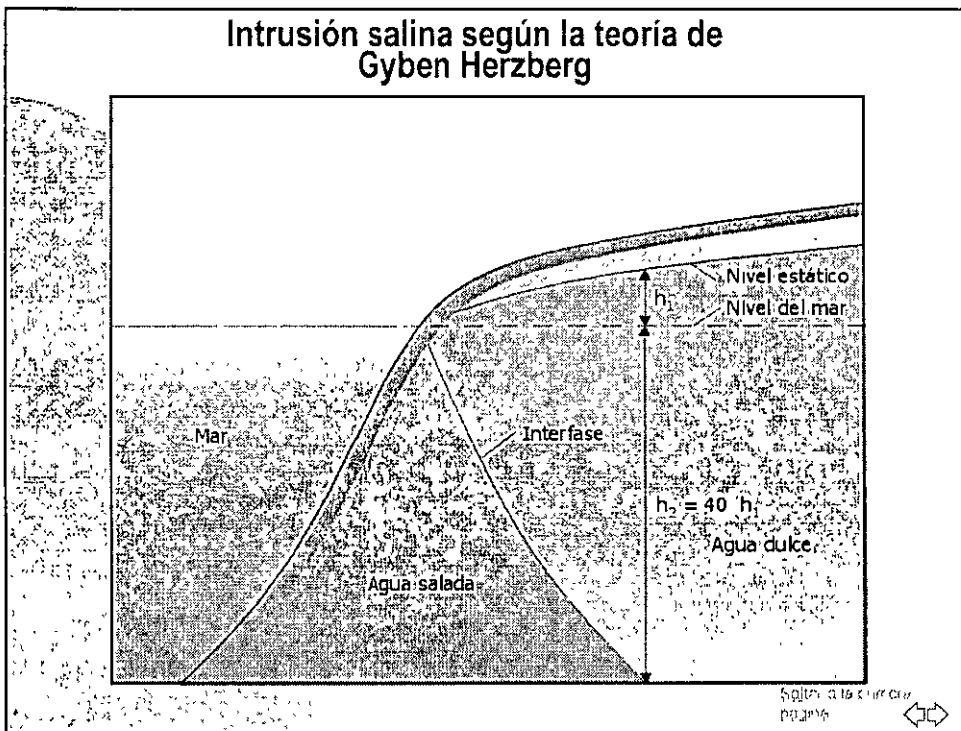




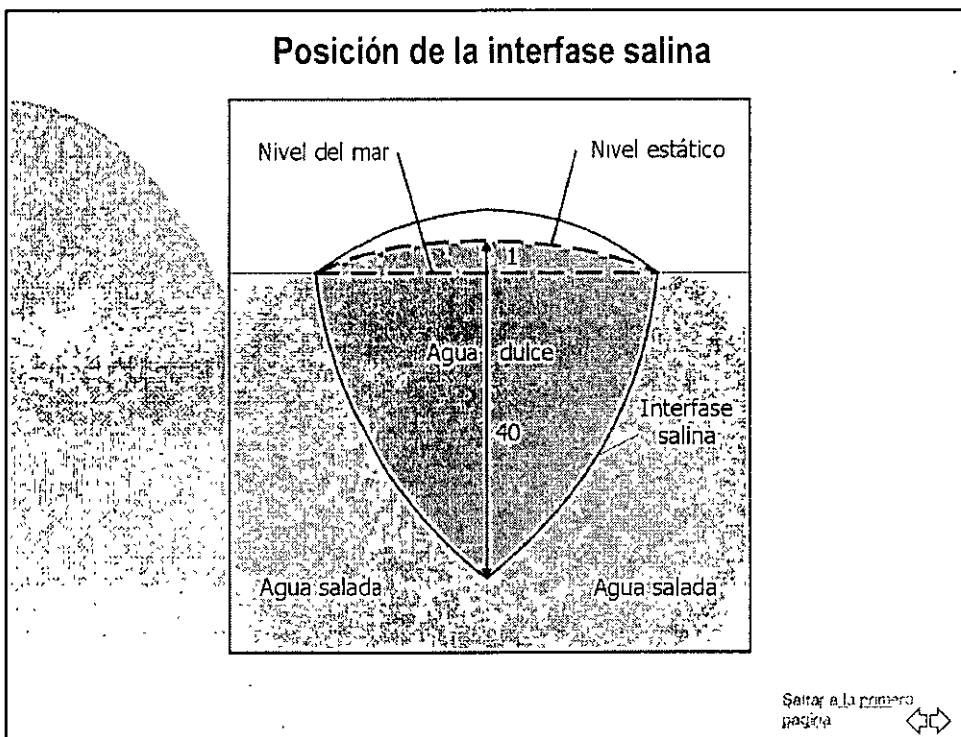


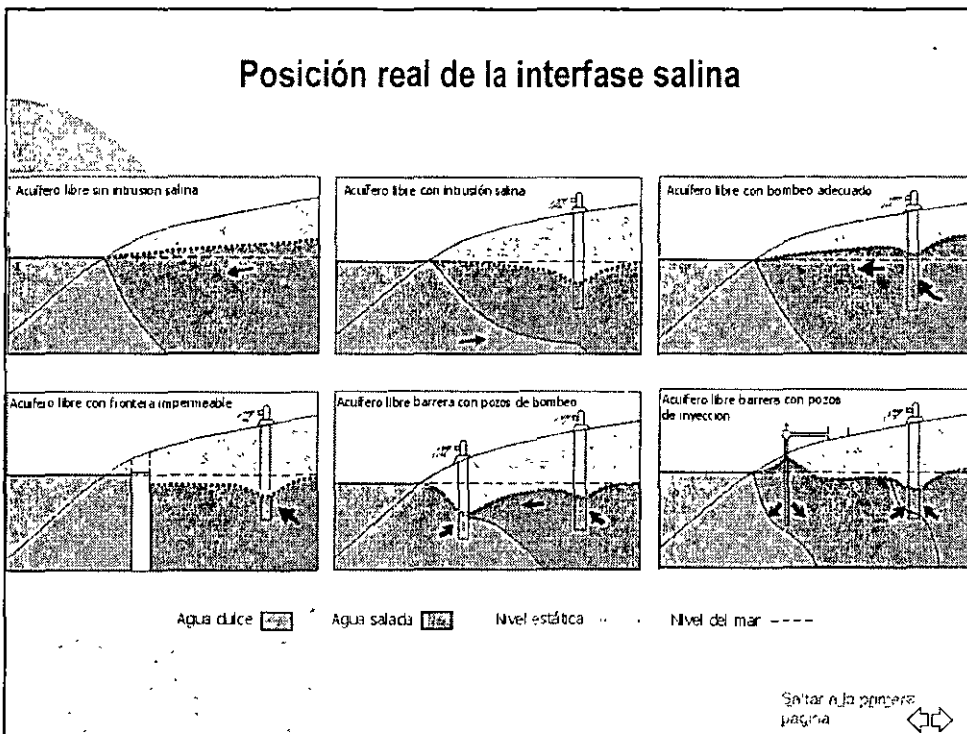
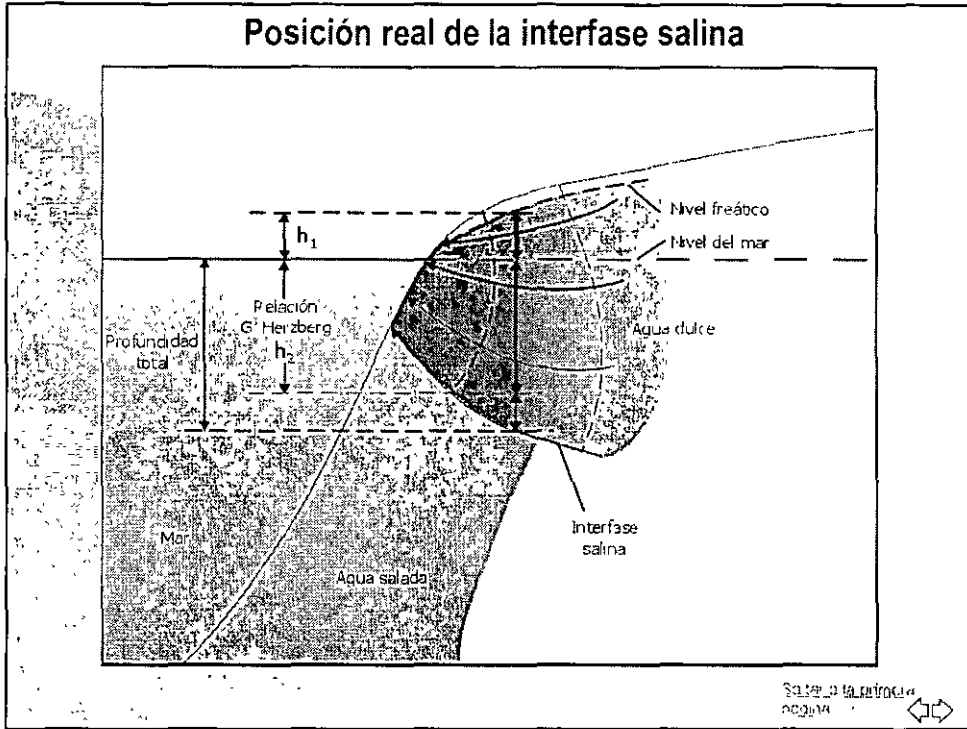


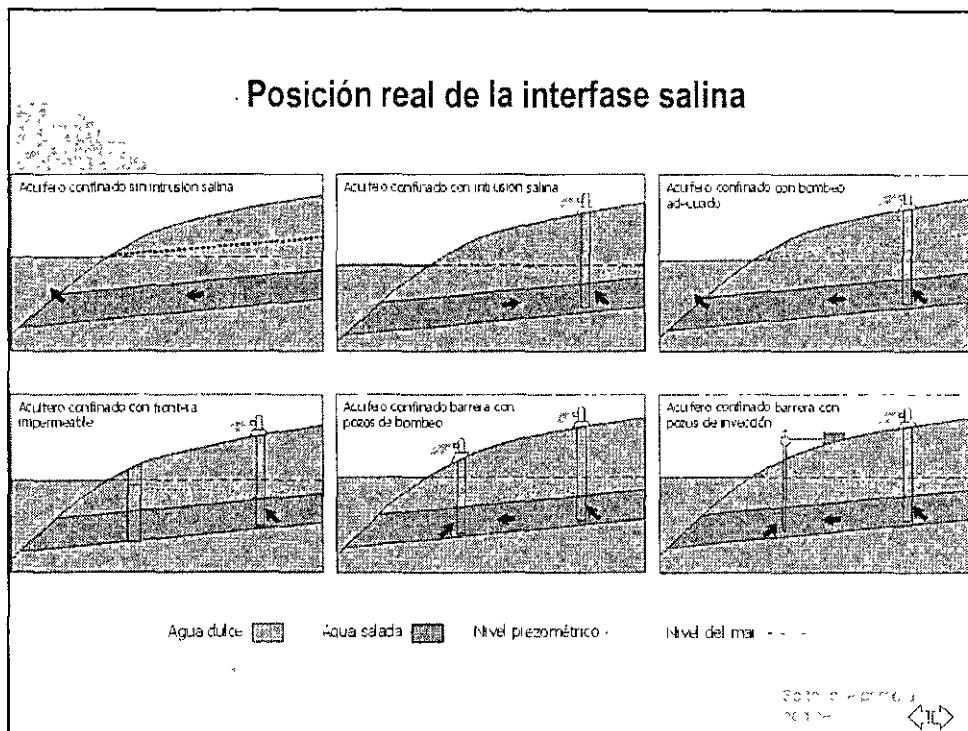
### Intrusión salina según la teoría de Gyben Herzberg



### Posición de la interfase salina







## CALIDAD DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO NOM 127 SSA 1994 (2000)

Sotomayor & Asociados

- 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 CaCO <sub>3</sub> .....	400.00
Aluminio.....	0.20
Arsénico.....	0.05
Bario.....	1.00
Cadmio.....	0.005
Cianuro expresado como ión 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 CaCO <sub>3</sub> .....	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 orgánico.....	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido.....	2.00
Plomo.....	0.05
Selenio.....	0.01
Sulfatos, expresados como ión.....	250.00
Zinc.....	1.0

**Límites  
Norma  
Oficial  
Mexicana**

Subir a la página  
Página

Turbiedad medida desde el punto de vista biológico o químico)  
5 unidades de turbiedad nefelométrica (UTN) o su equivalente en otro método.

**4.3 LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

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

CARACTERÍSTICA	LÍMITE 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

**Límites  
Norma  
Oficial  
Mexicana**

Subir a la página  
Página

Lunes 15 de agosto de 1994 DIARIO OFICIAL (Segunda Sección)

Gamma-HCH (lindeno)	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

**Límites  
Norma  
Oficial  
Mexicana**

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 RADIATIVAS**

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Bequerel 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.**

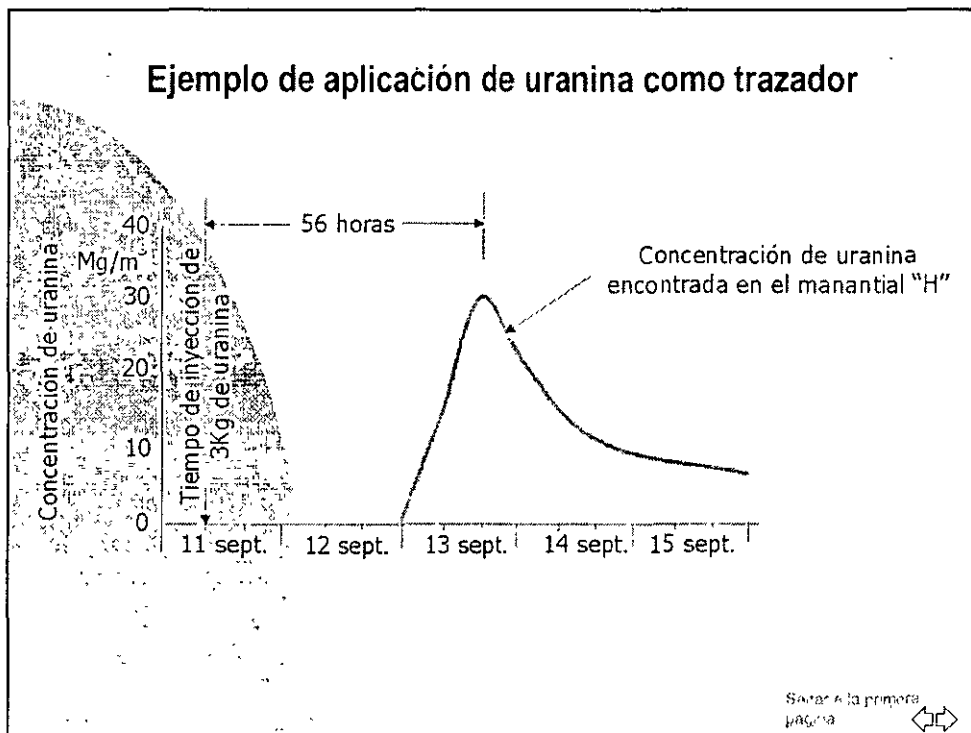
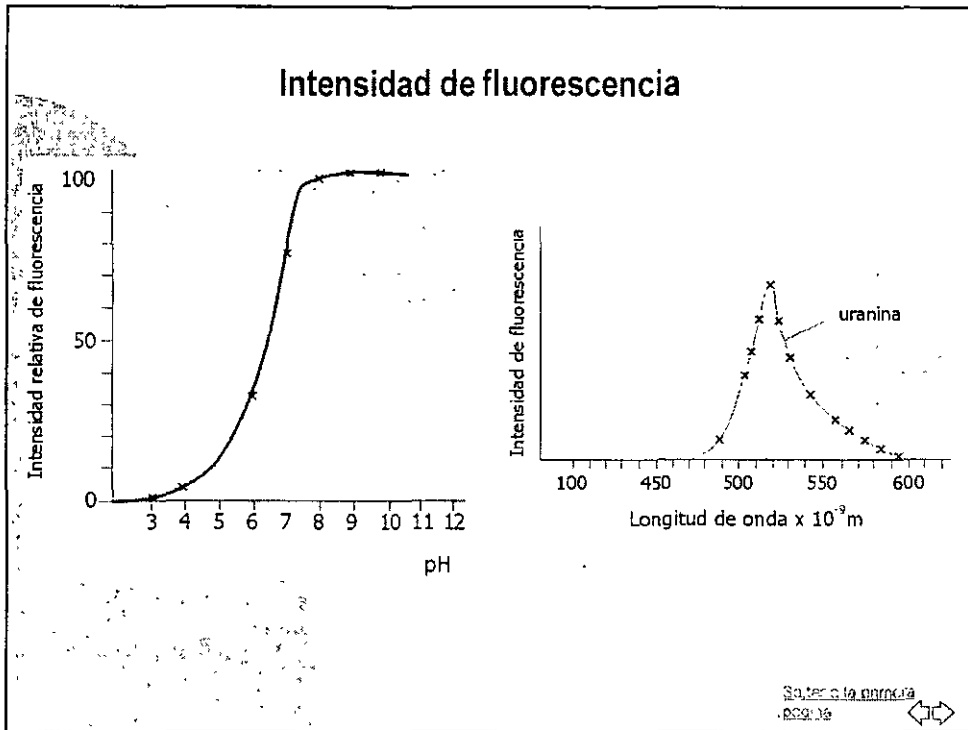
**§ 1.1 Bacterias, helmintos, protozoos y virus - Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz.**

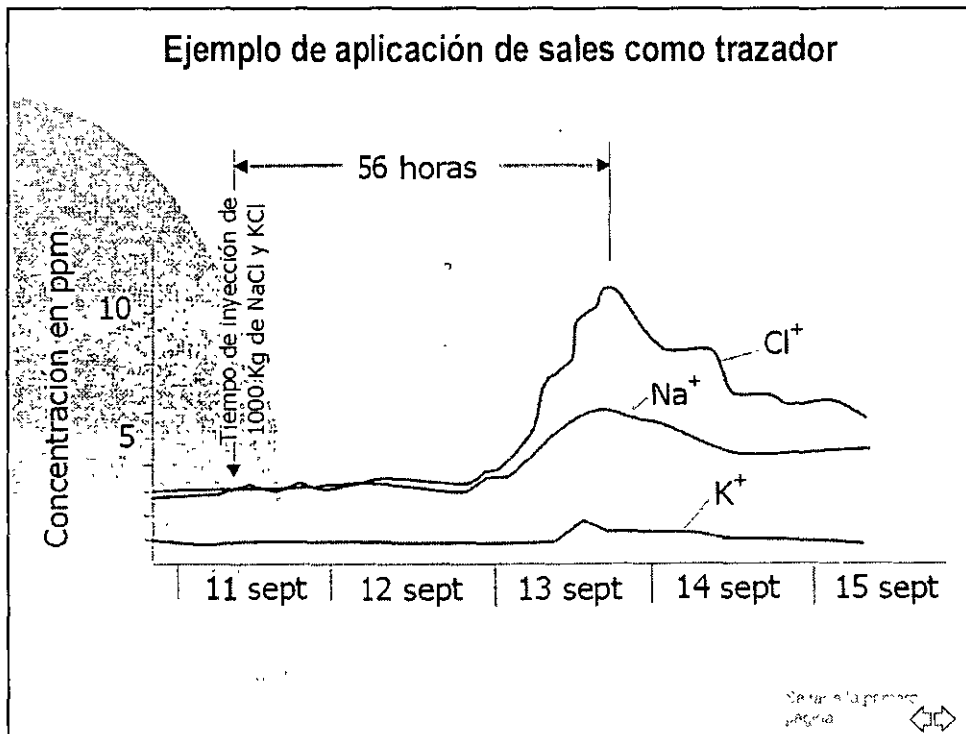
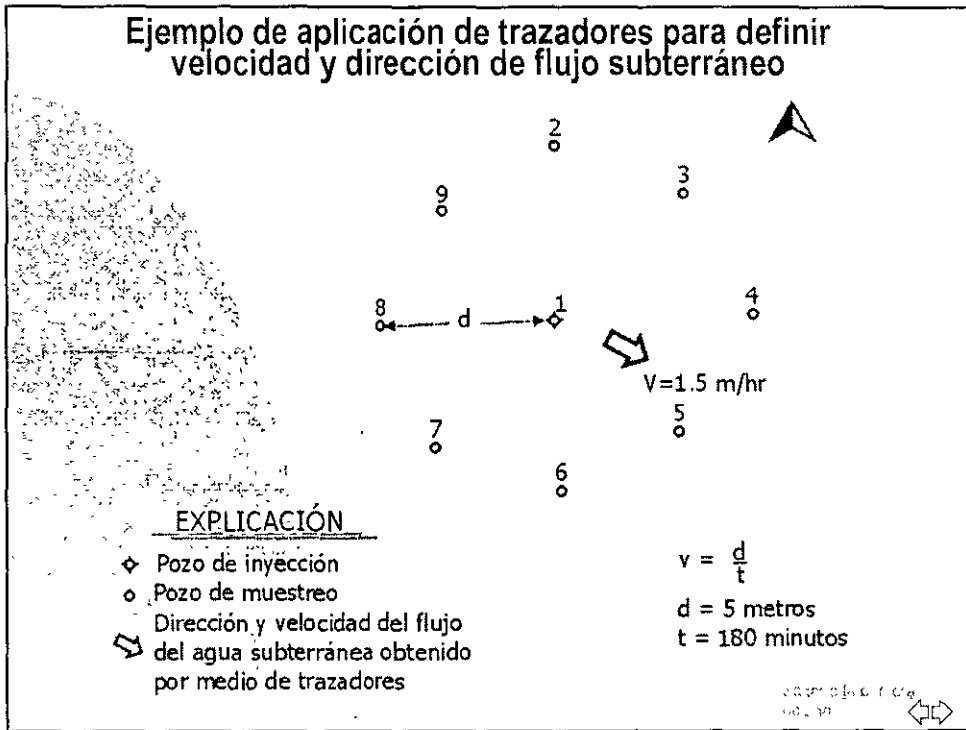
Se van a la siguiente página 

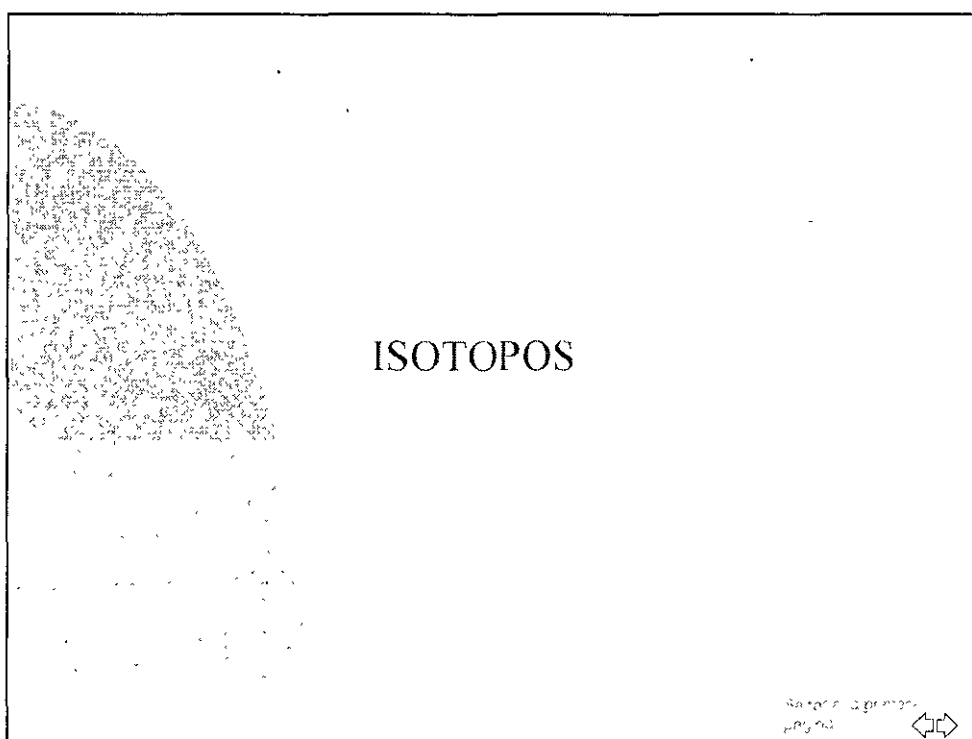
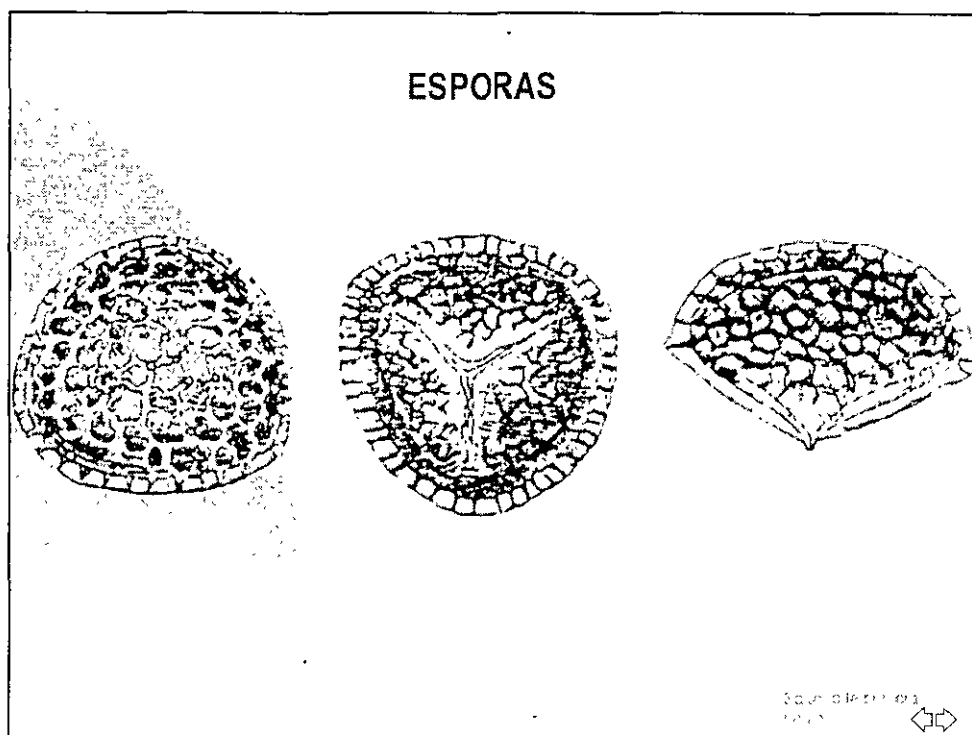


**TRAZADORES DE AGUA SUBTERRÁNEA,  
AUXILIAR EN LA CONTAMINACIÓN  
DE ACUÍFEROS**

Se van a la primera página 









## ISOTOPOS DEL HIDRÓGENO

H1 Elemento natural

H2 Isótopo del hidrógeno (Deuterio)

H3 Isótopo del hidrógeno Radioactivo (Tritio)

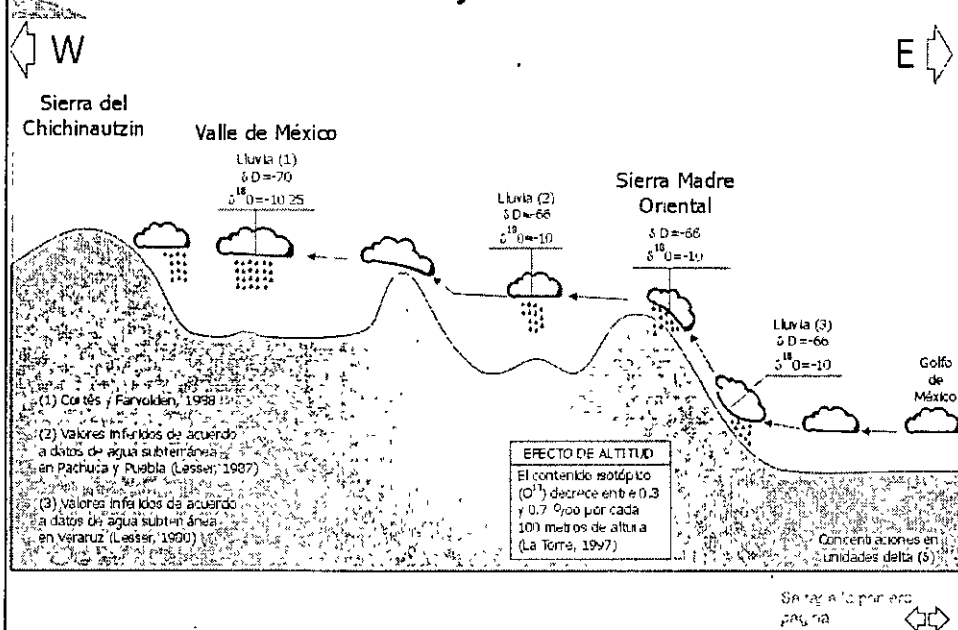
## ISOTOPOS DEL OXIGENO

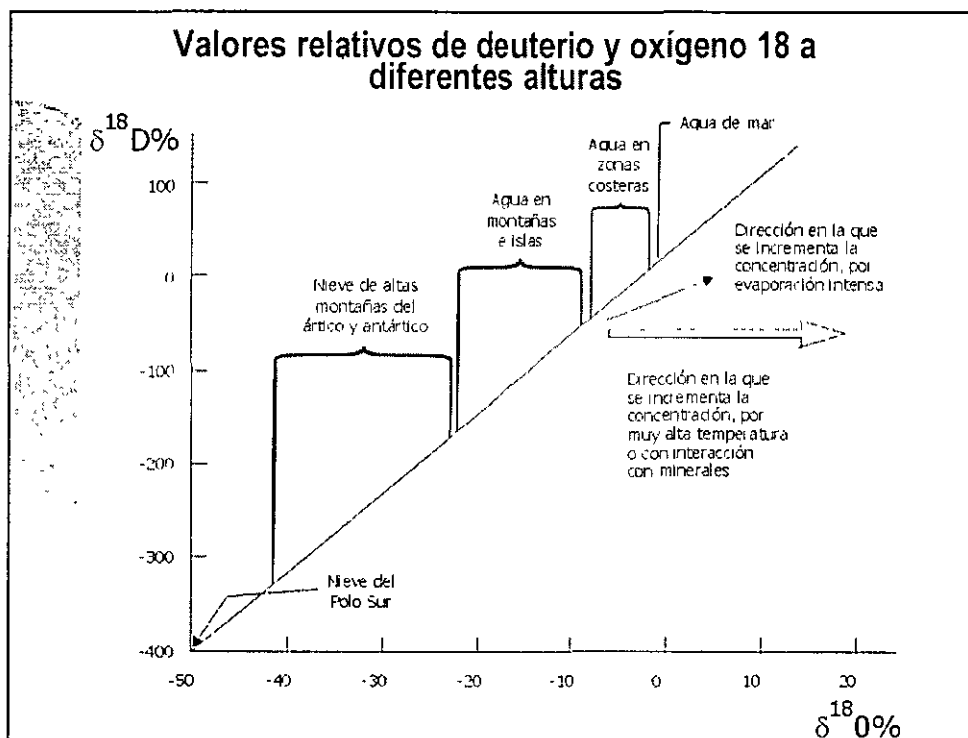
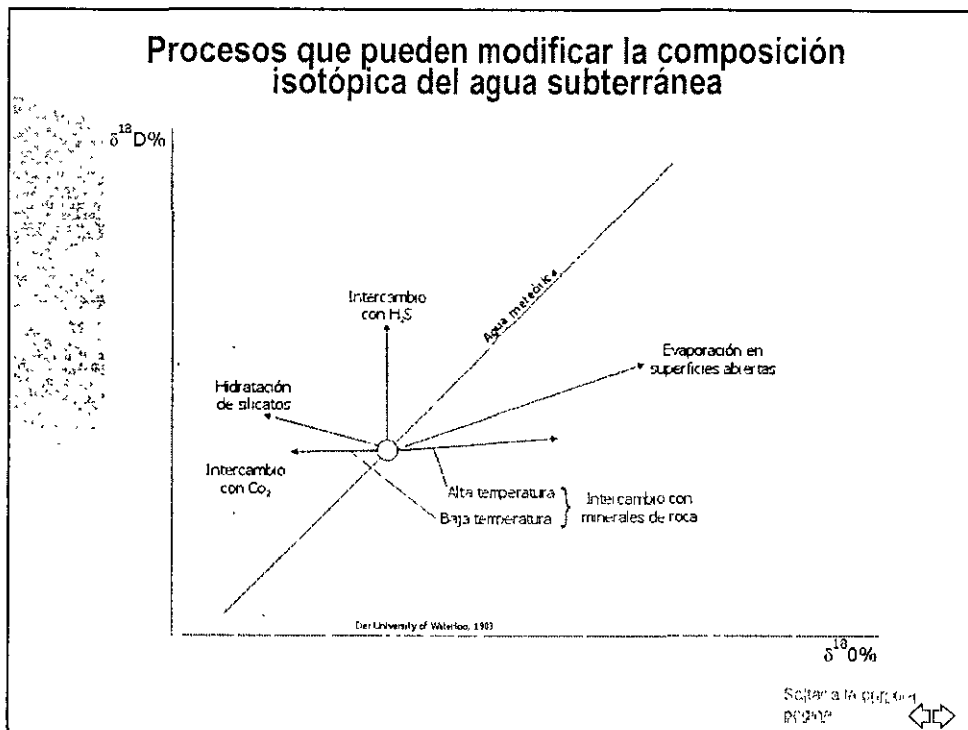
O16 Elemento natural

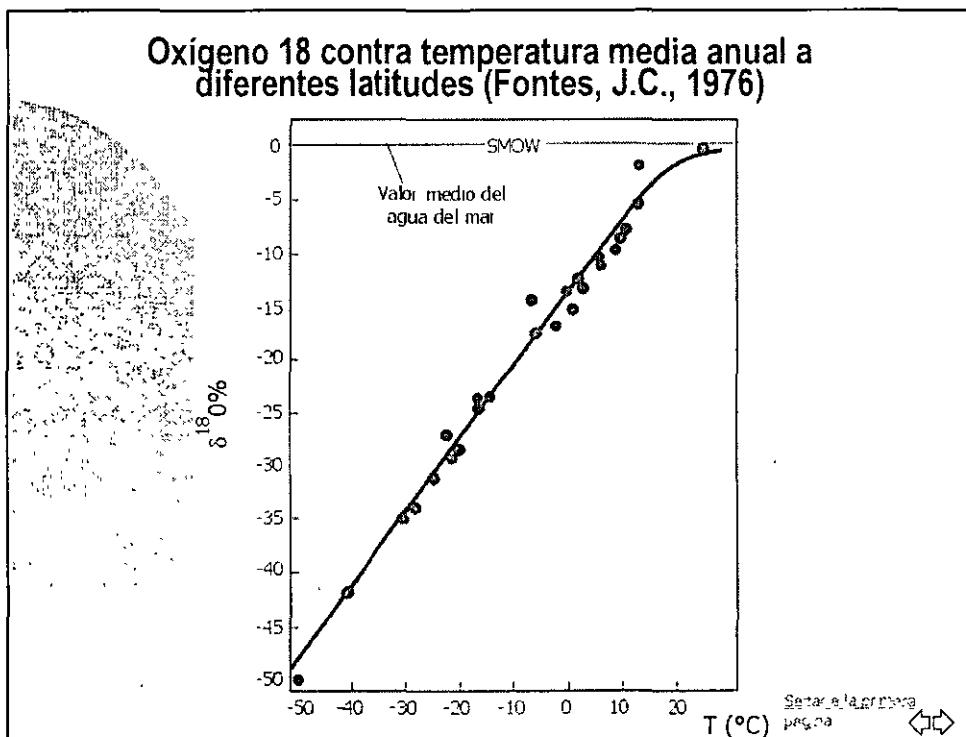
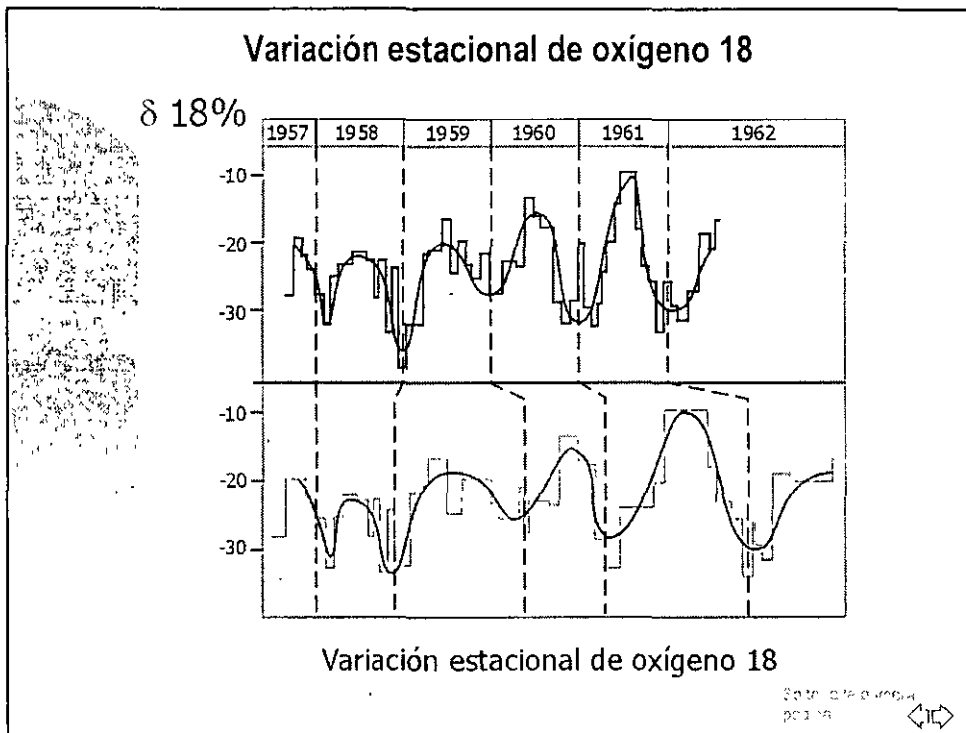
O18 Isótopo del oxígeno (Oxígeno 18)

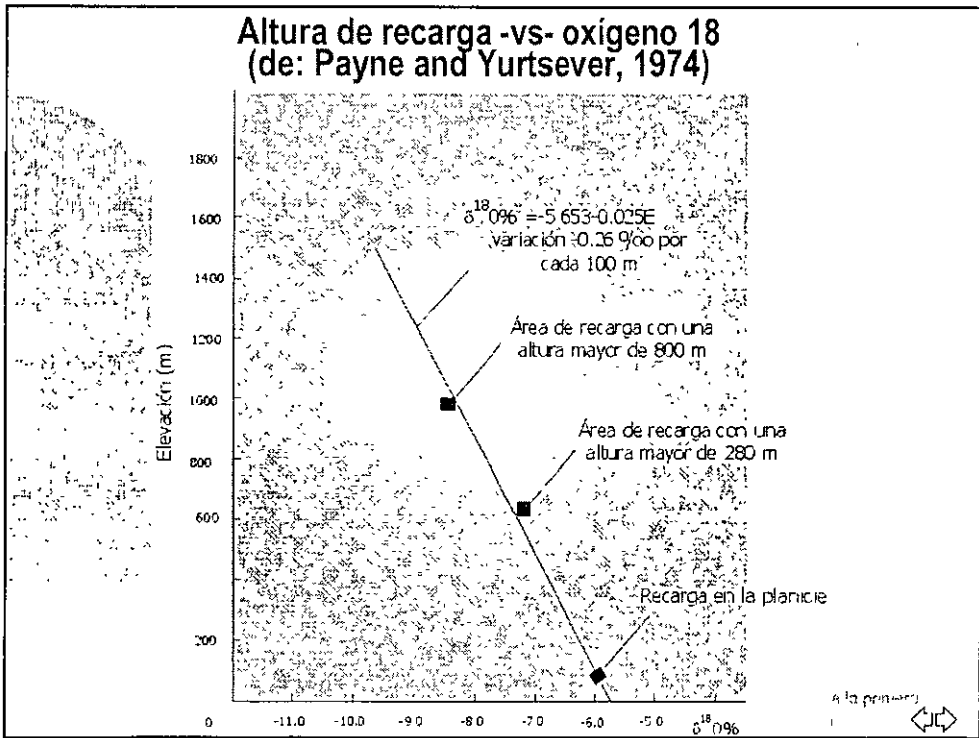
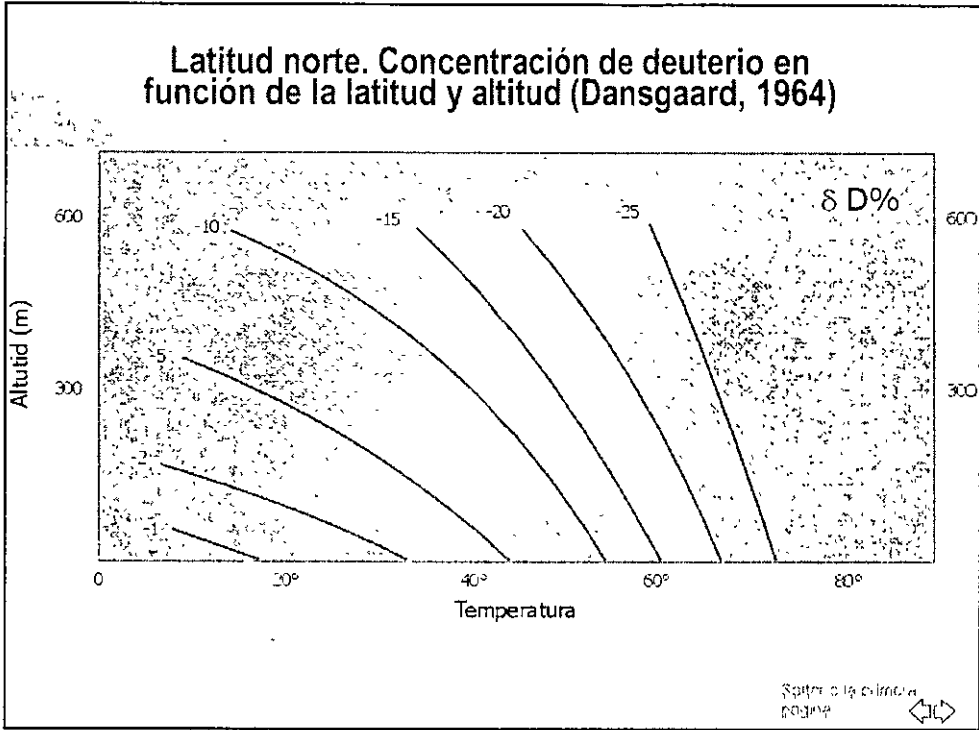
SECRETARÍA DE AGUA  
Y POTABILIDAD

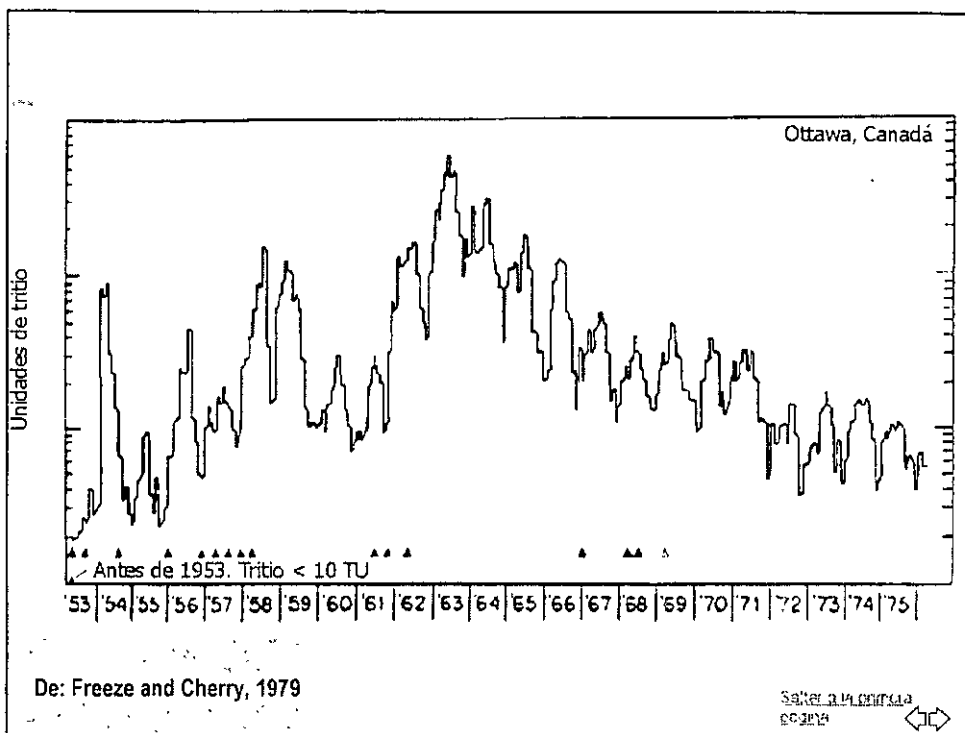
### Comportamiento isotópico de la lluvia entre el Golfo de México y el Valle de México











# Hidrogeoquímica

- GENERALIDADES
- INTRUSIÓN SALINA
- CALIDAD DEL AGUA
- TRAZADORES
- ISÓTOPOS

Por: Ing. Juan-Manuel Lesser

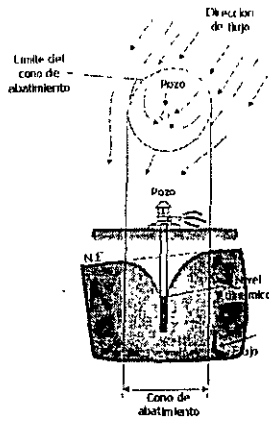
Salta a la primera página

**CALCULO DEL RADIO DE INFLUENCIA DEL  
BOMBEO**

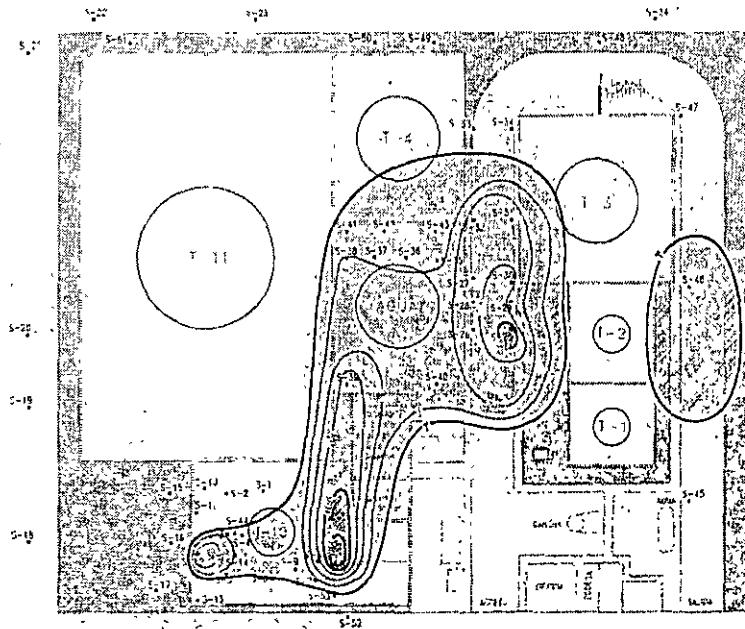
**POR: ING.**

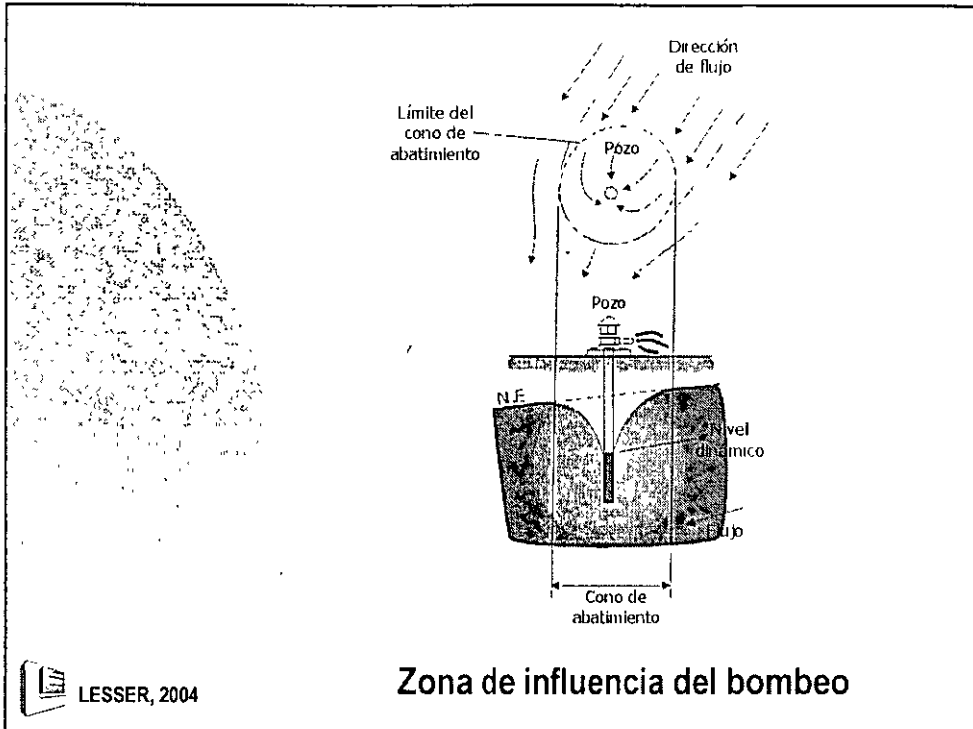
**JUAN MANUEL LESSER ILLADES**

## CALCULO DEL RADIO DE INFLUENCIA



## CONFIGURACION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE





**CALCULO DEL RADIO DE INFLUENCIA**

$$R = (2.25 * T * t / S)^{1/2}$$

R = Radio de influencia

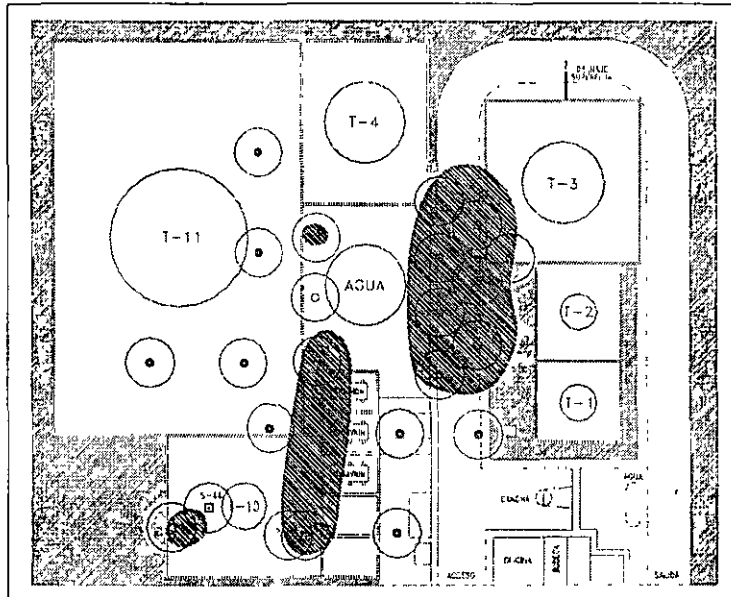
T = Transmisibilidad

t = Tiempo de estabilizacion

S = Coeficiente de almacenamiento



LOCALIZACION DE POZOS PARA EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE

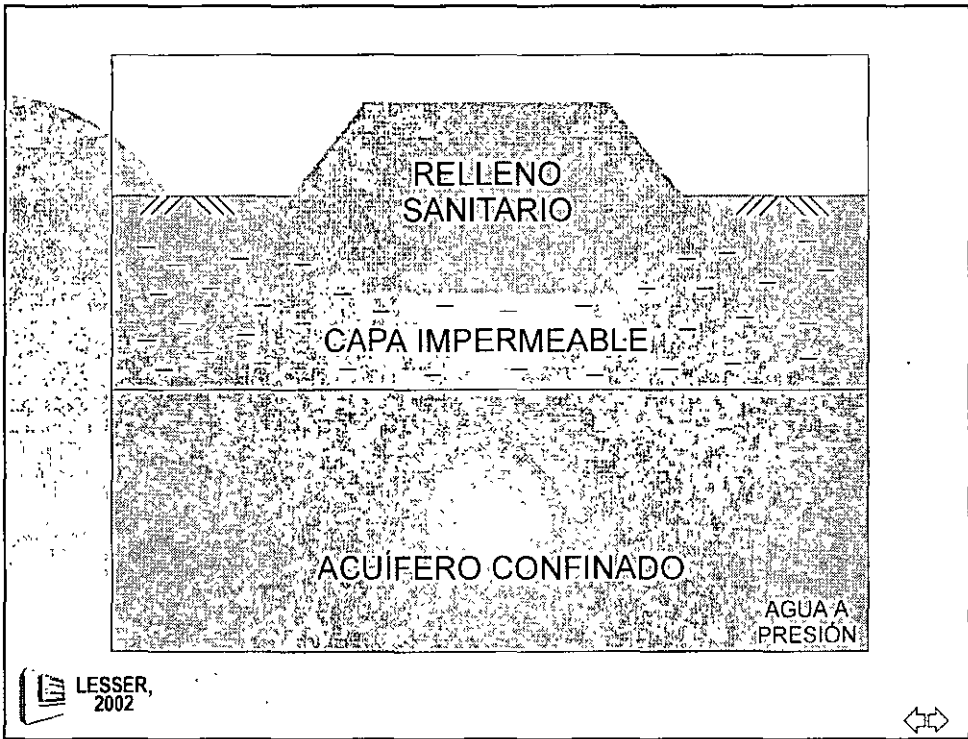
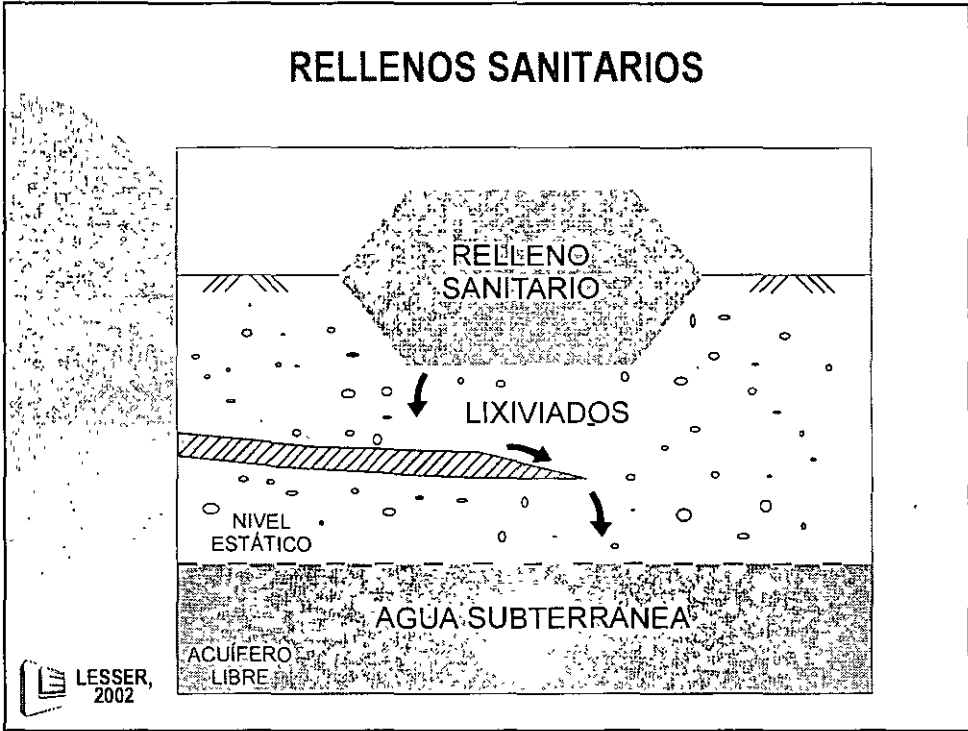


**RELLENOS SANITARIOS PARA PREVENIR LA  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**POR: ING.**

**JUAN MANUEL LESSER ILLADES**

# RELLENOS SANITARIOS



Los lagos, lagunas, acuíferos, ríos y sus afluentes, directos e indirectos, permanentes o intermitentes, presas o embalses, cenotes, manantiales, lagunas floridas, estuarios, esteros, manismas, y en general las zonas marismas mexicanas y otras corrientes de agua.

#### 3.4 Descripción estratigráfica

La descripción de los estratos del suelo, en cuanto a su espesor y características físicas y químicas.

#### 3.5 Rieña geológica

El área que presenta desplazamientos por una falla longitudinal o transversal de origen tectónico o tectónico las cuales producen porosidad y permeabilidad de tipo secundario, dependiendo de su origen.

#### 3.6 Geología

El estudio de la formación, evolución, distribución, correlación y comparación de los materiales terrestres.

#### 3.7 Geohidrología

El estudio del comportamiento de las aguas subterráneas y su composición química.

#### 3.8 Hidrología superficial

El estudio del comportamiento de las aguas superficiales de una cuenca hidrográfica.

#### 3.9 Nivel freático

La superficie de agua que se encuentra únicamente bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación, de la de saturación.

#### 3.10 Topografía

Las características del relieve que presenta el terreno natural.

#### 3.11 Permeabilidad

La propiedad que tiene una sección unitaria de terreno para permitir el paso de un fluido a través de él sin deformar su estructura, bajo la carga producida por un gradiente hidráulico.

#### 3.12 Relleno sanitario

La obra de ingeniería que reúne características específicas para la disposición final y segura de residuos sólidos municipales.

#### 3.13 Residuo sólido municipal

El residuo sólido que proviene de actividades que se desarrollan en casas-habitación, sitios y servicios públicos, demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso.

#### 3.14 Zona de aireación

El área localizada debajo de la superficie del terreno, en la que las espumas están parcialmente llenas de aire y parcialmente de agua retenida por atracción molecular.



## ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN SITIOS SELECCIONADOS PARA LA INSTALACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MUNICIPALES

### TEMA DE ACUERDO A LA NOM-083-96

#### A Evidencia y uso del agua subterránea

- Definir las ubicación y distribución de todas las evidencias de aguas subterráneas a escala regional y local
- Volúmenes y extracción
- Tendencias de la explotación
- Planes de desarrollo

#### B Identificación del tipo de acuífero

- Identificar unidades hidrogeológicas
- Extensión y geometría
- Tipo de acuíferos
- Relación entre unidades hidrogeológicas



**ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN SITIOS SELECCIONADOS PARA LA INSTALACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MUNICIPALES**

TEMA DE ACUERDO A LA NOM-083-96

**C Parámetros hidráulicos, análisis de agua y características elementales de los estratos del subsuelo**

- Profundidad al nivel estático
- Dirección del agua subterránea
- Conductividad hidráulica
- Porosidad efectiva
- Composición química del agua subterránea
- Fracción de carbono orgánico
- Capacidad de intercambio catiónico
- Extensión del área de influencia de pozos en operación

**D Análisis del sistema de flujo**

- Zonas de recarga y descarga
- Flujo local y regional

**E Evaluación potencial de contaminación**

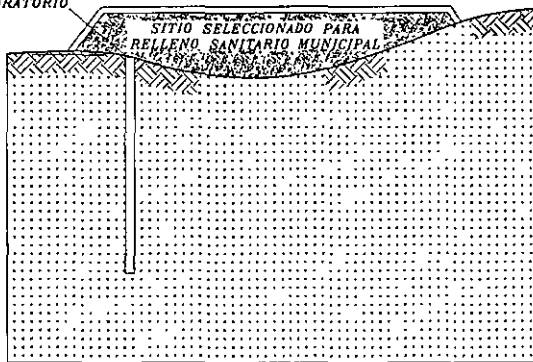
- Determinar si el sitio es apto
- Factor de tránsito de la infiltración



**DATOS BASICOS REQUERIDOS PARA CONOCER UN SITIO**

*DONDE NO EXISTE NIVEL PIEZOMETRICO*

POZO EXPLORATORIO



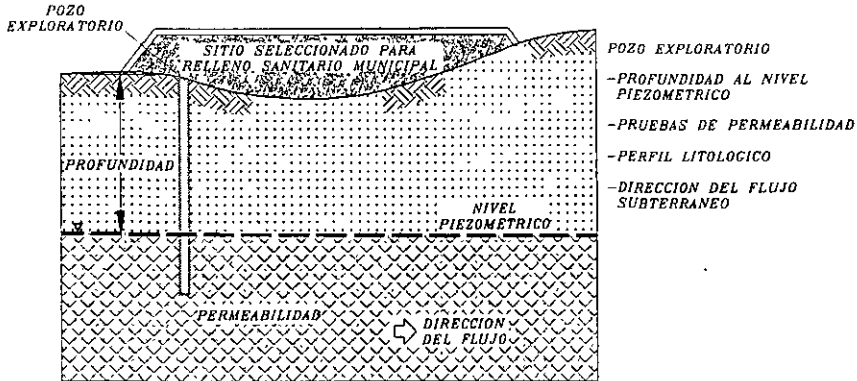
POZO EXPLORATORIO

- CERTIFICAR QUE NO HAYA NIVEL DE AGUA
- PROFUNDIDAD (A CRITERIO)
- PRUEBAS DE PERMEABILIDAD
- PERFIL LITOLÓGICO



## DATOS BASICOS REQUERIDOS PARA CONOCER UN SITIO

*DONDE SE ENCUENTRA NIVEL PIEZOMETRICO*



LESSER,  
2002

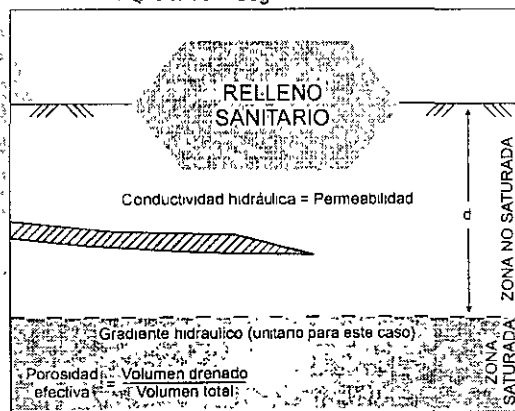


## FACTOR DE TRÁNSITO

$$f = (k i) / (u \cdot d)$$

f = factor de tránsito  
 k = conductividad hidráulica  
 i = gradiente hidráulico  
 u = porosidad efectiva  
 d = espesor de la zona no saturada

$$f < 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$$



LESSER,  
2004



f Debe de ser  $10^{-10}$   
menor de  $3 \times 10^{-10}$

**EJEMPLO 1  
ARENAS**

$$k = 10^{-4} \text{ m/seg}$$

$$i = 1$$

$$u = 0.10$$

$$d = 20 \text{ m}$$

$$f = \frac{1 \times 10^{-4} \text{ m/seg}}{20 \text{ m}}$$

$$f = 0.5 \times 10^{-4} / \text{seg}$$

**EJEMPLO 2  
ARCILLAS**

$$k = 10^{-10} \text{ m/seg}$$

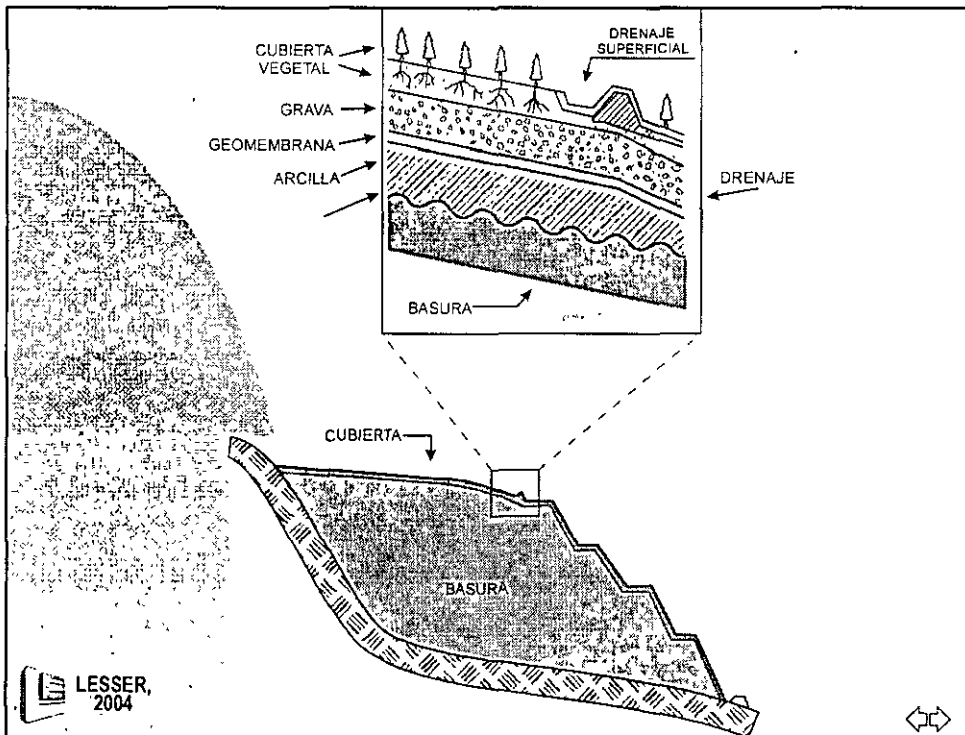
$$i = 1$$

$$u = 0.3$$

$$d = 20 \text{ m}$$

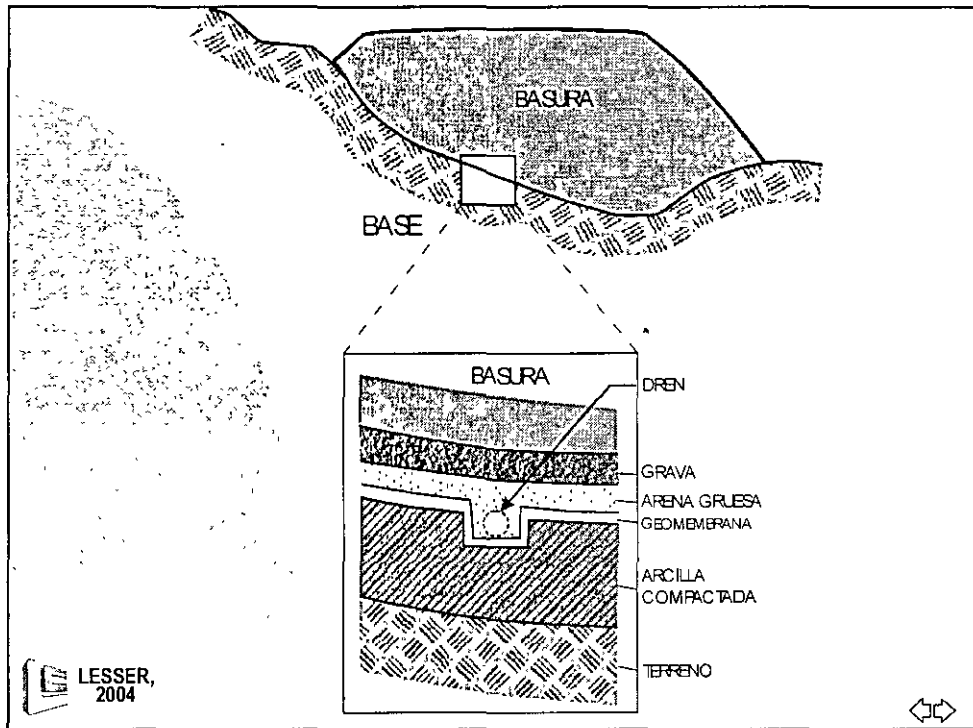
$$f = \frac{10^{-10} \text{ m/seg}}{20 \text{ m}} = 0.16 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$$

LESSER,  
2004



LESSER,  
2004





## 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

LESSER,  
2004

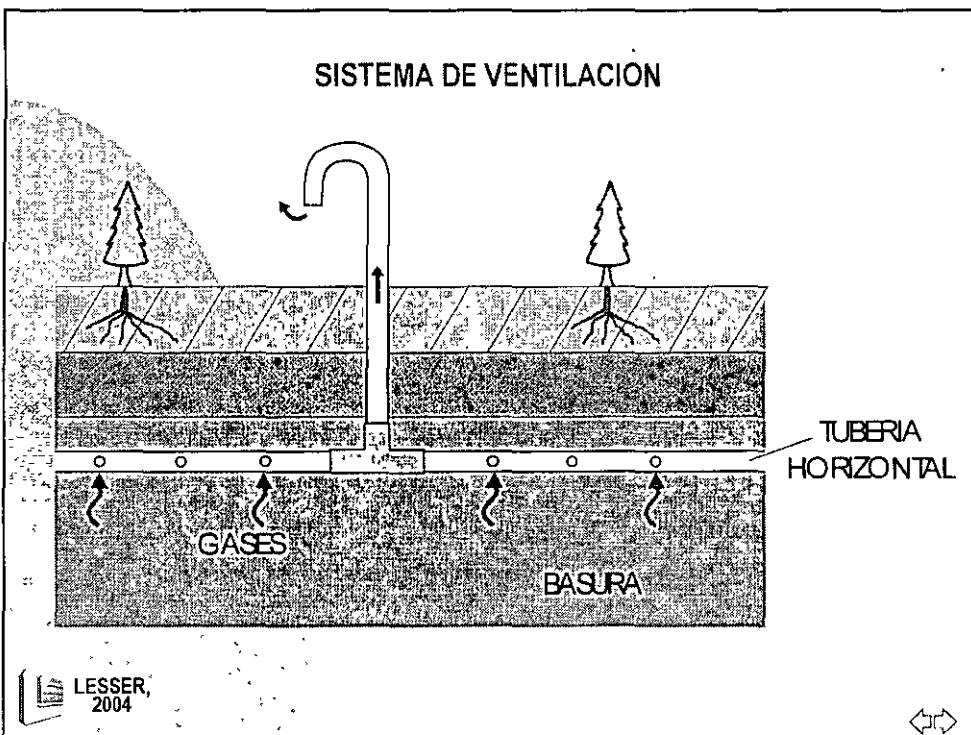
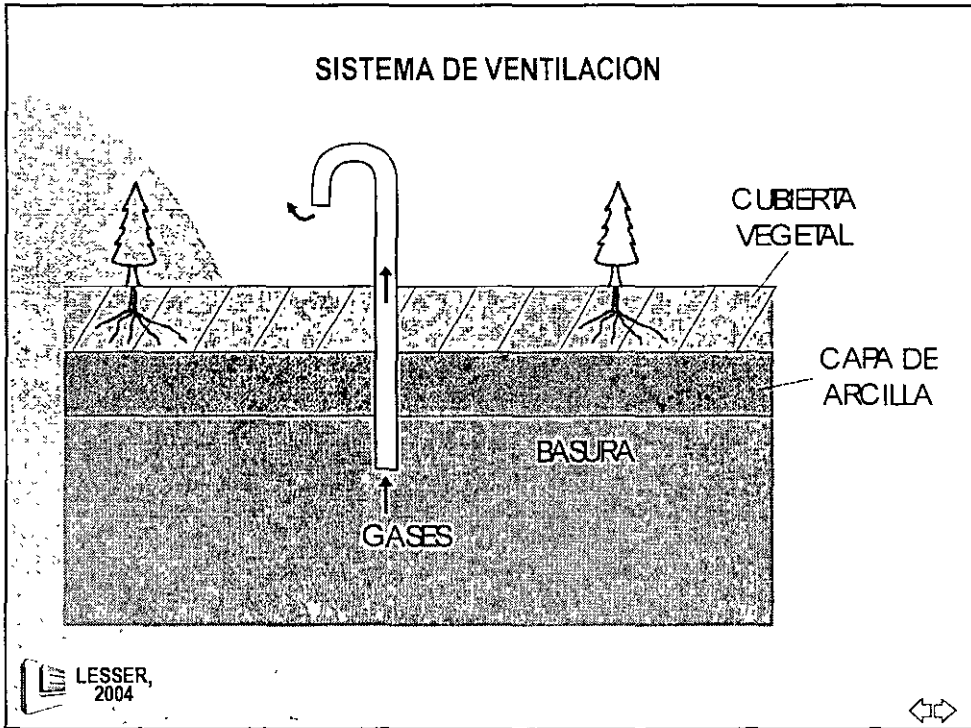


## DRENAJE DENTRO DEL RELLENO SANITARIO

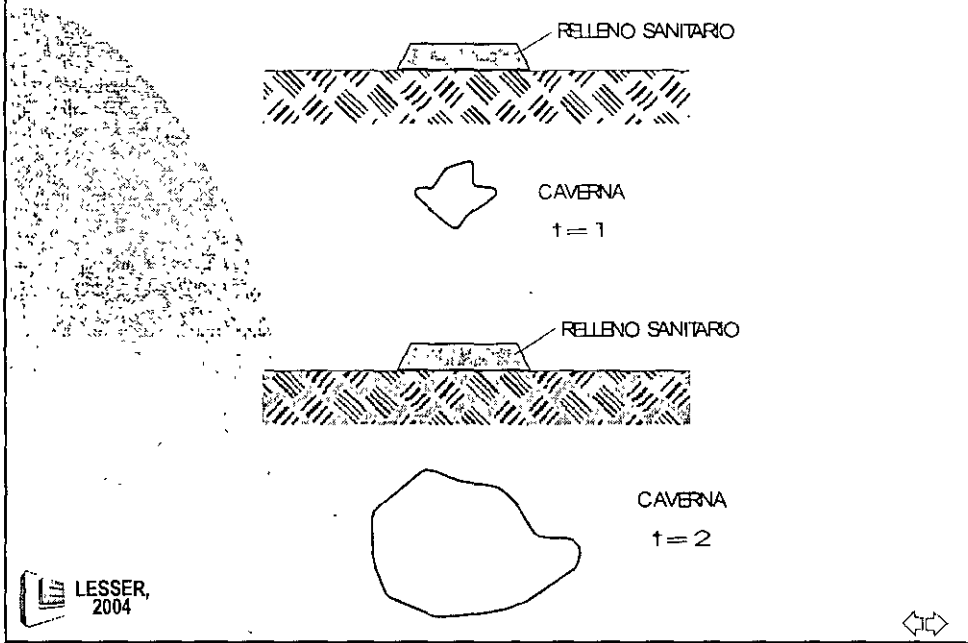


LESSER,  
2004

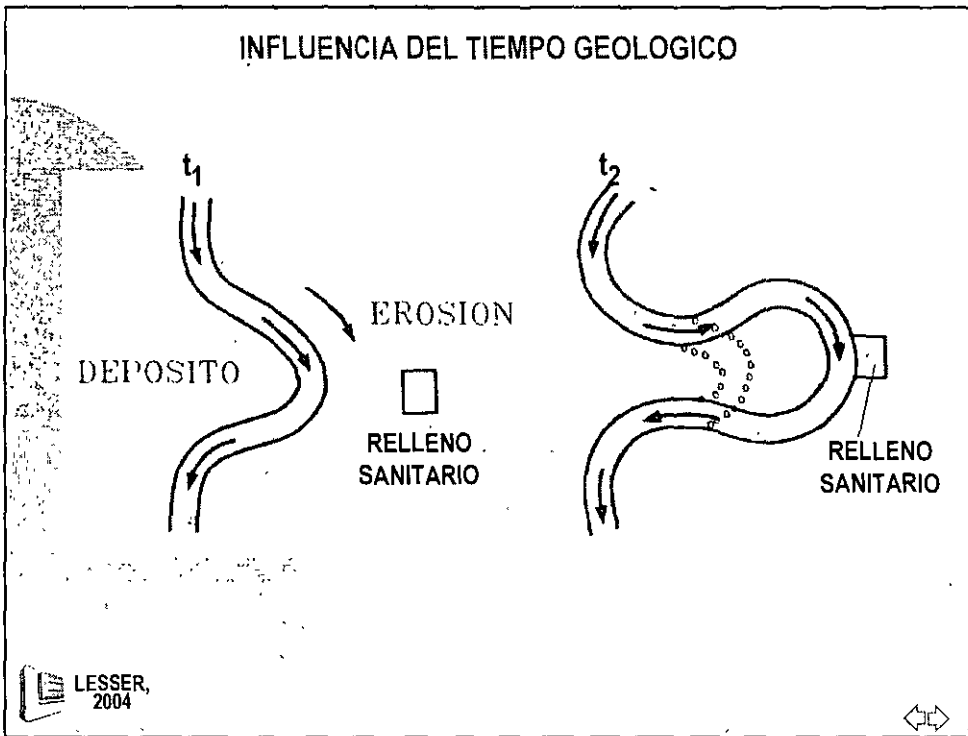


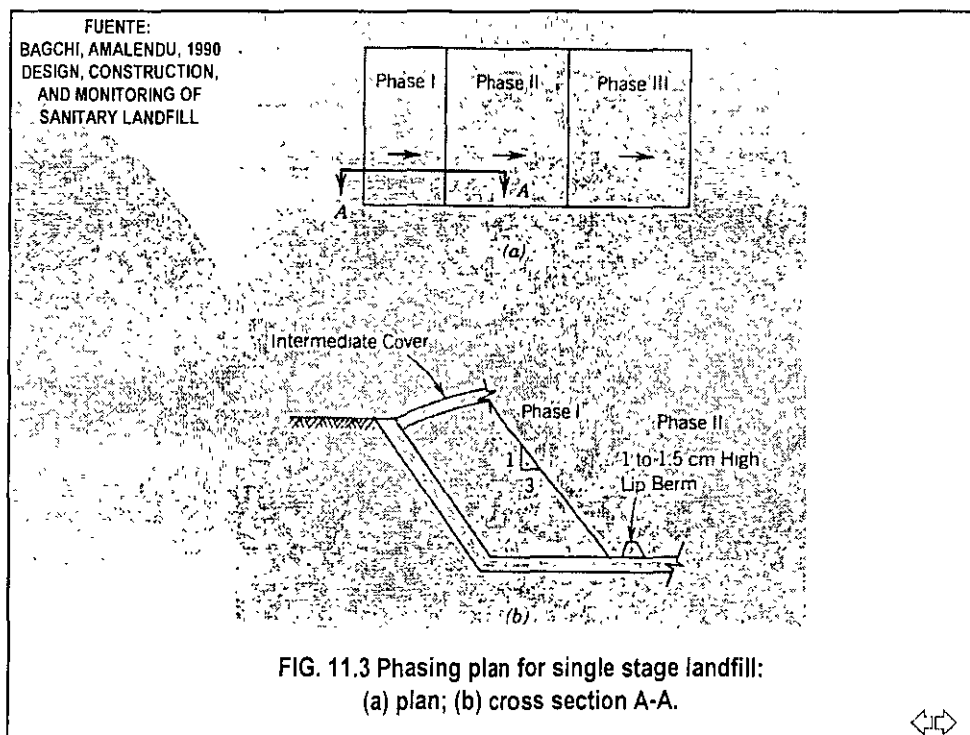
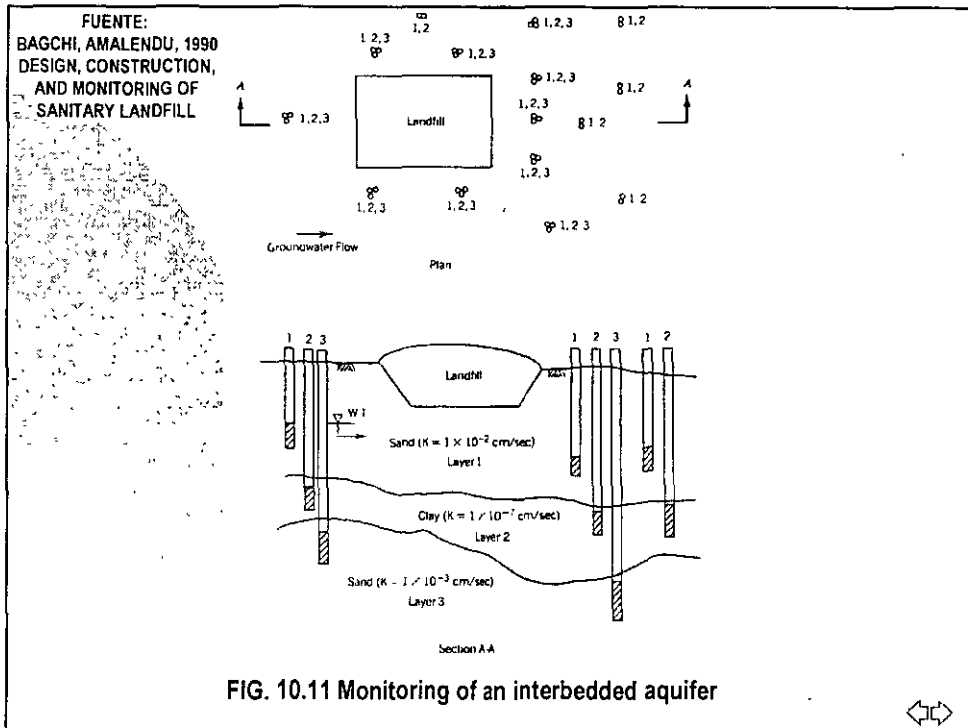


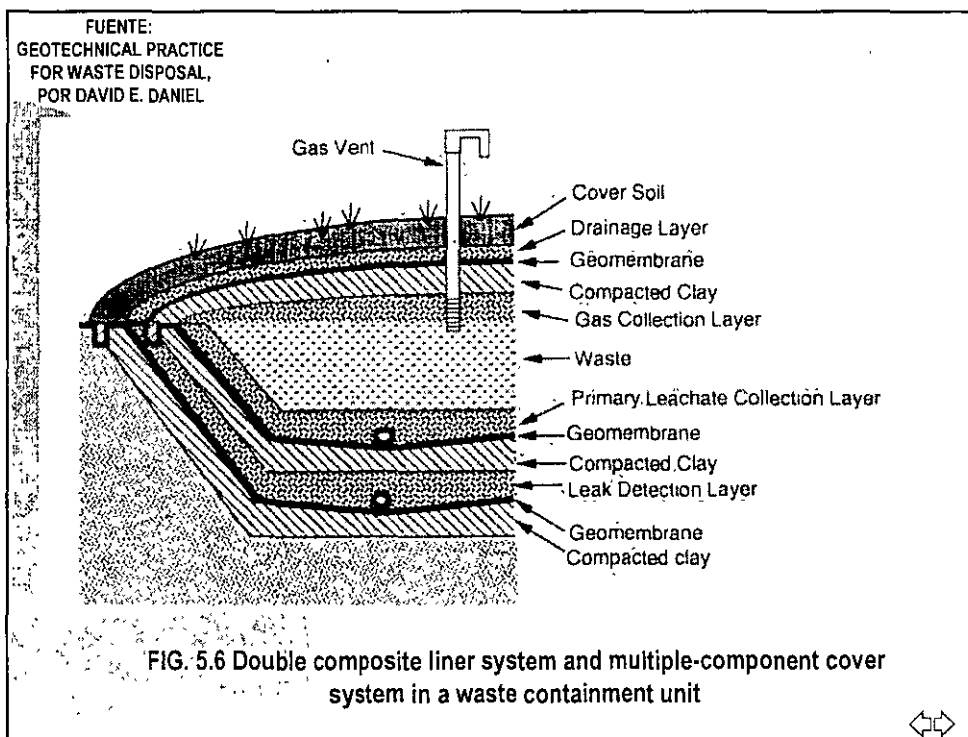
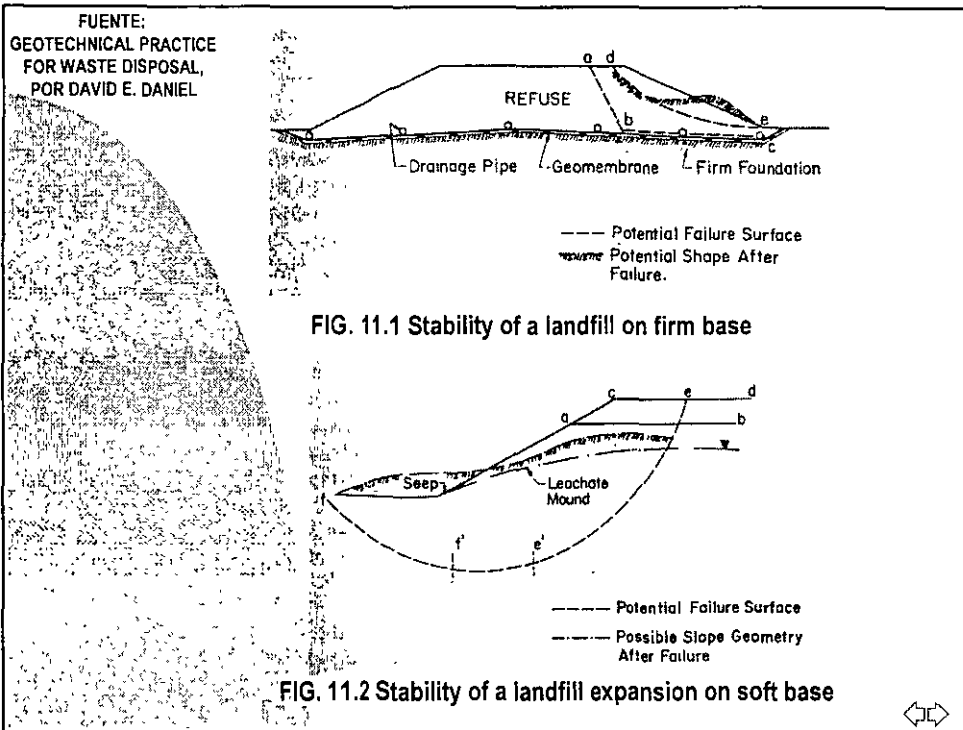
### INFLUENCIA DEL TIEMPO GEOLOGICO

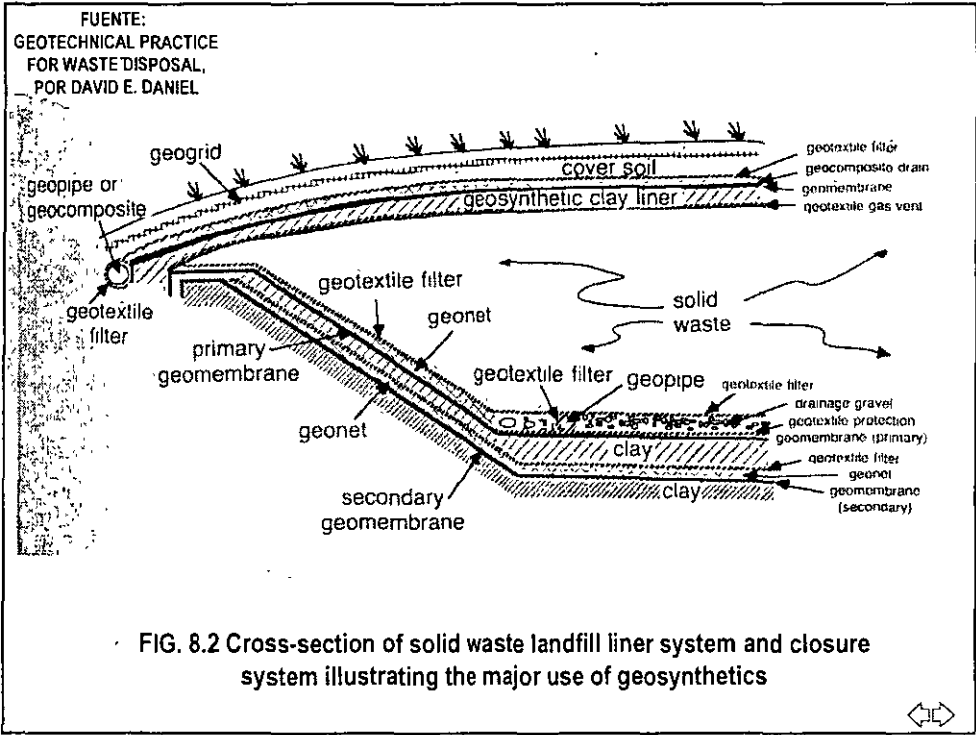
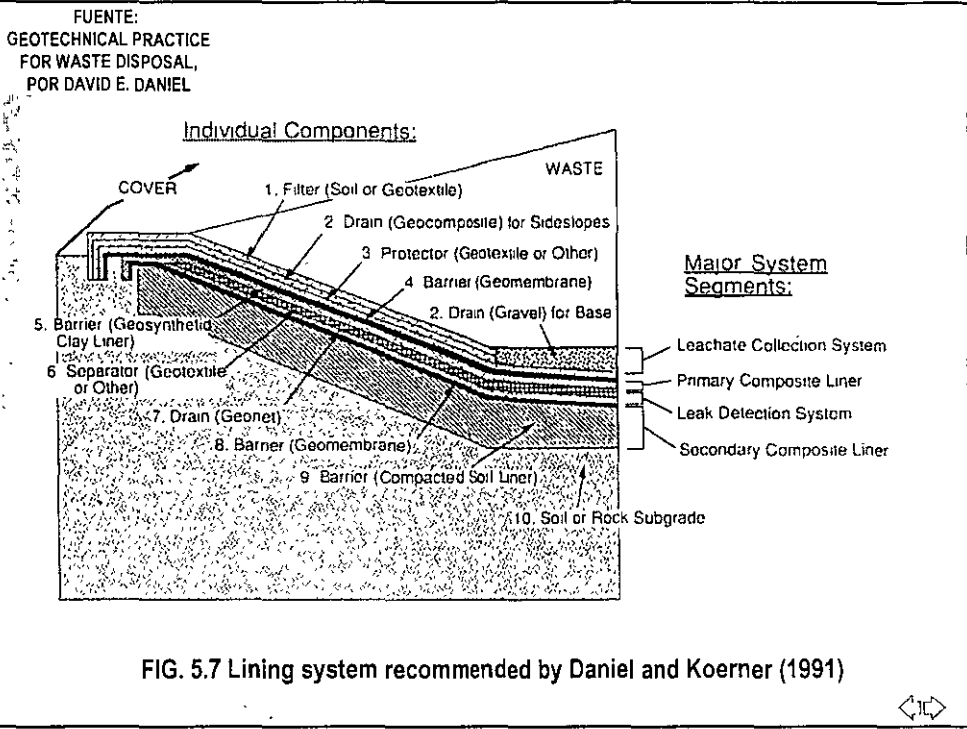


### INFLUENCIA DEL TIEMPO GEOLOGICO











... Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**MODULO I:  
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON  
CONTAMINANTES INORGÁNICOS CA-206**

**TEMA:  
QUÍMICA INORGÁNICA Y PROBLEMAS  
DE CONTAMINACIÓN**

**COORDINADOR: DRA. AURORA ARMENTA  
DEL 05 AL 09 DE SEPTIEMBRE DEL 2005  
PALACIO DE MINERÍA**

# **CARACTERIZACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS**

**Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

## **¿ QUE ES UNA CARACTERIZACIÓN ?**

### **DEFINICION**

**Estudio que se realiza para identificar el tipo, grado y comportamiento de la contaminación en un sitio**

### **ALCANCE**

**Definir las acciones correctivas necesarias para reducir el nivel de contaminación y en su caso cumplir con la normatividad aplicable**



## TIPO DE PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN A ESTUDIAR

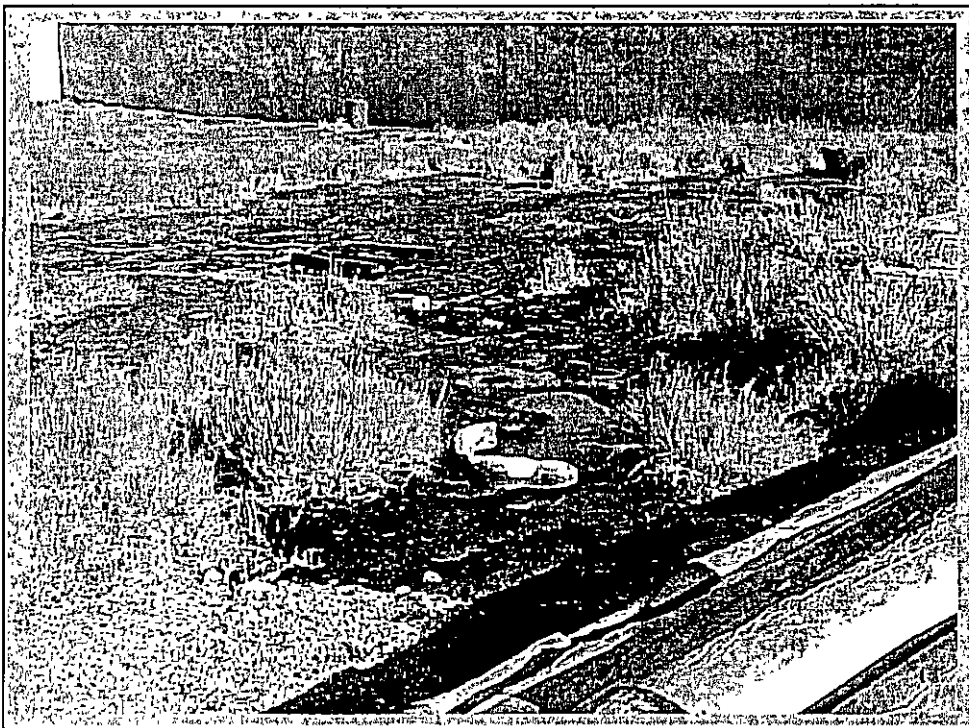
### Post-emergencia ambiental

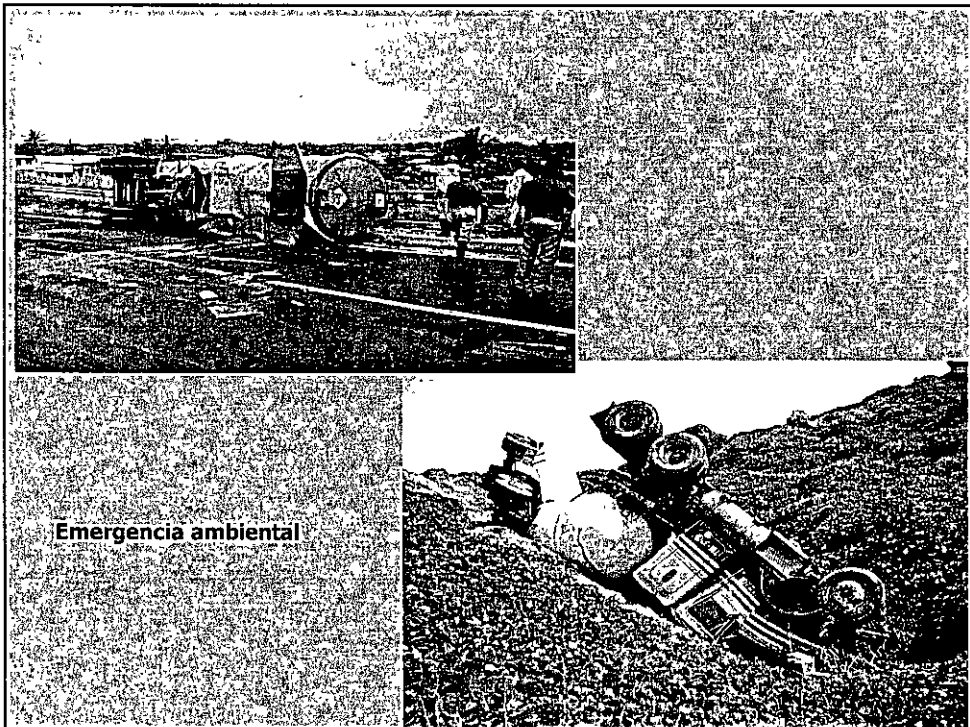
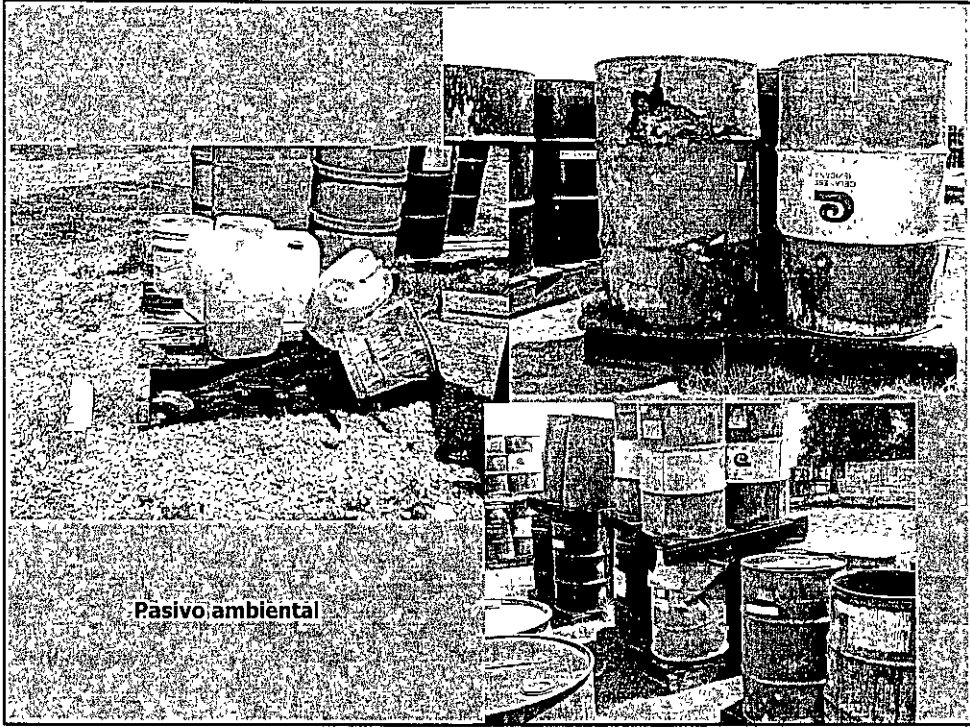
Contaminantes generalmente conocidos que se presentan de manera individual:

- > origen inorgánico
- > origen orgánicos

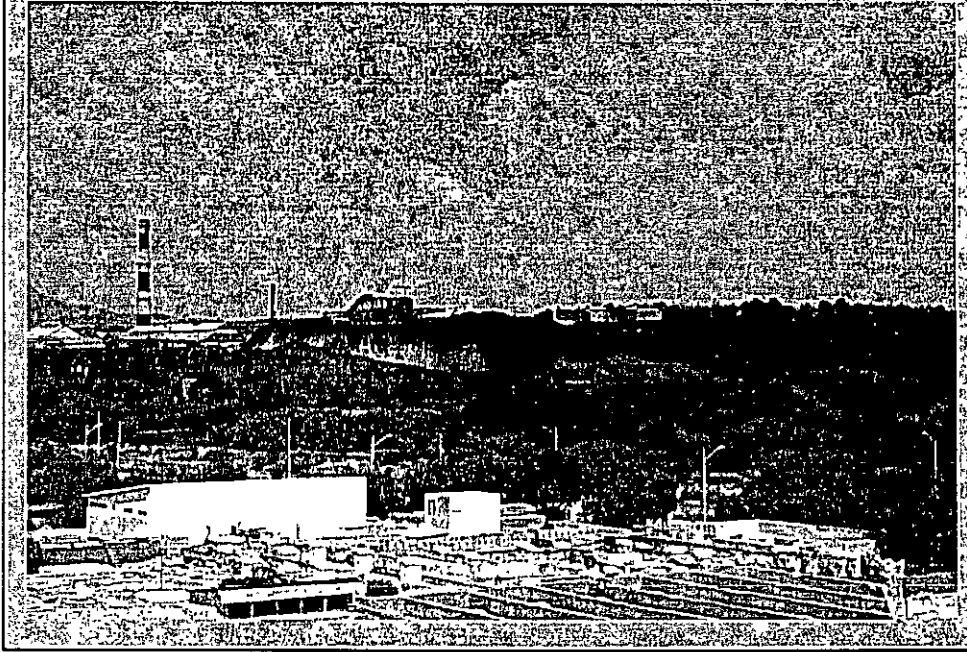
### Pasivo ambiental

Contaminantes generalmente de origen desconocido que pueden estar presentes como mezclas

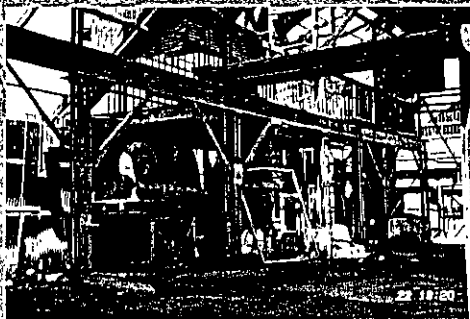


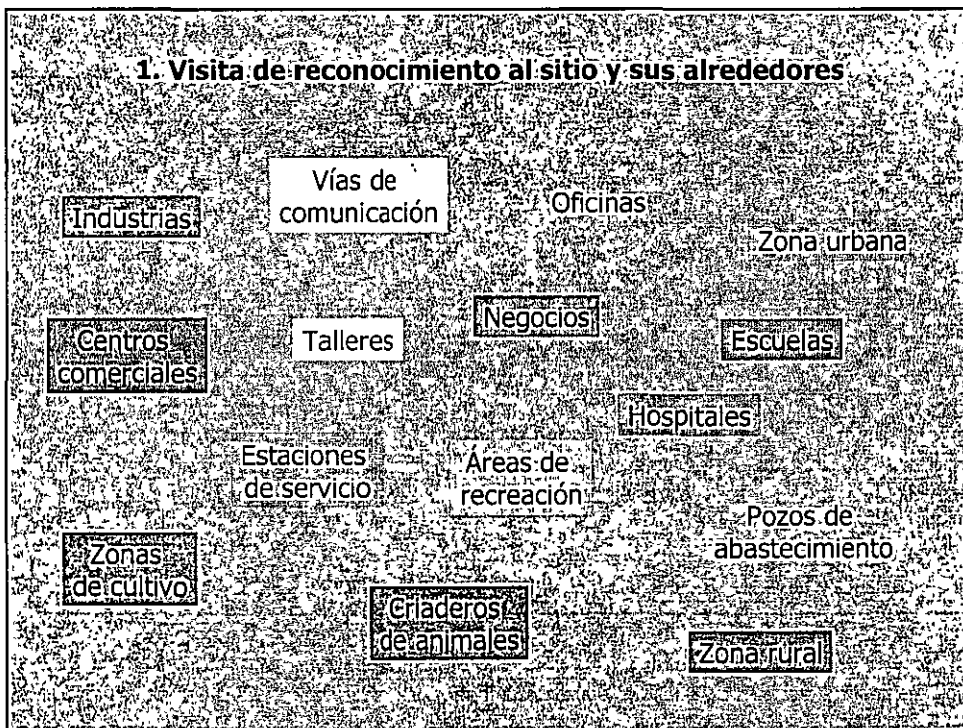
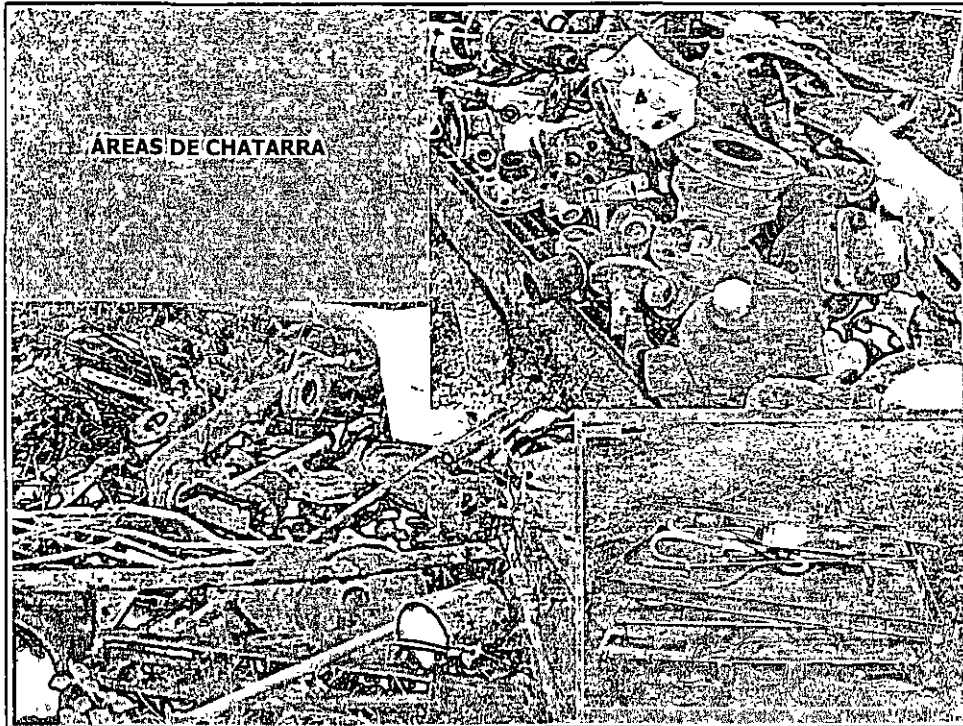


**INDUSTRIA MINERA**  
Jales

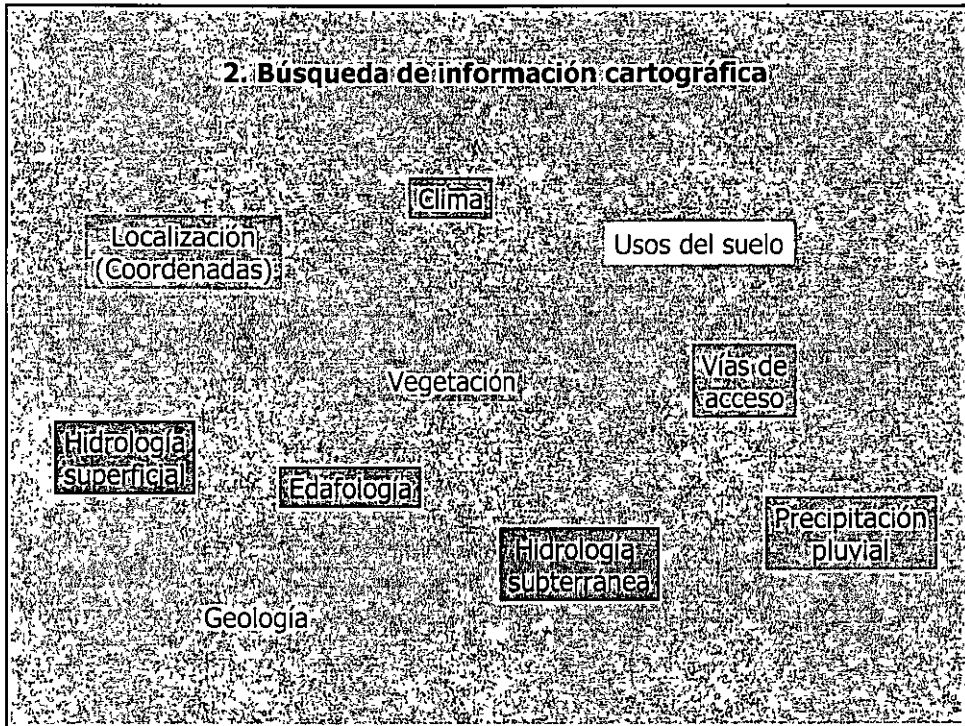


**Plantas fundidoras**  
Escoria

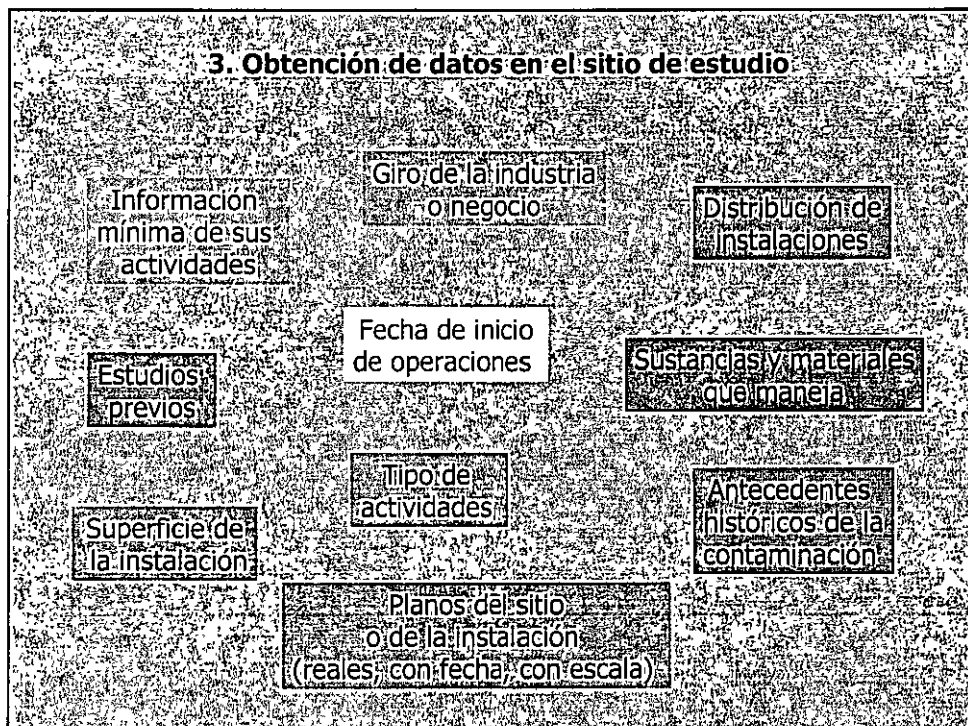


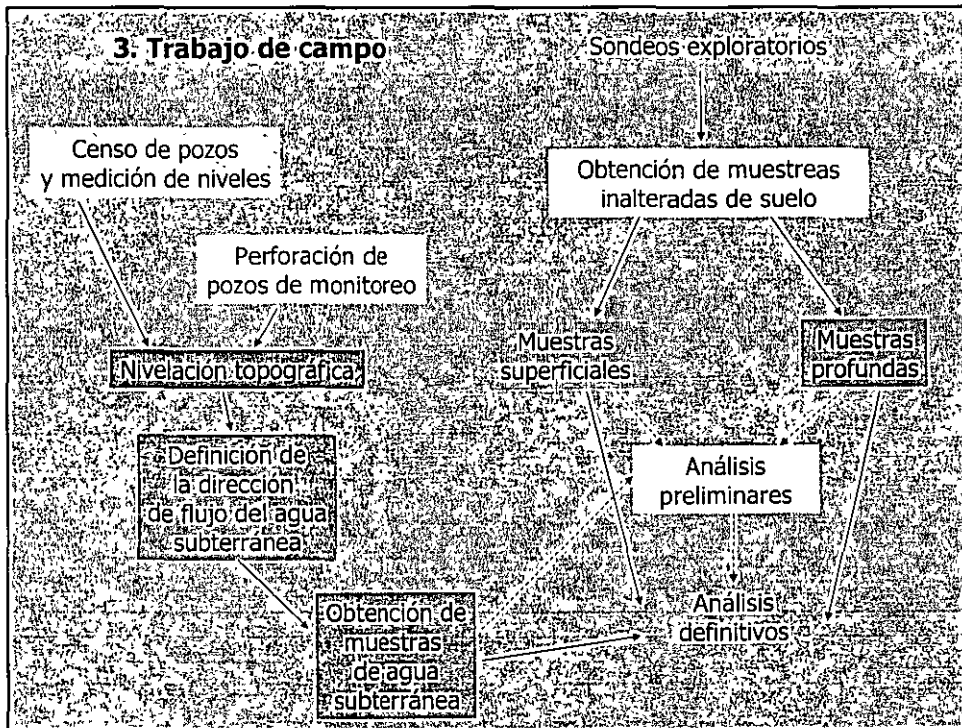
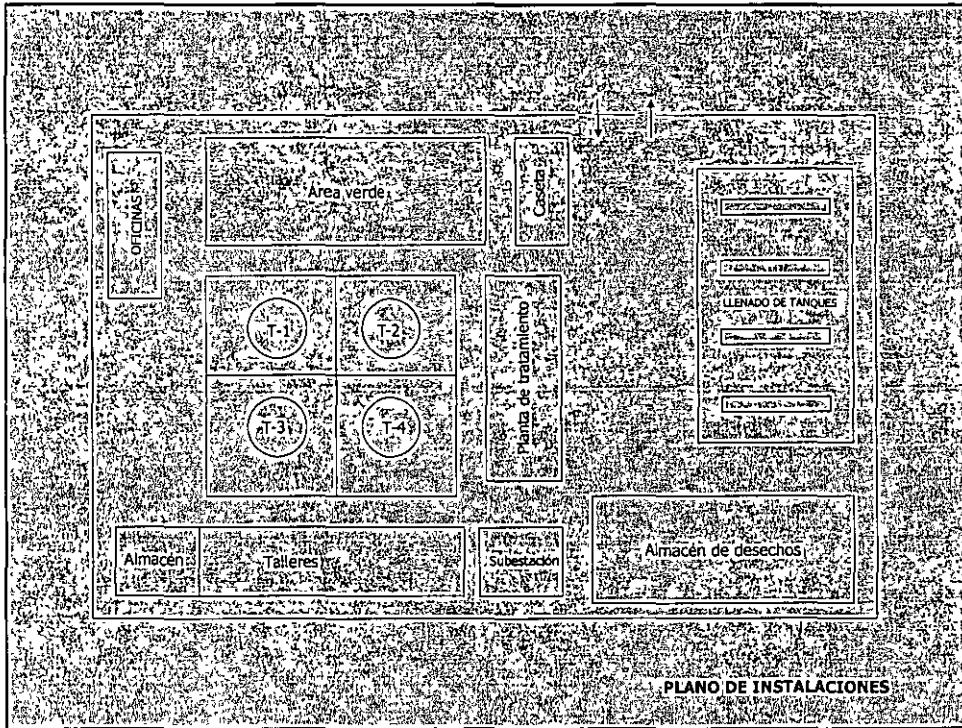


## 2. Búsqueda de información cartográfica



## 3. Obtención de datos en el sitio de estudio





## **SONDEOS EXPLORATORIOS**

**Perforaciones previas al muestreo para conocer de manera preliminar las características de la contaminación cuando esta en el subsuelo y definir los análisis a realizar y los puntos a muestrear**

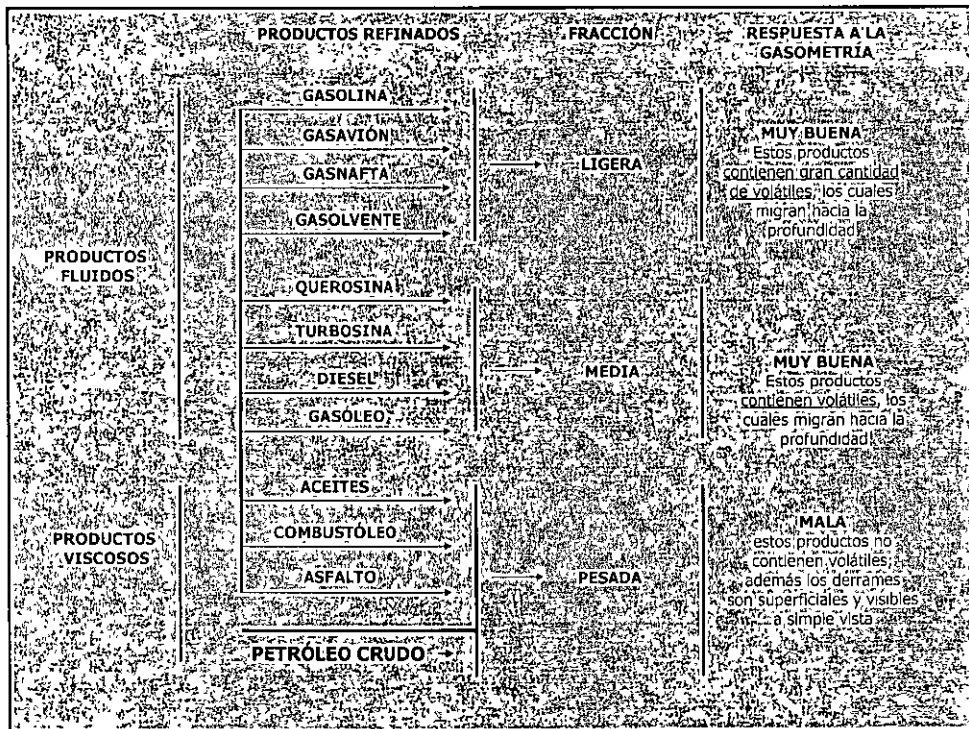
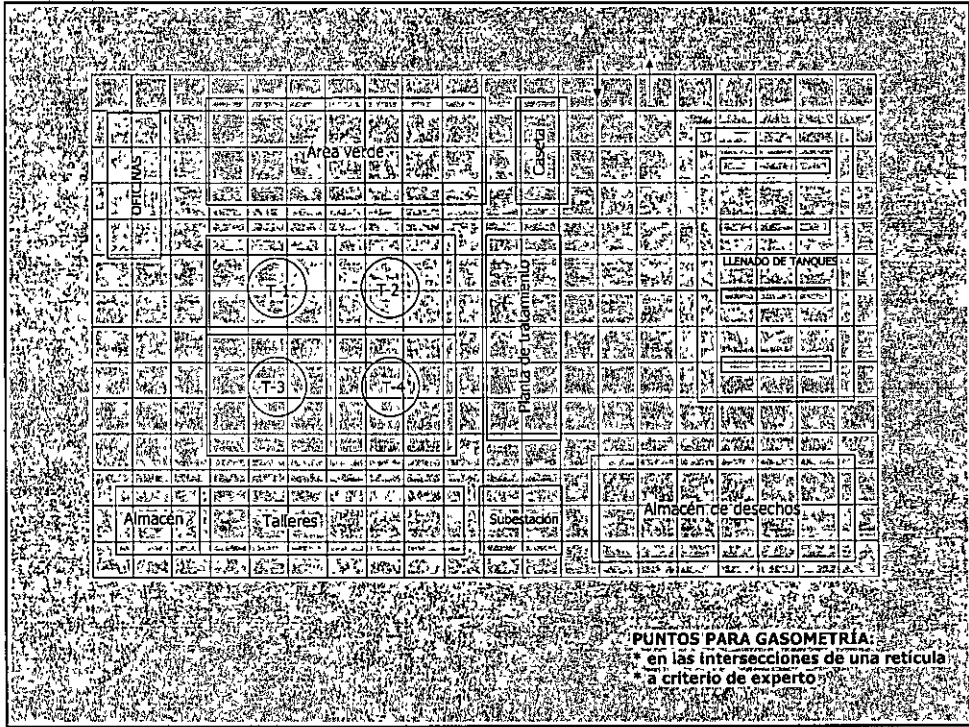
✓ **mediciones de hidrocarburos volátiles**

✓ **mediciones de compuestos orgánicos volátiles**

✓ **mediciones de pH**

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS DE GASOMETRÍA**

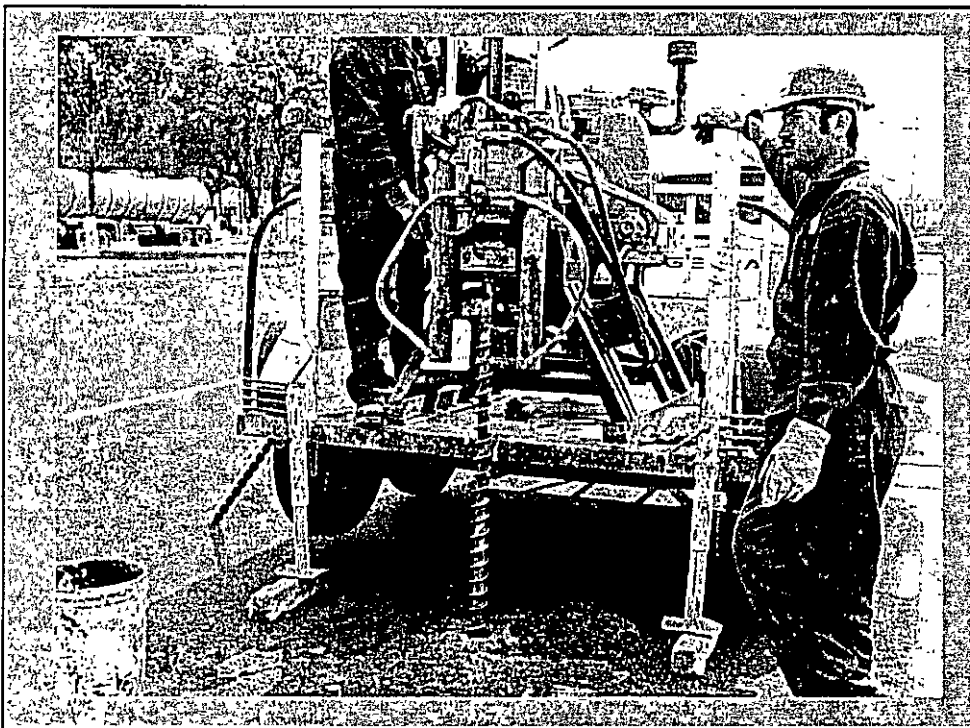
- ✓ **Muy útiles en casos de contaminación con hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles en general**
- ✓ **Permite detectar problemas de contaminación en el subsuelo, que no pueden pronosticarse desde la superficie**
- ✓ **Las lecturas son inmediatas y la interpretación es sencilla**
- ✓ **Es la mejor herramienta de apoyo para definir la localización de puntos para muestreo profundo y aquellos para instalación de pozos de monitoreo**
- ✓ **El costo de los equipos de medición es accesible y su aplicación es muy económica**





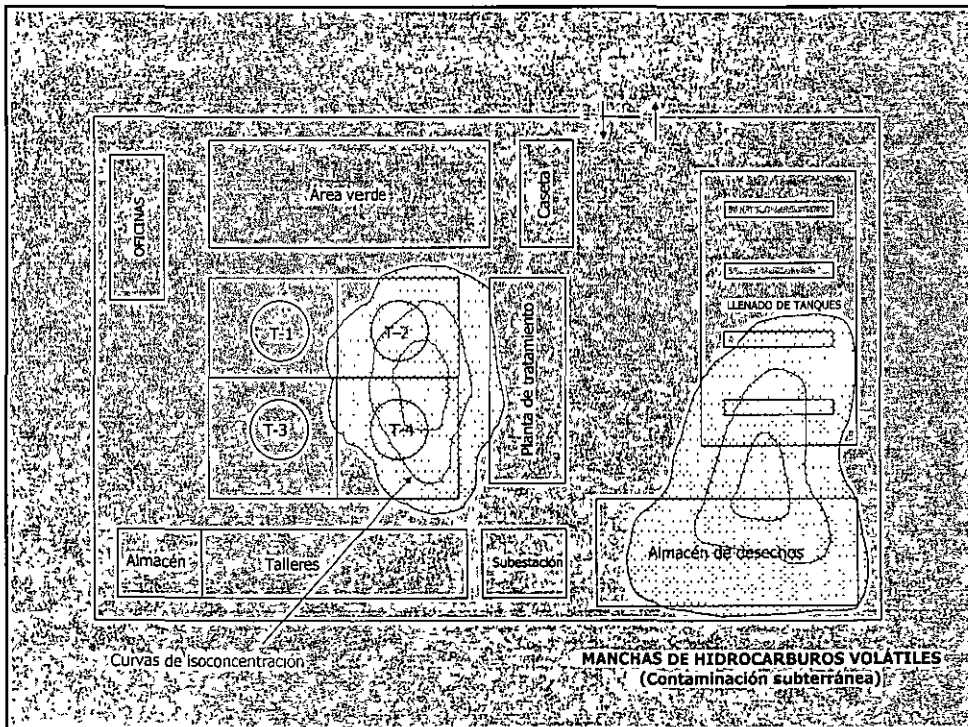
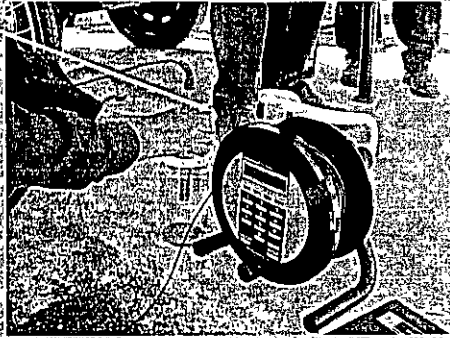
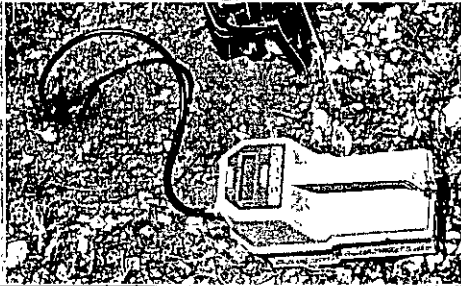
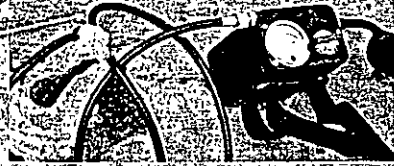


Perforaciones para gasometría ("discretas" por su diámetro pequeño)



### Instrumentos

- medidores de explosividad
- medidores de hidrocarburos volátiles (HCVs) o de compuestos orgánicos volátiles (COVs)



## DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

### En pasivos ambientales:

- Tomar como referencia los antecedentes de la contaminación
- Considerar la distribución de instalaciones
- Considerar las evidencias en suelo superficial

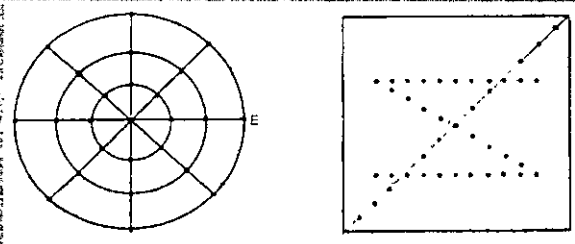
### En estudios de post-emergencia ambiental:

- Considerar las evidencias en suelo superficial  
(en caso de accidentes, solo alrededor de la mancha principal)

### En ambos casos:

- En los puntos donde las lecturas de hidrocarburos volátiles fueron las más altas
  - La profundidad máxima de muestreo será definida por las observaciones de campo, deseablemente un metro más allá de la última muestra que presentó contaminación
- En el caso de metales se requieren muestras de un sitio control para obtener valores de fondo especialmente en el caso de metales

### Ejemplos de patrones de muestreo

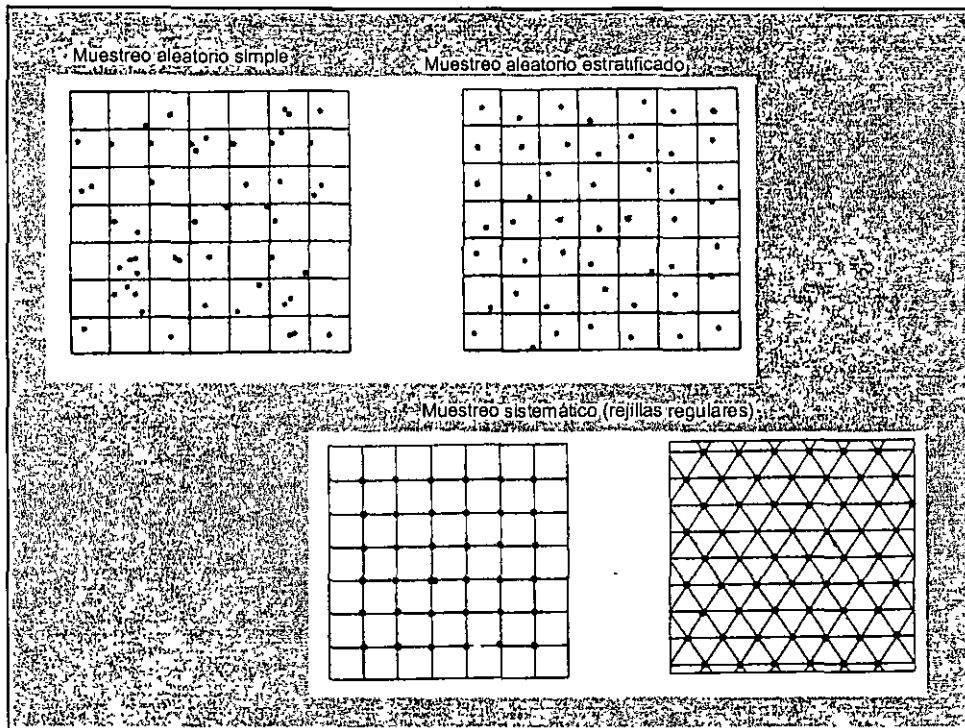


#### Rejillas circulares

- Para delinear una contaminación local
- El radio dependerá del área de influencia

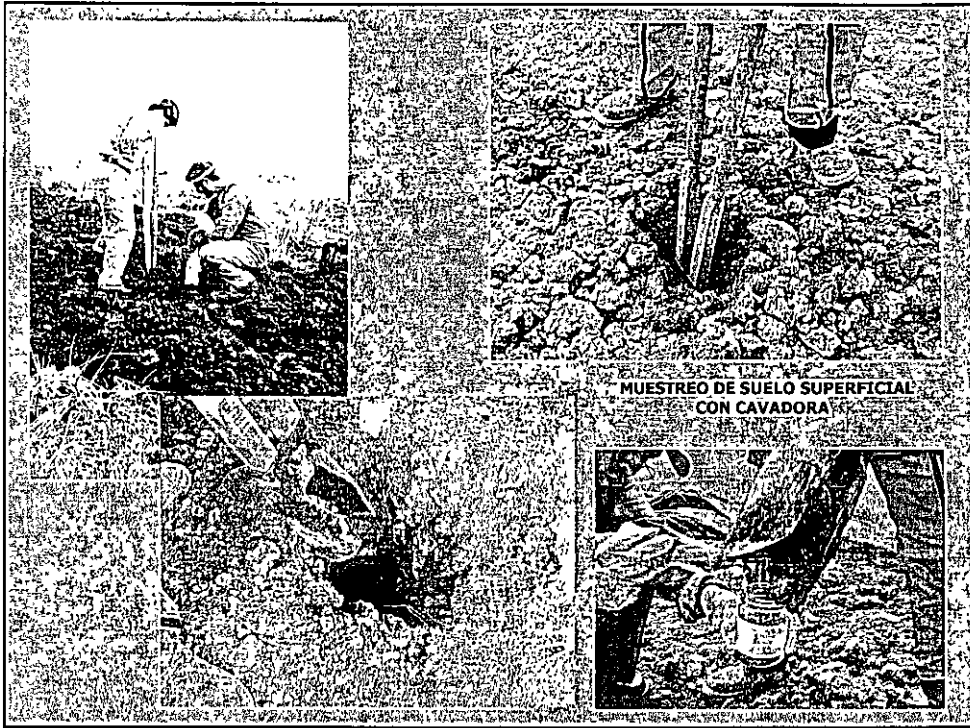
#### No sistemático (muestreo irregular)

- En zigzag
- Distribución relativamente homogénea
- Diseño para tomar muestras compuestas
- Poco adecuado para definir distribución de un parámetro

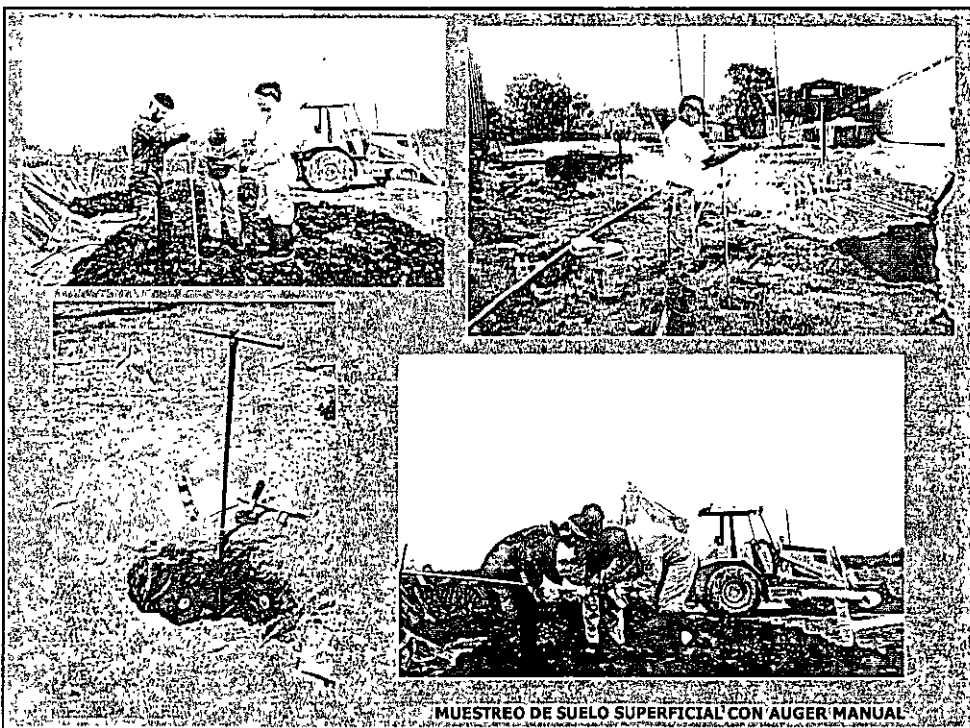


### **OBTENCIÓN DE MUESTRAS INALTERADAS DE SUELO**

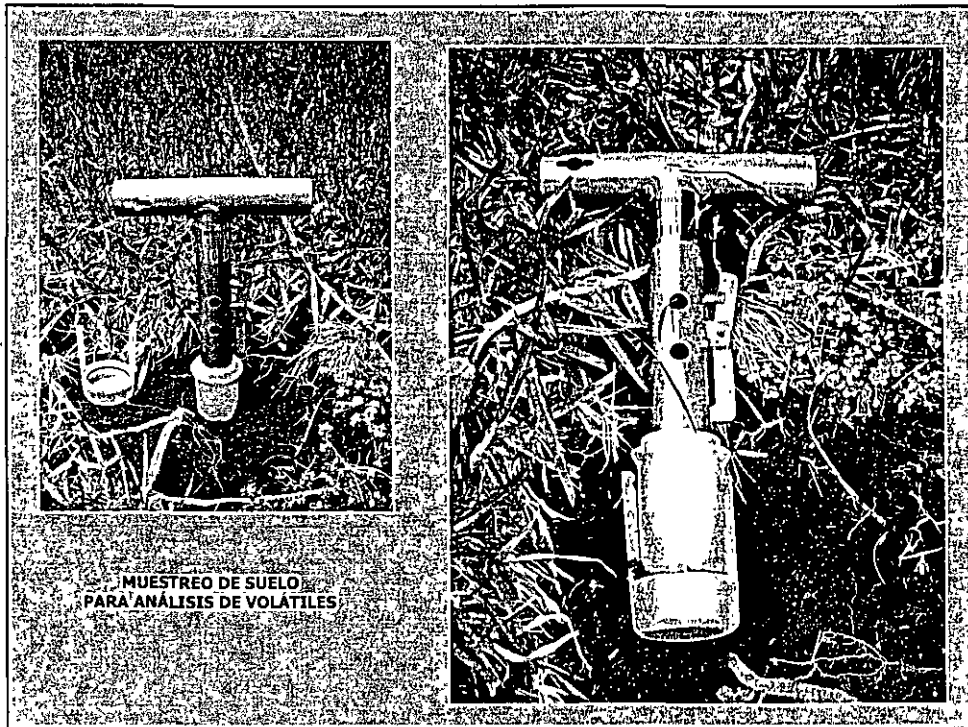
- **En frascos de vidrio para análisis de hidrocarburos y compuestos orgánicos en general**
- **En cartuchos transparentes bien sellados**
- **Para análisis de hidrocarburos volátiles tomar la muestra directamente del suelo en dispositivos especiales para evitar volatilización**

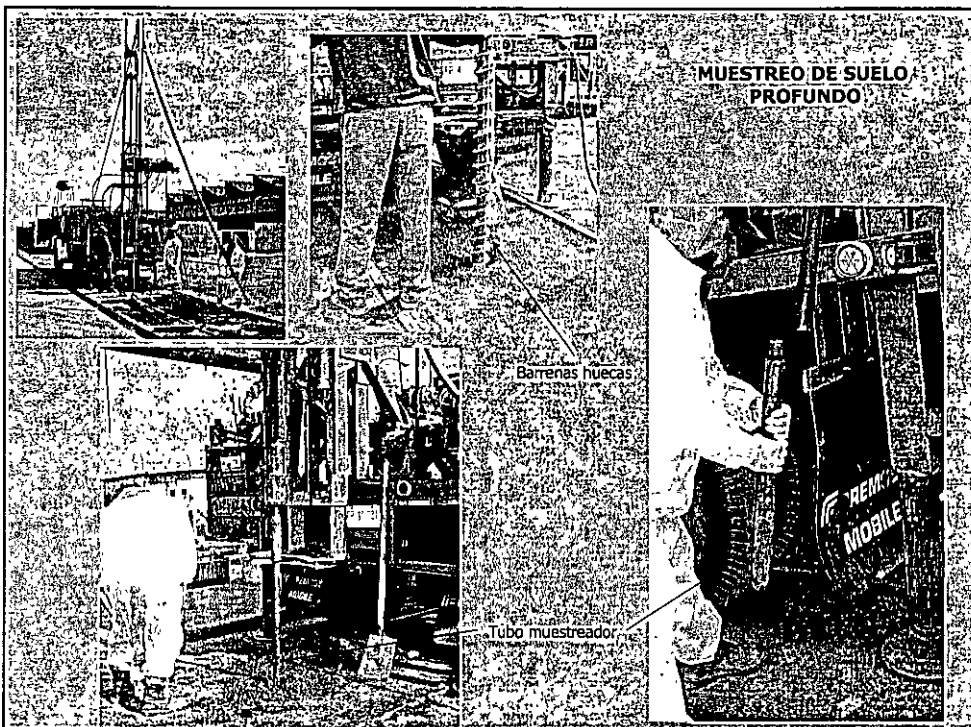
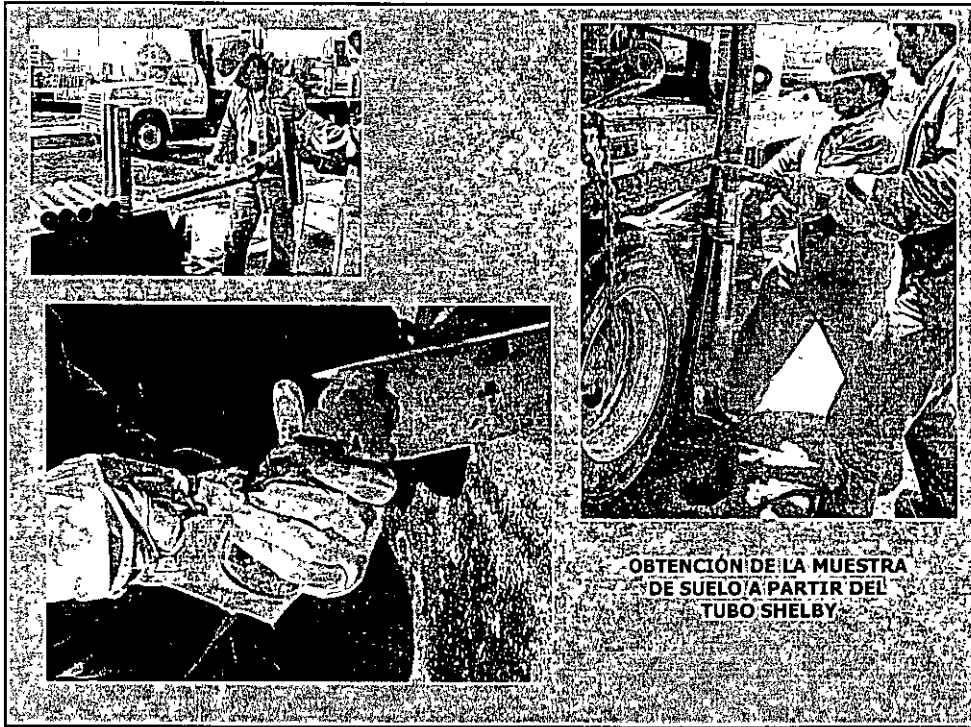


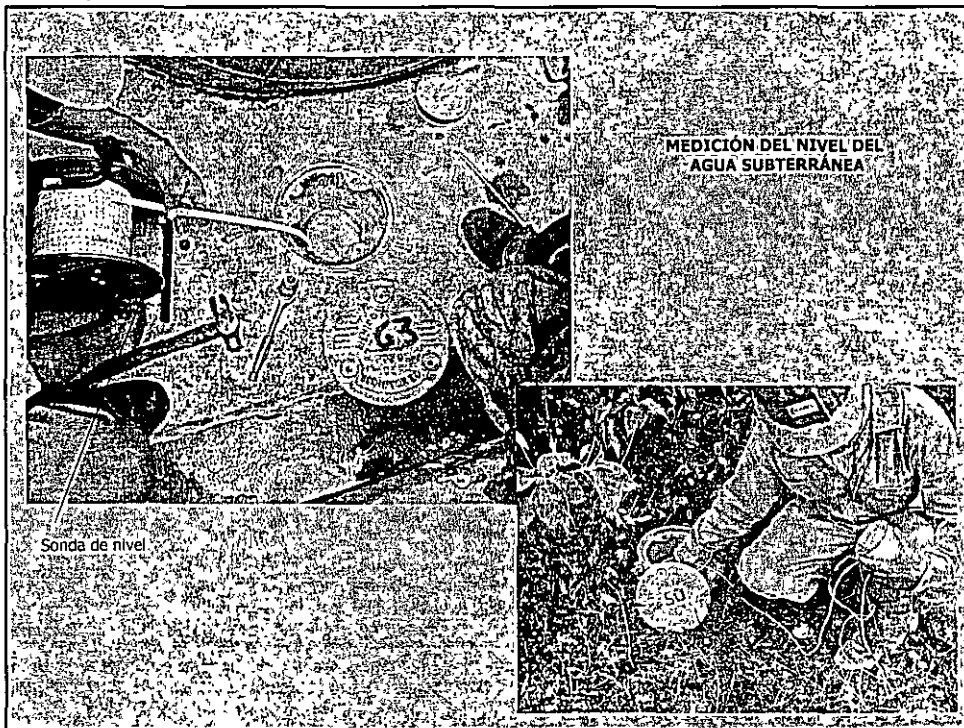
MUESTRO DE SUELO SUPERFICIAL  
CON CAVADORA



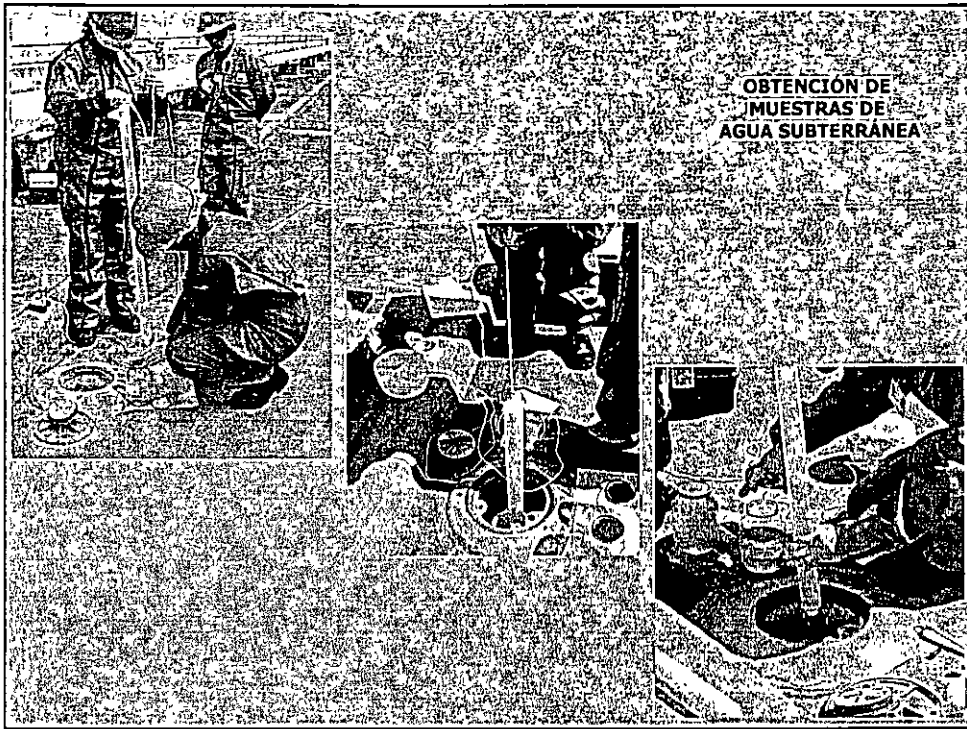
MUESTRO DE SUELO SUPERFICIAL CON AUGER MANUAL



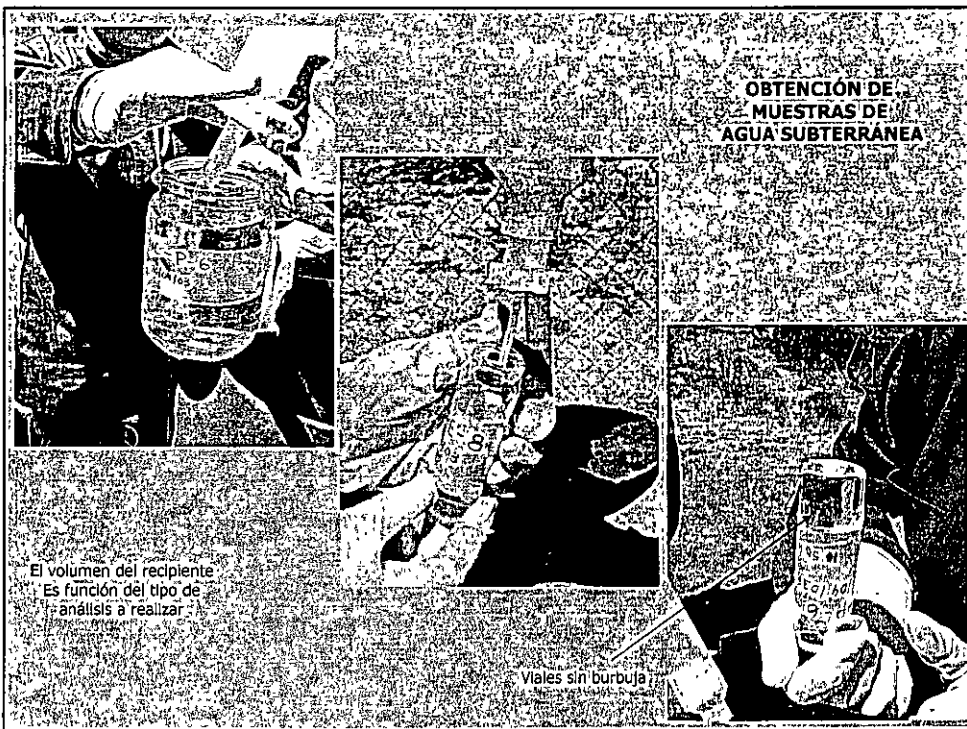








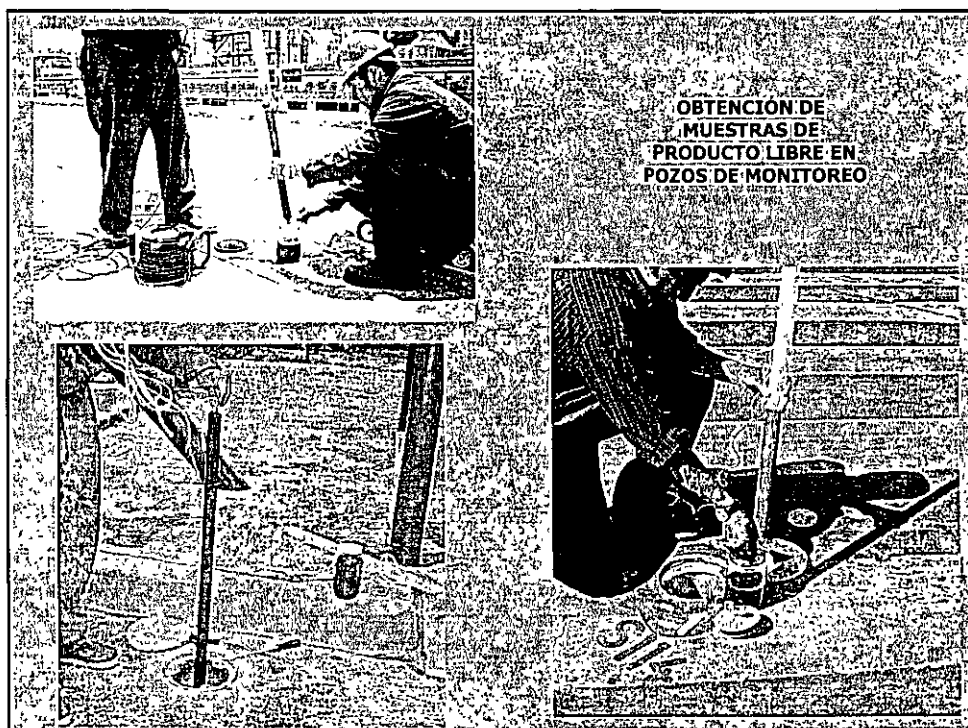
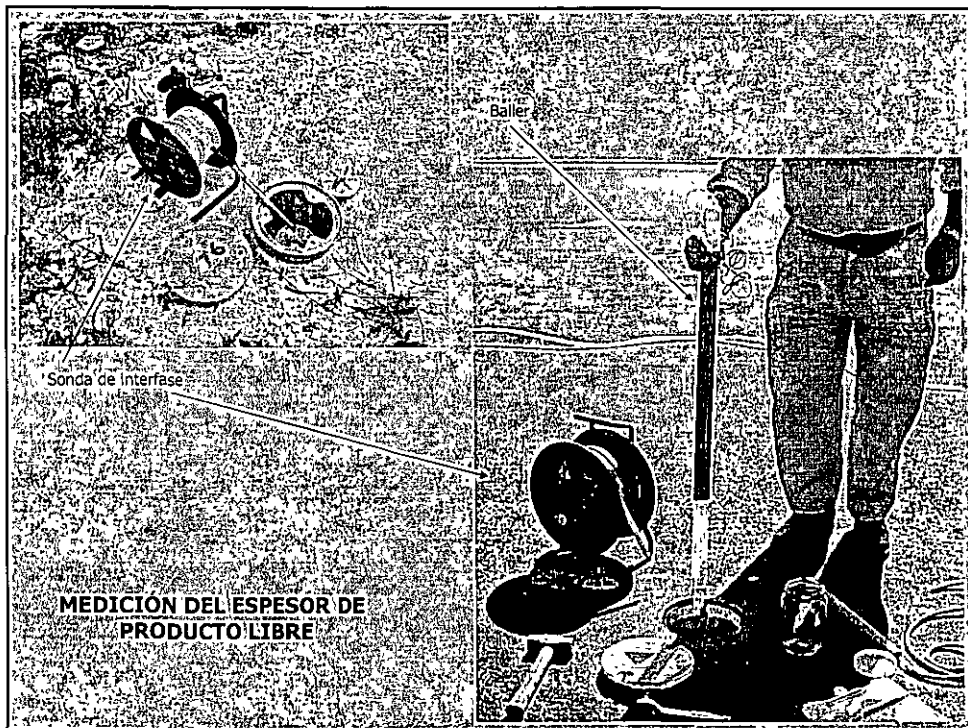
**OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

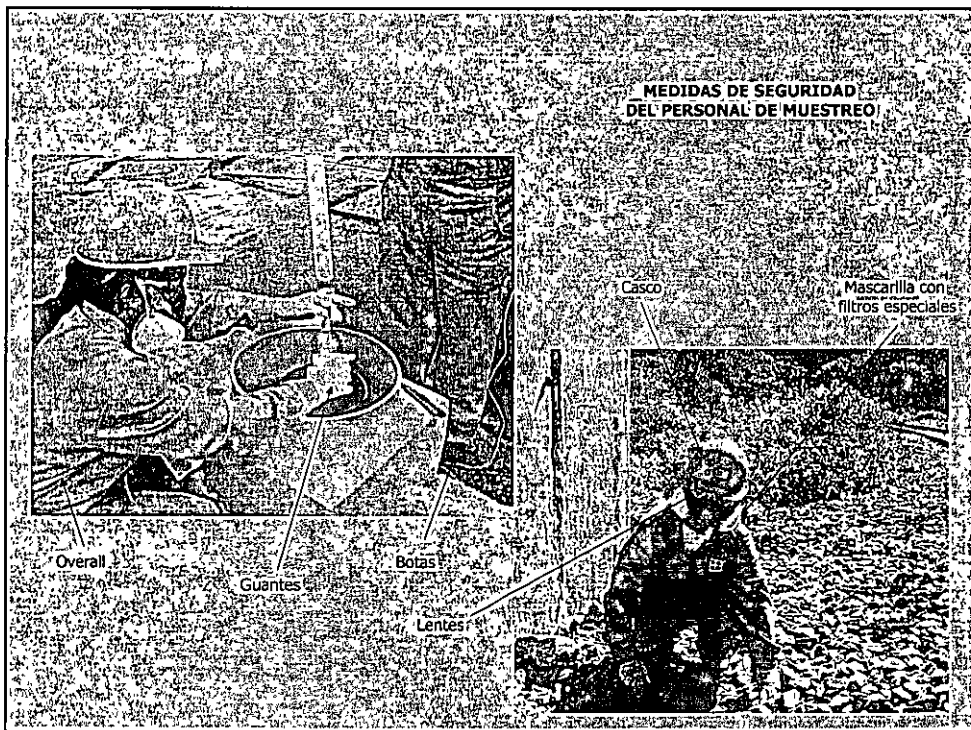
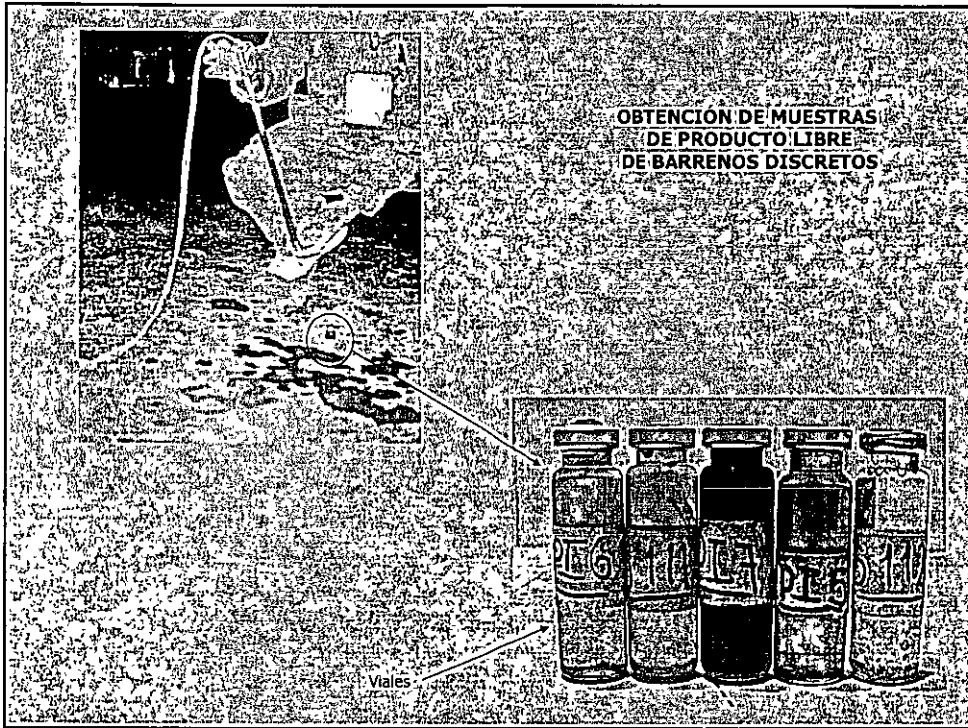


**OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

El volumen del recipiente  
Es función del tipo de  
análisis a realizar

Viales sin burbuja

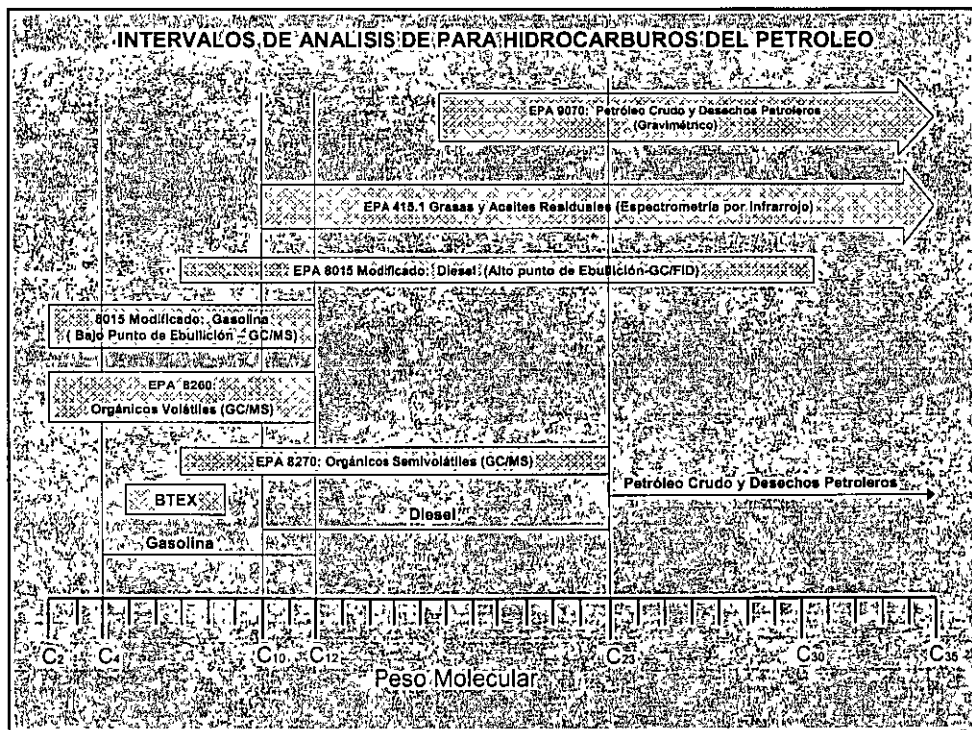


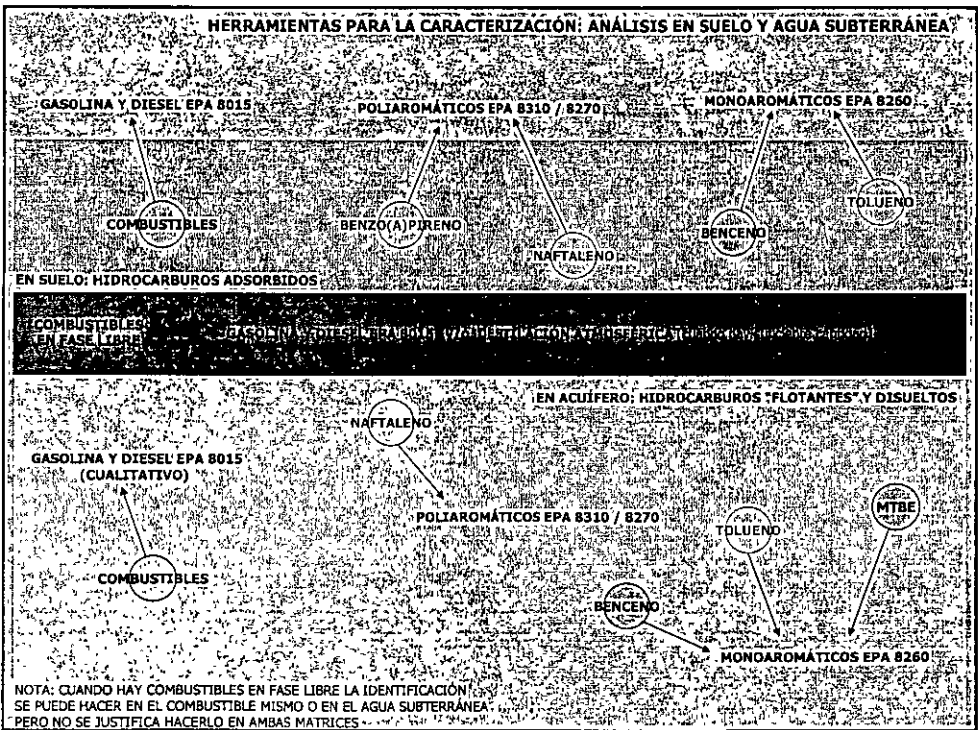
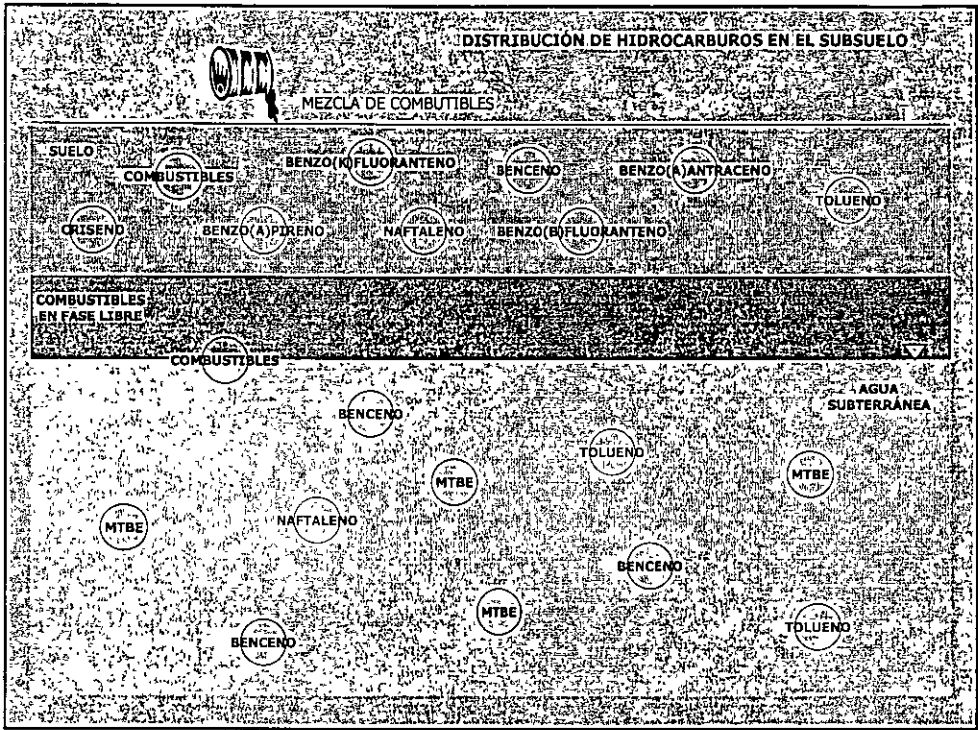


## 4: ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

- Adsorbidos en suelo
- Disueltos en agua
- Aquellos combustibles que conforman el producto libre que flota sobre el agua subterránea

### INTERVALOS DE ANÁLISIS DE PARA HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO





## METALES ASOCIADOS AL PETRÓLEO CRUDO Y COMBUSTIBLES PESADOS



## entidad mexicana de acreditación, a.c.

### Ramas que acredita:

- ✓ Agua
- ✓ Residuos, fuentes fijas, ambiente laboral (suelos)
- ✓ Química
- ✓ Alimentos (agua potable)

La ema, a.c. entrega al laboratorio un documento con el No. de Acreditación por cada rama indicando la vigencia de la misma, el listado con todas las pruebas acreditadas y de los signatarios autorizados.

Esta información debe estar disponible para los involucrados.

organismos encargados de la aprobación de métodos analíticos que la ema, a.c. acredita a los laboratorios de prueba

✓ **CENICA-INE**

fuentes fijas, residuos y ambiente laboral (suelos)

NOM-085-ECOL-1994; PRY-NOM-098-ECOL-2000; NOM-052-ECOL-1993;  
NOM-053-ECOL-1993; NOM-010-STPS-1999; (NOM-EM-138-ECOL-2002)

✓ **SECRETARÍA DE SALUD**

alimentos (agua potable)

NOM-127-SSA1-1994 (2000)

✓ **CNA**

aguas naturales, subterránea, residual

NOM-001-ECOL-1996, Lineamientos de la Ley Federal de Derechos en  
Materia de Agua, Criterios Ecológicos de Calidad del Agua

**ANÁLISIS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS ADSORBIDOS EN SUELO**

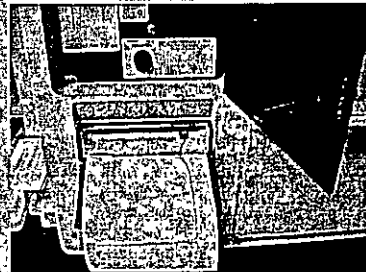
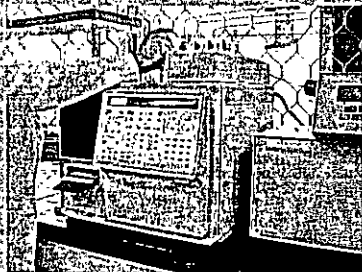
✓ **Combustibles** **EPA 8015 C**

✓ **Monoaromáticos (BTEX)** **EPA 8260 B**  
(benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos)

✓ **Poliaromáticos** **EPA 8310**

✓ **Orgánicos volátiles** **EPA 8260 B**

✓ **Orgánicos semivolátiles** **EPA 8270 D**



PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Tabla 1. HIDROCARBUROS QUE DEBERAN ANALIZARSE EN FUNCIÓN DEL PRODUCTO CONTAMINANTE

PRODUCTO CONTAMINANTE	HIDROCARBUROS					
	FRACCIÓN PESADA	POLAROMÁTICOS	FRACCIÓN MEDIA	POLAROMÁTICOS	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezclas desconocidas	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Petróleo crudo	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Combustóleo	XXX	XXX				
Emulsiones asfálticas	XXX	XXX				
Asfalto	XXX	XXX				
Parafinas						
Petrolatos	XXX	XXX				
Ácetes	XXX	XXX				
Gasóleo			XXX	XXX		
Diesel			XXX	XXX		
Turbosina			XXX	XXX		
Keroseno			XXX	XXX		
Creosota			XXX	XXX		
Gasavión					XXX	XXX
Gasolvente					XXX	XXX
Gasolina					XXX	XXX
Gasnafta					XXX	XXX

PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Tabla 2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS  
mg/kg base seca

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (Incluye forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (Incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
LIGERA	200	200	500	Anexo A.1
MEDIA	1,000	1,000	3,000 (2,000)	Anexo A.2
PESADA	3,000 (1,000)	3,000 (1,000)	6,000 (2,000)	Anexo A.3



PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Tabla 3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS EN SUELOS  
mg/kg base seca

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
Benceno	6	6	15	Anexo A.4
Tolueno	40	40	100	
Etilbenceno	10	10	25	
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	
Benzopireno	2	2	2	Anexo A.5
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	2	
Benzo(a)antraceno	2	2	2	
Benzo(b)fluoranteno	2	2	2	
Benzo(k)fluoranteno	8	8	8	
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	2	

NOM-133-ECOL-2000

DOF 10 diciembre 2001

PROTECCIÓN AMBIENTAL

BIFENILOS POLICLORADOS (BPCs) ESPECIFICACIONES DE MANEJO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EMISIONES AL MEDIO AMBIENTE DE BPCs EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

EMISIONES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
a la atmósfera	0.05 microgramos/m <sup>3</sup>
en agua residual	5 microgramos/l
en sólidos residuales	menos de 50 mg/kg BS

LÍMITES MÁXIMOS DE CONTAMINACIÓN EN SUELO

USO DE SUELO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE EN mg/kg BS con la sumatoria de todos los congéneres de BPCs detectados
agrícola	0.5
residencial	5
industrial/comercial	25

**ANALISIS DE COMPUESTOS ORGANICOS EN AGUA SUBTERRANEA**

- ✓ **Combustibles flotantes** **EPA 8015 C**
- ✓ **Monoaromaticos disueltos (BTEX) y MTBE** **EPA 8260 B**  
(benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos)
- ✓ **Poliaromaticos disueltos** **EPA 8310**
- ✓ **Organicos volátiles** **EPA 8260 B**
- ✓ **Organicos semivolátiles** **EPA 8270 D**

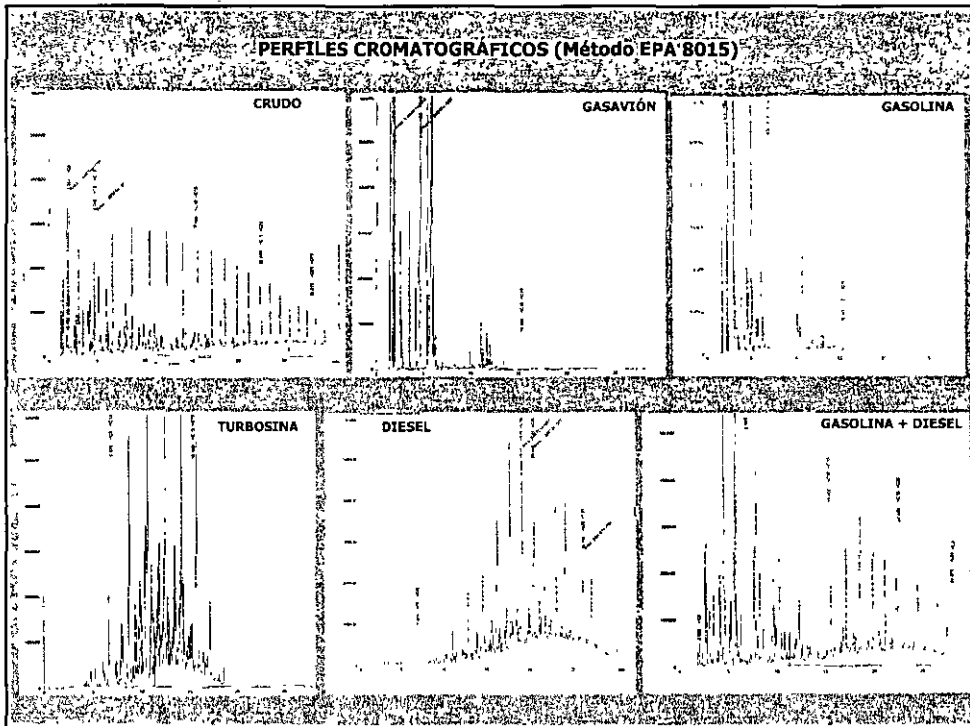
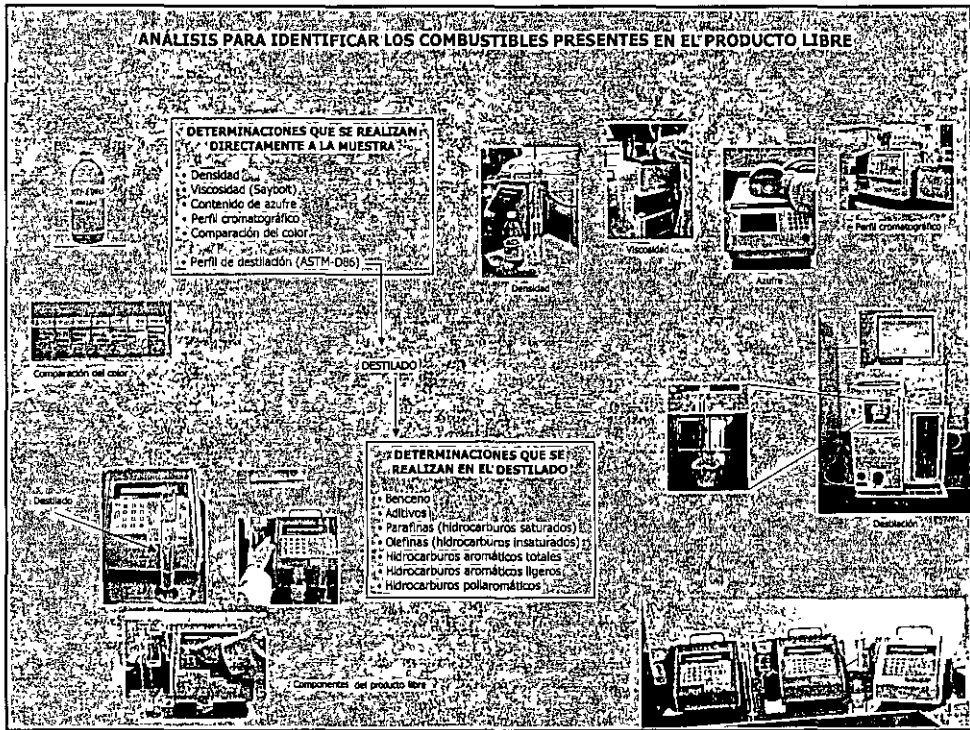


**NOM-127-SSA1-1994 (2000)**

version actualizada en el DOF 22 noviembre 2000

**SALUD AMBIENTAL  
AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO  
LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A  
QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA  
PARA SU POTABILIZACIÓN**

<b>HIDROCARBUROS</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE mg/l</b>
<b>benceno</b>	<b>0.010</b>
<b>tolueno</b>	<b>0.700</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>0.300</b>
<b>xilenos</b>	<b>0.500</b>



GDT  
Profepa  
1999

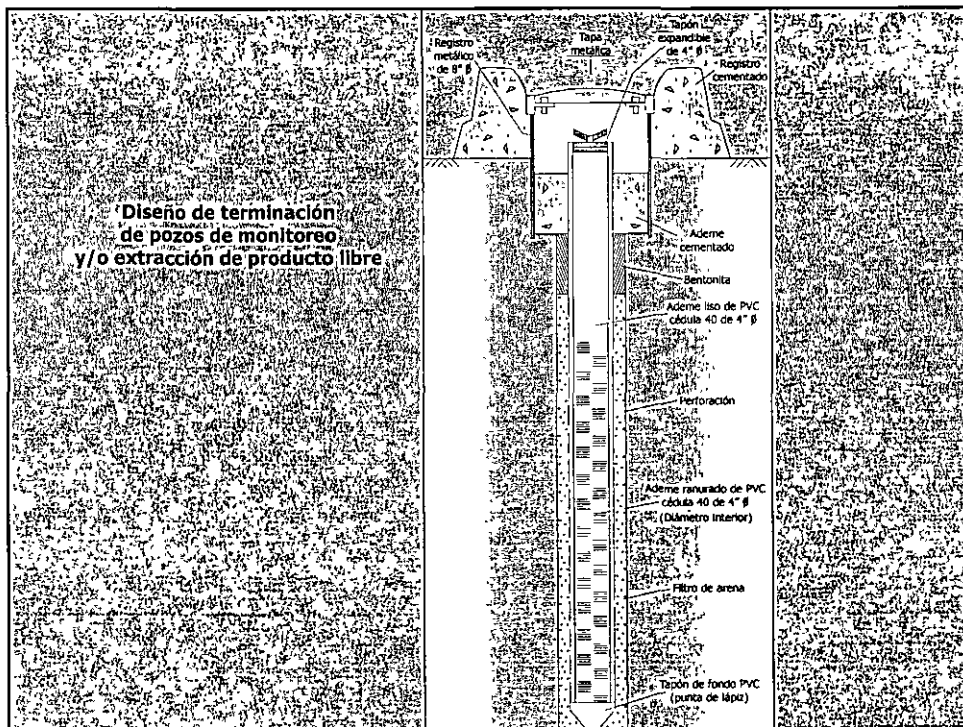
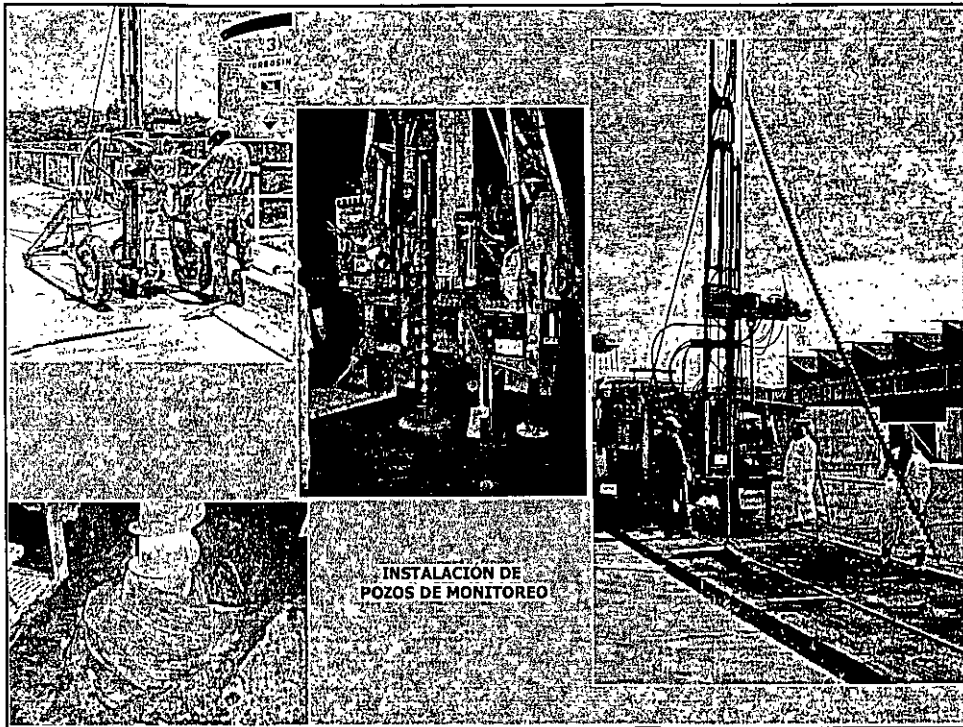
**2do. GRUPO DE CRITERIOS INTERNOS DE RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON INORGÁNICOS TÓXICOS (METALES PESADOS) Y OTROS**

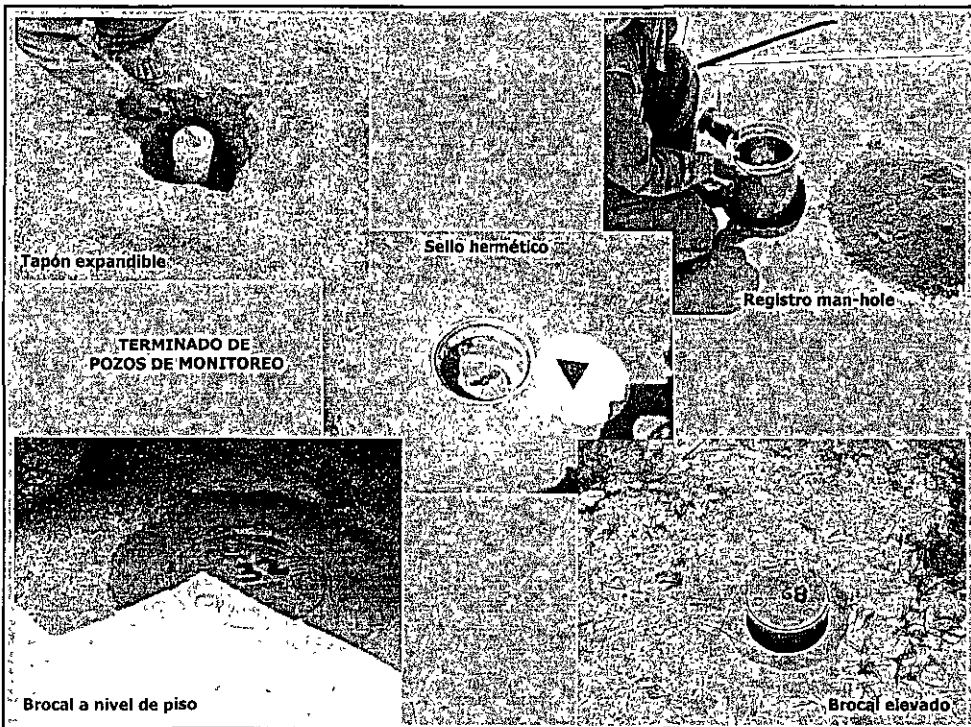
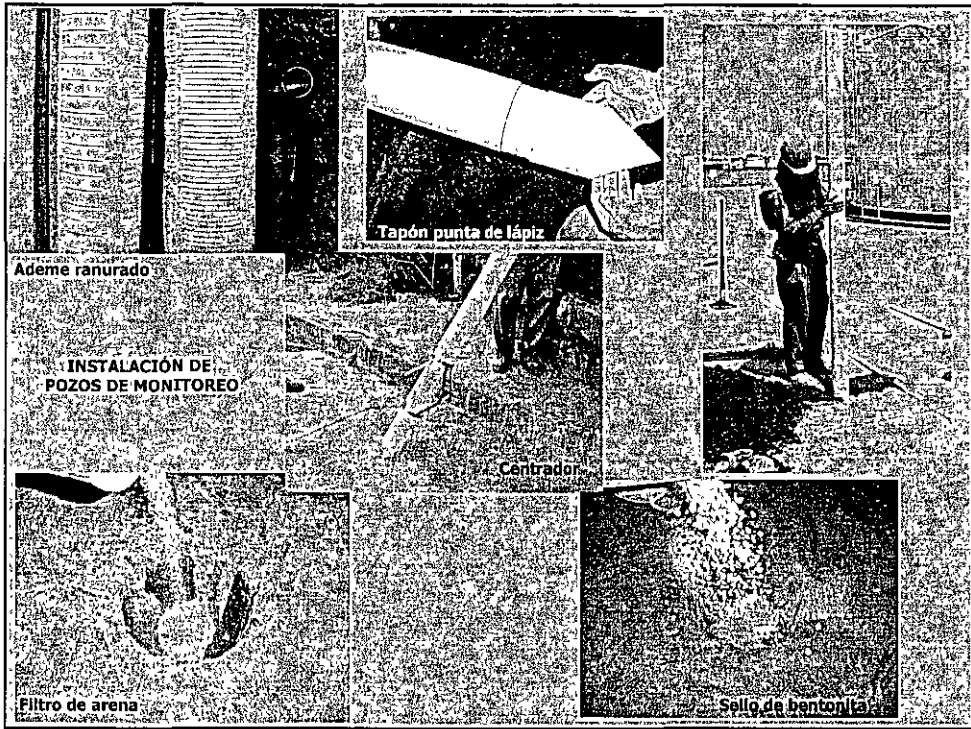
Contaminante	Uso Residencial mg/kg ppm	Agrícola mg/kg ppm	Uso Industrial mg/kg ppm	Método Analítico (EPA)
PLOMO TOTAL	200	100	1,500	7420
ARSENICO TOTAL	20	20	40	7061
BARIO TOTAL	750	150	1,500	7080
CADMIO TOTAL	20	20	100	7130
MERCURIO TOTAL	20	20	100	7471
NIQUEL TOTAL	150	75	700	7520
SELENIO TOTAL	20	20	100	7741
ZINC TOTAL	800	300	1,500	7950
CROMO TOTAL	375	75	750	7190
CIANURO	50	5	500	9010 A
ACRILAMIDA	0.2	0.02	2.4	8260C
ACRILONITRILLO	1.4	0.02	4.8	8260C
PLOMO ORGANICO	0.5	0.1	1	PENDIENTE
HIDROCARBUROS MONOAROMATICOS TOTALES (Arominas + otros disolventes)	40	40	100	8260C

Estos criterios son referencias genericas. Cada propuesta de restauración se resuelve caso por caso

**LÍMITES PERMISIBLES A UTILIZAR EN CASOS DE CONTAMINACIÓN DE AGUA CON METALES**

CONTAMINANTE (mg/l)	AGUA POTABLE NOM-127-SSA1-1994 (2000)	FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE CECCA-001-1989
Aluminio	0.20	0.02
Arsénico	0.05	0.05
Bario	0.70	1.00
Cadmio	0.005	0.01
Cobre	2.00	1.00
Cromo	Total 0.05	Cromo VI 0.05
Fierro	0.30	0.30
Manganeso	0.15	0.10
Mercurio	0.001	0.001
Níquel		0.01
Plata		0.05
Plomo	0.01	0.05
Zinc	5.00	5.00





## **ALGO QUE SIEMPRE SE DEBE RECORDAR**

**Todo estudio de caracterización debe ser planeado para cubrir las necesidades de cada sitio en particular**

## **PREGUNTAS QUE DEBE RESPONDER UN ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN**

- **QUE TIPO DE CONTAMINANTES EXISTEN?**
- **CUAL ES O FUE LA FUENTE DE CONTAMINACIÓN?**
- **CUAL ES LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES?**
- **CUALES SON LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN EN SUELO Y EN AGUA SUBTERRÁNEA?**
- **LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN REBASAN ALGUNA NORMA OFICIAL O DISPOSICIÓN OFICIAL?**
- **LA CONTAMINACIÓN SE ENCUENTRA DENTRO DEL PREDIO, O REBASA EL LÍMITE PERIMETRAL?**
- **HAY TERCEROS AFECTADOS?**

**ALGUNOS COSTOS DE LOS CONCEPTOS DE CARACTERIZACIÓN**

**Perforaciones**

**Mediciones de campo**

**Obtención de muestras inalteradas**

**Análisis de contaminantes**

Perforación de sondeos exploratorios	\$ 1,500 - \$ 4,000 metro lineal
Perforación e instalación de pozos de monitoreo	\$ 5,000 - \$ 10,000 metro lineal
Análisis de contaminantes	\$ 800 - \$ 2,000 por grupo de compuestos

**ssb@pumas.iingen.unam.mx**



## **CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS:**

### **ESTADO ACTUAL DEL MARCO LEGAL Y NORMATIVO**

Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM  
Mayo del 2004

ssb@pumas.ingen.unam.mx

#### **MARCO GENERAL EN ASUNTOS DE CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS**

- **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**
- **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**
- **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos**
  - **Ley de Aguas Nacionales**
  - **Ley Federal de Metrología y Normalización**
    - **Código Penal Federal**
  - **Código Federal de Procedimientos Penales**
  - **Ley Orgánica de la Administración Pública**
  - **Ley de Procedimientos Administrativos**
  - **Ley General de Población**

## **MARCO LEGAL Y REGLAMENTOS**

### **LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE**

**versión original: 1988**

**versión 1996: incluyó las figuras de los DELITOS AMBIENTALES  
y de la REPARACIÓN DEL DAÑO (multas, indemnización, restauración)**

#### **Título IV. Protección al Ambiente**

##### **Capítulo III. Prevención y Control de la Contaminación del Suelo**

Artículos 134 a 144

##### **Capítulo VI. Materiales y Residuos Peligrosos**

Artículos 150 a 153

Modificaciones:

10 Dic 1999: Decreto de modificación

31 Dic 2001: Decreto de modificación

25 Feb 2003: Reformas

Sus reglamentos .....

**REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA  
PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS**

**versión original: 1988**

- ✓ Al igual que la LGEEPA considera exclusivamente a los **RESIDUOS PELIGROSOS**, siendo que la gran mayoría de hidrocarburos son no-peligrosos
- ✓ Documento obsoleto que no responde ni a la LGEEPA actual, ni a las necesidades actuales
- ✓ En el 2000, el entonces INE de la SEMARNAT generó una propuesta de actualización considerando residuos no-peligrosos, pero nunca se hizo oficial
- ✓ A la fecha no se vislumbran iniciativas formales encaminadas a generar una actualización

**REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA  
PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE AUDITORÍA AMBIENTAL**

**versión original: DOF 29 Noviembre 2000**

**Propuesta de modificaciones**

**16 Julio 2003**

**LEY GENERAL DE PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS**  
DOF, 8 de octubre del 2003

- Apareció de manera sorpresiva como iniciativa del gobierno
- En su creación no se involucraron las actuales entidades ambientales
- Aunque se asume que es la SEMARNAT, nunca refiere a la Secretaría encargada de aplicarla
- Carece de un fundamento técnico preciso y exagera en aspectos administrativos
  - En su redacción, inicialmente considera residuos sin calificarlos, al final se refiere únicamente a los residuos peligrosos
  - Incluye aspectos de riesgo a la salud y deja de lado el riesgo al ambiente
    - Considera el concepto de remediación de sitios contaminados
- Su aplicación creará conflictos con la actual LGEEPA en lo que se refiere a la restauración de suelos contaminados
- Respecto a su reglamento, recientemente se publicó el proyecto y terminó el período de consulta pública

**LEY DE AGUAS NACIONALES**

Versión original: 1992

Título séptimo

Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas

Capítulo Único: Artículos 85 a 96

Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales

Versión original: 1994

- El 29 de abril del 2004 se publicó la versión actualizada de la Ley que ahora considera la contaminación de aguas como **DELITOS AMBIENTALES** y obliga a la **REPARACIÓN DEL DAÑO**
  - Será necesario actualizar su reglamento de manera inmediata

**10 Agosto 1998**  
**Creación de la FISCALÍA CONTRA DELITOS AMBIENTALES**

**6 Febrero 2002**  
**CÓDIGO PENAL FEDERAL**  
**Título Vigésimo Quinto**  
**Delitos contra el Ambiente y la Gestión Ambiental**

- Capítulo I.** De las actividades tecnológicas y peligrosas  
artículos 414 a 416
- Capítulo II.** De la biodiversidad  
artículos 417 a 420 bis
- Capítulo III.** De la bioseguridad  
artículo 420 ter
- Capítulo IV.** Delitos contra la gestión ambiental  
artículo 420 quarter
- Capítulo V.** Disposiciones comunes a los delitos contra el ambiente  
artículos 421 a 423

**LEY FEDERAL DE METROLOGÍA Y NORMALIZACIÓN**  
**(1 de julio de 1992, última reforma aplicada 19 mayo 1999)**

**Título tercero**

**Capítulo II**

**Sección I. De las Normas Oficiales Mexicanas (NOM): Artículos 40 a 51**

**Sección II. De las Normas Mexicanas (NMX): Artículos 51A a 51B**

## **MARCO NORMATIVO**

### **APLICABLE A SUELOS CONTAMINADOS**

#### **SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

##### **CRITERIOS INTERINOS DE LIMPIEZA PARA SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

Disposición vigente de 1998 al 2000 que se aplicó por instrucciones de la Profepa y el entonces INE de la SEMARNAT (Grupo de Trabajo conformado por autoridades ambientales y académicos convocado por la Profepa, Emergencias Ambientales)



##### **NORMA OFICIAL MEXICANA DE EMERGENCIA NOM-EM-138-ECOL-2002 QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS AFECTADOS POR HIDROCARBUROS, LA CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y PROCEDIMIENTO PARA LA RESTAURACIÓN**

Vigencia del 20 de agosto del 2002 al 19 de agosto del 2003  
(Grupo de Trabajo conformado exclusivamente por autoridades ambientales)



##### **PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003 QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y LAS ESPECIFICACIONES PARA SU CARACTERIZACIÓN Y RESTAURACIÓN**

Solicitud de dictamen final a COFEMER MIR 18 diciembre del 2003  
Publicado en el DOF el 19 de marzo del 2004  
Concluyó el período de consulta pública; revisión de comentarios  
(Grupo de Trabajo conformado por representantes de diversas instituciones convocadas por la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental - SEMARNAT)

Tabla 1. HIDROCARBUROS QUE DEBERÁN ANALIZARSE EN FUNCIÓN DEL PRODUCTO CONTAMINANTE

PRODUCTO CONTAMINANTE	H I D R O C A R B U R O S					
	FRACCIÓN PESADA	POLIAROMÁTICOS	FRACCIÓN MEDIA	POLIAROMÁTICOS	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezclas desconocidas	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Petróleo crudo	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Combustóleo	XXX	XXX				
Emulsiones asfálticas	XXX	XXX				
Asfalto	XXX	XXX				
Parafinas	XXX	XXX				
Petrolatos	XXX	XXX				
Aceltes	XXX	XXX				
Gasóleo			XXX	XXX		
Diesel			XXX	XXX		
Turboquina			XXX	XXX		
Keroseno			XXX	XXX		
Creosota			XXX	XXX		
Gasavión					XXX	XXX
Gasolvente					XXX	XXX
Gasollinas					XXX	XXX
Gasnafta					XXX	XXX

Tabla 2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS  
mg/kg base seca

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (incluye forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
LIGERA	200	200	500	Anexo A.1
MEDIA	1,000	1,000	3,000 (2,000)	Anexo A.2
PESADA	3,000 (1,000)	3,000 (1,000)	6,000 (2,000)	Anexo A.3

Tabla 3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS EN SUELOS  
mg/kg base seca

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
Benceno	6 (20)	6 (20)	15 (50)	Anexo A.4
Tolueno	40	40	100	
Etilbenceno	10	10	25	
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	
Benzopireno	2 (0.08)	2 (0.08)	2 (0.08)	Anexo A.5
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	2	
Benzo(a)antraceno	2 (0.80)	2 (0.80)	2 (0.80)	
Benzo(b)fluoranteno	2 (0.80)	2 (0.80)	2 (0.80)	
Benzo(k)fluoranteno	8 (8.00)	8 (8.00)	8 (8.00)	
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	2	

NOM-133-ECOL-2000      DOF 10 diciembre 2001  
PROTECCIÓN AMBIENTAL  
BIFENILOS POLICLORADOS (BPCs)      ESPECIFICACIONES DE MANEJO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EMISIONES AL MEDIO AMBIENTE DE BPCs EN  
TRATAMIENTOS TÉRMICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

EMISIONES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
a la atmósfera	0.05 microgramos/m <sup>3</sup>
en agua residual	5 microgramos/l
en sólidos residuales	menos de 50 mg/kg BS

LÍMITES MÁXIMOS DE CONTAMINACIÓN EN SUELO

USO DE SUELO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE EN mg/kg BS con la sumatoria de todos los congéneres de BPCs detectados
agrícola	0.5
residencial	5
industrial/comercial	25

Modificación DOF 5 marzo 2003:  
Amplía el plazo para la disposición de equipos o residuos conteniendo BPCs



**NOM-115-ECOL-1998**

**QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE DEBEN OBSERVARSE EN LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS TERRESTRES PARA LA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN ZONAS AGRÍCOLAS, GANADERAS Y ERIALES**

publicada en el DOF 25 noviembre 1998

Propuesta de actualización en el 2003  
**NOM-115-ECOL-2003**

**QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE DEBEN OBSERVARSE EN LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS PETROLEROS TERRESTRES PARA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN ZONAS AGRÍCOLAS, GANADERAS Y ERIALES, FUERA DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS O TERRENOS FORESTALES**

Publicada en el DOF el 31 diciembre del 2003  
Concluyó el período de consulta pública en marzo del 2004

**NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-021-RECNAT-2000**

publicado en el DOF 31 diciembre 2002

**QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS. ESTUDIOS, MUESTREO Y ANÁLISIS**

métodos detallados para el muestreo  
y análisis de los parámetros  
físicoquímicos de suelos agrícolas

**NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-052-ECOL-1993**

**QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS,  
EL LISTADO DE LOS MISMOS Y LOS LIMITES QUE HACEN A UN RESIDUO  
PELIGROSO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE**

Publicada en el DOF 22 octubre 1993  
Actualización de nomenclatura publicada en el  
DOF 29 noviembre 1994

Propuesta de actualización  
**PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA  
PROY-NOM-052-ECOL-2001**

**QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE  
IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y EL LISTADO DE LOS  
RESIDUOS PELIGROSOS**

publicado en el DOF 26 julio 2002

En espera .....

**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**

Publicada en el DOF 22 octubre 1993  
Actualización de nomenclatura publicada en el  
DOF 29 noviembre 1994

**NOM-054-ECOL-1993**

**QUE ESTABLECE EL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR  
LA INCOMPATIBILIDAD ENTRE DOS O MÁS RESIDUOS  
CONSIDERADOS COMO PELIGROSOS POR LA NOM-052-  
ECOL-1993**

Publicada en el DOF 22 octubre 1993  
Actualización de nomenclatura publicada en el  
DOF 29 noviembre 1994

**ELABORACIÓN DE LA PROPUESTA DE  
NORMA OFICIAL MEXICANA**

**QUE ESTABLECE LOS CRITERIOS  
Y BASES METODOLÓGICAS PARA  
DETERMINAR LAS ACCIONES DE REMEDIACIÓN  
EN UN SUELO CONTAMINADO POR METALES  
(ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS)**

(Reinstalación del Grupo de Trabajo: 6 Abril 2002)  
SEMARNAT Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental

**2do. GRUPO DE CRITERIOS INTERNOS DE RESTAURACIÓN  
DE SUELOS CONTAMINADOS CON INORGÁNICOS TÓXICOS  
(METALES PESADOS) Y OTROS**

GDT  
Profepa  
1999

Contaminante	Uso Residencial mg/kg ppm	Agrícola mg/kg ppm	Uso Industrial mg/kg ppm	Método Analítico (EPA)
PLOMO TOTAL	200	100	1,500	7420
ARSENICO TOTAL	20	20	40	7061
BARIO TOTAL	750	150	1,500	7080
CADMIO TOTAL	20	20	100	7130
MERCURIO TOTAL	20	20	100	7471
NIQUEL TOTAL	150	75	700	7520
SELENIO TOTAL	20	20	100	7741
ZINC TOTAL	800	300	1,500	7950
CROMO TOTAL	375	75	750	7190
CIANURO	50	5	500	9010 A
ACRILAMIDA	0.2	0.02	2.4	8260C
ACRILONITRILLO	1.4	0.02	4.8	8260C
PLOMO ORGANICO	0.5	0.1	1	PENDIENTE
HIDROCARBUROS MONOAROMATICOS TOTALES (Arominas + otros disolventes)	40	40	100	8260C

Estos criterios son referencias genéricas. Cada propuesta de restauración se resuelve caso por caso

**PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-141-SEMARNAT-2003**

**QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DEL SITIO, PROYECTO,  
CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y POST-OPERACIÓN  
DE PRESAS DE JALES**

Publicada en el DOF 17 septiembre del 2003

**MARCO NORMATIVO**  
**APLICABLE A AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**NOM-127-SSA1-1994 (2000)**  
versión actualizada en el DOF 22 noviembre 2000

**SALUD AMBIENTAL**  
**AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO**  
**LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE**  
**SOMETERSE EL AGUA**  
**PARA SU POTABILIZACIÓN**

<b>HIDROCARBUROS</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE</b> <b>mg/l</b>
<b>benceno</b>	<b>0.010</b>
<b>tolueno</b>	<b>0.700</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>0.300</b>
<b>xilenos</b>	<b>0.500</b>

**CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA  
CECCA-001/89**

**Niveles máximos en agua (mg/l)**

Compuesto	Fuente de abastecimiento de agua potable	Protección de la vida acuática	
		Agua dulce	Agua marina
Benceno	0.010	0.050	0.005
Tolueno	14.300	0.200	0.060
Etilbenceno	1.400	-	0.500
Acenafteno	0.020	0.020	0.010
Fluoranteno	0.040	0.040	0.0004
Bifenilos policlorados	0.000008	0.00001	0.00003

**NOM-003-CNA-1996  
DOF 6 enero 1997**

**REQUISITOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN  
DE POZOS DE AGUA PARA PREVENIR LA  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**NOM-004-CNA-1996**  
**DOF 24 julio 1997**

**QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA LA  
PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS DURANTE EL  
MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE POZOS DE  
EXTRACCIÓN DE AGUA Y PARA EL CIERRE DE POZOS EN  
GENERAL**

Propuesta de modificación ingresada a  
COFEMER – MIR junio 27 del 2003

**NOM-014-SSA1-1993**  
**DOF 3 junio 1994**

**PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL  
MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO  
HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA PÚBLICOS Y PRIVADOS**

**muestreo, manejo, preservación y transporte de  
muestras de agua para la determinación de  
parámetros incluidos en la  
NOM-127-SSA1-1994**  
(requiere actualización, ya que no contempla BTEX)

**MARCO NORMATIVO**  
**APLICABLE A AMBIENTE LABORAL**

**NOM-010-STPS-1999**  
publicado en el DOF 14 marzo 2002

**CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE  
EN LOS CENTROS DE TRABAJO  
DONDE SE MANEJEN, TRANSPORTEN, PROCESEN  
O ALMACENEN SUSTANCIAS QUÍMICAS  
CAPACES DE GENERAR CONTAMINACIÓN  
EN EL MEDIO AMBIENTE LABORAL**

**límites máximos permisibles de exposición,  
clasificación de sustancias con base en sus  
características carcinógenas y listado de procedimientos  
para la determinación de sustancias químicas en el  
medio ambiente laboral**



### LÍMITE DE EXPOSICIÓN A SUSTANCIAS ORGÁNICAS

SUSTANCIA	CLASIFICACIÓN COMO CARCINÓGENO	LMPE <sup>1</sup> EN JORNADA NORMAL mg/m <sup>3</sup>	LMPE QUE NO DEBE SER EXCEDIDO <sup>2</sup> mg/m <sup>3</sup>
Benceno	A2 sospechoso	3.2	16.0
Tolueno	A4 no clasificable	188	-
Etilbenceno	-	435	545
Xilenos	A4 no clasificable	435	655
Naftaleno	A4 no clasificable	50	75

<sup>1</sup>LMPE: Límite Máximo Permissible de Exposición

<sup>2</sup>LMPE que no debe ser excedido por más de 15 min, una vez durante la jornada normal

### LEY FEDERAL DE METROLOGÍA Y NORMALIZACIÓN (1 de julio de 1992, última reforma aplicada 19 mayo 1999)

#### Título cuarto

Capítulo I. De la acreditación y la aprobación: Artículos 68 a 72

Capítulo II. De los procedimientos para la evaluación de la conformidad  
Artículos 51A a 51B

Capítulo V. De los laboratorios de pruebas: Artículos 81 a 83

Capítulo VI. De las unidades de verificación: Artículos 84 a 87

Su reglamento ..... DOF 14 enero 1999

**entidad mexicana de acreditación, a.c.**

**organismo encargado de la  
acreditación de métodos analíticos en los  
laboratorios de prueba  
bajo la NMX-EC-17025-IMNC-2000  
a partir del 1 de enero del 2002**

**entidad mexicana de acreditación, a.c.**

**Ramas que acredita:**

- √ Agua
- √ Residuos, fuentes fijas, ambiente laboral (suelos)
- √ Química
- √ Alimentos (agua potable)

**La ema, a.c. entrega al laboratorio un documento con el No. de Acreditación por cada rama indicando la vigencia de la misma, el listado con todas las pruebas acreditadas y de los signatarios autorizados**

organismos encargados de la aprobación de métodos analíticos que la ema, a.c. acredita a los laboratorios de prueba

√ CENICA-INE

fuentes fijas, residuos y ambiente laboral (suelos)

NOM-085-ECOL-1994; PRY-NOM-098-ECOL-2000; NOM-052-ECOL-1993;  
NOM-053-ECOL-1993; NOM-010-STPS-1999; (NOM-EM-138-ECOL-2002)

√ SECRETARÍA DE SALUD

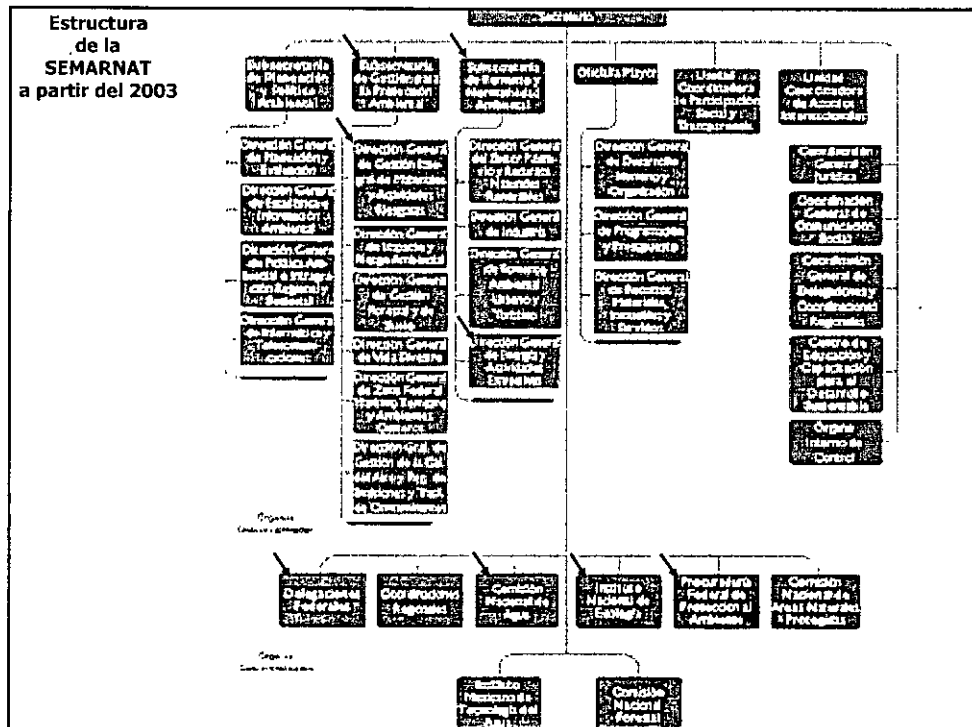
alimentos (agua potable)

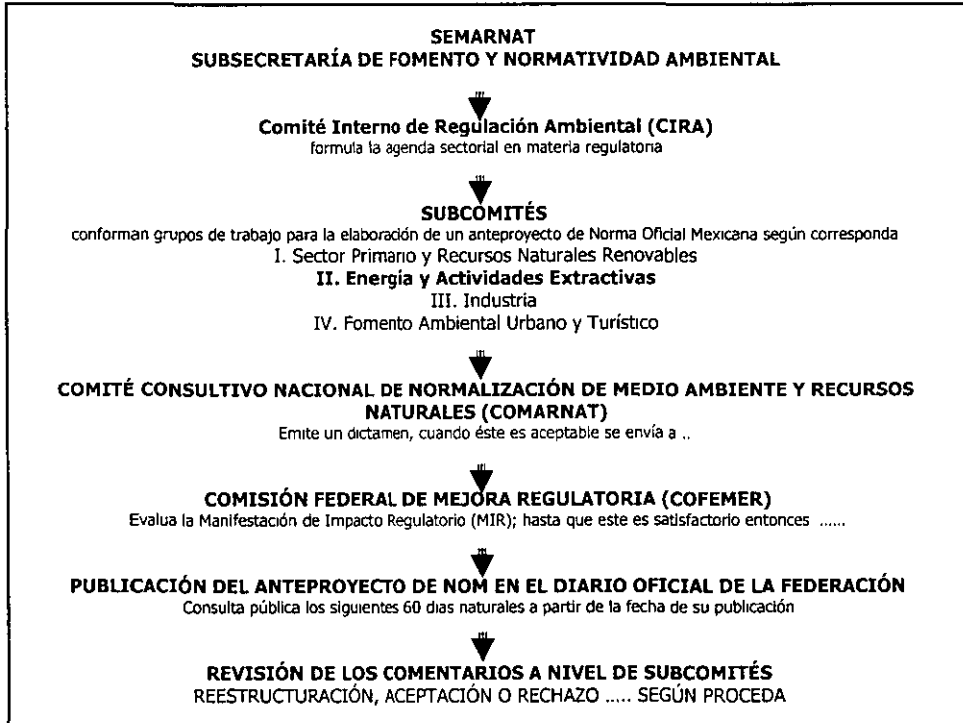
NOM-127-SSA1-1994 (2000);

√ CNA

aguas naturales, subterránea, residual

NOM-001-ECOL-1996, Lineamientos de la Ley Federal de Derechos en  
Materia de Agua, Criterios Ecológicos de Calidad del Agua





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

## **EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD EN SITIOS CONTAMINADOS**

**Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

### **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN**

√ riesgo geohidrológico: afectación de la calidad del agua subterránea que es fuente de abastecimiento para uso y consumo humano y/o de animales, o para riego agrícola

√ riesgo a la salud humana por las diferentes vías de exposición: ingestión, inhalación y/o contacto dérmico

√ riesgo ecológico con afectación a especies de flora y fauna que son fuente de alimentación, tienen interés comercial o están en peligro de extinción; incluye cuerpos de agua superficiales

## **RIESGO GEOHIDROLÓGICO**

**Afectación a fuentes de abastecimiento  
de agua potable**



**Aspectos a considerar:**

- √ **Características de los contaminantes  
que determinan su dispersión**
- √ **Características del sitio que determinan la dispersión de  
los contaminantes**

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES QUE DETERMINAN SU DISPERSIÓN EN EL AMBIENTE**

- √ **estado físico**
  - √ **solubilidad**
    - √ **volatilidad**
      - √ **densidad**
        - √ **viscosidad**

## **CARACTERÍSTICAS DEL SITIO QUE DETERMINAN EL DESTINO DE LOS CONTAMINANTES**

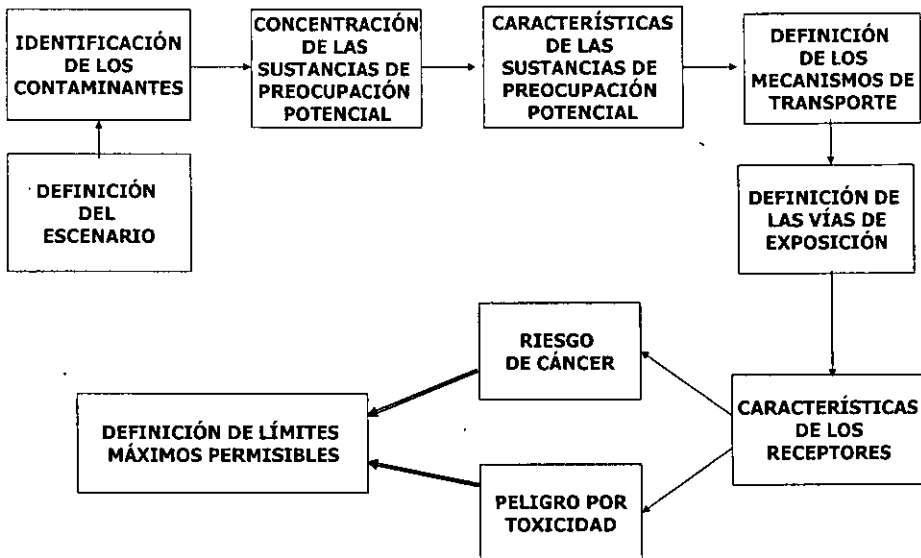
- √ profundidad del nivel estático
- √ dirección y velocidad de flujo subterráneo
- √ material de la zona vadosa
  - √ permeabilidad
  - √ tipo de suelo
  - √ tipo de roca
- √ pendiente del terreno
- √ recarga neta

## **EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA**

**Daños a la salud humana por la presencia de contaminantes**



## EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA POR CONTAMINACIÓN



### FACTOR DE RIESGO DE CÁNCER

Uno de cada "n" individuos puede ser afectado por **cáncer** en función de la vía de exposición (entre mayor sea "n" el riesgo es menor)

Riesgo aceptable por sustancia:  **$10^{-6}$**   
(uno de cada millón de individuos)

Riesgo aceptable acumulado (por presencia de varias sustancias):  **$10^{-5}$**   
(uno de cada cien mil individuos)



**PELIGROSIDAD  
POR TOXICIDAD**

número de veces que la dosis de exposición está por encima de la concentración que no causa daño

índice aceptable : 1

(entre más cercano sea el valor a 1 y más aún cuando es mayor a 1, mayor es el peligro por toxicidad)

**EJEMPLO DE RESULTADOS ESPERADOS DE UN ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA**

Vía de exposición / Receptor / Escenario		Riesgo por Carcinogenicidad		Peligro por Toxicidad	
		Probabilidad	Riesgo	Índice	Peligro
Valor aceptable		1 de 100,000	-	1	-
<b>Inhalación de polvos o partículas</b>					
<b>Trabajadores permanentes</b>					
	espacio abierto	1 de 5,263	sí	1.1	sí
	espacio cerrado	1 de 67	sí	69	sí
<b>Trabajadores ocasionales</b>					
	espacio abierto	1 de 5,000,000	no	0.042	no
<b>Ingestión accidental de agua</b>					
	en la zona	1 de 6	sí	34	sí
	alrededor de la zona	1 de 1,449	sí	0.15	no



- CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO AFECTADO**
- √ Vientos dominantes
  - √ Precipitación pluvial
  - √ Distancia a las zonas pobladas en los alrededores
  - √ Profundidad al nivel del agua subterránea
  - √ Uso del agua subterránea
  - √ Distancia a los pozos de abastecimiento

**IDENTIFICACIÓN  
DE LOS  
CONTAMINANTES**

**CONCENTRACIÓN  
DE LAS SUSTANCIAS  
DE PREOCUPACIÓN  
POTENCIAL**

• **Método de muestreo**

• **Métodos de análisis confiables** (laboratorios con métodos de prueba acreditados por la ema y aprobados por el organismo correspondiente)

• **Límites de detección de los métodos**  
(para comparar con los valores de fondo en el caso de metales)

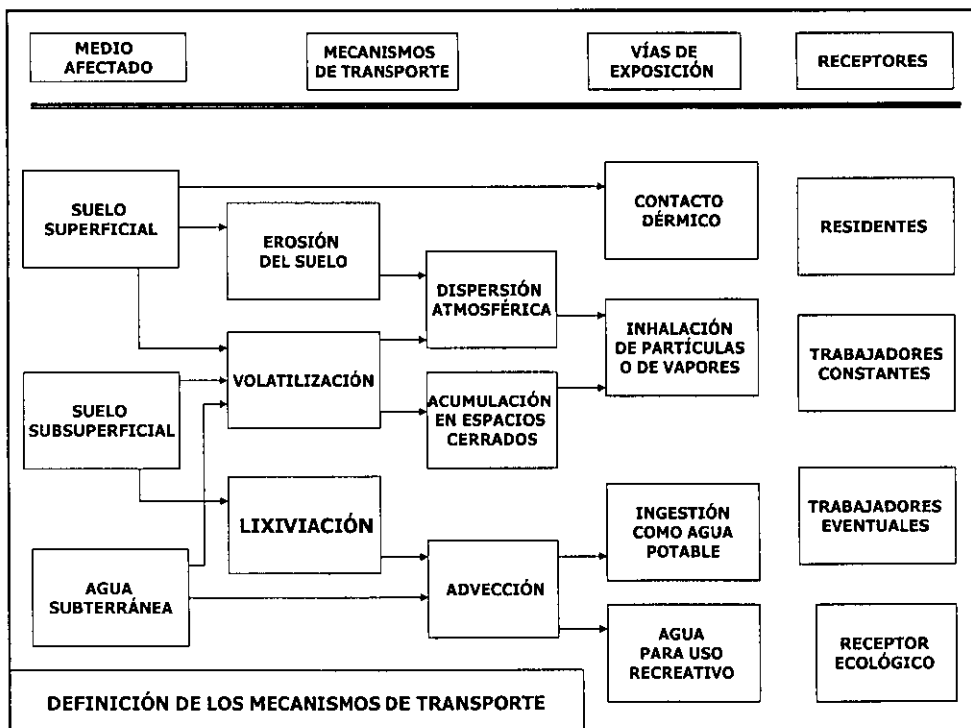
• **Formas químicas biodisponibles del contaminantes para el receptor**

**SUSTANCIAS INDICADORAS DE RIESGO EN CASOS DE  
CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS**

GRUPO DE COMPUESTOS	COMBUSTIBLES DESTILADOS	PETRÓLEO CRUDO Y SUS RESIDUOS	ACEITES Y RESIDUOS ACEITOSOS
HIDROCARBUROS MONOAROMÁTICOS	X	X	
HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS	X	X	X
METALES		Cadmio Níquel Vanadio	

**CARACTERÍSTICAS  
DE LAS SUSTANCIAS  
DE PREOCUPACIÓN  
POTENCIAL**

- Constante de la Ley de Henry
- Solubilidad
- Coeficiente de sorción (factor de retardo)
- Presión de vapor
- Coeficiente de dispersión
- Coeficiente de distribución octanol/agua



**DEFINICIÓN DE LAS  
VÍAS DE EXPOSICIÓN  
DE LOS RECEPTORES**

**inhalación  
de vapores y/o  
partículas de suelo**

**ingestión  
de agua o suelo**

**contacto dérmico  
con agua o suelo  
contaminados**

**CARACTERÍSTICAS  
DE LOS  
RECEPTORES**

- √ **edad, sexo** (especialmente en el caso de plomo)
- √ **calidad de vida** (nutrición, adicciones, higiene)
- √ **tiempo de exposición** (residente, trabajador constante u ocasional)
- √ **tipo de actividad en el sitio** (operación en planta, oficina, taller, limpieza)

**CLASIFICACIÓN DE LAS  
SUSTANCIAS EN FUNCIÓN  
DE SU EFECTO A LA  
SALUD HUMANA**

**TOXICIDAD CRÓNICA**

**DOSIS FRECUENTES DE COMPUESTOS BIOACUMULABLES,  
QUE AUNQUE SEAN MÍNIMAS PUEDEN CAUSAR  
CARCINOGENICIDAD, TERATOGENICIDAD O MUTAGENICIDAD  
(principalmente en humanos)**

**CRITERIOS USEPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS  
QUÍMICAS CON BASE EN EL RIESGO DE CÁNCER  
PARA CUALQUIER VÍA DE EXPOSICIÓN**

<b>A</b>	<b>Carcinógeno a humanos con suficiente evidencia de estudios epidemiológicos</b>
<b>B1</b>	<b>Probable carcinógeno a humanos, con evidencia limitada de estudios epidemiológicos</b>
<b>B2</b>	<b>Probable carcinógeno a humanos, con suficiente evidencia de estudios con animales, pero inadecuada evidencia de estudios epidemiológicos</b>
<b>C</b>	Posible carcinógeno a humanos con limitada evidencia de estudios con animales
<b>D</b>	No clasificable como carcinógeno a humanos por inadecuada evidencia en estudios con animales
<b>E</b>	Evidencia de no-carcinogenicidad en humanos y ninguna evidencia en animales de diferentes especies

**NÚMERO DE COMPUESTOS CLASIFICADOS POR LA USEPA (2002)**

CLASIFICACIÓN USEPA	CATEGORÍA DE RIESGO A LA SALUD	NÚMERO DE COMPUESTOS CLASIFICADOS
A	CARCINÓGENO A HUMANOS	11
B1	PROBABLE CARCINÓGENO, EVIDENCIA LIMITADA EN HUMANOS	5
B2	PROBABLE CARCINÓGENO, EVIDENCIA SUFICIENTE EN ANIMALES	69
C	POSIBLE CARCINÓGENO, EVIDENCIA LIMITADA EN ANIMALES	41
D	NO CLASIFICABLE COMO CARCINÓGENO A HUMANOS	113
E	EVIDENCIA DE NO-CARCINOGENICIDAD EN HUMANOS	3

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

COMPUESTO	CLASIFICACIÓN USEPA (años de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Benceno	A 86/00	Inhalación (exposición ocupacional) Ingestión (de agua)	Leucemia en humanos Estudios epidemiológicos en humanos 1974, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1985, 1986, 1987, 1992, 1993, 1994, 1996, 1997, 1998, 1999
Tolueno*	D 86/92/94	Ingestión / Inhalación	Efectos neurológicos, degeneración del epitelio nasal en animales de laboratorio 1956, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1987, 1988, 1989, 1990
Etilbenceno	D 86/87/90/91	Ingestión / Inhalación	Toxicidad al hígado y riñón en animales de laboratorio 1956, 1980, 1981, 1983, 1985, 1988, 1989, 1990, 1991
Xilenos*	D 86/87/91	Ingestión / Inhalación	Hiperactividad y reducción del peso corporal en animales de laboratorio 1984, 1985, 1986

\* En proceso de revisión (2002)

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

COMPUESTO	CLASIFICACIÓN USEPA (años de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Benzo(a)pireno	B2 86/92/94	Implantación en pulmones / Inyección intraperitoneal y subcutánea	Desarrollo de tumores y genotoxicidad en animales de laboratorio 1967, 1973, 1981, 1991, 1992
Benzo(a)antraceno	B2 86/90/94	Inyección intraperitoneal / subcutánea / intramuscular	Desarrollo de tumores en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1951, 1952, 1959, 1963, 1969, 1971, 1972, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1981, 1984, 1986, 1987, 1988, 1990
Benzo(b)fluoranteno	B2 86/90/93/94	Implantación en pulmones / Inyección intraperitoneal y subcutánea	Desarrollo de carcinomas en aparato digestivo y pulmones en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1959, 1963, 1982, 1983, 1985, 1986, 1987,
Benzo(k)fluoranteno	B2 86/90/94	Implantación en pulmones / Inyección subcutánea	Desarrollo de tumores en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1966, 1980, 1982, 1983, 1985, 1987,
Criseno	B2 86/90/94	Inyección intraperitoneal / Contacto dérmico	Desarrollo de carcinomas y linfomas en piel, anomalías cromosómicas en animales de laboratorio 1959, 1966, 1972, 1973, 1974, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1983, 1985, 1986
Dibenzo(a,h)antraceno	B2 86/90/94	Inyección intramuscular y subcutánea	Desarrollo de carcinomas en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1943, 1955, 1959, 1962, 1963, 1967, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

COMPUESTO	CLASIFICACIÓN USEPA (años de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Naftaleno	C 86/90/98	Ingestión / Inhalación	Hiperplasia y metaplasia en epitelio respiratorio y nasal en animales de laboratorio 1964, 1980, 1981, 1982, 1984, 1985, 1986, 1989, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1997, 1998
Acenafteno	- 89/90/93/94	Inyección intraperitoneal	Hepatotoxicidad en animales de laboratorio 1969, 1970, 1975, 1989
Acenaftileno	D 86/90/91	Apliación dérmica	Estudios en animales de laboratorio 1932
Antraceno	D 86/90/91/93/94	Inyección intraperitoneal	Ninguno observado en animales de laboratorio 1955, 1972, 1973, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985, 1988, 1989,
Fenantreno	D 86/90/94	Inyección intraperitoneal y subcutánea	Estudios en animales de laboratorio 1962, 1963, 1964, 1973, 1976, 1977, 1979, 1981, 1982, 1985
Fluoranteno	D 86/90/93/94	Inyección intraperitoneal	Nefropatía, alteraciones hematológicas en animales de laboratorio 1957, 1959, 1972, 1974, 1976, 1979, 1983, 1987, 1988
Fluoreno	D 86/90	Inyección intraperitoneal	Estudios en animales de laboratorio 1960, 1981, 1984, 1988, 1989
Benzo(g,h,i)perileno	D 86/90	Implantación en pulmones / Inyección subcutánea	Estudios en animales de laboratorio 1959, 1966, 1968, 1973, 1976, 1983
Pireno	D 86/90/91/93/94	Inyección intraperitoneal	Estudios en animales de laboratorio 1940, 1973, 1974, 1976, 1981, 1986, 1989



**Nota importante:**

**La probable carcinogenicidad hacia los humanos (B2) de los hidrocarburos poliaromáticos se ha relacionado con su presencia en el humo del cigarro, así como en emisiones a la atmósfera de los hornos de carbón de hulla (mineral), durante el proceso de obtención de coque, así como en la destilación de la hulla y de la madera de coníferas para obtener alquitrán y creosota. En su caso, la vía de exposición sería la de inhalación de partículas.**

**Sin embargo, no ha sido posible concluir que los hidrocarburos poliaromáticos sean los agentes directamente responsables**

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A METALES**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

INORGÁNICO	CLASIFICACIÓN USEPA (Año de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Arsénico	A 86/88/93/95/98	Inhalación (exposición ocupacional), Ingestión (de agua)	Cáncer pulmonar en humanos por inhalación. Cáncer en diferentes órganos y en piel en humanos por ingestión de agua 1968, 1977, 1988
Bario	D 86/87/98/99	Ingestión (de agua en animales)	Incrementa el peso del hígado en animales de laboratorio 1984, 1990, 1996
Berilio	B1 86/97/98	Inhalación (en animales)	Cáncer pulmonar, de traquea y bronquios en animales de laboratorio 1976, 1980, 1996
Cadmio	B1 86/87/91/92/94	Inhalación (exposición ocupacional)  Inhalación, inyección intramuscular y subcutánea (en animales)	Limitada evidencia de cáncer pulmonar, de traquea y bronquios en humanos.  Suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales de laboratorio 1985
Cromo VI	A 86/87/98	Inhalación (exposición ocupacional)	Cáncer pulmonar en humanos 1975, 1983, 1990, 1994
	D 86/87/98	Ingestión (de agua en animales)	Estudios en animales de laboratorio 1958
Cobre	D 86/88/91		Estudios en animales de laboratorio
Manganeso	D 86/88/93/95/96	Inhalación (exposición ocupacional a dióxido de manganeso) Ingestión crónica en humanos	Estudios en humanos 1992, 1973, 1987, 1989, 1992

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A METALES**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

INORGÁNICO	CLASIFICACIÓN USEPA (Año de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Mercurio	D 86/88/95	Inhalación (exposición ocupacional)	Inadecuada evidencia de estudios epidemiológicos y en animales de laboratorio 1983, 1989, 1992, 1993
Cloruro mercúrico	C 86/94/95	Ingestión e Inyección subcutánea (en animales)	Limitada evidencia en estudios con animales de laboratorio 1987
Cloruro metilmercúrico	C 86/87/95/01	Ingestión	Inadecuados datos en humanos y limitada evidencia en animales de laboratorio 1997, 1999
Níquel (en sales)	- 87/91/94/96	Ingestión (en animales)	Disminuye peso de órganos en animales de laboratorio 1976
Carbonil níquel	B2 86/87/91	Inhalación Inyección intravenosa	Formación de tumores en animales de laboratorio
Polvos de níquel	A 86/91	Inhalación (exposición ocupacional)	Cáncer pulmonar y nasal en humanos expuestos a los polvos de refineries 1981, 1982, 1984
Bisulfuro de níquel	A 86/91	Inhalación (exposición ocupacional)	Cáncer pulmonar y nasal en humanos expuestos a polvos de refineries 1981, 1982, 1984
Plomo	B2 86/81/91/93	Ingestión / Inyección subcutánea	Formación de tumores en animales de laboratorio
Tetraetil de plomo	B2 87/88	Ingestión	Histopatología del riñón y timo en animales de laboratorio 1964

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A METALES**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

INORGÁNICO	CLASIFICACIÓN USEPA (Año de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Plata	D 86/87/89/91/96	Implantación en órganos	Estudios con animales de laboratorio 1935
Selenio	D 86/91/93	Ingestión	Selenosis clínica. Estudio epidemiológico en humanos 1989
Ácido selenoso	D 86/	-	Estudios con animales de laboratorio
Sulfuro de selenio	B2 86/91/93	Ingestión	Carcinomas hepáticos en animales de laboratorio
Pentóxido de vanadio	87/88/96	Ingestión	Alteraciones en el pelo de animales de laboratorio 1953
Zinc	D 86/91/92	Ingestión	Estudios en animales de laboratorio

**CONSIDERACIONES IMPORTANTES**

**LAS ÚNICAS SUSTANCIAS QUE PODRÍAN DAR UN FRANCO RESULTADO DE RIESGO DE CÁNCER EN HUMANOS SON AQUELLAS PARA LAS CUALES SE HA DETERMINADO UNA CLASIFICACIÓN USEPA "A"**

- . **BENCENO** (POR INHALACIÓN E INGESTIÓN)
- . **ARSÉNICO** (POR INHALACIÓN E INGESTIÓN)
- . **CROMO VI** (POR INHALACIÓN)
- . **NÍQUEL** (POR INHALACIÓN DE POLVOS, Y EN FORMA DE COMPUESTOS AZUFRADOS)

**PARA LAS SUSTANCIAS CON UNA CLASIFICACIÓN USEPA B1 O B2, AÚN NO SE HAN DEMOSTRADO DE MANERA DETERMINANTE LOS EFECTOS A HUMANOS, A MENOS QUE SU MALA CALIDAD DE VIDA LOS HAGA VULNERABLES**

**SI NO EXISTEN LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN,  
NO HAY RIESGO DE CÁNCER, NI PELIGRO POR INTOXICACIÓN**

**CLASIFICACIÓN DE  
LAS SUSTANCIAS  
EN FUNCIÓN  
DE SU EFECTO A LA  
SALUD HUMANA**

**TOXICIDAD AGUDA  
UNA SOLA DOSIS CAUSA  
"ENVENENAMIENTO" INMEDIATO**

**EFFECTOS ADVERSOS DERIVADOS DE UNA CONTAMINACIÓN CON:**

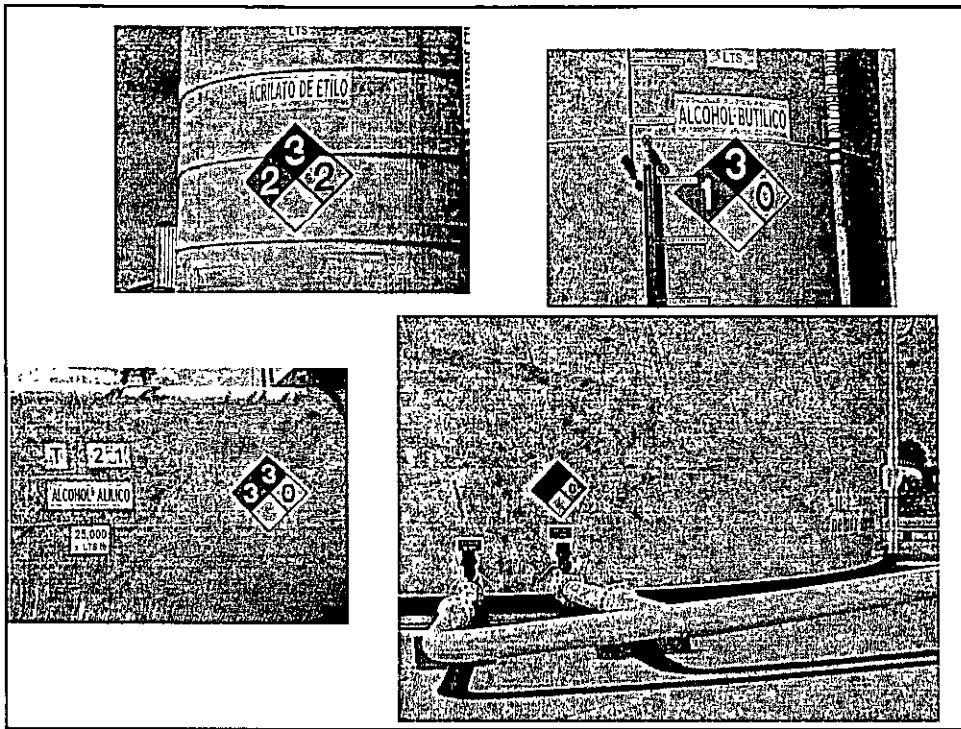
CONTAMINANTE	EFFECTO ADVERSO
ÁCIDOS	Irritación a los ojos y a vías respiratorias Intoxicación por inhalación Quemaduras de los ojos y de la piel
AMONÍACO	Irritación a los ojos, a vías respiratorias, a la piel Intoxicación por inhalación Quemaduras de la piel
HIDRÓXIDO DE SODIO	Quemaduras de la piel
HIPOCLORITO DE SODIO	Irritación de vías respiratorias y de la piel Intoxicación por inhalación Desordenes gástricos (náuseas) Quemaduras de la piel

**EFFECTOS ADVERSOS POR LA PRESENCIA DE ANIONES EN AGUA DERIVADOS DE UNA CONTAMINACIÓN CON ÁCIDOS**

ANIÓN	EFFECTO ADVERSO
Sulfatos	No hay reportes de efectos adversos a concentraciones menores a 500 mg/l. Entre 300 y 400 mg/l se detecta sabor desagradable
Cloruros	Se detecta su sabor desagradable a partir de 250 mg/l
Nitratos	Más de 10 mg/l ocasiona <u>metahemoglobinemia</u> . Oxidante de la hemoglobina de la sangre (USEPA "D")
Fosfatos	No hay reportes de daños a la salud humana. Se limita su concentración en cuerpos de agua porque su presencia es una amenaza de eutrofización

## COMUNICACIÓN DE RIESGO A LA SALUD





### NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE COMBUSTIBLES

COMBUSTIBLE	RIESGO A LA SALUD	RIESGO DE INFLAMABILIDAD	RIESGO POR REACTIVIDAD
Gasnafta	1	3	0
Gasolina	1	3	0
Gasavión	1	3	0
Gasolvente	1	3	0
Turbosina	1	3	0
Diesel	0	2	0
Gasóleo	0	2	0
Combustóleo	0	2	0
Asfalto	0	1	0
Crudo	2	3	0

**NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE HIDROCARBUROS**

<b>HIDROCARBURO</b>	<b>RIESGO A LA SALUD</b>	<b>RIESGO DE INFLAMABILIDAD</b>	<b>RIESGO POR REACTIVIDAD</b>
Benceno	2	3	0
Tolueno	2	3	0
Etilbenceno	2	3	0
Xilenos	2	3	0
Hexano	1	3	0
n-Heptano	1	3	0
Ciclohexano	1	3	0

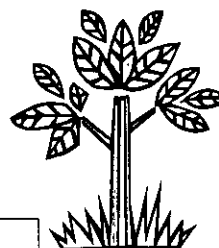
**NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE OTROS PRODUCTOS**

<b>COMPUESTO</b>	<b>RIESGO A LA SALUD</b>	<b>RIESGO DE INFLAMABILIDAD</b>	<b>RIESGO POR REACTIVIDAD</b>
Tetraetilo de plomo	3	2	3
MTBE	1	3	0
Azufre	2	1	0
Cloruro de vinilo	2	4	1

### NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE COMPUESTOS INORGÁNICOS

COMPUESTO	RIESGO A LA SALUD	RIESGO DE INFLAMABILIDAD	RIESGO POR REACTIVIDAD	ESPECIAL
ácido clorhídrico	3	0	0	
ácido nítrico				
ácido sulfúrico	3	0	2	-W-
ácido fosfórico				
ácido sulfhídrico	3	4	0	
ácido fluorhídrico	4	0	0	
cloro	3	0	0	
amoníaco	3	1	0	
hidróxido de sodio	3	0	1	ALC
hidróxido de potasio	3	0	1	ALC

### RIESGO ECOLÓGICO



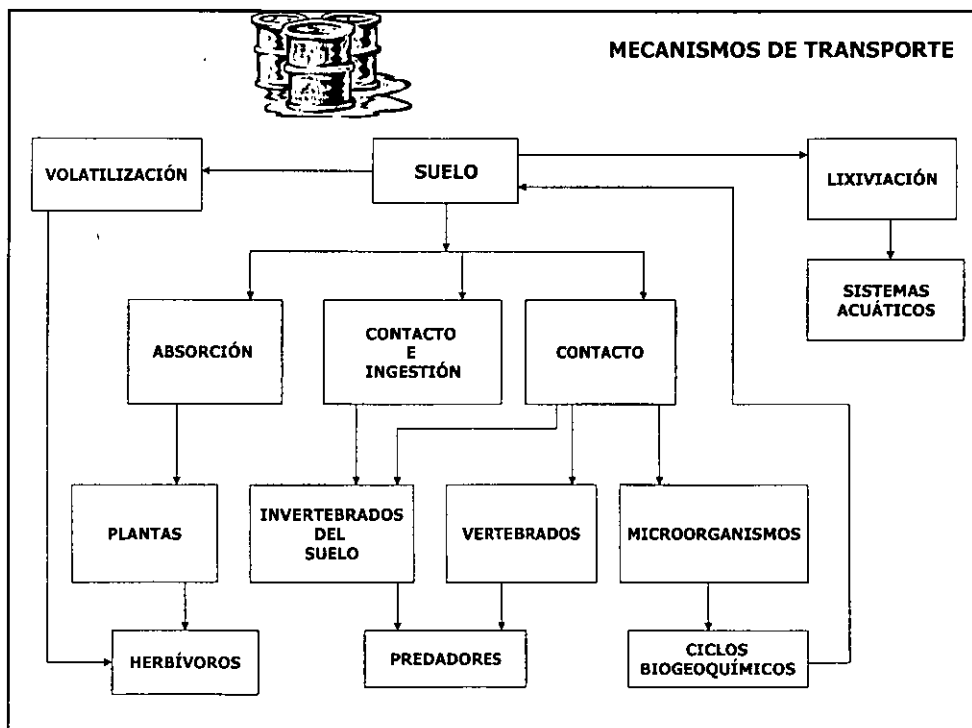
**Destrucción de especies nativas vegetales y/o animales presentes en suelo o cuerpos de agua superficiales**

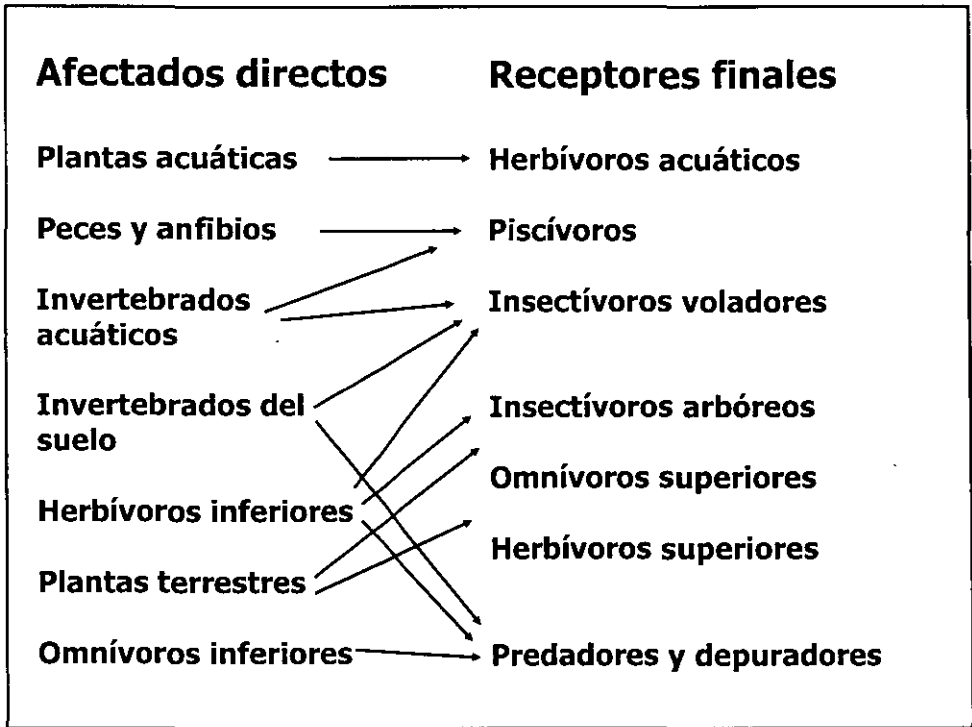




## INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO ECOLÓGICO

- Características de los receptores
- Identificación de las formas de exposición de los receptores
- Identificación de los receptores finales de las cadenas alimenticias involucradas
- Concentración de los contaminantes en el medio afectado





**ssb@pumas.iingen.unam.mx**



...: Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**MODULO I:  
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON  
CONTAMINANTES INORGÁNICOS CA-206**

**TEMA:  
QUÍMICA INORGÁNICA Y PROBLEMAS  
DE CONTAMINACIÓN**

**COORDINADOR: DRA. AURORA ARMENTA  
DEL 05 AL 09 DE SEPTIEMBRE DEL 2005  
PALACIO DE MINERÍA**

## CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

La interpretación geoquímica del agua subterránea, se utiliza junto con la geología, hidrología y geofísica, como un auxiliar para conocer y entender en una forma más completa, el funcionamiento de los acuíferos y la planeación de una mejor y más racional explotación.

Para efectuar la interpretación geoquímica, se toma en cuenta que, el agua que forma los acuíferos, proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta, al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas rocas, disolviendo las sales minerales que las forman y produciendo cambios en su composición. La química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afecten la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas, el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

Por lo tanto, la composición del agua está en íntima relación con el funcionamiento general del acuífero. Es por ello que, a partir de su composición química, se puede obtener la dirección del movimiento del agua subterránea, la localización de las zonas de recarga del acuífero, los tipos de roca a través de las cuales circula, así como algunas características físicas del acuífero y la calidad del agua para usos agrícolas, ganaderos, agropecuarios, potables, turísticos e industriales.

A lo largo de las líneas de costa, en las planicies costeras, el agua de los acuíferos se encuentra en contacto sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua se encuentra en equilibrio y, las modificaciones producidas en las condiciones originales del acuífero, originan cambios en la posición de dicho contacto. Al explotar los acuíferos costeros, se rompe este equilibrio, produciendo una intrusión de agua de mar, dentro del acuífero. Debido a las diferencias en concentración y composición química existente entre el agua de mar y el agua dulce, los métodos geoquímicos ayudan a conocer la posición y velocidad de avance de la intrusión salina.

En las muestras de agua, obtenidas tanto en pozos como en norias, galerías filtrantes y manantiales, se determinan los sólidos totales disueltos, la conductividad eléctrica, la dureza total y las concentraciones de los iones siguientes: Ca, Mg, Fe, Mn, Na, SO<sub>4</sub>, Cl, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub>, principalmente.

Se elaboraran configuraciones de los índices más representativos, obteniéndose, a partir de ellas, las zonas de recarga, las cuales coinciden con los lugares donde se encuentran las menores de sales. Se obtiene también, la dirección del flujo del agua subterránea, debido a que ésta va disolviendo mayor cantidad de sales conforme avanza. Así, también se pueden determinar las zonas con mayor o menor permeabilidad, ya que éstas afectarán, en mayor o menor grado, la composición y concentración de sales en el agua.

A partir de la composición química del agua, se deduce el tipo de roca que forma el acuífero; así, el agua que circula a través de rocas calizas, tendrá en solución abundante calcio y carbonatos, en contrastes con agua que circula a través de rocas yesíferas, la cual tendrá disueltos iones de calcio y sulfatos.

Para obtener la calidad del agua para uso doméstico, se comparan los resultados de los análisis químicos, con los límites máximos permisibles ya establecidos, obteniéndose, rápida y directamente, la clase de agua para este uso.

Con respecto a la clase de agua para riego, se utiliza la clasificación de Wilcox, a partir de la cual y por medio de las concentraciones de sodio, magnesio, calcio y la conductividad eléctrica, se conoce la clase de agua para riego a que pertenece cada muestra analizada, así como las recomendaciones relativas al tipo de suelo en que debe usarse, las prácticas del control de la salinidad y los tipos de cultivos más adecuados.

Para la industria, el agua se puede clasificar inicialmente por su dureza, Posteriormente, dependiendo del tipo de industria, el agua deberá cumplir ciertos requisitos establecidos.

## REFERENCIAS

Drever, J. K. 1988. *The Geochemistry of Natural Water*, Second Edition. Prentice Hall, 473 p.

Hem, John. (1985) *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water*. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2254.

## CAPÍTULO 2.- GENERALIDADES

### 2.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir; 1) evaporarse para formar las nubes; 2) escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar y; 3) infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. Esta agua infiltrada, posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales para evaporarse o seguir su camino hacia el mar.

### 2.2.- BALANCE DEL AGUA DENTRO DEL CICLO HIDROLÓGICO

Del 100% del agua que se evapora, para incorporarse a la atmósfera en forma de nubes, el 86% proviene del mar y el 14% restante, de los continentes. Del 86% que se evapora en los océanos, el 78% se precipita en el mar y el 8% en los continentes. (fig. 2.1). El otro 14% de evaporación, se precipita sobre los continentes, haciendo un total de 22% de precipitación sobre éstos. De este 22%, se evapora el 14%, escurre hacia el mar en forma de corrientes superficiales el 7%, y el 1% restante se infiltra en el subsuelo y en forma de agua subterránea, es incorporada al mar.

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones, pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas o puede permanecer atrapada entre sedimentos en forma de agua fósil.

Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas formaciones geológicas, disolviendo las sales minerales que forman las rocas y produciendo cambios en su composición. Por lo tanto, la composición química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afecten la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas; el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

### 2.3.- QUÍMICA DEL AGUA DEL CICLO HIDROLÓGICO

a).- Composición del agua de lluvia.- Al precipitarse hacia la corteza terrestre, arrastra diferentes materiales finos, que se encuentran en suspensión en la atmósfera y que, en muchos casos, son transportados por el viento. (figura 2.2.)

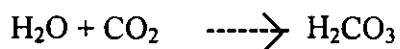
La composición química general del agua de lluvia, según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente:

Na	1.98 ppm	Ca	0.09	HCO <sub>3</sub>	0.12
K	0.30	Cl	3.79		
Mg	0.27	SO <sub>4</sub>	0.58		

La concentración de elementos disueltos en la lluvia en diferentes lugares, es variable: por ejemplo, el contenido de cloro y sodio, en la precipitación que se lleva a cabo en algunas zonas costeras, es mayor de 2 y 1 ppm respectivamente, mientras que en los continentes es menor de 0.3 y 0.2 ppm, respectivamente.

Debido a la baja concentración de sales en el agua de lluvia, ésta se considera como "agua pura" y las variantes existentes entre la composición y concentración de un lugar a otro, no son de importancia en la interpretación hidrogeoquímica, salvo lugares excepcionales, donde corrientes de aire levantan una gran cantidad de partículas que posteriormente son arrastradas por la lluvia.

Al precipitarse, las moléculas de agua incorporan bióxidos de carbono de la atmósfera, formando ácido carbónico como se ilustra en la siguiente reacción.



Este ácido, tiene un gran poder de disolución y es el principal agente de ataque del agua sobre las rocas.

b).- Composición del agua de ríos.- Las corrientes superficiales, que en la mayoría de los casos son la causa inmediata de la lluvia, tienen contacto con los materiales que forman los cauces, así como con los fragmentos de roca transportados por la corriente.

Al contacto con dichos materiales, el agua los ataca y disuelve, llegando a tener una composición dependiente del tipo de materiales con los que se tiene contacto.

La composición promedio del agua de ríos, según Livingstone (1963), es la siguiente:

Cl	7.8 ppm	Ca	15.0	Al	0.01
Na	6.3	HCO <sub>3</sub>	58.4	S.T.D.	129.5
Mg	4.1	SiO <sub>2</sub>	13.1		
SO <sub>4</sub>	11.2	NO <sub>3</sub>	1.0		
K	2.3	Fe <sup>++</sup>	0.67		

c).- Composición del agua de mar.- Los océanos constituyen los mayores depósitos de agua en el mundo, y se caracterizan por tener una gran cantidad de sales disueltas. Estas sales son producto de la erosión química efectuada por el agua durante el ciclo hidrológico, desde la formación de la tierra, hasta nuestra época.

Originalmente, los océanos se formaron por condensación de vapor de agua, la cual se acumuló en las partes bajas de la tierra. Se inició el ciclo hidrológico y esta agua empezó a disolver los minerales que formaban las rocas, conduciendo las sales, producto de erosión química, hacia las cuencas oceánicas. Continuó el ciclo hidrológico y con él, el aumento de sales en el agua de mar.

La composición química del agua de mar, de acuerdo con Goldberg (1957), es:

Cl	19,000 ppm	Ca	400
Na	10,500	HCO <sub>3</sub>	140
Mg	1,300	SiO <sub>2</sub>	6
SO <sub>4</sub>	2,650	S.T.D.	34,467
K	380		

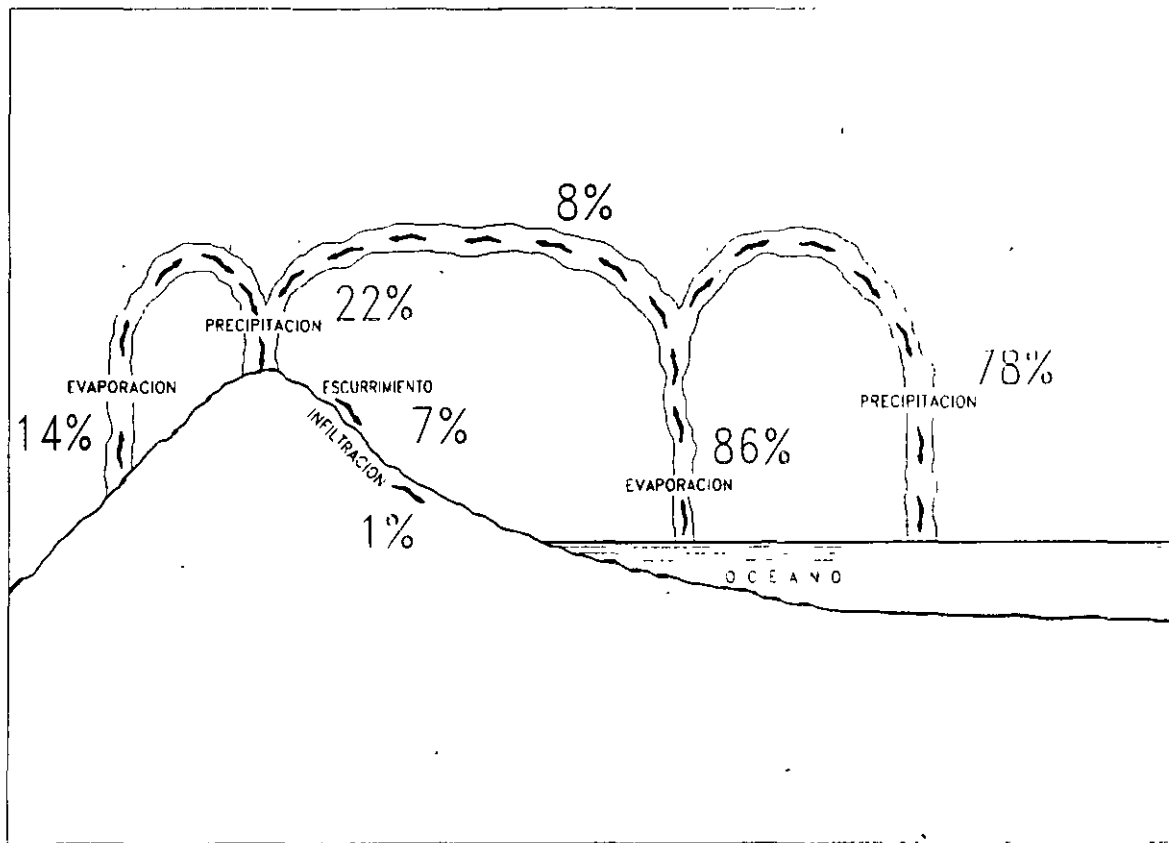
d).- Composición subterránea.- La composición química del agua subterránea dependerá del tipo de roca, a través de la cual circula y de otros muchos factores complejos. (figuras 2.3 y 2.4).

Así, tenemos que un agua que circula a través de rocas calizas, tendrá principalmente iones de calcio, carbonatos y bicarbonatos. Si circula por yesos y anhidritas, tendrá una gran cantidad de sólidos disueltos, debido a la fácil disolución de estas rocas, predominando la presencia de iones de calcio y sulfatos. El agua que circula a través de basaltos, tendrá pocos sólidos disueltos, debido a que esa roca es de difícil disolución; además tendrá aproximadamente, la misma cantidad de calcio, magnesio y sodio.

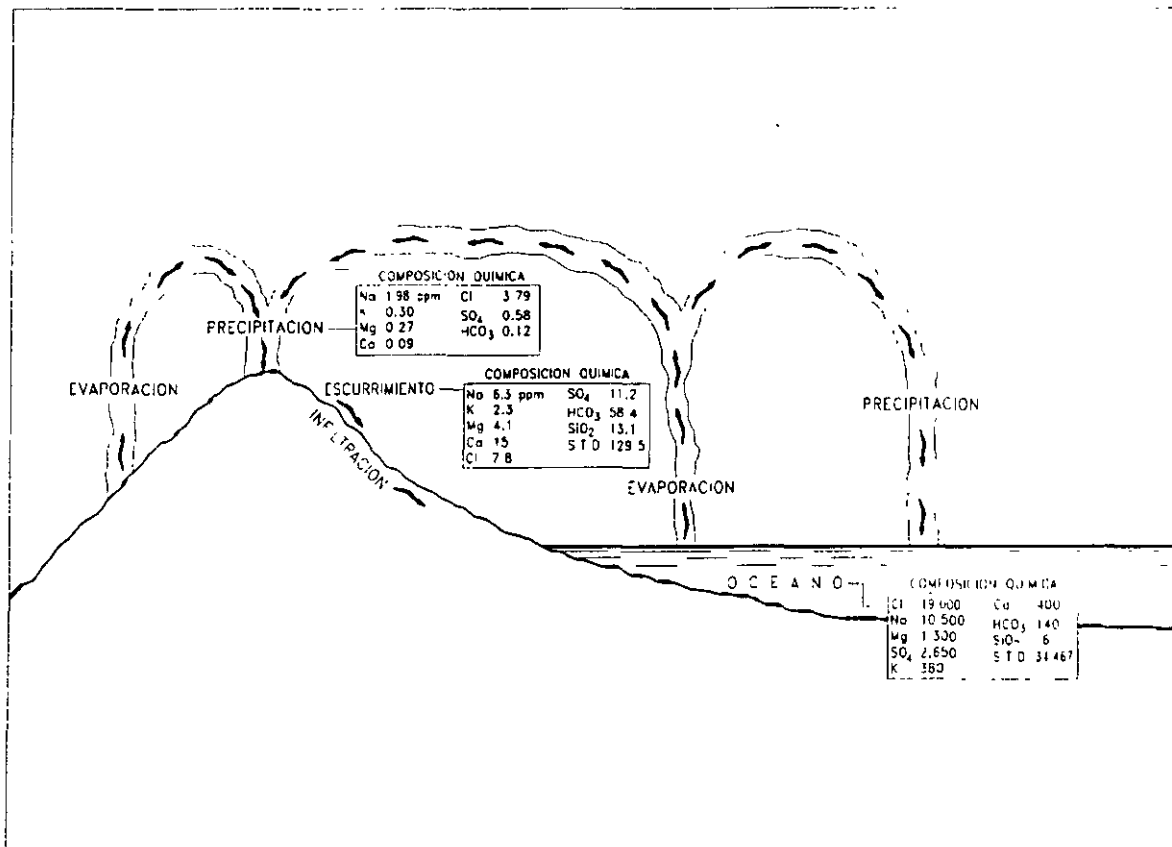
## REFERENCIAS

- Custodio, E. y Llamas, M. R. 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Drever, J. I. 1988. The Geochemistry of Natural Water, Second Edition Prentice Hall. 437 p.
- Fairbridge, R. W "Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Science".
- Garrels and Mackenzie, 1971. "Evolution of the Sedimentary Rocks".
- Hem, John. (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2254.





**FIGURA 2.1.-CICLO HIDROLOGICO**



**FIGURA 2.2.-CICLO HIDROLOGICO Y COMPOSICION PROMEDIO DEL AGUA DE LLUVIA, RIOS Y OCEANOS**

En la figura 3.3 se graficaron muestras de agua tipo sódico-clorurada, mixta-mixta y cálcico-bicarbonatada.

d).- Resistividades y sólidos totales disueltos.- La resistividad es una medida indirecta de los sólidos totales disueltos (S.T.D.) que contienen el agua, ya que sus valores son inversamente proporcionales a éstos últimos. Tomando en cuenta esta característica, se forma una gráfica (fig. 3.4) con la cual, se pueden calcular resistividades a partir de sólidos totales disueltos, o viceversa. Los sólidos totales disueltos calculados, en algunos casos, ayudan a complementar la información de configuraciones de una forma rápida y económica. Las resistividades calculadas, se pueden utilizar para hacer correlaciones con geofísica.

Existen otros tipos de clasificación y representación de análisis químicos, como las de Stiff Shoeller, Wilcox, etc.

## REFERENCIAS

Freeze, A. and Cherry, J. 1979. Groundwater, Prentice Hall. 604 p.

Hem, John. (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2254.

Piper, A.M., 1944. "A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses". Am. Geophys. Union Trans.

**METODO DE TRABAJO**

**SELECCION Y MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA**

**SELECCION POR POZOS, NORIAS, GALERIAS FILTRANTES Y MANANTIALES**

**MEDICION DE PH Y TEMPERATURA DEL AGUA EN EL CAMPO**

**OBTENCION DE LA MUESTRA DE AGUA EN BOTELLA DE POLIETILENO DE UN LITRO DE CAPACIDAD**

**ANALISIS FISICO-QUIMICOS**

**DETERMINACION DE CALCIO, MAGNESIO, SODIO, POTASIO, BICARBONATO, CLORURO, SULFATO, SOLIDOS TOTALES DISUELTOS, ETC.**

**ELABORACION DE PLANOS Y DIAGRAMAS E INTERPRETACION DE LOS MISMOS**

**TABLA RESUMEN CONFIGURACIONES DIAGRAMAS TRIANGULARES ETC.**

**FIGURA 3.1.-INTERPRETACION GEOQUIMICA**

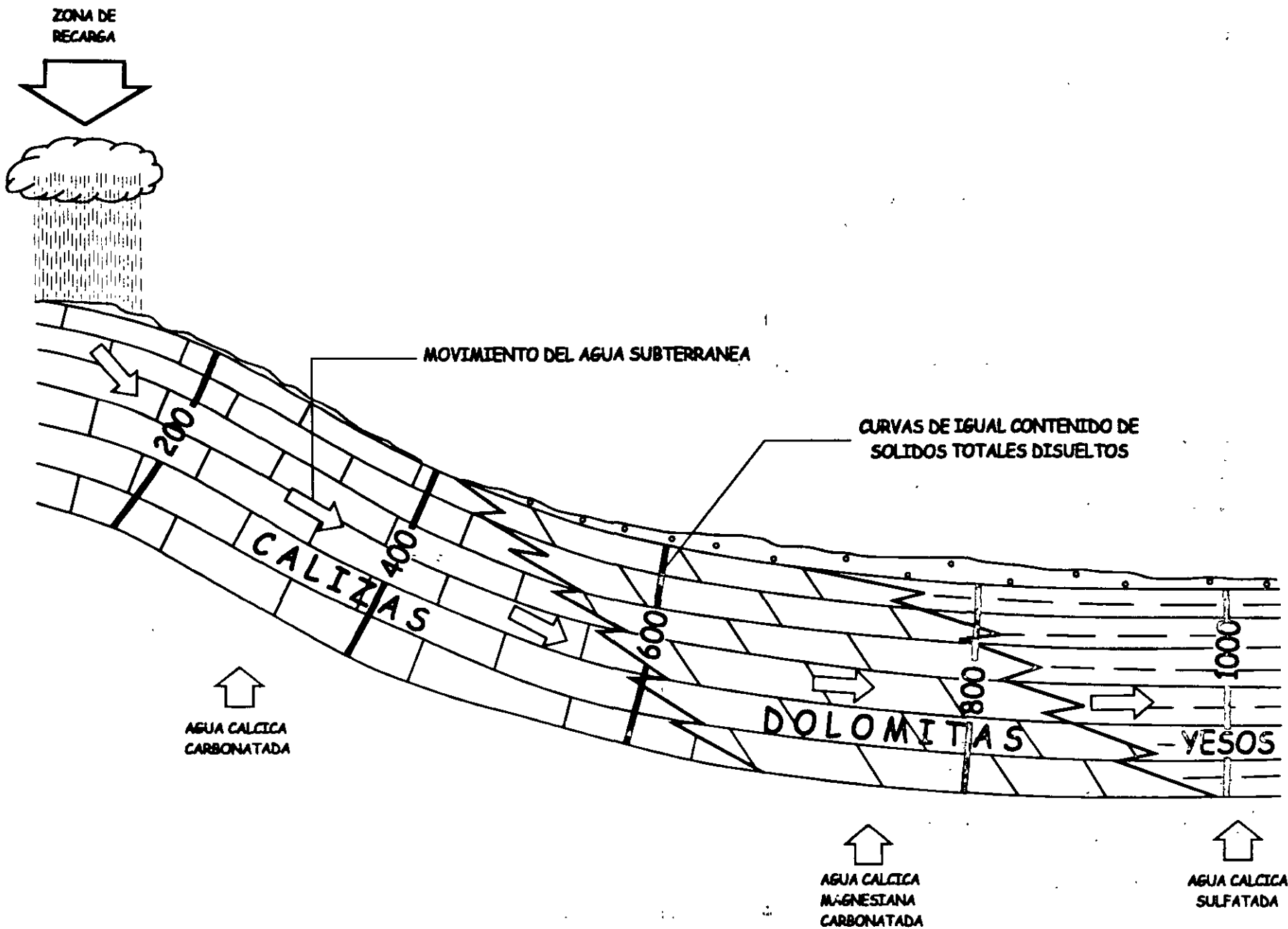


FIGURA 3.2.-VARIACION DE LA QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA, DE ACUERDO AL TIPO DE ROCAS A TRAVES DE LAS CUALES CIRCULA

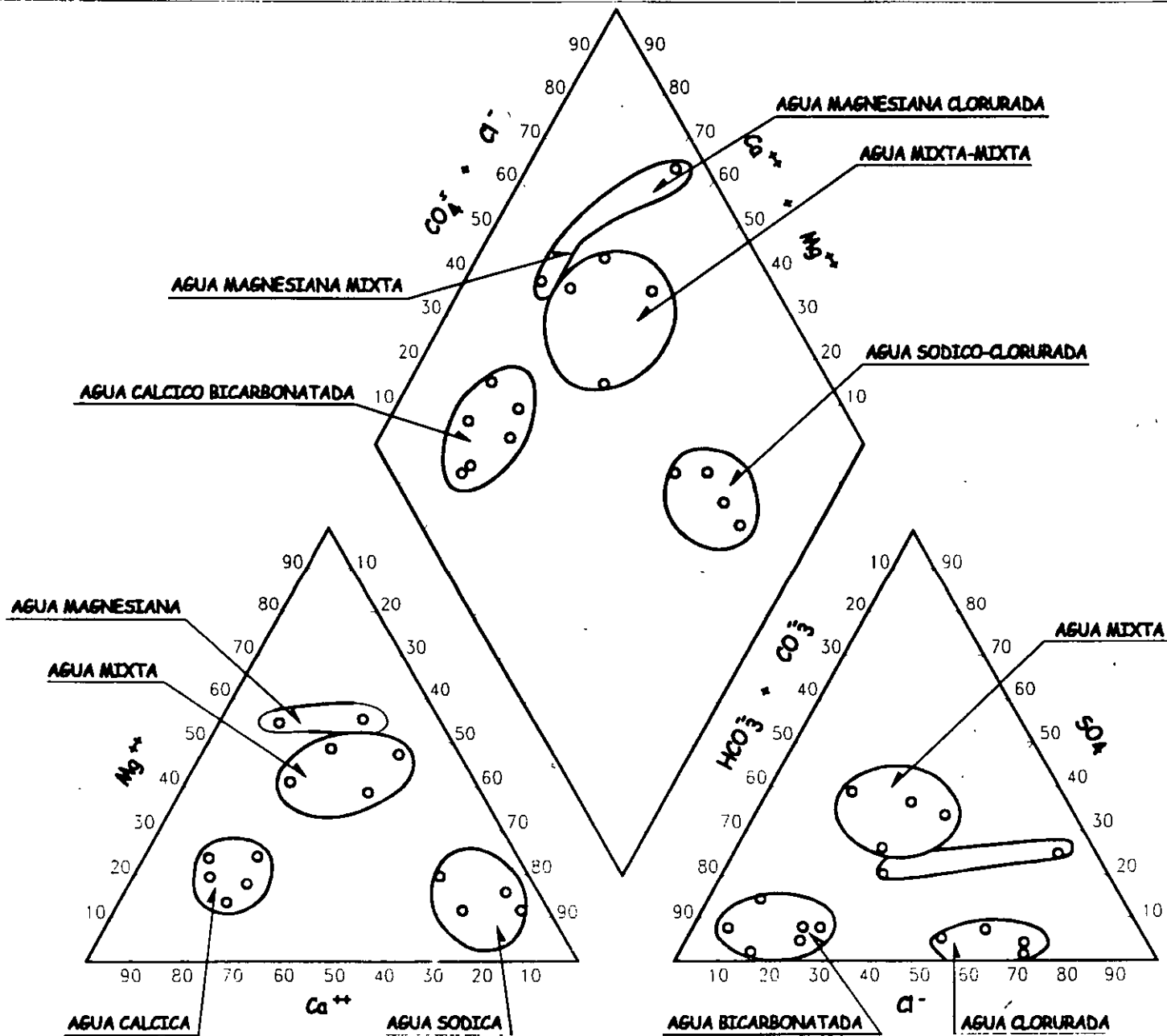
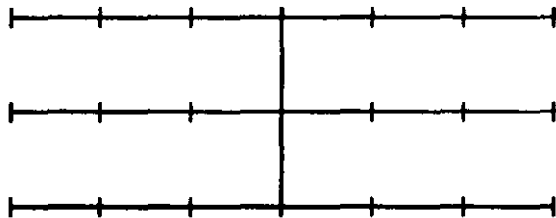
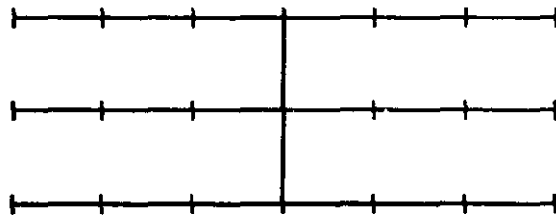
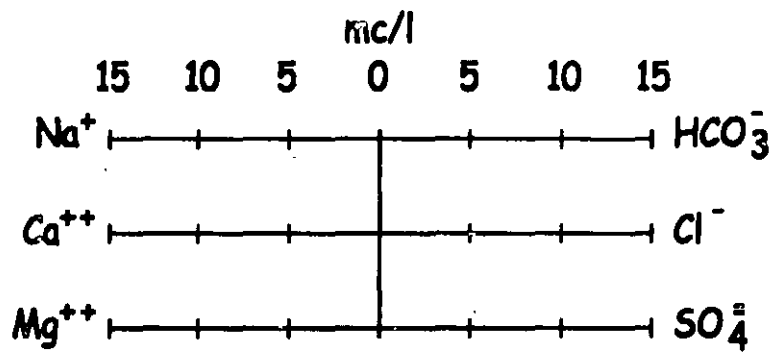


FIGURA 3.3.-DIAGRAMA TRIANGULAR (PIPER)



3.41

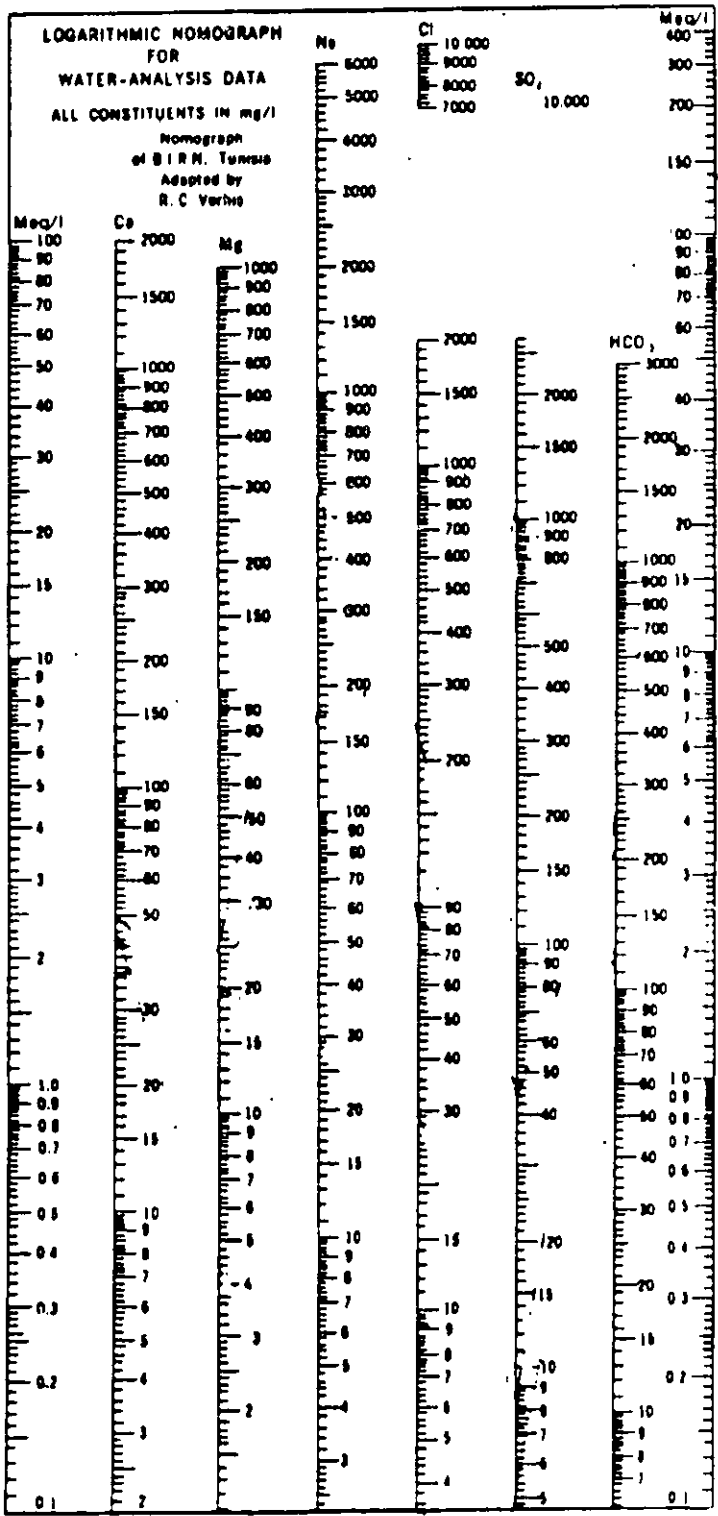


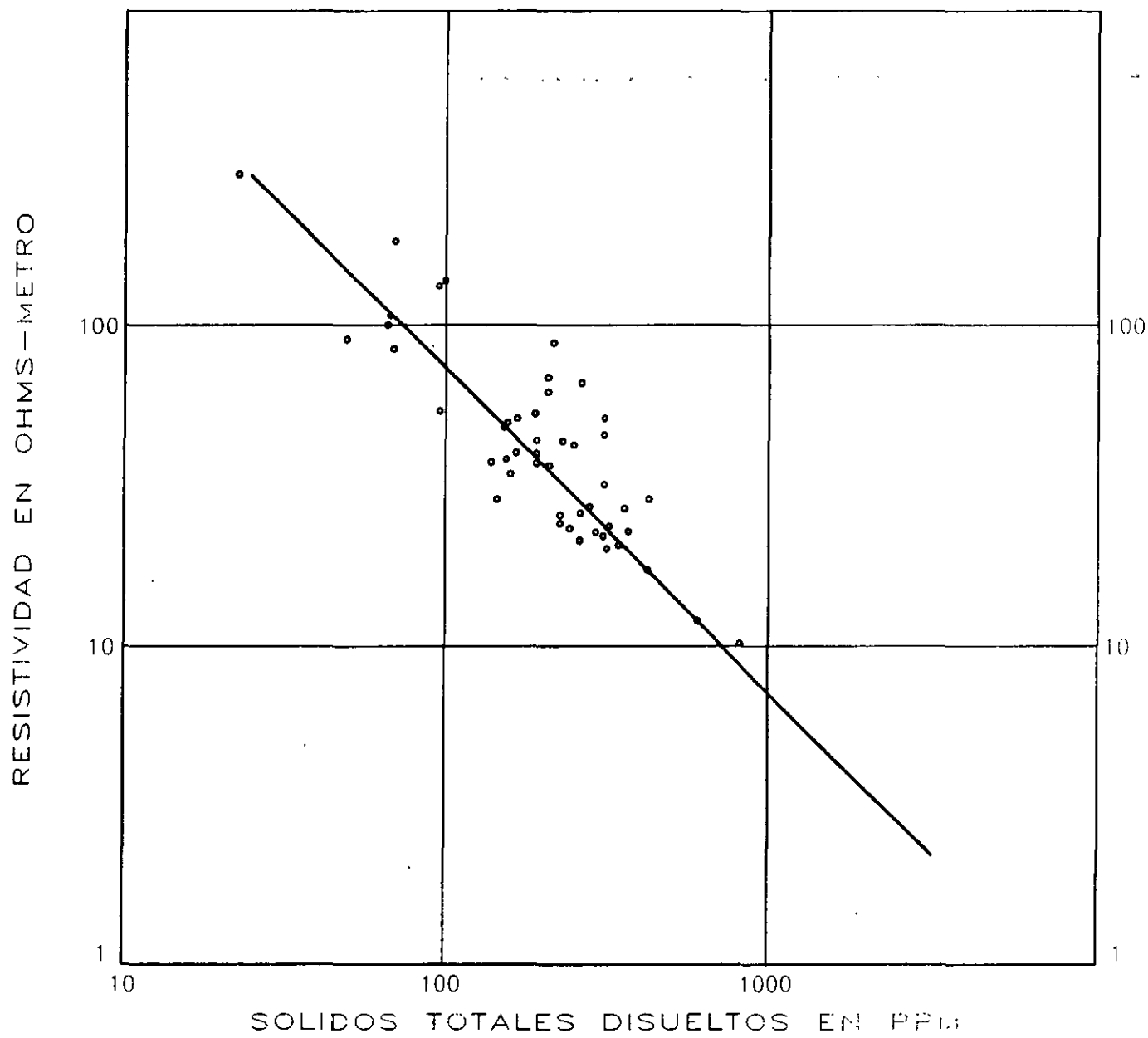
FIGURE 35.—Analysis represented by logarithmic plotting of concentration in milligrams per liter.

TABLE 9.—Conversion factors: Milligrams per liter  $\times F_1$  = milliequivalents per liter; milligrams per liter  $\times F_2$  = millimoles per liter (based on 1961 atomic weights, referred to carbon-12)

Element and reported species	$F_1$	$F_2$
Aluminum (Al <sup>3+</sup> )	0.11119	0.03715
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	.05544	.05544
Barium (Ba <sup>2+</sup> )	.01456	.00728
Beryllium (Be <sup>2+</sup> )	.33288	.11096
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	.01639	.01639
Boron (B)		.09250
Bromide (Br <sup>-</sup> )	.01251	.01251
Cadmium (Cd <sup>2+</sup> )	.01779	.00890
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	.04990	.02495
Carbonate (CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> )	.03333	.01666
Chloride (Cl <sup>-</sup> )	.02821	.02821
Chromium (Cr)		.01923
Cobalt (Co <sup>2+</sup> )	.03394	.01697
Copper (Cu <sup>2+</sup> )	.03148	.01574
Fluoride (F <sup>-</sup> )	.05264	.05264
Germanium (Ge)		.01376
Gallium (Ga)		.01434
Gold (Au)		.00511
Hydrogen (H <sup>+</sup> )	.99209	.99209
Hydroxide (OH <sup>-</sup> )	.05880	.05880
Iodide (I <sup>-</sup> )	.00788	.00788
Iron (Fe <sup>2+</sup> )	.03581	.01791
Iron (Fe <sup>3+</sup> )	.05372	.01791
Lead (Pb)		.00483
Lithium (Li <sup>+</sup> )	.14411	.14411
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	.08226	.04113
Manganese (Mn <sup>2+</sup> )	.03640	.01820
Molybdenum (Mo)		.01042
Nickel (Ni)		.01703
Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	.01613	.01613
Nitrite (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	.02174	.02174
Phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	.03159	.01053
Phosphate (HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	.02084	.01042
Phosphate (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	.01031	.01031
Potassium (K <sup>+</sup> )	.02557	.02557
Rubidium (Rb <sup>+</sup> )	.01170	.01170
Silica (SiO <sub>2</sub> )		.01664
Silver (Ag)		.00927
Sodium (Na <sup>+</sup> )	.04350	.04350
Strontium (Sr <sup>2+</sup> )	.02293	.01141
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	.02082	.01041
Sulfide (S <sup>-2</sup> )	.06238	.03119
Titanium (Ti)		.02088
Uranium (U)		.00420
Zinc (Zn <sup>2+</sup> )	.03060	.01530

Geochemists, however, have sometimes preferred to express analytical data for water in terms which they believed were more directly comparable to rock-composition data. To this end they have expressed analyses in terms of the percentage of each element or ion in the anhydrous residue remaining after evaporating the water. Clarke (1924 a, b) used this reporting procedure, usually with a value for total dissolved-solids concentration and percentages of the components which he termed "percentage composition of anhydrous residue"





**FIGURA 3.8.-RELACION ENTRE RESISTIVIDAD ELECTRICA  
Y SALINIDAD DEL AGUA**

## CAPÍTULO 5.- LA INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS

La explotación de agua subterránea en acuíferos de zonas costeras encara un gran riesgo, denominado “Intrusión Salina”. Muchas zonas costeras son degradadas por este fenómeno, como resultado del exceso de bombeo del agua del acuífero.

Un renglón importante en los acuíferos costeros, es el estudio de la ubicación y velocidad de la intrusión salina. Dentro de estos estudios, es esencial, la determinación de la posición del nivel piezométrico del acuífero y sus fluctuaciones con el tiempo, así como el registro de las variaciones de salinidad en los pozos. Si se cuenta con estos datos puede determinarse la posición y peligrosidad de la intrusión y planear las alternativas más convenientes para su control.

### 5.1.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA INTRUSIÓN SALINA

Para que una zona costera se vea afectada por este fenómeno, es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- a) Continuidad hidráulica.- Debe existir continuidad hidráulica en los materiales que forman el acuífero hacia el mar.
- b) Inversión del gradiente.- otra de las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la intrusión salina, es la inversión del gradiente hidráulico que en forma natural se establece de la planicie costera hacia el mar para originar un flujo hacia él. Cuando por efecto de bombeo se abate el nivel del acuífero para encontrarse abajo del nivel del mar, se invierte el gradiente hidráulico natural y se ocasiona un flujo de agua del mar hacia el acuífero. En la práctica, la magnitud del gradiente hidráulico se obtiene a partir de la medición de la profundidad al nivel del agua en pozos y norias.

### 5.2.- PRINCIPIO DE GHYBEN – HERZBERG

A lo largo de las líneas de costa el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua (interfase salina) se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos aguas.

La profundidad a la cual se encuentra la interfase fue descrita por Badon Ghyben en 1869, y aplicada a problemas específicos por Bairat Herzberg en 1901.

La teoría se basa en lo siguiente:

El peso de una columna vertical de agua dulce que va desde el nivel piezométrico del acuífero hasta la interfase, se encuentra equilibrada por el peso de una columna de agua de mar que vaya desde el nivel del mar, hasta la interfase. Esto es, el peso de la columna de agua dulce de longitud  $h + Z$  es igual al peso de una columna de agua de mar de longitud  $Z$ , donde “ $h$ ” es la elevación del nivel estático a partir del nivel del mar y “ $Z$ ” es la profundidad a la interfase, a partir el mismo nivel de referencia.

Si "Dd" y Dm" representan las densidades del agua dulce y de mar respectivamente, la condición para el balance hidrostático se expresa de la siguiente manera:

$$D_m \cdot g \cdot z = D_d \cdot g \cdot (h + z)$$

$$Z = \frac{D_d}{D_m} (h + z)$$

Considerando que las densidades del agua de mar y del agua dulce son 1.025 y 1.000, respectivamente, tenemos que:

$$Z = 40 h$$

O sea que por cada metro que se eleve el nivel piezométrico sobre el nivel del mar, existirán 40 metros de agua dulce bajo el mismo nivel de referencia (figura 5.1 y 5.2.). La posición del nivel piezométrico sobre el mar, condiciona la profundidad a la interfase. Los movimientos de la superficie del mar por mareas y de la superficie piezométrica del acuífero, producidos por aumento o disminución de agua en él, producen fluctuaciones en la posición de la interfase. El área en donde se llevan a cabo estas fluctuaciones, se denominan zona de difusión. La mayoría de los acuíferos que no están sobreexplotados, descargan agua hacia el mar y la posición real de la interfase, en este caso, se encuentra a mayor profundidad (Hubbert) que la calculada por Ghyben-Herzberg, (figura 5.3).

### 5.3.- MECANISMO DE LA INTRUSIÓN SALINA

Existen varios mecanismos por los cuales el agua de mar puede intrusionar a un acuífero costero. Estos, están relacionados con la disminución de la elevación del nivel piezométrico y la inversión del gradiente hidráulico, que permite el agua de mar moverse hacia tierra adentro. Bajo condiciones naturales en los acuíferos costeros, existe un equilibrio entre la recarga, la descarga y el cambio del almacenamiento. Es conveniente que exista un flujo de agua dulce al mar, para conservar el equilibrio, y evitar la intrusión. Conforme el agua subterránea es extraída por bombeo, el nivel estático baja acomodándose a las nuevas condiciones y el flujo de la intrusión salina se comienza a mover hacia el acuífero, ocupando primero las zonas costeras y posteriormente la zona de explotación del valle.

### 5.4.- MÉTODOS DE CONTROL DE LA INTRUSIÓN SALINA

Varios métodos de control son conocidos y utilizados para prevenir la intrusión salina. Los más comunes son:

- |                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1).- Reducción de la extracción | 4).- Barrera con pozos de bombeo     |
| 2).- Recarga artificial         | 5).- Barreras con pozos de inyección |
| 3).- Fronteras impermeables     | (figura 5.4)                         |

- a) Reducción de la extracción.- Una de las medidas técnicamente más sencillas para prevenir la intrusión de agua de mar, es la extracción de agua subterránea, a un nivel planificado. Esta medida implica una disminución en las demandas de agua lo cual,

en ocasiones crea problemas socioeconómicas y políticas muy fuertes. Cuando se opta por este método y el bombeo es reducido, puede establecerse nuevamente el gradiente hacia el mar y la intrusión es reemplazada por un ligero flujo de agua dulce hacia el mar. Si existe información suficiente sobre la variación de los niveles del agua y si se conocen las condiciones geológicas del subsuelo, la reducción de la extracción puede ser controlada de tal manera, que se obtenga la máxima cantidad de agua sin provocar una intrusión salina nociva.

- b) **Recarga artificial.**- Para ello es necesario contar con una fuente adicional de agua así como condiciones apropiadas del terreno, de tal manera, que la recarga puede llevarse a cabo. Las obras para la recarga pueden consistir en zanjas superficiales construidas en el área de recarga a través de las cuales se hace circular agua que se infiltra al subsuelo. Otro tipo de obras, consiste en la construcción de presas de infiltración, localizadas en la zona de recarga. En zonas donde existen capas confinantes impermeables, pueden construirse pozos de inyección. Al llevar a cabo esta recarga se provoca la reinversión del gradiente hacia el mar, la cual es acompañada por un flujo de agua dulce. La recarga, en esta forma, es económica, respecto a los otros métodos, pero en la mayoría de los casos no se cuenta con fuentes de agua adicional para llevarla a cabo.
- c) **Fronteras impermeables.**- Consiste en la construcción de una barrera impermeable entre la línea de costa y los pozos de explotación. El medio de construcción puede ser excavando una zanja que posteriormente se rellena con materiales arcillosos. Otro tipo de barrera. Consiste en el inyectado de material impermeable. Estas construcciones son usadas solo en áreas relativamente someras. Es importante, el conocer los resultados posteriores a su construcción, ya que, si la impermeabilización es completa, permitirá abatimientos fuertes y por lo tanto la obtención de mayores volúmenes de agua almacenada. Este método tiene la desventaja de no contar con un flujo de agua subterránea hacia fuera de la zona, que en ocasiones, es necesario para mantener un balance de sales favorables.
- d) **Barrera de pozos de bombeo.**- Consiste en una línea de pozos localizados entre la zona de explotación del valle y el mar. Los pozos, deben de extraer toda el agua de mar que intrusiona al acuífero, hasta obtener un equilibrio hidrostático. Para ello, los niveles de agua deben de ser bajados en la barrera, más que en cualquier otro punto en la cuenca. El volumen de extracción que se lleva a cabo en el valle, debe de ser reducido, cuando menos una cantidad ligeramente menor a la que se obtenía antes de aplicar el método. Es importante, disponer del registro de los niveles del agua en la zona de la barrera, así como el conocer la cantidad exacta de agua que se debe bombear para obtener los resultados deseados. Esta cantidad de agua que se debe de extraer, es muy variable y deberá de ser mayor al volumen de agua de mar que originalmente intrusionaba.

Mientras más cerca del mar se localiza la barrera, el bombeo tendrá que ser mayor.

- e) **Barrera con pozos de inyección.**- Este método para control de intrusiones salinas, consiste en la construcción de pozos de inyección alineados a lo largo de la costa, su

funcionamiento va a depender de la resistencia que encuentre el agua al moverse en el subsuelo.

Al inyectar agua al acuífero se provoca la elevación del nivel piezométrico lo cual se lleva a cabo hasta alcanzar el gradiente requerido. Debido a la diferencia en densidad entre el agua de mar y el agua dulce, se requiere una columna de 41 metros de agua dulce para equilibrar una columna de 40 metros de agua salada. Para controlar la intrusión es necesario primeramente determinar el espesor de sedimentos permeables. Posteriormente se construye la barrera de pozos de inyección y se provoca la elevación del nivel piezométrico a lo largo de la línea de pozos, hasta alcanzar una altura de 75 centímetros arriba del nivel del mar, por cada 30 metros de espesor del acuífero bajo el mismo nivel de referencia. La cantidad de agua utilizada para dicho fenómeno puede ser estimada. Después de que en la barrera con pozos de inyección, se establece un equilibrio, la cantidad de agua que fluye hacia el acuífero, será la cantidad de agua de mar que intrusionaba anteriormente, siempre y cuando la explotación de la planicie se haya conservado igual. Para mantener el balance dinámico de esta zona, es necesario que exista un pequeño flujo de agua dulce hacia el mar. La magnitud de este flujo es variable, pero será de alrededor de 10% de la que fluye hacia el acuífero. El número de pozos requeridos para formar la barrera dependerá de las características hidráulicas del acuífero, en especial de la capacidad específica de un pozo de bombeo perforado en la zona.

- f) Método combinado; barrera por pozos de bombeo-barrera por pozos de inyección.- Este método utiliza la combinación de los dos métodos anteriores. Para ello, la barrera por pozos de bombeo, es localizada entre la línea de costa y la zona de explotación del valle y la barrera por pozos de inyección se ubica tierra adentro, del otro lado de la zona de explotación. La barrera combinada, compuesta de los dos sistemas, operando simultáneamente, minimizada los efectos de subsidencia y extracción de agua, así como otros efectos secundarios y permite una mayor flexibilidad en su operación sobre la de uno solo de los sistemas previamente descritos.

## REFERENCIAS

Bruington, A.E., y Seares, F.D., 1965, "Operating a Sea Water Barrier Project". American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 91, No. IRI.

Bruington, A. E. Drescher, W. J. y Sherwood, C.B. 1969. "Saltwater Intrusion in the United States"., American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Hydraulics Division, Paper 6788, HY 5; pp. 1651-1669.

Custodio, E. y Llamas, M. R. 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega Barcelona, España.

Driscoll, Fletcher (1986). Groundwater and Wells. Filter/Johnson Screens, Ed. St. Paul, MN. 1089 p.

Freeze, A. and Cherry, J. 1979. Groundwater: Prentice Hall, 604 p.

NOTA: Para la elaboración de este artículo, se utilizaron datos de diferentes textos y trabajos, principalmente de los apuntes del curso de hidrología subterránea del Departamento de Recursos Hidráulicos del Estado de California, E.U., por Raymond C. Richter.

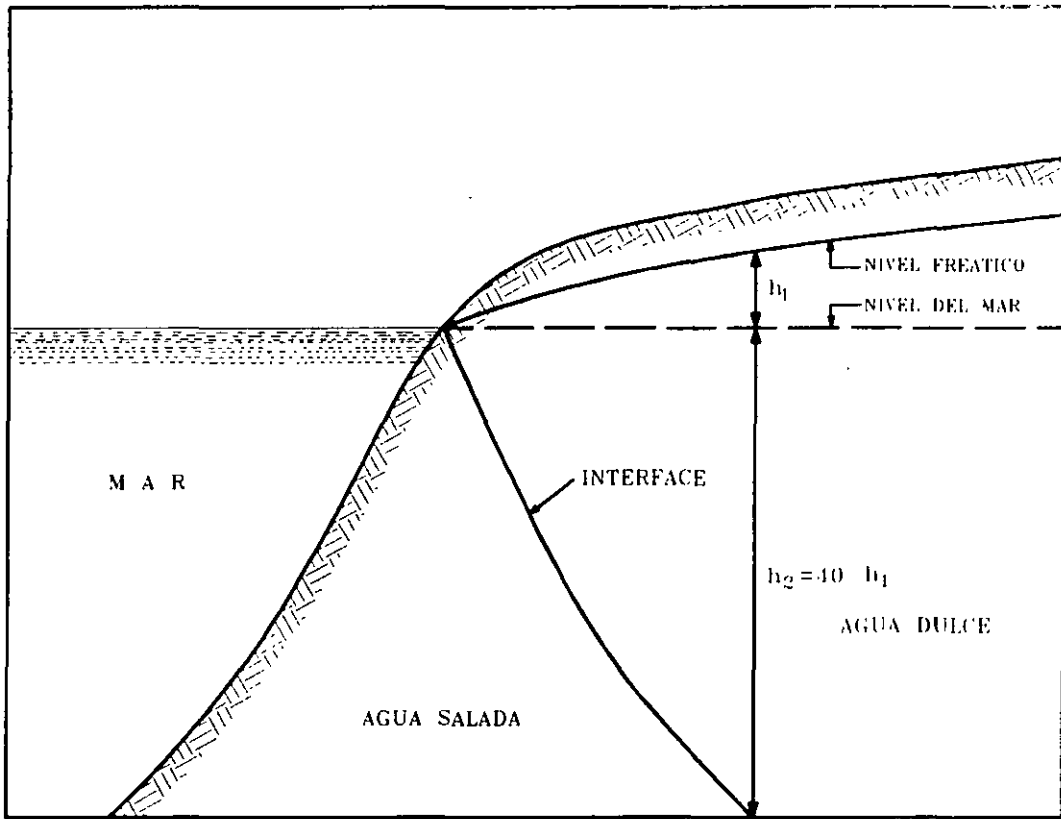


FIGURA 5.1.- INTRUSION SALINA SEGUN LA TEORIA DE GYBEN HERZBERG

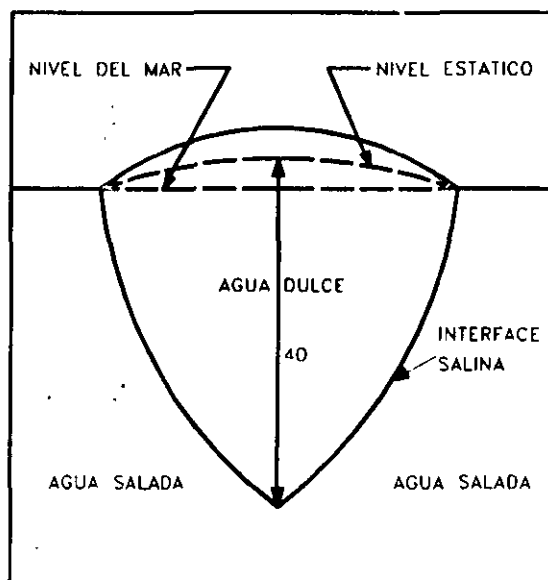


FIGURA 5.2:- POSICION DE LA INTERFASE SALINA EN UNA ISLA



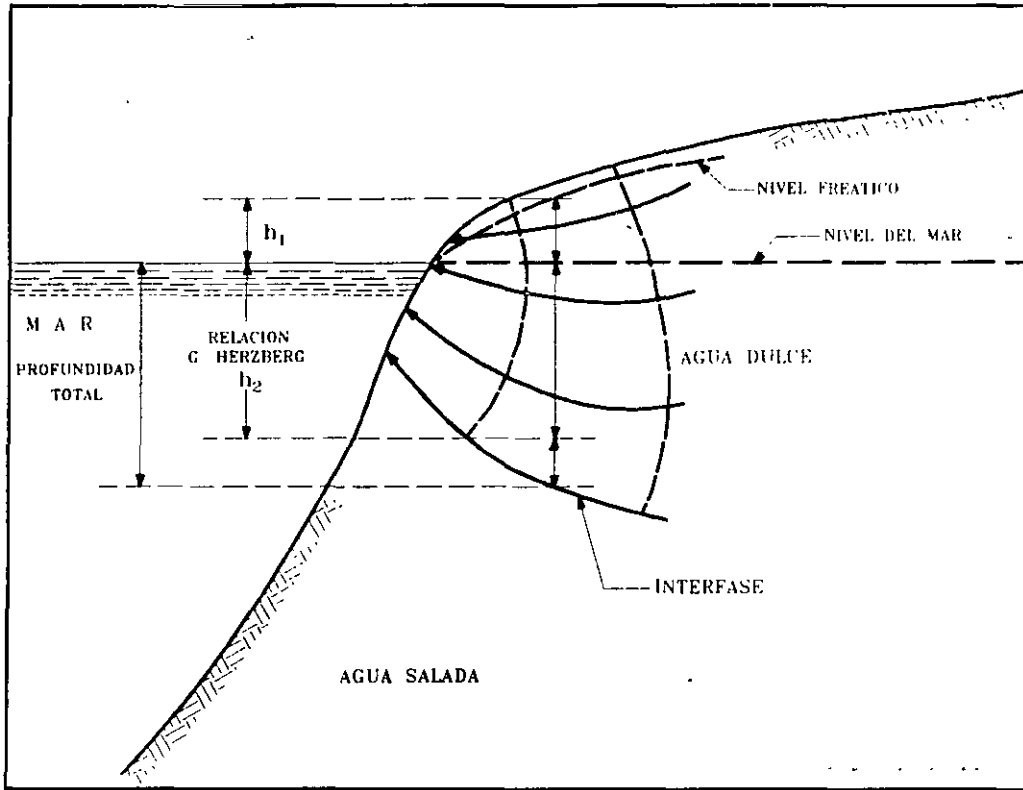
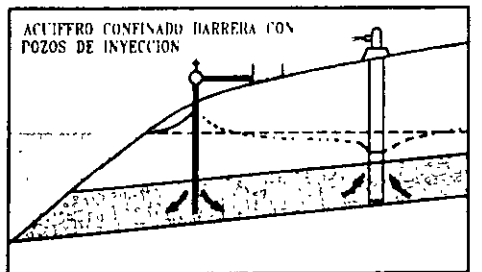
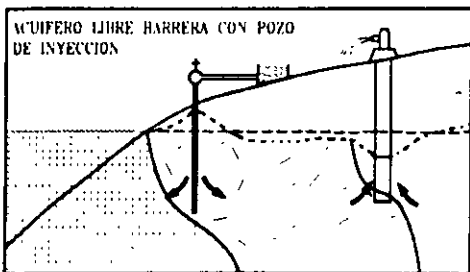
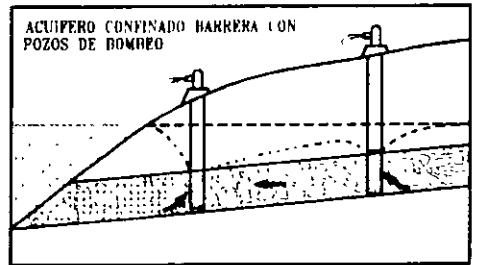
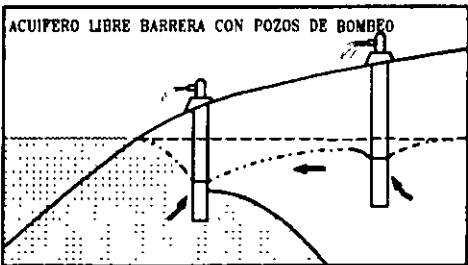
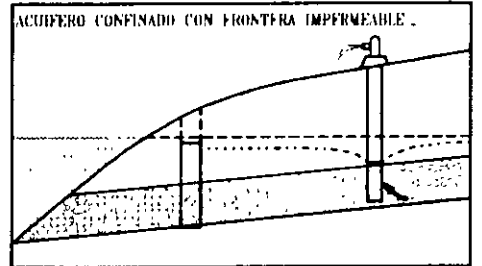
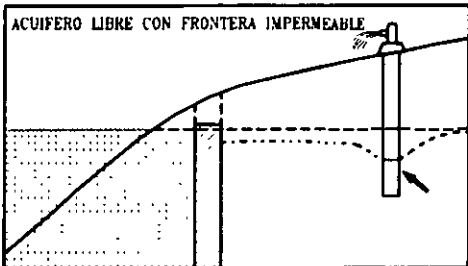
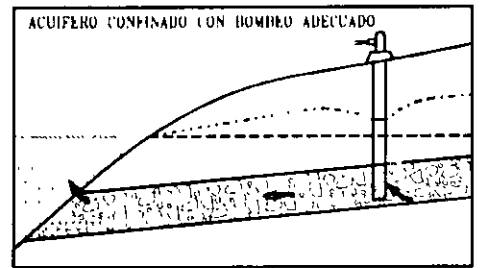
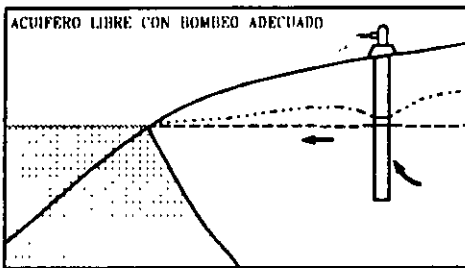
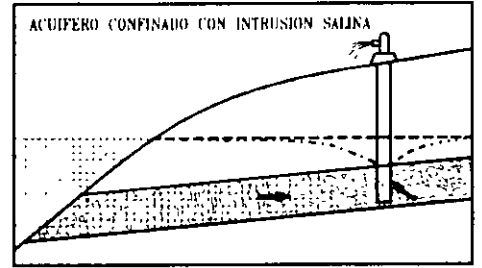
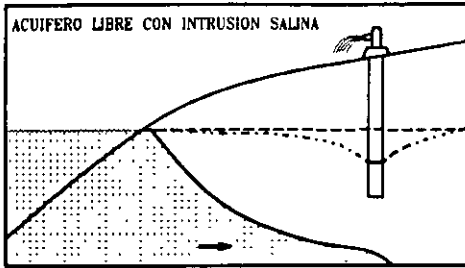
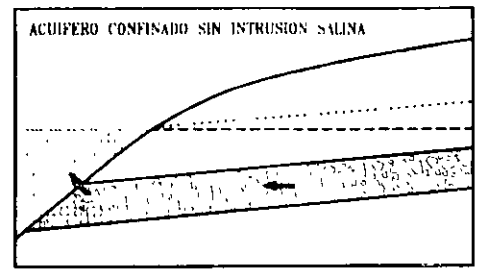
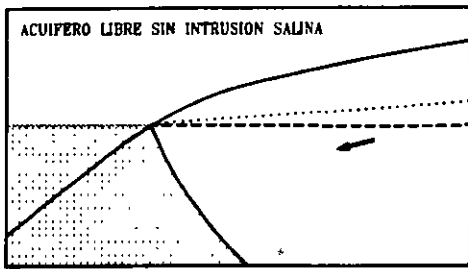


FIGURA 5.3.- POSICION REAL DE LA INTERFASE SALINA



NIVEL PIEZOMETRICO ..... NIVEL DEL MAR ----- AGUA DULCE [white box] AGUA SALADA [stippled box] AGUA INYECTADA [dotted box]

FIGURA 5.4.- DIFERENTES ASPECTOS DE LA INTRUSION SALINA

## **CAPITULO 6.- CALIDAD DEL AGUA**

Las aguas subterráneas y superficiales que son utilizadas para satisfacer las necesidades de agua potable de zonas urbanas, así como la que se destina a la agricultura, ganadería e industria, necesita cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos, a sus propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

El objeto del presente trabajo, es el de mostrar, en forma general, las normas de calidad del agua utilizada como potable, en riego, en abrevadero y en la industria, así como el significado y algunas propiedades físicas y químicas del agua.

La calidad del agua, se determina a partir de análisis físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde análisis sencillos donde se determinen los principales elementos, hasta análisis complejos que incluyan la determinación de una gran variedad de especies presentes en el agua.

El tipo de análisis dependerá del uso que se le tenga destinado al agua, así como de algunas características observadas en la zona donde ésta se encuentre. Por ejemplo, en una zona minera, es conveniente determinar las concentraciones de algunos metales que pudieran encontrarse presentes. En lugares próximos a poblados y/o establos, debe ponerse atención a los contenidos de nitratos y organismos coliformes, etc.

### **6.1.- AGUA POTABLE**

Las normas de calidad para el agua potable, conocidas también como límites máximos permisibles, se publicaron en el Diario Oficial el 18 de enero de 1988, los cuales se transcriben a continuación:

**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. AMONICAL	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	12COL/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.

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.....	3.0
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-

**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 aquellos 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-)	0.07
Cloro residual libre	0.5-1.00 (después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min)
Cloruros (como Cl-)	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-)	1.50
Fosfatos (como PO <sub>4</sub> =)	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

Características de algunos elementos críticos como los que se mencionan a continuación.

## **CROMO**

El cromo se define como un elemento químico metálico con una alta resistencia a la corrosión y que es utilizado por un gran número de industrias. La forma como se encuentra en yacimientos naturales es como cromita cuya fórmula es  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . Los compuestos de cromo más importantes son: cromato de sodio y potasio. Se puede encontrar también como cromo metálico ( $\text{Cr}^{++}$ ), cromo trivalente y como cromo hexavalente. Esta última forma tiene tendencia a ser reducida por especies orgánicas.

En el agua se puede encontrar en forma soluble. Proviene de la disolución de sales de cromato de sodio, cromato de potasio y cromato de amonio. Es utilizado comúnmente en industrias electrónicas, en plantas textiles, en industrias de vidrio y de materiales fotográficos. También se utiliza en la industria del calzado, en pinturas y tintes, así como en explosivos, fábricas de cerámica y papel. Exceso de cromo en el agua potable causa problemas en el hígado y pulmones con síntomas de hemorragia, así como problemas en la piel. Se clasifica como cancerígeno y dentro del grupo 1 (International Agency for Research on Cancer - IARC). La norma de calidad para el agua potable de acuerdo a la USEPA 1989 (U.S. Environmental Protection Agency), es de 0.1 miligramos por litro. La Norma Oficial Mexicana (NOM) indica una concentración máxima de 0.05 miligramos por litro de cromo hexavalente para el agua potable.

## **NITRITOS Y NITRATOS**

Los nitratos ( $\text{NO}_3$ ) son un producto de la estabilización aeróbica del nitrógeno orgánico. Otra fuente de nitratos son sales minerales.

Los nitritos ( $\text{NO}_2$ ) se forman por la acción bacteriana del amonio y del nitrógeno orgánico. Generalmente sus concentraciones en el agua son muy reducidas debidas a la rápida oxidación de los nitritos a nitratos. Se encuentra generalmente en aguas tratadas, tanto municipales como agrícolas.

Los nitritos se utilizan como fertilizante, así como agente oxidante en la industria química. En la industria alimenticia, son utilizados como preservador de alimentos, particularmente en carnes y quesos.

Los nitritos al ser ingeridos por el hombre, actúan en la sangre como oxidante de la hemoglobina. Se clasifica dentro del Grupo D en relación al riesgo cancerígeno (USEPA, 1985) y en publicaciones recientes se indica que no existen suficientes datos para su clasificación por lo que se recomiendan estudios más profundos. La norma de calidad para agua potable de acuerdo a la MCLG y MCL (1989) indican 10 miligramos por litro para los nitratos y un miligramo por litro para los nitritos. (MCLG = Nonenforceable standards to be used as a guide; MCL = maximum contaminant level). La Norma Oficial Mexicana indica 5 mg/l para los nitratos y 0.05 mg/l para los nitritos

## SILICE

Se expresa como óxido de sílice,  $\text{SiO}_2$  y es ampliamente utilizado para referirse al sílice que se encuentra en las aguas naturales pero debe entenderse que la forma en que se encuentra es hidratado y su representación real es  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  o bien  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

El sílice puede ser incorporado en el agua a partir de la disolución de feldespatos sódicos como la albita. Concentraciones mayores se encuentran en relación con aguas de origen geotermal. Estudios de geotermia basan o utilizan la determinación de sílice en el agua para calcular la profundidad de formación y temperatura, tendiente a estudiar los yacimientos geotérmicos y a localizar sitios para perforación de pozos geotérmicos. A las determinaciones de temperaturas basadas en edad se le denomina geotermómetros.

El rango en que generalmente se encuentra el sílice en el agua de acuerdo a la literatura, es de 1 a 30 miligramos por litro, sin embargo, concentraciones arriba de 100 mg/l llegan a ser comunes en zonas como la estudiada (comunicación verbal del laboratorio), donde el agua ha circulado a través de rocas que incluyen sílice entre los minerales que las constituyen y que han estado sujetas a altas temperaturas.

## ARSENICO

El arsénico es un elemento químico sólido, semimetálico, que destaca por su alta toxicidad hacia humanos. Se encuentra en forma de compuestos siendo el más común la arsenopirita ( $\text{FeSAs}$ ). Es utilizado por industrias de vidrio, cerámica, tintes y como insecticida en la agricultura, etc. Recientemente se ha venido utilizado en estado sólido en transistores y parte de material laser.

El arsénico como As es insoluble en agua pero varias sales sí presentan solubilidad. Concentraciones de 100 mg suelen ser venenosas para los humanos y letales en rangos de 130 mg. El arsénico se acumula en los tejidos del cuerpo humano. Ha sido reportado como venenoso cuando se encuentra en concentraciones que varían de 0.21 y 10.0 mg/l. No se ha encontrado que presente problemas de cáncer porque, antes que eso, primeramente, se considera venenoso o tóxico. La norma de calidad reciente publicada por la MCLG USEPA 1987, indica que el agua debe de contener menos de 0.05 mg/l para consumo humano. Mismo valor consigna la Norma oficial Mexicana.

## 6.2.- AGUA PARA RIEGO

Para conocer la calidad del agua para riego, se ha optado por utilizar la clasificación de Wilcox (1948) en la cual, por medio de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), se obtiene la clase de agua para riego.

La conductividad eléctrica es igual al recíproco de la resistividad y proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos. Normalmente, esta se expresa en micromhos por centímetro (mmhos-cm).



La relación de adsorción de sodio, se obtiene por medio de la fórmula siguiente.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Donde las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  están dadas en equivalentes por litro. Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la fórmula, queda, supeditado a las concentraciones absoluta y relativa de los principales cationes.

Los valores de CE y RAS, son graficados en el nomograma de clasificación (figura 6.1) obteniéndose de esta manera, la clase de agua para riego, la cual está definida por los parámetros, C y S y subíndices en cada uno de ellos. El significado de las diferentes clases, así como algunas recomendaciones para el uso del agua en riego, se comentan a continuación.

- C1 BAJA SALINIDAD.- Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con pocas probabilidades de que aumente la salinidad.
- C2 SALINIDAD MEDIA.- Puede usarse, si se hacen lavados moderados. Se pueden sembrar plantas moderadamente tolerantes a las sales en la mayoría de los casos, sin efectuar prácticas especiales para el control de la salinidad.
- C3 ALTAMENTE SALINA.- No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado, se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas que sean bastante tolerantes a las sales.
- C4 MUY ALTAMENTE SALINA.- No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias aunque puede usarse, en ocasiones, bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado; el agua para riego debe aplicarse en exceso con el fin de llevar a cabo un lavado fuerte. Las plantas que se seleccionen deberán ser muy tolerantes a las sales.
- S1 CON POCO SODIO.- Puede usarse para riego en casi todos los suelos, con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo, las plantas sensitivas al sodio como algunos frutales (fruto con hueso) y aguacate, pueden acumular concentraciones dañinas de sodio.
- S2 CON CONTENIDO MEDIO.- Será peligrosa en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que haya yeso en el suelo. Esta agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.
- S3 CON ALTO CONTENIDO.- Conducirá a niveles peligrosos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos por lo cual se requerirá de un manejo especial, buen

drenaje, lavados fuertes y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse, para el reemplazo de sodio intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de mejoradores en aguas de muy alta salinidad.

**S4 CON MUY ALTO CONTENIDO.-** Generalmente no es apropiada para el riego, excepto en casos de baja y quizá media salinidad, donde la solución del calcio del suelo o el empleo de yeso u otros mejoradores, hagan factible el uso de esta agua.

La conductividad eléctrica puede tomarse como un índice en la selección de cultivos, en la tabla siguiente se presenta la tolerancia relativa de los cultivos a las sales.

Tabla 6.2.- Tolerancia de cultivos a las sales  
Frutales

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
Palma – dátiles	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruela Almendro Chabacano Durazno Fresa Limonero Aguacate

## Hortalizas

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 12 *$ Betabel Bretón o col rosada Espárragos Espinacas  $CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 10$ Jitomate Brócoli Col Chile dulce Coliflor Lechuga Maíz dulce Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos $CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 4$ Rábano Apio Ejotes  $CE_e \times 10^3 = 3$

## Plantas forrajeras

MUY TOLERANTE	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTE
$CE_e \times 10^3 = 18$ Zacate alcalino de coquito Zacate bermuda Zacate rhodes	$CE_e \times 10^3 = 4$ Trébol blanco Trébol amarillo Zacate inglés perenne  Zacate Sudán Trébol Huban Alfalfa (California común)	$CE_e \times 10^3 = 4$ Trébol blanco holandés Trébol Alsike Trébol rojo Trébol ladino Pinpinela

El boro en pequeñas concentraciones, es esencial para el desarrollo normal de las plantas y, la falta de este elemento, o su presencia en concentraciones altas, afecta el crecimiento de los cultivos.

Dependiendo de la cantidad de boro que las plantas acepten, estas se han dividido en tres grupos:

#### CUANDO ACEPTAN

Cultivos sensibles	Hasta 0.67 ppm
Cultivos semitolerantes	Entre 0.67 y 1.00 ppm
Cultivos tolerantes	Entre 1.00 y 3.75 ppm

A continuación se muestran algunos cultivos haciéndose distinción entre tolerantes, semitolerantes y sensibles.\*

Tabla 6.3.- Cultivos tolerantes, semitolerantes y sensibles a las sales

TOLERANTES	SEMITOLERANTES	SENSIBLES
Espárragos	Girasol (nativo)	Nuez encarcelada
Palma datilera	Papa	Nogal negro
Remolacha azucarera	Algodón	Nogal persa
Alfalfa	Jitomate	Ciruelo
Gladiola	Rábano	Peral
Haba	Chícharos	Manzano
Cebolla	Rosa Ragged	Uva (málaga y sultaina)
	Robin	Higo Kadota
Nabo	Olivo	Níspero
Col	Cebada	Cereza
Lechuga	Trigo	Chabacano
Zanahoria	Maíz	Durazno
	Sorgo	Naranja
	Avena	Aguacate
	Calabacita	Toronja
	Pimiento "Bell"	Limonero
	Camote	
	Frijol Lima	

(En orden descendente de más a menos tolerante)

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
Cebada folium (para heno tripata de pájaro)	Trigo (para heno) Avena (para heno) Grama azul Bromo suave Veza lechosa Cicer	
$CE_e \times 10^3 = 12$	$CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 2$
CULTIVOS COMUNES		
$CE_e \times 10^3 = 12$	$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 4$
Cebada (grano) Remolacha Azucarera Colza Algodón	Centeno (grano) Trigo (grano) Avena (grano) Arroz Sorgo (grano) Maíz Linaza Girasol Higuerilla	Alubias
$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 6$	

(De: Suelos salinos y sódicos, 1954)

\*El número que sigue a la  $CE_e \times 10^3$  es el valor de la conductividad eléctrica del extracto de saturación en milimhos por centímetro a 25°C asociado a una disminución en los rendimientos de 50 por ciento.

### 6.3.- AGUA PARA ABREVADERO

El agua usada en granjas y ranchos ganaderos, normalmente debe de cumplir con los mismos requisitos que el agua potable, ya que es utilizada también para usos domésticos de los ranchos. Los animales pueden ingerir agua con una mayor concentración de sales.

A continuación se describen los límites máximos para algunos animales, según Mckee y Wolf, (1963).

Tabla 6.4.- Límites máximos para algunos animales

Aves	2,860 ppm
Cerdos	4,290 ppm
Caballos	6,430 ppm
Ganado lechero	7,150 ppm
Ganado de carne	10,100 ppm
Borrego	12,900 ppm

#### 6.4.- AGUA PARA LA INDUSTRIA

La clase de agua requerida en la industria, depende del tipo de instalaciones utilizadas.

Una forma rápida de catalogar el tipo de agua para la industria, es conociendo su dureza. Esta normalmente se reporta en concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Cuando un agua contiene concentraciones bajas de ese compuesto, se denomina "agua blanda" y al agua con concentraciones altas, "agua dura".

De acuerdo con algunos autores (Durfor y Becker, 1964), se han distinguido los siguientes rangos de dureza.

Tabla 6.5.- Rangos de dureza para la industria

Concentración en Mg/l de $\text{CaCO}_3$	Descripción
0 - 60	Agua blanda.
61 - 120	Agua moderadamente dura.
121 - 180	Agua dura.
más de 180	Agua muy dura

En la tabla siguiente, se muestran algunos de los límites para la industria textil y papelera, así como en derivados del petróleo y embotelladoras.

Tabla 6.5.- Calidad del agua para algunas industrias  
(en mg/l)

CONSTITUYENTE	INDUSTRIA TEXTIL	INDUSTRIA PAPELERA	DERVIADOS DEL PETRÓLEO	EMBOTELLADORA
SiO <sub>2</sub>	-	50	-	-
Fe	0.1	1.0	1.0	0.3
Mn	0.1	0.5	-	0.05
Ca	-	20	75	-
Mg	-	12	30	-
Cu	0.01	-	-	-
NH <sub>4</sub>	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-
HCO <sub>3</sub>	-	-	-	-
SO <sub>4</sub>	-	-	-	500
Cl	-	200	300	500
F	-	-	-	-
NO <sub>3</sub>	-	-	-	-
Dureza	25	100	350	-
PH	2.5-10.5	6-10	6-9	-
S.T.D.	100	-	100	-

(En: John Hem, 1985)

## REFERENCIAS

Chapingo, Escuela Nacional de Agricultura. Calidad del agua para riego, apuntes inéditos.

De Zuane, John, (1990). Handbook of Drin King Water Quality, Standards and Controls. Van Nostrand Reinhold, New York, 523 p.

Drever, James, (1998). The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, New Jersey. 437 p.

Hem, John, (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Surver Water-Supply paper 2254.

Languimir, Donald, (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall, New Jersey, 600 p.

Driscoll, Fletcher (1986). Groun Water and Wells. Filter/Johnson Screens, Ed. St. Paul, M N. 1089 p.

Suelos Salinos y Sódicos, 1954 Manual de Agricultura No. 60 Departamento de Agricultura de los estados Unidos de América.

## CAPÍTULO 8.- TRAZADORES DE AGUA SUBTERRÁNEA

### 8.1.- RESUMEN

La técnica sobre la aplicación de trazadores en agua subterránea, se ha venido desarrollando con nuevas metodologías en los últimos 35 años. Los principales trazadores utilizados son: fluoriceínas, sales, esporas e isótopos. Las fluoriceínas son uno de los trazadores más económicos y fáciles de utilizar. Su aplicación se ha incrementado al introducir en el proceso de detección, el espectrofluorómetro y la concentración por medio de carbón activado. Las esporas, son el trazador más nuevo que existe, el cual ha probado ser de gran utilidad. Otro tipo de trazadores de agua subterránea, son los isótopos deuterio, oxígeno 18, tritio y carbono 14, cuya técnica y aplicación es cada día mayor.

### 8.2.- INTRODUCCIÓN

En determinadas ocasiones es de esencial importancia el conocer con exactitud si existe conexión entre dos puntos de un acuífero. Para ello se han llevado a cabo, desde el siglo pasado, experimentos consistentes en mezclar, en el agua de un aprovechamiento subterráneo localizado aguas arriba, una sal o un tinte, el cual puede ser reconocido en otro aprovechamiento localizado a cierta distancia aguas abajo, determinando así, la posible conexión entre dichos puntos. A esta técnica se le conoce como trazadores de agua subterránea.

Este método, se ha aplicado principalmente en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto, y en distancias hasta de 40 km. (Zotl, 1970). En menor proporción, se ha llevado a cabo en medios granulares, ya que por una parte la velocidad de flujo es relativamente pequeña y por otra, la arcilla produce absorción e intercambio iónico, por lo cual la aplicación en este medio debe ser en distancias cortas.

Los puntos de inyección más comunes, son ríos subterráneos localizados dentro de cavernas y los principales puntos de muestreo son manantiales. Con algunas limitaciones los puntos de inyección y muestreo de trazadores pueden ser también pozos, norias, galerías filtrantes, drenes, lagos y presas. En algunas ocasiones, se ha utilizado esta técnica para determinar si el agua de manantiales, ríos o drenes, corresponden a filtraciones de una presa o lago.

Un buen trazador, debe reunir las características siguientes: Debe ser no tóxico; soluble en agua, identificable en pequeñas concentraciones; resistente a cambios químicos; tener poca o nula capacidad de intercambio iónico; no ser absorbido o retenido por suelo o rocas; su determinación debe ser mediante análisis sencillos y su aplicación económica.

Los principales trazadores son fluoresceínas, sales, esporas e isótopos.



### 8.3.- FLUORESCEINAS

Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente. La longitud de cada onda de esta luz, varía de una sustancia a otra, propiedad que se utiliza para identificarlas. Las sustancias más comunes utilizadas como trazadores son: Uranina, Eosina, Aminorhodamina G extra, Rhodamina FB y Tinopal CBS-X.

A continuación se describen las características de cada una de estas sustancias.

- a) URANINA.- Es la de mayor aplicación. Consiste en una fluoresceína de sodio que presenta un color naranja en soluciones concentradas (más de 1 ppm), que cambia de verde-amarillento al ser diluida.

La intensidad de fluorescencia depende del pH. En la figura 8.1, se muestra la relación entre el pH y la intensidad de fluorescencia de la uranina. En aguas muy ácidas, pierde su fluorescencia pero este proceso es reversible, pudiendo recobrarla al añadir un compuesto básico, como KOH ó NH<sub>3</sub>. Esta propiedad puede utilizarse para identificar el trazador.

El poder de la uranina, puede disminuir por medio de procesos fotoquímicos como la luz ultravioleta, por agentes oxidantes como el cloro y el ozono y en algunos casos por procesos biológicos.

Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Antiguamente se utilizaban lámparas de luz ultravioleta para identificarla cuando se encontraba en concentraciones bajas. Actualmente las concentraciones entre  $1 \times 10^{-2}$  y  $2 \times 10^{-6}$  ppm son medidas con espectrofluorómetro.

La intensidad máxima de fluorescencia se detecta a una longitud de onda de  $515 \times 10^{-9}$  m. A mayor o menor longitud de onda la intensidad disminuye en forma simétrica (figura 8.2) y la forma de la curva distingue a la uranina de otra fluoresceína. Para concentraciones menores a  $2 \times 10^{-6}$  ppm, se utiliza carbón activado (W.B. White, 1967, F. Baver, 1972) el cual se coloca en el agua durante un tiempo que varía de un día a semanas, donde la uranina es absorbida y concentrada de 50 a 500 veces por el carbón y su concentración medida posteriormente.

Para extraer la uranina del carbón, se le agrega a éste algunas gotas de una de las siguientes preparaciones:

Una parte de alcohol etílico al 95% y una parte de hidróxido de potasio diluido al 15% en agua destilada.

Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de NH<sub>3</sub>.

Por último, la urganina es resistente a la absorción por arcillas y su uso no es tóxico para el hombre o animales.

- b) EOSINA.- Presenta una fluorescencia naranja-rosa, cuya máxima intensidad se detecta a una longitud de onda de  $535 \times 10^{-9}$  m.

Cuando se presentan valores mayores de 0.01 ppm es visible al ojo humano. Entre 0.01 y  $50 \times 10^{-6}$  ppm, puede detectarse con espectrofluorómetro. Concentraciones menores se concentran con carbón activado del cual puede extraerse añadiendo una sustancia compuesta por ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Al utilizarse junto con rhodamina FB o uranina, se producen interferencias por lo que su aplicación conjunta es limitada.

- c) AMINORHODAMINA G EXTRA.- Conocida anteriormente como sulforhodamina G extra, presenta una fluorescencia naranja-rosa en soluciones concentradas, que cambia a verde al ser diluida. Su mayor intensidad se presenta a una longitud de onda de  $554 \times 10^{-9}$  m. Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm y con espectrofluorómetro pueden detectarse hasta  $6 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores pueden concentrarse por medio de carbón activado, del cual puede ser extraída la fluoresceína, por medio de una solución de ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Esta fluoresceína presenta inconvenientes, ya que es difícil de disolver y fácilmente absorbida por arcillas. En presencia de uranina, rhodamina FB o eosina, se producen interferencias.

- d) RHODAMINA FB.- Presenta un color púrpura y fluorescencia roja. Su mayor intensidad se detecta a una longitud de onda de  $578 \times 10^{-9}$  m. Es visible al ojo humano en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Con espectrofluorómetro se detectan hasta  $10 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores pueden ser concentrados por medio de carbón activado del cual se extrae por medio de una de las soluciones siguientes:

- a) Cinco partes de propanol y 5 partes de hidróxido de amonio.
- b) Ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

La rhodamina FB, presenta interferencias al combinarse con uranina, eosina o aminorhodamina G extra. Es tóxica cuando se inhala en soluciones concentradas. Por otra parte, en presencia de arcillas es altamente absorbida.

- e) TINOPAL CBS-X.- Presenta un color verde con fluorescencia azul.

Su mayor intensidad se determina a una longitud de onda de  $430 \times 10^{-9}$  m. Es visible solamente en concentraciones mayores de 1 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta  $440 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores son concentrados por medio de carbón activado del cual la fluoresceína puede extraerse agregando unas gotas de una solución que contenga ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada. Este producto, es absorbido por arcillas.

- f) **EJEMPLO SOBRE LA APLICACIÓN DE FLUORESCINA.**- Con el propósito de ilustrar su aplicación, a continuación se presentan los resultados obtenidos en un experimento llevado a cabo en una región cárstica.

Se propuso conocer la conexión entre el agua de un río que se infiltraba dentro de una dolina y dos manantiales situados a 5 kilómetros de la primera. Para ello, se inyectaron 3 kg de uranina en el agua de la dolina y se obtuvieron muestras de agua cada dos horas en los manantiales "H" y "S".

En el manantial "S", no se detectó uranina, por lo que se concluye que este no tiene conexión con la zona de recarga donde se inyectó el trazador.

En el manantial "H", se empezó a detectar uranina 56 horas después de la inyección, y la concentración del trazador fue aumentando hasta llegar a 32 mg/m<sup>3</sup>, según se muestra en la figura 8.3.

Otro ejemplo ilustrativo de la aplicación de trazadores, ahora en acuíferos granulares someros es el siguiente:

En un valle aluvial que presenta un acuífero freático a 3 m de profundidad, se perforaron 9 pozos a 3" de diámetro y 5 m de profundidad, distribuidos en la forma como se ilustra en la figura No. 8.4.

En el pozo central, se inyectó uranina y se obtuvieron muestras de agua en el resto de los pozos, cada 20 minutos.

Después de 3 horas 20 minutos de la inyección, se detectó uranina solamente en los pozos 4 y 5, de donde se puede obtener que el agua subterránea fluye en dirección sureste, a una velocidad de 1.5 m/hr.

Este método es utilizado en zonas sin información y su aplicación queda limitada por la profundidad a que se encuentre el nivel estático, ya que mientras mayor es ésta, mayor es el costo de los pozos de muestreo e inyección.

#### **8.4.- SALES**

Las sales son el trazador artificial de agua subterránea más antiguo que se conoce se haya aplicado con éxito. Los productos utilizados más comunes son: sal de cloruro de sodio y sal de cloruro de potasio.

La sal es disuelta en agua y posteriormente incorporada al acuífero. Una de las desventajas que presenta este método, es que requiere que en la zona de inyección el caudal de agua que entre al acuífero sea grande. Por otra parte se necesita una gran cantidad de sal en cada experimento.

En zonas cársticas, para distancias entre 3 y 5 km. se requiere inyectar un mínimo de 500 kg. de sal (Zotl, 1975). La cantidad más grande que se ha llegado a inyectar en un

experimento de trazadores, fue de 50 toneladas de NaCl, (W. Kass. En H Batsche et, al., 1970), donde después de 4 días, se encontró en uno de los manantiales de observación un incremento de cloruros de solo 39 ppm.

Los grandes volúmenes de trazador requeridos mediante este método, hacen que su uso sea limitado. La ventaja consiste en que pueden efectuarse determinaciones cuantitativas.

Ejemplo sobre la aplicación de sales.- Durante los trabajos realizados para conocer la posible conexión entre el agua de un río que se infiltraba en una dolina y dos manantiales localizados a 5 kilómetros de ésta, como se mencionó en párrafos anteriores, se inyectaron 50 kg. de cloruro de sodio y 400 kg. de cloruro de potasio.

Posteriormente se obtuvieron muestras de agua con intervalos de dos horas cada una, tanto en el manantial "H" como en el "S", las cuales se analizaron químicamente determinándose el contenido de cloruros, sodio y potasio.

Al igual que en los resultados obtenidos para la fluoresceína (párrafos anteriores), en el manantial "S", no se detectó incremento alguno en su contenido salino, por lo cual se concluyó que este manantial no tiene conexión con el agua de infiltración de la dolina.

Por lo que se refiere al manantial "H", los resultados de los análisis se graficaron en la figura 8.5, donde se observa que 56 horas después de la inyección de las sales, se detectó un incremento en los iones determinados, ratificando la comunicación entre la dolina y el manantial.

Considerando el tiempo que tardó en aparecer el trazador en el manantial y la distancia entre éste y la dolina, se obtuvo la velocidad de flujo del agua de este acuífero.

Por otra parte, con estos resultados y los de los análisis químicos y volúmenes aforados, es factible determinar el volumen mínimo de agua almacenado, así como el conocer en que proporción el agua del manantial, proviene de la que se infiltra en la dolina.

## 8.5.- ESPORAS

Las esporas utilizadas como trazadores corresponden al tipo *Lycopodium Clavatum*. Tiene un diámetro de 30-55 micras y un color amarillo pálido ( $1 \text{ micra} = 10^{-4} \text{ cm}$ ).

Su forma es similar a la de un triángulo isósceles con lados convexos. Sus orillas forman cadenas de semicírculos cóncavos (figura 8.6). Están cubiertas por una fina membrana insoluble por lo que al ser incorporadas al agua son transportadas en suspensión. No se sedimentan y tienen la propiedad de no ser absorbidas o intercambiadas con el suelo o rocas.

En el año de 1953, A. Mayr, trató de emplear las esporas como trazador debido a las propiedades que presentan pero su identificación resultó problemática. J. Zotl y V. Maurin, idearon teñir las esporas de diferentes colores para facilitar su identificación lo cual resultó exitoso. De esta manera pueden mezclarse en agua, esporas de diferentes

colores y posteriormente detectarse en cierta zona de muestreo identificándose, por el color, con cuales sitios tiene conexión.

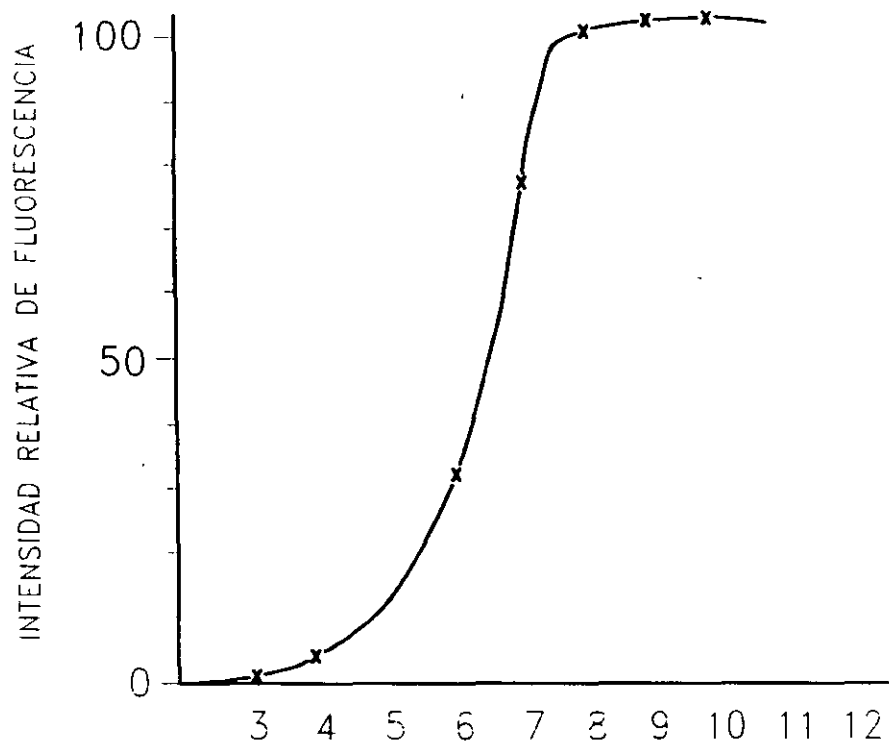
El muestreo de esporas se lleva a cabo instalando redes para plancton las cuales se pueden dejar por tiempo indefinido en el lugar de muestreo. Al preparar la muestra para observarla en el microscopio, se ha visto que se obtienen resultados satisfactorios, si se lleva a cabo lo siguiente:

A las muestras de campo se le agregan 3 gotas de hidróxido de potasio al 10%, 3 gotas de formol al 35% y una pisco de urea; posteriormente se calienta en baño de María por tres minutos. Se centrifuga y el sedimento se concentra en un tubo al que se le agrega una gota de ácido etílico. Se coloca una pequeña parte de la preparación en una lámina delgada para su análisis al microscopio.

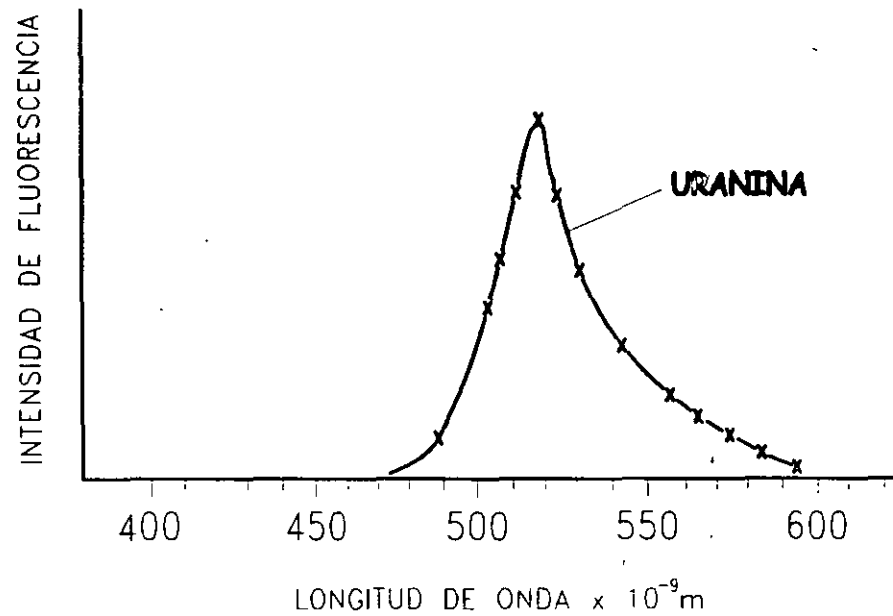
## REFERENCIAS

Davis, S.N., D.J. Cambell, H.W. Bentley and T.J. Flynn, 1985. Ground Water Tracers. National Water Well Asociation.

Dechant M., 1977, "The Dyeing of Lycopodiumspores" Notes of the Ground Water Tracing Techniques Course" Graz, Australia.

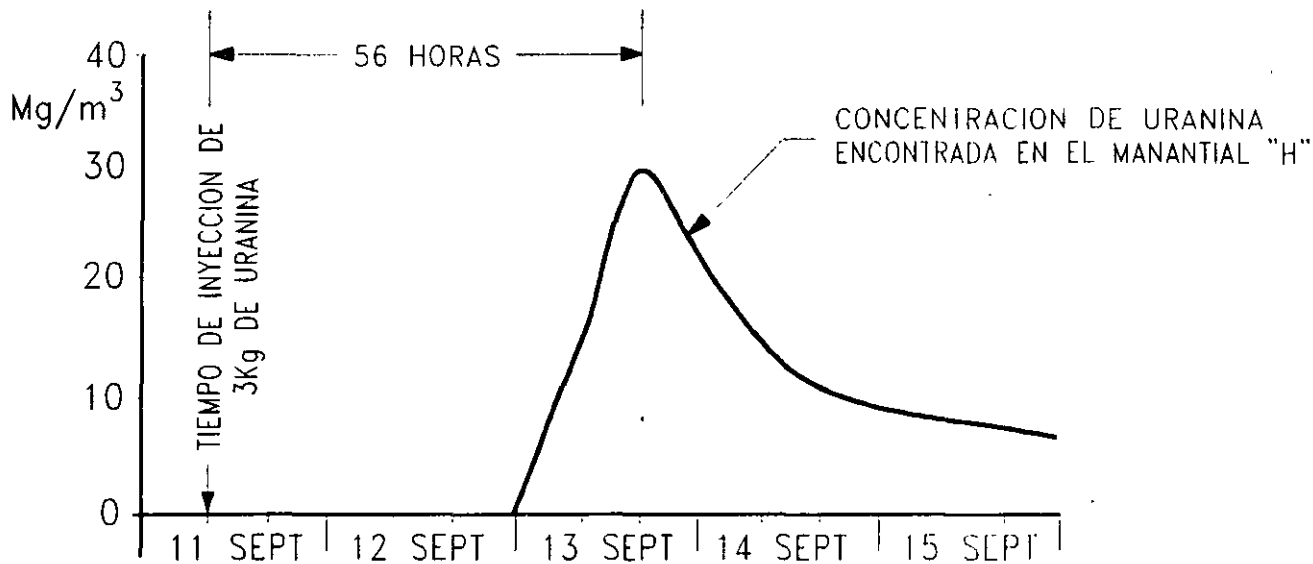


**FIGURA 8.1.-RELACION ENTRE INTENSIDAD DE FLUORESCENCIA Y pH**

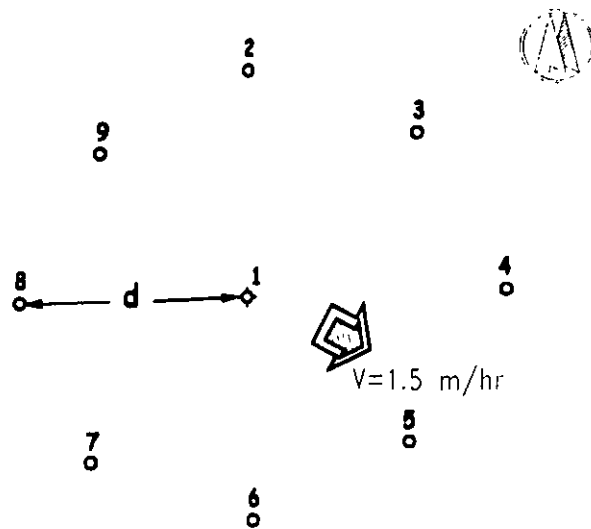


**FIGURA 8.2.-INTENSIDAD DE FLUORESCENCIA DE LA URANINA**

CONCENTRACION DE URANINA



**FIGURA 8.3.-EJEMPLO DE LA APLICACION DE URANINA COMO TRAZADOR**



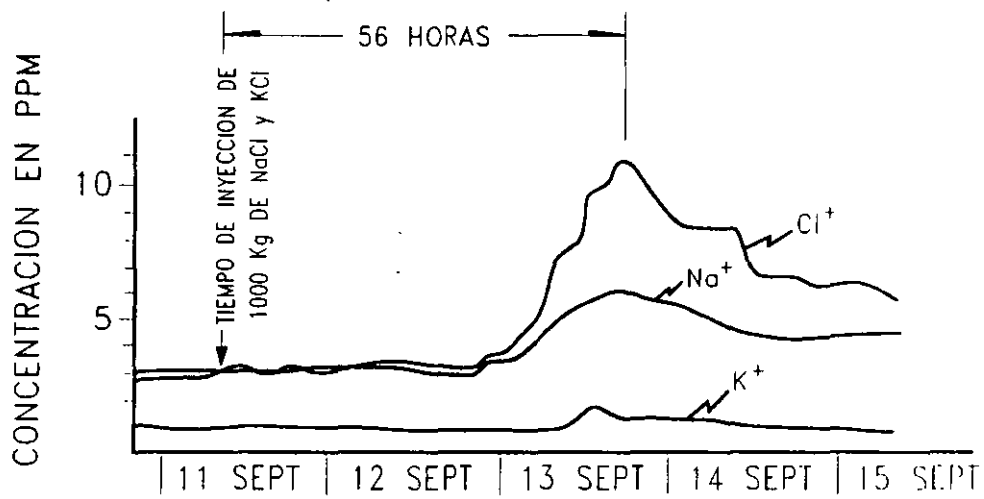
**EXPLICACION**

- ◆ POZO DE INYECCION
- POZOS DE MUESTREO
- ➡ DIRECCION Y VELOCIDAD DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA OBTENIDO POR MEDIO DE TRAZADORES

$$v = \frac{d}{t}$$

d = 5 metros  
t = 180 minutos

**FIGURA 8.4.-EJEMPLO DE APLICACION DE TRAZADORES PARA DEFINIR VELOCIDAD Y DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO**



**FIGURA 8.5.-EJEMPLO DE LA APLICACION DE SALES COMO TRAZADOR**



**FIGURA 8.6 ESPORAS VISTAS AL MICROSCOPIO**



## CAPITULO 9.- ISÓTOPOS AMBIENTALES EN LA GEOHIDROLOGÍA

### 9.1.- DEFINICION Y ORIGEN

El nombre de isótopo se utiliza para distinguir a los átomos que tienen iguales propiedades físicas y químicas pero diferente masa. Las propiedades químicas de un átomo están definidas por el número atómico del elemento o sea el número de protones. En el núcleo de los átomos se encuentran, además de los protones, los neutrones; el total de neutrones y protones en el núcleo se conoce como número de masa. Al variar el número de neutrones en un núcleo, se alterará su masa pero su carga seguirá siendo igual y por consiguiente sus propiedades químicas no se alterarán. Los átomos con igual número de protones que el elemento original y diferente número de neutrones, son conocidos como isótopos.

En otras palabras, los isótopos son átomos caracterizados por tener un mayor número de neutrones que el elemento original. Así, por ejemplo, el elemento hidrógeno ( $^1\text{H}$ ) en su forma natural tiene un protón y un electrón; cuando además de lo anterior llega a presentar un neutrón, se convierte en un isótopo del hidrógeno denominado deuterio ( $^2\text{H}$ ). Cuando presenta dos neutrones dentro el núcleo, forma otro isótopo ( $^3\text{H}$ ) conocido con el nombre de tritio.

Otro ejemplo lo constituye el oxígeno, el cual tiene una masa de 16; cuando llega a incluir dos neutrones más dentro de su núcleo, de origen al isótopos denominado "oxígeno 18".

Los isótopos son conocidos también como elementos pesados, ya que tienen un peso mayor que el elemento "normal".

Los isótopos se forman por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera y pueden provenir de la mayor parte de los elementos. Los de mayor aplicación en geohidrología son el deuterio ( $^2\text{H}$ ), el oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ), el tritio ( $^3\text{H}$ ), el carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ) y las relaciones carbono 12/13 y azufre 32/34.

Los tres primeros son los de mayor importancia en geohidrología ya que forman parte de la molécula del agua.

Se encuentran en diferentes combinaciones de las cuales tres son las más comunes y de mayor interés para los estudios geohidrológicos, que corresponden a:  $\text{H}_2^1\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2\text{O}^{18}$ .

Al deuterio y al oxígeno 18, se les denomina isótopos estables; por lo que respecta al tritio, éste es radioactivo y se utiliza para determinar la edad del agua a partir del momento en que fue recargada al subsuelo.

Las relaciones carbono 12/13 y azufre 32/34, son utilizadas para conocer el origen del elemento en el agua, el cual puede provenir de la disolución de sales o de la descomposición de materia orgánica.

$$\delta D = \frac{H^2/H^1 \text{ muestra} - H^2/H^1 \text{ SMOW}}{H^2/H^1 \text{ SMOW}} \times 1000$$

$$\delta^{18}O = \frac{O^{18}/O^{16} \text{ muestra} - O^{18}/O^{16} \text{ SMOW}}{O^{18}/O^{16} \text{ SMOW}} \times 1000$$

Las concentraciones de estos elementos son medidas por medio de espectrómetro de masas. Los niveles de precisión son de 0.2% para el oxígeno 18 y de  $\pm 2\%$  para el deuterio (University of Waterloo 1987).

La complejidad de la determinación hace que los costos por análisis sean elevados y que no se acostumbre realizarlos en forma rutinaria.

La determinación de estos análisis se efectúa mediante espectrómetros de masas, que en su mayoría están basados en el principio del espectrómetro de Nier.

El método de trabajo en la determinación de deuterio y oxígeno 18, es tratado por A. Cortés, 1986 y los principales aspectos del funcionamiento de un espectrómetro se comentan a continuación:

Un espectrómetro de masas es un aparato diseñado para separar moléculas de acuerdo a su relación masa-carga en base a su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos. Esencialmente, un espectrofotómetro de masas opera de acuerdo a los principios básicos de: Admisión del gas y formación de iones; aceleración y colimación de iones y; analizador magnético.

### 9.3.- RECTA METEÓRICA MUNDIAL Y LOCAL

El contenido isotópico del agua de lluvia variará de acuerdo a ciertos factores, como son la altitud de precipitación, la presión barométrica ambiental, la temperatura, la latitud, época del año, etc., sin embargo existe una relación constante entre el deuterio y el oxígeno 18, tanto en tiempo como en espacio, la cual ha sido estudiada por el Organismo Internacional de Energía Atómica mediante análisis en diferentes partes del mundo y durante un amplio período, obteniendo que dicha relación obedece a la ecuación  $\delta D = \delta^{18}O + 10$  (Dansgaard, 1964), la cual se conoce como la "línea meteórica mundial". La referencia general para la mayor parte de los trabajos es la "línea meteórica mundial", sin embargo, para cada sitio, ésta puede presentar cierta variación y denominarse "línea meteórica local", la cual es paralela a la línea mundial y generalmente con variaciones ligeras.

### 9.4.- PROCESOS QUE MODIFICAN LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los procesos que modifican el contenido isotópico del agua y que son conocidos como fraccionamiento isotópico, son principalmente la evaporación y la condensación.

El deuterio y el oxígeno 18 de la atmósfera pasan a formar parte de la molécula del agua que se precipita en forma de lluvia, donde presenta una concentración isotópica característica. La mayor parte de las masas que forman las nubes provienen de los océanos y son transportadas hacia los continentes, modificando en su trayecto su concentración.

En forma general, el vapor formado en el océano presenta una concentración de oxígeno 18 de alrededor de  $-13\%$ ; al ser transportadas hacia el continente la precipitaciones cercanas a la línea de costa llegan a tener valores de aproximadamente  $-3\%$  debido a que en el proceso de condensación, la mayor concentración isotópica forma el agua de lluvia, en relación con la que se queda en la humedad de la atmósfera. Las nubes continúan su movimiento tierra adentro con alrededor de  $-15\%$  de oxígeno 18 o sea empobrecidas.

En el ciclo hidrológico de los acuíferos del Valle de México, las principales masas nubosas que originan las precipitaciones provienen del Golfo de México, las cuales (figura 9.1) tienen en la zona costera un contenido isotópico de alrededor de  $-7\%$  de oxígeno 18 y  $-50\%$  de deuterio (Lesser 1980). Los vientos predominantes transportan las masas nubosas tierra adentro, donde chocan y se elevan en el frente de la Sierra Madre Oriental; en esta porción, su contenido isotópico disminuye y las precipitaciones en la parte alta llegan a tener valores del orden de  $-10\%$  de oxígeno 18 y  $-66\%$  de deuterio. Las nubes que continúan hacia el Valle de México presentan, a la altura de Pachuca, valores que podrían ser del orden de  $-10\%$  de oxígeno 18 y alrededor de  $-66\%$  de deuterio, para posteriormente originar precipitaciones en las que se han detectado  $-10.25\%$  de oxígeno 18 y  $-70\%$  de deuterio, (Cortés y Farvolden, 1988).

En la figura 9.2, se muestra la distribución del deuterio y el oxígeno 18 para el agua de lluvia en Norteamérica.

En el proceso mencionado, se presentan dos efectos. Primero el efecto continental, o sea la variación que presentan las lluvias de una zona húmeda en el océano hacia zonas de menor humedad conforme se internan en el continente, disminuyendo la concentración de los isótopos. Otro efecto es el de altitud, ya que el fraccionamiento isotópico que se produce al cambiar de altura, provoca una disminución en el contenido isotópico, la cual ha sido calculada por varios autores para diferentes sitios. Latorre 1977, indica que se han medido decrementos de  $0.3$  a  $0.7\%$  de oxígeno 18 por cada  $100$  metros de altura que se aumenten.

Otros factores que pueden llegar a modificar el contenido isotópico del agua, son la latitud y la evaporación y, en el subsuelo el intercambio con minerales, la presencia de altas temperaturas, la existencia de medios reductores y la hidratación de silicatos. En general, los contenidos isotópicos del agua de lluvia son menores en climas fríos.

El agua sujeta a procesos de evaporación va a modificar su contenido isotópico, el cual se va a incrementar, y en mayor proporción de oxígeno 18 que de deuterio (figura 9.3). El intercambio con los minerales formadores de rocas, afecta solamente al oxígeno 18, disminuyendo su concentración; el efecto contrario ocurre en aguas de alta temperatura, donde el intercambio con minerales llega a producir incrementos significativos solo de

oxígeno 18. En medios fuertemente reductores, el gas sulfhídrico puede ser un importante componente del sistema geoquímico, de donde se pueden obtener cantidades bajas de deuterio. La hidratación de silicatos llega también a reducir el contenido de isótopos ambientales, sin embargo, de estos procesos solo la evaporación en cuerpos abiertos es común en el ciclo hidrológico.

En la figura 9.4 se muestra la relación de deuterio contra oxígeno 18 para las aguas naturales (Ferrotsky and Polyakov, 1982), donde se marca: (1) La dirección del aumento en oxígeno 18 ocasionado por la interacción con minerales a altas temperaturas; (2) dirección del incremento isotópico por evaporación; (3) concentración del agua de mar; (4) línea meteórica mundial; (5) agua de zonas costeras; (6) agua de montañas e interior de continentes; (7) composición isotópica de nieve de altas montañas y polos; (8) nieve en el polo sur.

Debido a que los elementos naturales son más ligeros que los isotópicos pesados (lo cual es una forma de expresar que los elementos ligeros tienen una mayor presión de vapor), al elevar la temperatura de un sistema y producir un cambio de estado, el sistema perderá preferente al elemento natural y se enriquecerá de isótopos. Los procesos de evaporación en el agua, repercuten directamente en el contenido isotópico de la precipitación pluvial, de acuerdo a ciertos patrones tales como variación estacional, latitud y altitud, lo cual se comenta a continuación.

#### 9.4.1.- VARIACIÓN ESTACIONAL

Para el deuterio y el oxígeno 18 se presentan variaciones estacionales, que se han comprobado mediante mediciones que realiza el Organismo Internacional de Energía Atómica, donde se ha observado que, en general, los valores isotópicos aumentan en verano y disminuyen en invierno principalmente por la temperatura características de estas épocas, lo que es el principal factor modificador del contenido isotópico del agua a lo largo del año. En la figura 9.5 se presentan estas variaciones para la estación Nord. Groelandia.

#### 9.4.2.- EFECTO POR LATITUD

Los isótopos varían también con la latitud, ya que la temperatura tiene influencia directa en su concentración. Se ha medido que, en las zonas tropicales, los valores de deuterio y oxígeno 18 son más altos y disminuyen hacia los polos. En general, existe una correlación entre el contenido de isótopos estables y la temperatura media anual, que a su vez está relacionada con la latitud. Para estaciones cercanas a los océanos y con temperaturas medias anuales en superficie (TA) menor de 10° C, se cumple que  $\delta^{18}\text{O} = 0.69 \text{ TA} - 13.16\%$  y  $\delta \text{D} = 5.6 \text{ TA} - 100\%$ . Aunque esto se cumple exclusivamente para estaciones en las líneas de costa, ya que tierra adentro está sujeta a otros efectos.

En la figura 9.6 se muestra la relación entre el oxígeno 18 y la temperatura media anual a diferentes latitudes y en la figura 9.7 la concentración de deuterio en función de la latitud y altitud.

### 9.4.3.- EFECTO CONTINENTAL

El efecto continental indica que los valores de deuterio y de oxígeno 18 disminuyen conforme se interna en los continentes. Este hecho está asociado con la pérdida gradual de isótopos pesados a que están sujetas las masas de humedad durante su trayectoria desde los océanos. En la figura 9.2 se muestran cambios en la concentración isotópica de la zona húmeda oceánica, hacia una zona más seca tierra adentro. En el proceso de condensación la fase gaseosa cede preferentemente sus isótopos pesados, quedándose con los más ligeros.

Las masas de humedad de la atmósfera, al precipitarse en forma de lluvia, pierden gradualmente sus isótopos pesados conforme penetran en el continente.

### 9.4.4.- EFECTO POR ALTITUD

Estos isótopos presentan también cambios con la altura, por las alteraciones isotópicas que causa la evaporación y el intercambio isotópico en la precipitación pluvial, los que son más notorios conforme mayor sea su trayectoria hasta llegar al suelo. Existe mayor empobrecimiento en isótopos conforme es mayor la altura de la zona donde ocurre la precipitación. De esta forma, es de esperarse que los contenidos de deuterio y de oxígeno 18 de la lluvia al nivel del mar, sean mayores que el de aquella agua que se precipita a mayor altura. En la práctica, se ha demostrado que es posible distinguir isotópicamente precipitaciones pluviales cuya diferencia de altura es de sólo 100 metros. Se han medido por varios autores, variaciones que fluctúan entre 0.16 y 0.7% de oxígeno 18, por cada 100 metros de altura. Latorre 1977, menciona variaciones de 0.3 a 0.7% (figura 9.2).

En la figura 9.8 se muestra la relación del oxígeno 18 contra la altura de recarga en un ejemplo de Nicaragua.

### 9.4.5.- EFECTO DE EVAPORACIÓN

La evaporación del agua en espacios abiertos superficiales, es uno de los principales modificadores de su contenido isotópico. La intensa evaporación a que puede estar sujeta el agua, causa un enriquecimiento de isótopos y además, debido a que el proceso es violento, se produce fuera de equilibrio, lo que causa que la variación relativa del oxígeno e hidrógeno, no cumplan la misma relación que la línea meteórica mundial. En la práctica, se ha encontrado que el enriquecimiento isotópico causado por la evaporación en condiciones fuera de equilibrio, lo que causa que la variación relativa del oxígeno e hidrógeno, no cumplan la misma relación que la línea meteórica mundial. En la práctica, se ha encontrado que el enriquecimiento isotópico causado por la evaporación en condiciones fuera de equilibrio, tales como a las que están sujetas las presas o lagos y en general cuerpos de agua abiertos, tienen una correlación lineal dada por la siguiente ecuación  $\delta D = (5 \pm 1) \delta 180 + C$

### 9.4.6.- EFECTOS GEOTÉRMICOS

En campos geotérmicos los isótopos pueden presentar alteraciones. En general los cambios son muy lentos pero se aceleran al existir temperaturas elevadas. En este caso, el contenido de oxígeno 18 del agua sobrecalentada tiende a equilibrarse con el alto contenido de las rocas. Especialmente de los silicatos y los carbonatos, mientras que el deuterio del agua no se altera. Esto, trae como consecuencia que se produzca una línea isotópica característica para los campos geotérmicos de ecuación  $\delta D = (O \pm 2) \delta^{18}O$ .

### 9.5.- MÉTODO GENERAL DE INTERPRETACIÓN

Los isótopos son utilizados para obtener un mejor y más claro conocimiento del flujo del agua subterránea, así como para inferir su historia a través del subsuelo. Mediante su interpretación se pueden identificar zonas de recarga; generalmente los valores más bajos indican puntos de recarga a gran altitud y bajo condiciones climáticas frías. Pueden diferenciarse los sistemas de flujo regionales de los flujos locales; se pueden identificar aguas que han estado expuestas a evaporación en cuerpos abiertos superficiales, así como mezclas de los diferentes tipos de aguas mencionados anteriormente. Esto es posible por las especiales características de los isótopos estables que se han venido mencionando, en especial debido a que tanto el isótopo como el elemento "normal", tienen las mismas propiedades físicas y químicas, o sea que, entre otras cosas, la disolución natural de sales por el agua no modifican el contenido isotópico, a menos que exista algún efecto de evaporación u otro de los mencionados anteriormente.

En la figura 9.3 se muestra el método general de interpretación que se sigue al graficar el deuterio contra el oxígeno 18. La línea meteórica mundial se utiliza como referencia en la mayor parte de las interpretaciones isotópicas.

El agua de lluvia, al evaporarse en cuerpos abiertos en la superficie, llega a presentar contenidos altos de isótopos pesados, los cuales se ubicarán a la derecha de la gráfica; las mezclas entre agua del acuífero y agua evaporada, se encontrará sobre una recta que une al agua de lluvia con la zona típica de agua evaporada.

Algunos procesos que ocurren dentro del ciclo hidrológico llegan a modificar el balance relativo de los elementos nucleares. Sin embargo, esta alteración obedece a patrones definidos y lejos de representar una desventaja, cuando las condiciones son favorables, los procesos a los que ha estado sujeta permiten rastrear su evolución.

### 9.6.- TRITIO

El exceso de neutrones de los isótopos de una familia provoca, en algunos casos, cierta inestabilidad que trae como consecuencia que el isótopo tienda a cambiar después de cierto tiempo su estado o composición. A estos isótopos se les llama radioactivos o radioisótopos.

Emiten rayos alfa, beta o gama, lo cual produce el efecto denominado decaimiento radioactivo. Se ha demostrado experimentalmente que si se tiene una muestra

estadísticamente representativa de un radioisótopo, el decaimiento del conjunto no es al azar, sino que obedece a una ley exponencial en función del tiempo, lo cual permite cuantificar su radioactividad y en base a ello determinar edades cortas, de hasta 50 años. Para edades de varias decenas de miles de años, se utiliza el carbono 14, que es otro isótopo radioactivo. Esta misma propiedad de decaimiento radioactivo, es utilizada en geología para la datación de rocas, donde la edad se deduce a partir de las relaciones isotópicas rubidio-estroncio y potasio-argón. En la tabla 9.1 se presentan los isótopos más comunes.

El decaimiento estadístico obedece a una ley exponencial en función del tiempo, la cual se expresa como  $x = x_0 e^{-\lambda t}$ ; donde  $x_0$  es el número inicial de radioisótopos originales y  $x$  el número de radioisótopos que quedan después de un cierto tiempo  $t$ ;  $\lambda$  es una constante de decaimiento.

Se define como vida media ( $T_{1/2}$ ) el tiempo en que decae la concentración de un isótopo a la mitad de su concentración original. La vida media del tritio es de 12.26 años.

El valor de la constante de decaimiento en función de la vida media es:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

Donde llega a formar parte de las nubes y se precipita en forma de lluvia.

Los átomos de hidrógeno son bombardeados por neutrones cósmicos que son incorporados al núcleo del hidrógeno, formando el tritio. La cantidad de tritio que se forma en la atmósfera es de alrededor de 0.25 átomos por segundo por centímetro cuadrado (Lal and Peters, 1962). Ciertas actividades del hombre, como son las explosiones nucleares, han incrementado la cantidad de tritio en la atmósfera, ocasionando la presencia de concentraciones variables en tiempo y en espacio.

Las determinaciones de tritio o de otros isótopos radioactivos se realizan mediante técnicas químicas altamente especializadas y son difíciles de detectar. Bajos valores de tritio requieren ser concentrados por electrólisis y contados por centelleo líquido.

El tritio se expresa en unidades de tritio U.T., lo cual se define como la concentración en la que existe un átomo de tritio por cada  $10^{18}$  átomos de hidrógeno.

Una unidad de tritio es equivalente a 7.2 desintegraciones por minuto en un litro de agua, o bien a 2.1 picocuries por litro.

El contenido del tritio producido en forma natural es del orden de 10 U.T. Como consecuencia de las pruebas nucleares, en 1963 se llegó a detectar concentraciones de hasta 6000 U.T. en la estación de Ottawa, Canadá y 3700 U.T. en Colorado, E.U. (figuras 9.9 y 9.10). Su concentración ha venido disminuyendo; actualmente en la Ciudad de México, se detectan concentraciones de tritio en el agua de lluvia del orden 3 U.T. (P.

Morales; Comunicación Personal). El movimiento de masas de aire produce una variación estacional de tritio, en la que en el hemisferio norte se encuentran valores máximos durante el verano y mínimos durante el invierno, como se puede observar en la figura 9.9.

El tritio varía también con la latitud. Por lo general, se observa que en el hemisferio norte su concentración es mayor y de forma similar que sus valores en los continentes son mayores que en los océanos, lo cual se ilustra en la figura No. 9.11, donde se marca la distribución mundial de tritio para el año de 1963. Nótese que actualmente debe de presentar variación, debido al decaimiento radioactivo.

Antes de las explosiones atómicas de principios de la década de los 50's, la cantidad de tritio en el agua de lluvia era de 5 a 10 U.T.; debido al decaimiento radioactivo, el agua que se infiltró en esa fecha, contiene ahora, teóricamente de 0.3 a 0.6 U.T. (el límite de detección del tritio es de  $\pm 0.2$  U.T., o sea que si el agua muestreada y analizada por tritio contiene menos de 0.2 U.T., podemos inferir que se trata de agua precipitada hace más de 50 años y se puede denominar "agua antigua").

Con las explosiones atómicas que se realizaron en la década de los 50 y hasta 1963, la cantidad de tritio en la atmósfera aumentó considerablemente, para llegar a tener en nuestro país alrededor de 180 U.T. Por lo tanto, si aplicamos el factor del decaimiento radioactivo al agua de lluvia que recargó los acuíferos entre 1952 y 1963, obtenemos que actualmente tiene entre 1.2 y 20 U.T.

Posteriormente a 1963, la cantidad de tritio en la atmósfera ha ido decreciendo para aparentemente estabilizarse en nuestros días en 3 y 8 U.T.

En la figura 9.12 se ilustra la posible edad del agua de acuerdo a su contenido actual de tritio, siempre y cuando no hayan existido mezclas.

## REFERENCIAS

Cortés A., 1986. Aplicación de la espectrometría de masas y técnicas isotópicas para la determinación de oxígeno 18 y deuterio en problemas hidrológicos. Tesis Profesional, U.N.A.M.

Cortés A., and Farvolden, R. N. 1988. Isotops studies of precipitation and Groundwater in the Sierra de Las Cruces, México.  
Submitted to Journal of Hydrogeology.

Custodio, E. 1976. Trazadores y Técnicas Radioisotópicas en Hidrología Subterránea; en Hidrología Subterránea Sección 12. Vol. 2, Editado por E. Custodio y M. R. Llamas; Ediciones Omega, Barcelona, España, pp. 1165-1312.

Davis, S. N., and Bentley, H. W. 1982. Dating Groundwater, a short review in Nuclear and Chemical Data Techniques, Lloyd Curie, Ed., Am. Chemical Society Symposium Series No. 176, Chapter 11, p.p. 187-222.



- Davis, S. N., Campbell, D. J. Bentley, H. W., and Flynn, T. J., 1985. Ground water Tracers, Publish by the National Water Well Association. 200 p.
- Drever, J. I. 1988, The Geochemistry of Natural Waters. Second Edition. Prentice Hall. 437 p.
- Ferronsky, V. I., and Polyakov, V.A., 1982. Environmental Isotopes in the Hydrosphere. John Wiley and Sons, Interscience Publications New York, 466 p.
- Fritz, P., and J. Ch. Fontes (eds). 1980 Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1, The Terrestrial Environment A. Elsevier, 545 pp.
- Fritz, P. 1984. Environmental Isotope Hydrogeology. Tools to Complement the Classical techniques of Physical Hydrology and Geochemistry. University of Waterloo.
- Fritz, P., and J. Ch. Fontes (eds) 1986. Hand book of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 2, The Terrestrial Environment B. Elsevier, 557 pp.
- Fritz, P., Drimmie, R. J., Frapce, S. K. And O SHEA, K. (1987) The Isotopic Composition of Precipitation and Groundwater in Canada. In: International Symposium on the use of Isotope Techniques in Groundwater resources Development. IAEA. Viena, Austria.
- Fontes, J.C., 1980 Environmental Isotopes in Groundwater Hydrology: Hand book of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Vol. 1, 75 p.
- Latorre, C., Lesser, J. M., Quijano, L. Y Payne, B. 1980. Isótopos Ambientales Aplicados al Estudio de la Interconexión de los Acuíferos Calizos y de rellenos en la Región Lagunera de Coahuila-Durango, México. Interamerican Symposium on Isotope Hydrology. Bogotá, Colombia, pp. 135-148.
- Lesser, J. M. 1974-1980. Aplicación de Isótopos Ambientales en el Estudio de los Acuíferos de: Durango, Sierra del Burro, Coah., Cuautla, Mor., Río Atoyac. Pue., Río Fuerte, Sin., Altiplano Mexicano, Presa San Ildelfonso, Qro., Valle de Tlacolula, Oax., Piedras Negras, Coah., y San Ciró, S.L.P. Informes Inéditos. Biblioteca de la Dirección de Aguas Subterráneas, S.A.R.H.
- Lesser, J. M. 1984. Aplicación de Isótopos Ambientales en los Alrededores del Río San Lorenzo, Sin. Boletín de Difusión Técnica y Científica No. 2, Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Lesser, J. M. 1987. Dictámen Geohidrológico-Isotópico para definir el funcionamiento y zonas de recarga del campo de pozos del área denominada Ojo de Agua de Patagalana. Municipio de Parras, Coah. Seminario de Hidrología Isotópica. IAEA-ININ, México.

Lesser y Asociados, S.A. 1985. Estudio Isotópico del Acuífero del Valle de México.  
Elaborado para la D.G.C.O.H. del D.D.F.

---

Lesser y Asociados, S.A. 1988. Aplicación de Isótopos Ambientales en la Zona de  
Monclova, Coah. Informe para Altos Hornos de México.



SIERRA DEL  
CHICHINAUTZIN

VALLE DE MEXICO

LLUVIA (1)

$$\delta D = -70$$

$$\delta^{18}O = -10.25$$

LLUVIA (2)

$$\delta D = -66$$

$$\delta^{18}O = -10$$

SIERRA MADRE  
ORIENTAL

$$\delta D = -66$$

$$\delta^{18}O = -10$$

LLUVIA (3)

$$\delta D = -66$$

$$\delta^{18}O = -10$$

GOLFO  
DE  
MEXICO

(1) CORTES Y FARVOLDEN, 1988

(2) VALORES INFERIDOS DE ACUERDO  
A DATOS DE AGUA SUBTERRANEA  
EN PACHUCA Y PUEBLA (LESSER, 1987)

(3) VALORES INFERIDOS DE ACUERDO  
A DATOS DE AGUA SUBTERRANEA  
EN VERACRUZ (LESSER, 1980)

EFFECTO DE ALTITUD

EL CONTENIDO ISOTOPICO  
( $^{18}O$ ) DECRECE ENTRE 0.3  
Y 0.7 ‰ POR CADA  
100 METROS DE ALTURA  
(LATORRE, 1977)

FIGURA 9.1.-COMPORTAMIENTO ISOTOPICO DE LA LLUVIA ENTRE EL GOLFO DE MEXICO Y EL VALLE DE MEXICO

$\delta D\text{‰}$

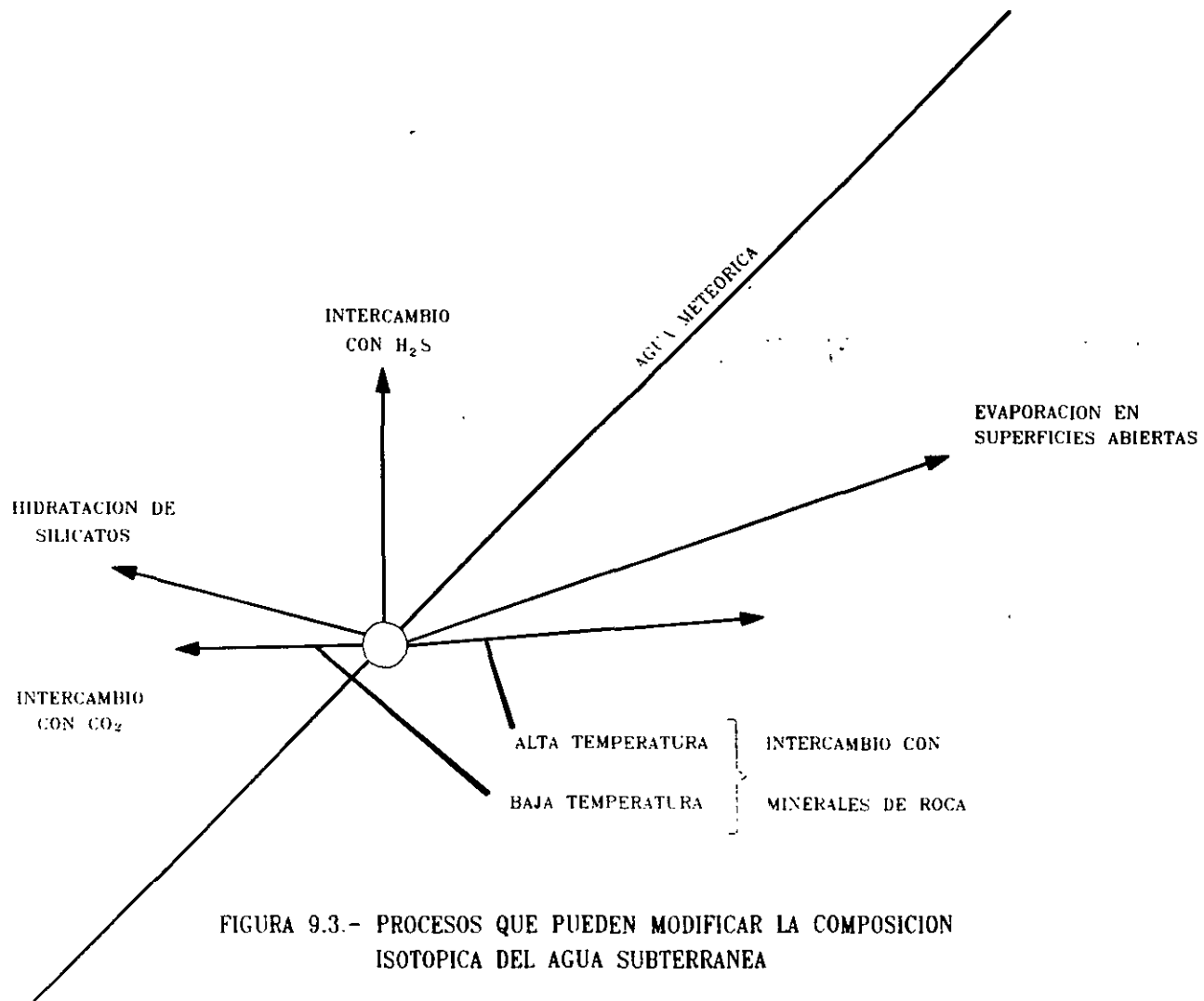


FIGURA 9.3.- PROCESOS QUE PUEDEN MODIFICAR LA COMPOSICION ISOTOPICA DEL AGUA SUBTERRANEA

DE UNIVERSITY OF WATERLOO, 1983

$\delta^{18}O\text{‰}$

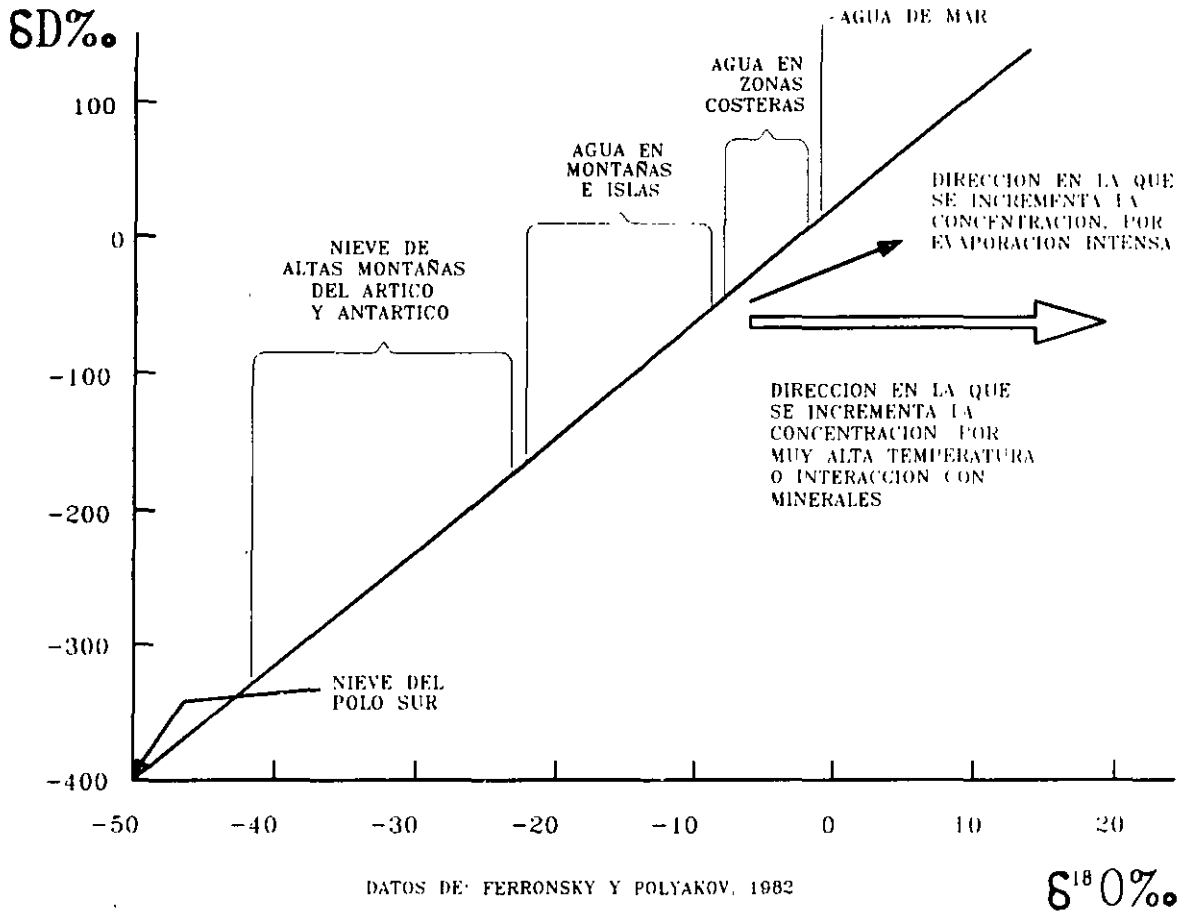


FIGURA 9.4.- VALORES RELATIVOS DE DEUTERIO Y OXIGENO 18, A DIFERENTES ALTURAS

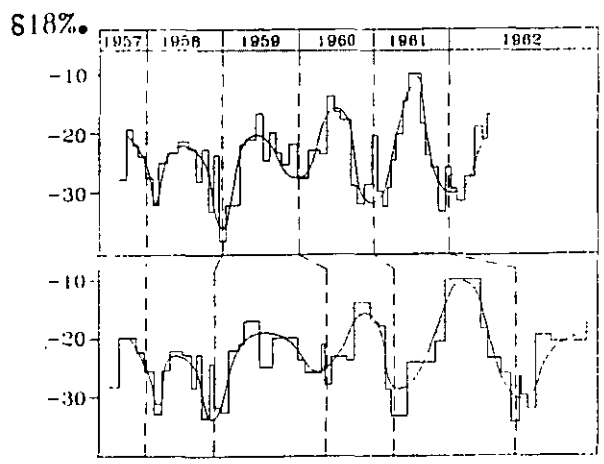


FIGURA 9.5.- VARIACION ESTACIONAL DEL OXIGENO 18 (MODIFICADA DE FONTES, J.C., 1966)

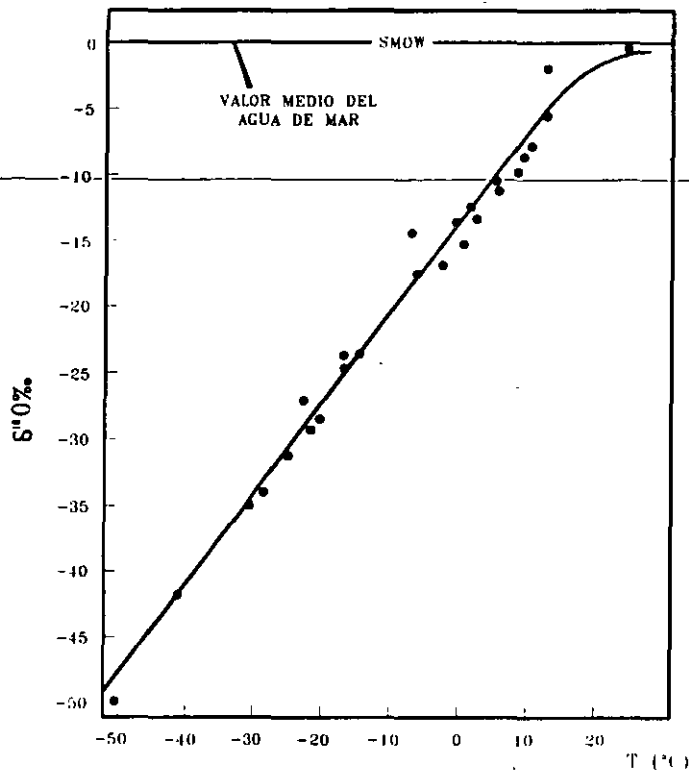


FIGURA 9.6.- OXIGENO 18 CONTRA TEMPERATURA MEDIA ANUAL A DIFERENTES LATITUDES (FONTES, J. C., 1976)

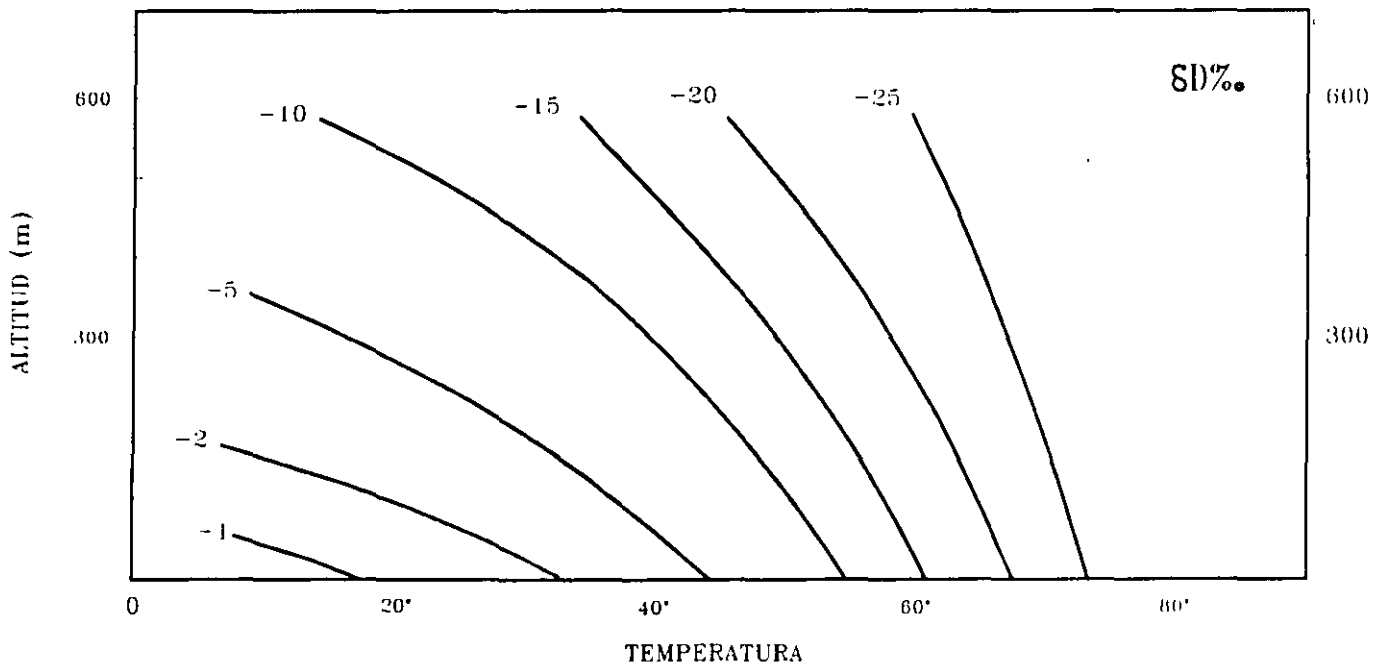


FIGURA 9.7.- LATITUD NORTE. CONCENTRACION DE DEUTERIO EN FUNCION DE LA LATITUD Y ALTITUD (DANSGAARD, 1964)

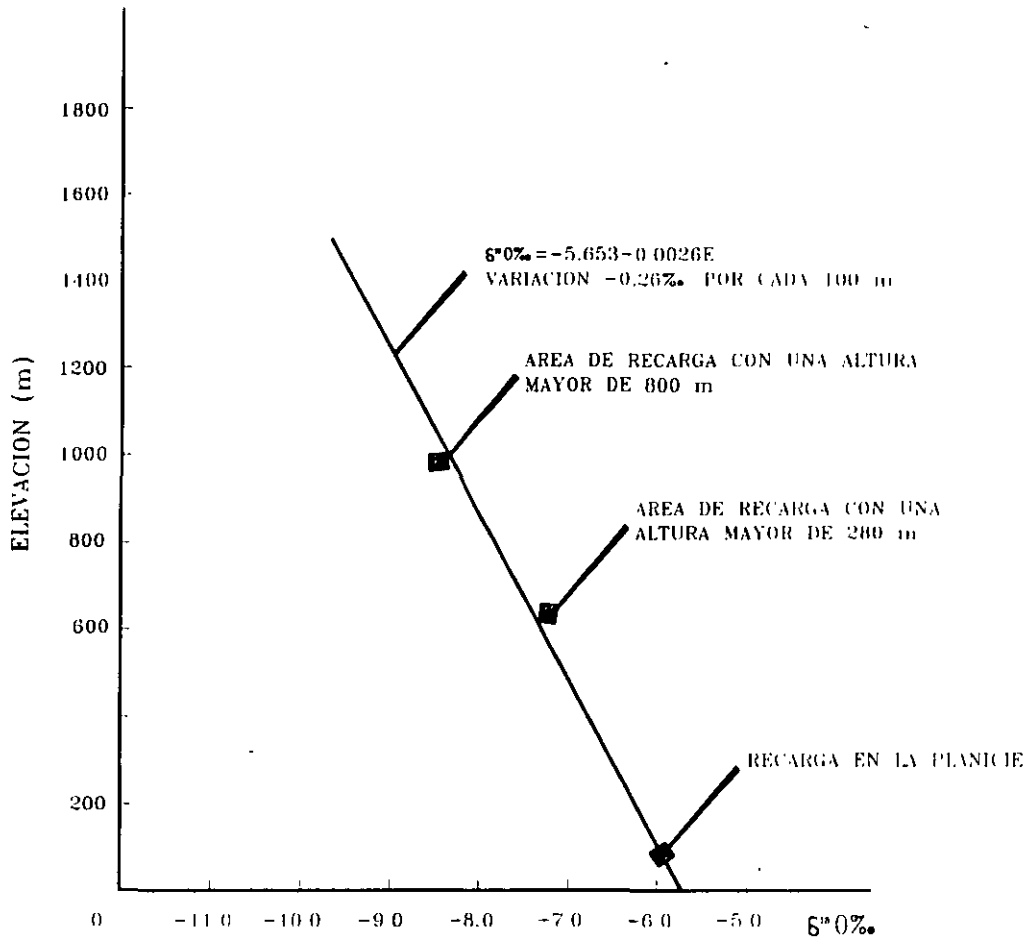


FIGURA 9.8.- ALTURA DE RECARGA -vs- OXIGENO 18  
(DE: PAYNE AND YURTSEVER, 1974)

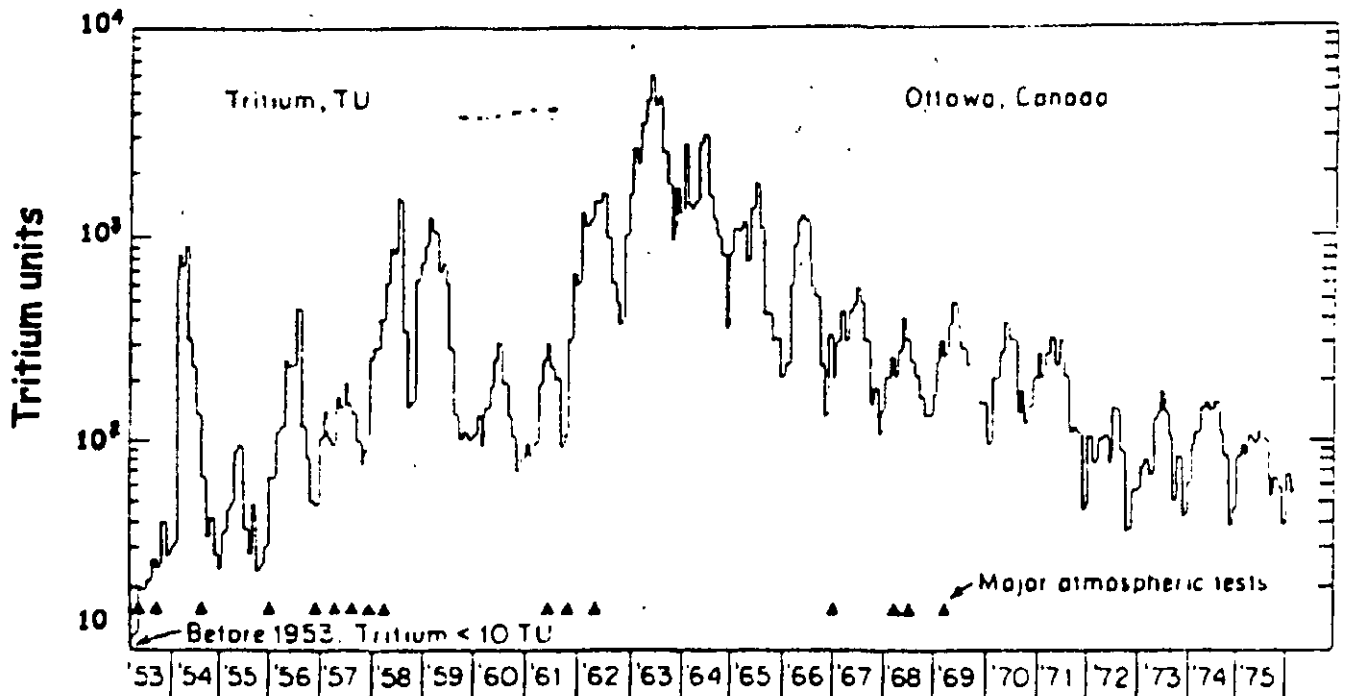


FIGURA 9.9 DE: FREEZE AND CHERRY, 1979

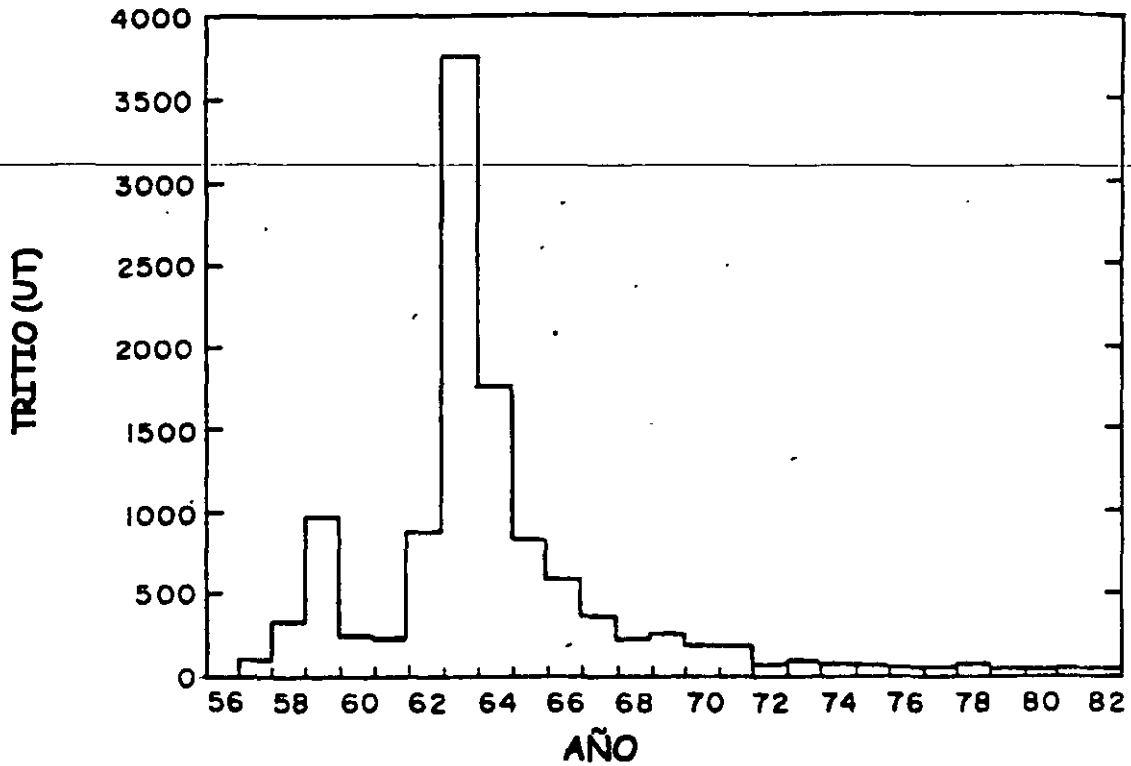


FIGURA 9.10 PROMEDIO ANUAL DE TRITIO EN AGUA DE LLUVIA Y NIEVE, EN LOS ESTADOS DE ARIZONA, COLORADO, NUEVO MEXICO Y UTAH. (DE: DAVIS, 1985).

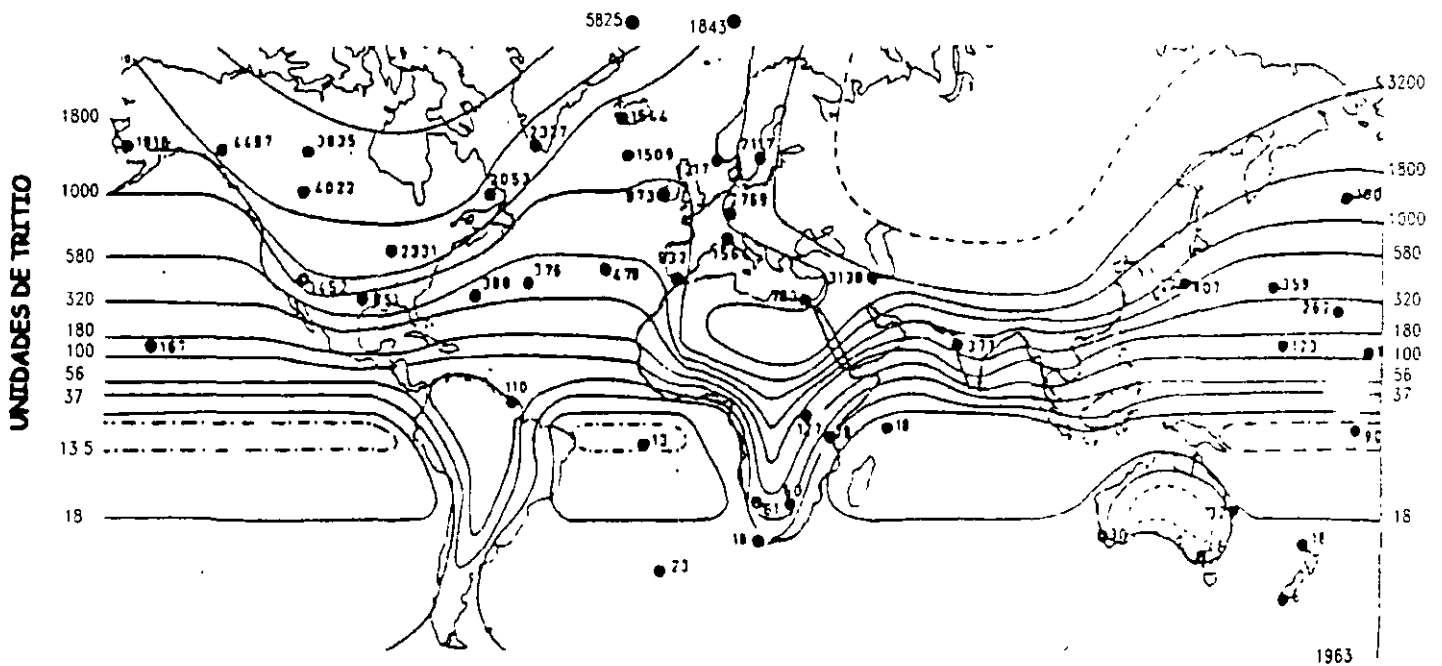


FIGURA 9.11 DISTRIBUCION GLOBAL DE TRITIO PROMEDIO PARA 1963 (IAEA, 1968)



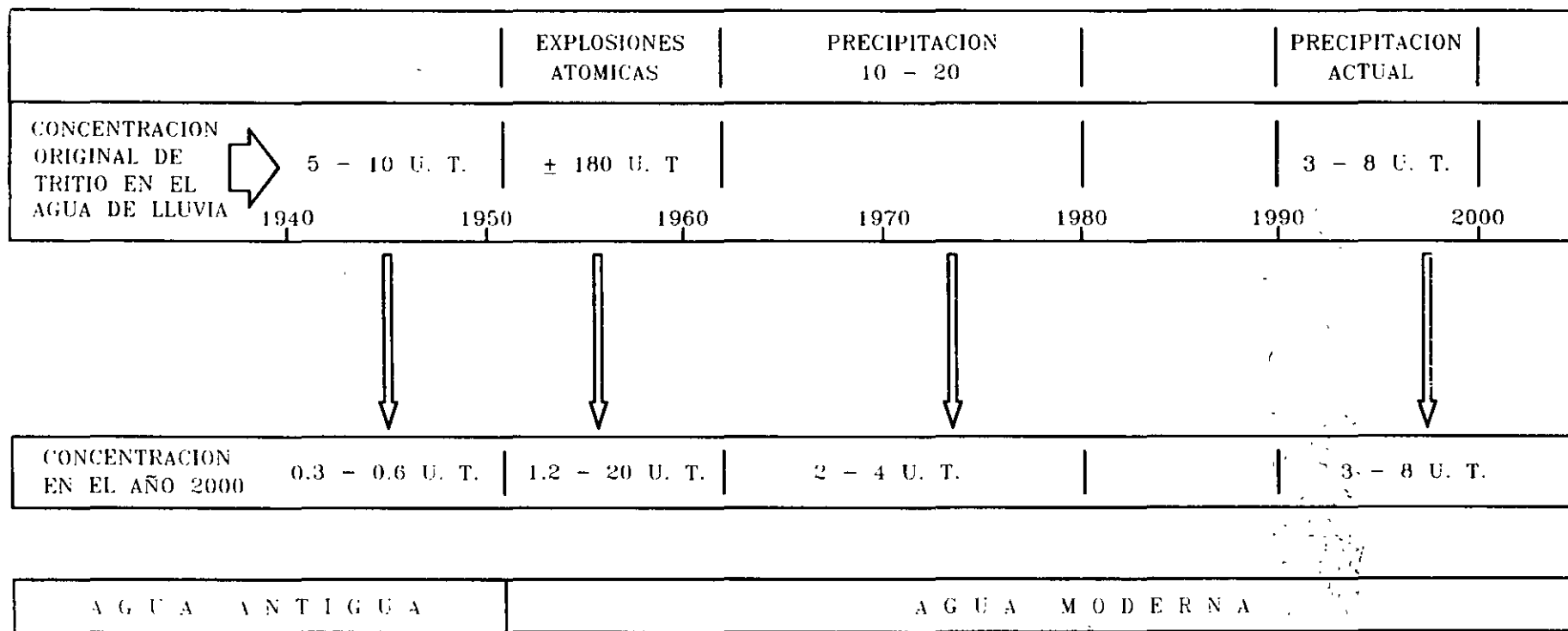


FIGURA 9.12.- CONCENTRACION ACTUAL DEL TITRIO EN AGUAS INFILTRADAS EN LOS ULTIMOS 50 AÑOS



...: Ciencias de la tierra

ALFONSO...

# **CURSOS ABIERTOS**

**MODULO I:  
RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON  
CONTAMINANTES INORGÁNICOS CA-206**

**TEMAS:  
CONTAMINACIÓN DE SUELO Y AGUA  
CONTAMINACIÓN POR CROMO Y ARSÉNICO**

**COORDINADOR: DR. RAMIRO R.  
DEL 05 AL 09 DE SEPTIEMBRE DEL 2005  
PALACIO DE MINERÍA**

## CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Dr. Ramiro Rodríguez Castillo  
Instituto de Geofísica UNAM, México

---

La cada vez mayor dependencia en el abastecimiento de agua potable de los recursos hídricos subterráneos pone de relevancia la importancia que adquiere el conocer si la calidad del agua subterránea es adecuada para consumo humano o si esta siendo alterada. Esto puede repercutir a mediano y largo plazo en la salud de la población abastecida. Más del 60 % del abastecimiento nacional en México depende de sistemas acuíferos. Existen zonas en donde la única fuente la constituyen los acuíferos locales. Los problemas asociados a la calidad del agua están rebasando en algunas regiones a los de cantidad. En ambos casos se requiere de parametrizar los sistemas acuíferos.

### CONTAMINACION Y ALTERACION DE LA CALIDAD NATURAL

Por contaminación, en Hidrogeología, se entiende la alteración de la calidad natural del agua subterránea, física, química o biológica, ya sea como consecuencia directa o indirecta de la actividad del hombre o por razones naturales. Esto provoca que el agua pueda ser impropia para los usos a los que se destinaba antes de la contaminación, pero no necesariamente para otros en donde la normativa de calidad lo permita, por ejemplo riego con aguas "grises".

La definición anterior implica el conocimiento de la **calidad natural** del agua. La cual variara no nada mas geográficamente sino incluso temporalmente. Para conocerla hay que determinar las concentraciones normales, **valores de fondo**, de los principales constituyentes del agua. Para obtener valores de fondo es necesario contar con información de por lo menos 5 años en por lo menos tres pozos diferentes ubicados en la misma formación acuífera y aguas arriba de cualquier fuente que pudiera aportar el elemento analizado. Los datos se promedian y se obtiene el valor de fondo más representativo para esa zona. En caso de compuestos de origen antropogénico, como por ejemplo el clorobenceno, los valores de fondo son cero.

Se ha tratado de restringir el término contaminación a la normatividad vigente para agua para consumo humano. Lo cual en el caso de México y de otros países latinoamericanos, deja fuera una gran cantidad de compuestos orgánicos. En pocos países el índice BTEX, para hidrocarburos esta considerado en la normativa para agua potable. También se hace referencia a la normatividad de la Agencia de Protección Ambiental norteamericana, EPA y a los criterios de la Organización Mundial de la Salud, OPS, y mas recientemente de la Comunidad Económica Europea.

El caso de los metales es ilustrativo al respecto. En una zona pueden tenerse valores de, por ejemplo, 0.01 mg/L de arsénico, los cuales pueden corresponder a los valores de fondo naturales en dicha área. Si las concentraciones se incrementan a 0.02 mg/L, desde el punto de vista normativo nacional (NOM 0.025 mg/L para 2003), el agua no esta contaminada. Sin embargo si lo esta, si tomamos en cuenta la norma americana, 0.01 mg/L. Pero si analizamos el proceso del incremento a los contenidos de As, la calidad natural del agua esta siendo afectada por alguna fuente, esto es, se contaminó.

Si los valores de fondo fuesen 0.040 mg/L de As en algún país en donde la normativa fuese de 0.025 mg/L . El agua no es apta para consumo humana, pero estrictamente no esta contaminada ya que esas serian las concentraciones "normales" de As. Esta agua sufrió un proceso de alteración de la calidad del agua con respecto a un uso específico, consumo humano.

Es por este tipo de situaciones que actualmente cuando se trata de definir procesos de contaminación se hace referencia a los valores de fondo del elemento en cuestión. Si las concentraciones rebasan sistemáticamente las anteriores concentraciones "normales", el agua esta siendo contaminada. Cuando se trata de compuestos orgánicos, hidrocarburos, agroquímicos y/o productos de transformación, sus valores "normales" en el agua son cero, por lo tanto cualquier

cantidad detectada significaría que el acuífero está contaminado, aunque no se rebasen los valores de referencia (normas, criterios ecológicos).

En el caso del agua subterránea, se denominan **solutos** a los contaminantes que al solubilizarse se incorporan al flujo subterráneo, interactuando antes con agua de poro o con la matriz porosa que conforma la zona vadosa. Si un contaminante no se solubiliza no puede migrar hacia el agua subterránea.

## FUENTES DE CONTAMINACION

El sitio de origen de los contaminantes, solutos, se denomina **fuentes**, esta puede ser POTENCIAL o ACTIVA dependiendo si esta o no generando lixiviados. La sola presencia de elementos o sustancias contaminantes en una fuente no implica que estos estén migrando hacia el acuífero. Una fuente inactiva, como un relleno sanitario, es potencial, ya que pueden darse las condiciones para que posteriormente si pueda generar lixiviados.

Las fuentes también se catalogan por su geometría. Estas pueden ser LINEALES, PUNTUALES o DIFUSAS. Se definen fuentes difusas a aquellas que en una vasta zona aportan solutos en diferentes puntos de su interior. El mejor ejemplo son los terrenos agrícolas. El carácter puntual dependerá de la escala de trabajo. Un basurero de algunas docenas de hectáreas, es una fuente puntual cuando se considera a una escala de 1: 50,000, pero será una fuente difusa cuando se utiliza un mapa de referencia de una escala mucho menor como 1:5,000.

Se diferencian las fuentes por su temporalidad. Si constantemente producen solutos se les denomina CONTINUAS. Si la producción está supeditada a la presencia de excesos de humedad que favorezcan infiltraciones serán INTERMITENTES (un gran basurero urbano en una zona semi-árida, solo genera lixiviados cuando se percola agua de precipitación durante los periodos de lluvia).

Cuando ocurre una contingencia (accidentes químicos , derrames) que produce percolaciones, se produce una entrada única al sistema acuífero, entonces se dice que la fuente es un PULSO.

Dado que existen procesos ANTROPOGENICOS y NATURALES las fuentes también se clasifican por su origen de la misma manera. El origen es importante dadas las implicaciones que tiene en los mecanismos de transporte y de ser el caso, en los programas de remediación.

Actividad	ACTIVA o POTENCIAL
Origen	NATURAL o ANTROPOGENICO
Geometría	LINEAL, PUNTUAL o DIFUSA
Temporalidad	CONSTANTE, INTERMITENTE, PULSO

Tabla 1 Clasificación de fuentes

La alteración de la calidad no se da únicamente con elementos o sustancias que pudieran afectar la salud humana. Los flujos subterráneos pueden incorporar excesos de elementos no normados o que pueden rebasar valores de referencia sin que su consumo provoque afectaciones adversas a la salud. Pero cuando se hace referencia a contaminantes por lo general se trata de sustancias cuya **toxicidad**, puede poner en riesgo la salud de quien consume ese tipo de agua por periodos continuos y prolongados aun a bajas concentraciones.

La cantidad de contaminante, **carga**, es un aspecto fundamental en la caracterización de las fuentes. Esta no solo depende de la cantidad de material que contiene el elemento sino de la concentración del mismo. Un gran volumen con una muy baja concentración puede equivaler a poco volumen con muy alta concentración. La relevancia de la carga se incrementa cuando se hace referencia a la toxicidad del contaminante y a sus valores normativos. Mientras que en la mayoría de los metales la norma nacional e internacional para agua de consumo humano es del orden de 0.05 mg/L para algunos compuestos orgánicos ésta baja

dos ordenes de magnitud, 0.0007 mg/L como el caso del dieldrín. En este caso, 1 Kg de dieldrin podría contaminar cerca de 1.5 Millones de m<sup>3</sup> de agua j

---

La movilidad de los contaminantes depende de varios factores, uno de los más importantes es su **solubilidad**. Ha medida que la solubilidad se incrementa es más probable que pueda migrar hacia sistemas acuíferos. Si existe agua en la fuente, el **soluto** se incorporará a ésta y se podrá desplazar desde la fuente. Si no hay humedad suficiente en la fuente, los contaminantes no se solubilizan y por lo tanto no podrán moverse. De allí que puedan ser más "riesgosas" fuentes con material líquido que sólido.

En el caso de los metales pesados, el grado de disolución se cuantifica por su producto de solubilidad, Kps, el cual presenta valores bajos para cuando los elementos se encuentran en forma de compuestos inorgánicos. Las condiciones REDOX y el pH son los principales factores que controlan el grado de disolución de estos elementos en el agua subterránea.

Habría que considerar que existen sustancias insolubles en agua pero solubles en otro tipo de líquidos, como es el caso de un buen número de agroquímicos. Estos, si bien son de muy baja solubilidad en agua, son solubilizables en hidrocarburos. La presencia conjunta de este tipo de compuestos puede incorporar pesticidas, herbicidas u otro tipo de agroquímico al agua subterránea. Los compuestos orgánicos más solubles son aquellos que presentan pesos moleculares bajos, como la acetona.

Las condiciones físico químicas prevalecientes en la fuente también influyen en la movilidad de los contaminantes. Cambios importantes en las mismas, por ejemplo en las condiciones Redox, los cuales solo se dan en casos muy particulares, pueden alterar el *status* de la fuente y movilizar elementos o sustancias "riesgosas".

Las alteraciones naturales a la calidad del agua dependen fuertemente de las condiciones geológicas de la zona y de las interacciones agua-roca. Los

sistemas acuíferos que reúnen condiciones para presentar contenidos sobre las normatividades internacionales para agua potable son: acuíferos de gran extensión y profundidad; sistemas hidrotermales; acuíferos que presenten condiciones reductoras; acuíferos con aguas fósiles; sistemas en cuya composición existan niveles evaporíticos; acuíferos volcánicos; formaciones calizas con intrusivos mineralizados; sistemas con formaciones sedimentarias lacustres recientes; acuíferos costeros.

Las alteraciones naturales de la calidad del agua subterránea se originan por la circulación del agua por rocas con elementos lixiviables. Caso particular lo constituyen flujos regionales termales. Concentraciones de arsénico, flúor, fierro, plomo, boro, selenio, cromo, compuestos de azufre entre otros pueden ser de origen natural. En algunas zonas, flujos profundos pueden acarrear radón. En todos los casos se trata de fuentes difusas.

## **MECANISMOS DE MIGRACION**

Una vez que el soluto se moviliza en la desde la fuente, este tiene un complejo camino que recorrer antes de incorporarse al agua subterránea. Dependiendo del tipo de fuente, el suelo es un primer obstáculo que deben vencer los *lixiviados*. Si existe cobertura vegetal, el sistema reticular y la actividad microbiológica pueden actuar retener y/o degradar para algunas sustancias.

La interacción del lixiviado que pasa la capa de suelo con el material que conforma la *zona vadosa*, también llamada no saturada puede también retardar su migración o lograr que éste se quede retenido indefinidamente en la roca. En el Altiplano Mexicano hay Cuencas donde los niveles estáticos se encuentran a más de 100m de profundidad.

Los fenómenos de *retardo lineal* (adsorción, absorción, sorpción, intercambio químico) y la conductividad hidráulica, *K*, de los diferentes estratos que integran la zona vadosa propician que algunos solutos nunca arriben al acuífero o que tarden periodos largos de tiempo, meses o años. Grandes espesores de material arcillosos con valores muy bajos de *K* frenan los solutos. Un



soluto no reactivo, como los cloruros, tarda mas de 3 años en atravesar una capa de 10m de arcilla. En cambio medios fracturados o de doble porosidad facilitan un rápido desplazamiento.

Los solutos que logran incorporarse al flujo subterráneo se desplazan en él advectiva y dispersivamente. En las inmediaciones de la fuente al conjunto de los solutos, lixiviados, integrado al flujo se le denomina **pluma contaminante** (Fig 1). Las plumas muestran una geometría muy bien definida en el entorno inmediato de las fuentes (menos de un 1Km), a distancias mayores ya no son identificables, debido a las muy bajas velocidades del agua subterránea, de cm a un par de metros por día. Mientras que la **advección** depende de la velocidad del agua, la **dispersión** esta en función de las características del medio y del soluto. Esta última comprende la **difusión**, la cual se da a nivel micro. Ambos fenómenos originan en medios porosos velocidades muy bajas de los solutos, del orden de metros o hasta centímetros por día.

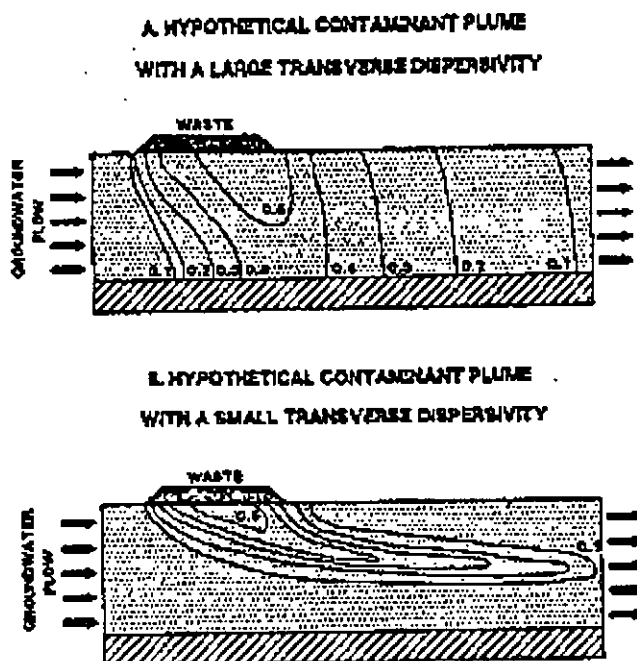


Fig.1 Pluma contaminante (CEPIS, 2005)

La velocidad del soluto,  $V_s$ , depende de la velocidad del agua subterránea,  $V_a$ . Generalmente  $V_s \leq V_a$ . El **Coefficiente o factor de retardo**,  $K_R$ , que se define como la relación  $1+K_d / p$ , donde  $K_d$  es el coeficiente de reparto y  $p$  la porosidad

cinemática, indica el número de veces que  $V_s$  es inferior a  $V_a$ . El coeficiente de reparto se define como la relación que existe entre la concentración de un soluto en el medio sólido y en el medio líquido. Cuanto mayor sea  $K_d$ , menor es la afinidad del soluto con el agua.

La transcripción matemática del transporte de solutos esta basada en balances de masa y en ecuaciones de continuidad. Existen varios modelos matemáticos computacionales para el transporte de contaminantes bi y tridimensionales, los cuales están acoplados a modelos de flujo, de donde toman los campos de velocidades. Aunque ya existen modelos para flujos multifásicos, éstos aún se pueden considerar en etapa de prueba.

## LOS NAPL's

Los **NAPL's**, líquidos de fase no acuosa, tienen un comportamiento particular. Su interacción con el medio físico y el agua es diferente. Son muy sensibles a cambios de  $K$  lo que hace que puedan quedar "atrapados" en heterogeneidades del medio. Existen NAPL's densos y ligeros. Los ligeros, **LNAPL's**, como la gasolina o el diesel, flotan sobre el agua, en cambio los densos, **DNAPL's**, como el cloroformo y los bifenilos policlorados (PCB's) se desplazan hasta el fondo del acuífero o hasta capas de menor  $K$ . Estos presentan una viscosidad menor que la del agua.

La solubilidad de los NAPL's es muy baja, pero generan fases solubles y gaseosas que se incorporan lentamente al agua. Su persistencia ambiental es alta. Sus residuales siguen actuando inclusive años después de que la fuente fue desactivada.

El desplazamiento de los contaminantes depende de la velocidad del flujo y ésta a su vez del gradiente hidráulico. El gradiente es parcialmente controlado por la recarga y la extracción. Cambios drásticos en el régimen de extracción, sobretodo en medios urbanos, inciden en la movilidad de solutos y LNAPL's.

Los LNAPL flotan sobre el nivel freático del acuífero formando capas de espesores que van de los milímetros a los metros (a dicha fracción se le denomina fase libre). Las fases volátiles ocupan parte de la zona vadosa y pueden incorporarse al flujo subterráneo. La fase libre circula en la parte superior del acuífero a una velocidad por lo general menor a la del flujo del agua subterránea. Las fases solubles de los LNAPL's formarán una pluma en la parte superior de la zona saturada, circulando a una velocidad mayor que la fase libre.

El desplazamiento de los DNAPL en medios sedimentarios está controlado por el gradiente gravitacional. El DNAPL se desplazará por el espacio intergranular que define la porosidad efectiva. En el suelo o los primeros metros la migración se da por ductos generados por la biomasa. Como tienden a desplazarse hasta la base impermeable del acuífero, se acumulan en las irregularidades del basamento dando lugar a "albercas" (pools). Por lo que, el control principal de la migración de los DNAPL's en medios granulares es sedimentológico.

En tanto que en medios fracturados los DNAPL se desplazan por intersticios, porosidad secundaria, originados por el fracturamiento. Si estas no presentan comunicación hidráulica los DNAPL's quedan atrapados temporalmente en ellas mediante fuerzas de tipo capilar. Los componentes solubles que existen en los DNAPL's se incorporan al agua subterránea. Si existe una fuente constante o un pulso, el DNAPL incorporado al sistema de fracturas desplaza la fase acuosa sin que necesariamente exista zona de mezcla de sus fases solubles.

## **RELEVANCIA DE LA PARAMETRIZACIÓN**

Para estudiar un sistema y poder realizar simulaciones y predicciones sobre la evolución de algún fenómeno o proceso se requiere que el sistema tenga memoria. Esto es, es necesario contar con información previa referente a la evolución espacial y temporal del proceso por investigar. Si no se cuenta con

datos anteriores es prácticamente imposible llevar a cabo predicciones sobre el comportamiento futuro.

Los modelos de transporte requieren de información validada y sistematizada, la cual por lo general no es fácilmente accesible. La información más importante la constituyen cortes litológicos y bases de datos químicos. Se debe partir de un modelo conceptual, basado en un modelo geológico que permita integrar un modelo hidrogeológico, el cual dará lugar a un modelo funcional. Los cortes litológicos permiten integrar perfiles geológicos, de no existir los primeros, se puede recurrir a información geofísica (métodos eléctricos y electromagnéticos, sísmica, gravimetría o magnetometría). Un buen geólogo será capaz de proponer un buen modelo hidroestratigráfico con datos geológicos y geofísicos integrados de acuerdo a la evolución geológica de la zona.

El contar con núcleos no alterados o con muestras de afloramientos representativos puede permitir determinaciones de parámetros tan importantes como la porosidad y la densidad de la roca. Este material también es requerido para experimentos de columna o tipo Batch que nos ayudan a conocer los fenómenos de retardo lineal. En el caso de concentraciones, un solo dato no es significativo. Se debe contar con datos de las concentraciones por lo menos en tres periodos diferentes. No es usual que se cuente con información sobre metales y mucho menos sobre compuestos orgánicos. Entre otros factores por el escaso número de laboratorios especializados y por el relativo alto costo. Una sola determinación del Índice BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) cuesta entre 75 a 100 US dólar.

Se necesitan valores de conductividad hidráulica,  $k$ , de las formaciones permeables los cuales se pueden obtener de pruebas de bombeo, de análisis de laboratorio (si hay núcleos) o de determinaciones in situ mediante permeámetros de carga constante en afloramientos representativos. Valores de  $k$  también pueden ser tomados de fuentes bibliográficas, con las reservas del caso.

## NORMATIVIDAD PARA AGUA POTABLE

El establecimiento de normas para el agua de consumo humano, esto es la concentración máxima permisible cuya ingesta no provoca afectaciones adversas a la salud, requiere de complicados estudios y ensayos *in vitro*, bioensayos dosis-respuesta en diferentes especies y datos epidemiológicos. En caso de no existir un valor normativo en los estándares nacionales se puede recurrir a las normas de la Agencia América de Protección Ambiental de los Estados Unidos, USEPA, quien cuenta con normas primarias y secundarias, las segundas siendo tan solo a nivel de recomendación. También se pueden consultar las normas propuestas por la Organización Mundial de la Salud, WHO, o su agencia americana la OPS, la Organización Panamericana de la Salud (tabla 2).

Los valores normativos para algunos elementos o sustancias pueden diferir de organización a organización. Hay países que no consideran en su normatividad a un buen número de compuestos orgánicos como México (NOM-127-SSA-2000), y otros que incluyen incluso compuestos no considerados por la USEPA como la WHO (1998).

Las normas de agua potable son solo valores de referencia con carácter obligatorio para las instituciones encargadas del administro de agua, no implican necesariamente que consumos de agua con valores superiores sean dañinos, tampoco

	USEPA (mg/L)	México (mg/L)	WHO (mg/L)	Canada (mg/L)
<b>Microorganismos</b>				
Coliformes totales	5 % (en un mes)	ausencia	ausencia	
Cristosporidium	No detectable		ausencia	
Turbiedad	< 5 UTN	5 UTN	< 5 UTN	
<b>Desinfección</b>				
Acido haloacético	0.6			
Bromatos	0.01			
Cloratos	1.0			
Trihalometanos totales	0.1	0.2		0.35
<b>Desinfectantes</b>				
Cloraminas	4.0			
Cloro	4.0			
Dióxido de cloro	0.8			
<b>Químicos inorgánicos</b>				
Antimonio	0.006		0.005	
Arsénico	0.01	0.025	0.01	0.05
Asbestos	7 MFL			
Bario	2.0	0.7	0.7	1.0
Berilio	0.004			
Boro			0.5	5
Cadmio	0.005	0.005	0.003	0.005
Cianuro	0.2	0.07	0.07	0.2
cloruros		250		< 250
Cobre	1.3	2.0	2.0	< 1
Cromo total	0.10	0.05	0.05	0.05
Flúor	4.0	1.5	1.5	1.5
Manganeso			0.5	< 0.05
Mercurio	0.002	0.001	0.001	0.001
Molibdeno			0.07	
Níquel			0.02	

Nitratos	10	10	50	10
Nitritos	1	0.5	3	1
Plomo	0.015	0.01	0.01	0.05
Selenio	0.05		0.01	0.01
Sodio		200		
SDT		1000		
Sulfatos		400		500
Talio	0.002			
Zinc		5.0		
<b>Compuestos orgánicos</b>				
2,4-D Acido diclorofenoxiacético	0.07	30		
Acido edético EDTA			0.6	
Acrilamida	0.05 % a 1 mg/L		0.0005	
Alaclor	0.002			
Aldicarb				0.009
Aldrin		0.03		0.0007
Atrazin	0.003			0.06
Benceno	0.005	0.010	0.010	0.005
Benceno pireno HAP	0.0002		0.0007	0.00001
Bifenilos policlorados PCB	0.0005			
Bromoxynil				0.005
Carbofuran	0.04			0.09
Clordano	0.002	0.2		0.007
clorobenceno	0.1			
Dalapon	0.2			
Dieldrin				0.0007
DBCP dibromo cloropropano	0.0002			
o-diclorobenceno	0.6			
p-diclorobenceno	0.075			
1,2 diclorobenceno			1.0	0.2
1, 2-dicloroetano	0.005		0.03	

1, 1 dicloroetileno	0.007			
Cis-1, 2 dicloroetileno	0.07			
Trans 1, 2 dicloroetileno	0.1			
2, 4 diclorofenol				0.9
Diclorometano	0.005		0.02	0.5
1, 2 dicloropropano	0.005			
DDT (total de isómeros)		1.0		
Di(2 etilhexil) adipato	0.4			0.03
Di(2- etilhexil) ftalato	0.006			
Dinoseb	0.007			
Dioxin	0.000,000,03			
Diquat	0.02			0.07
Endotal	0.1			
Endrin	0.002			
Epiclohidrin	0.01% a 20 mg/L			
Estireno	0.1		0.02	
Etilbenceno	0.7	0.30	0.30	< 0.002
Fenoles		0.3		
Dibromuro etileno	0.000,05			
Glifosato	0.7			0.28
Heptacloro	0.0004	0.03		0.003
Epóxido de heptacloro	0.0002	0.03		
Hexaclorobenceno	0.001	1.0		
Hexaclorociclopentadieno	0.05			
Lindano	0.0002	2.0		0.004
Malation				0.19
Metilparation				0.007
Metoxicloro	0.04	20		0.9
Metribuzin				0.08
Monoclorobenceno			0.30	
Oxamil	0.2			



Paraquat				0.01
Paration				0.05
Pentaclorofenol	0.001			0.06
Pesticidas totales				0.1
Picloram	0.5			
2,4, 5-TP Silvex	0.05			
Simazina	0.004			0.01
Tetracloroetano			0.04	
Tetracloro etileno	0.005			
Tetracloruro de carbono	0.005		0.002	
2,3,4,6 tetraclorofenol				0.1
Terbufos				0.001
Tolueno	1.0	0.70	0.70	< 0.024
Toxafeno	0.003			
1,2, 3 triclorobenceno	0.07			
Triclobenceno totales			0.02	
1,1,1 tricloroetano	0.02		2.0	
Tricloroetano			0.07	
1,1, 2 tricloroetano	0.005			
Tricloroetileno	0.005			
2,4,6 Triclorofenol				0.005
Cloruro de vinilo	0.002		0.005	
Xilenos totales	10	0.50	0.50	
<b>Radionuclidos</b>				
Particulas alfa	15 pCi/L			
Particulas beta	4 mrems x año			
Radio 226 y 228	5 pCi/L			
Uranio	30 ug/L		0.002	

Tabla 2. Normatividad para agua potable

## **PROTOCOLO DE MONITOREO**

Un adecuado conocimiento del proceso de contaminación de un acuífero implica la instalación de sistemas de monitoreo vertical discreto, a diferentes profundidades, piezómetros, o pozos de observación diseñados expresamente para toma de muestras. El muestreo tradicional basado en descargas de pozos, solo proporciona información sobre la presencia de solutos en el agua y es útil para conocer la calidad del agua abastecida.

Para garantizar ante terceros los resultados de una investigación es menester seguir un protocolo preestablecido de monitoreo y seguir cadenas de custodia, en donde se pueda supervisar cada paso del protocolo hasta la presentación de resultados con su respectivo responsable y testigo calificado. Las cadenas de custodia garantizan de alguna manera que el personal involucrado en cada paso del monitoreo sea calificado y que los procedimientos siguen las normatividades respectivas.

Una guía para un protocolo de monitoreo de agua subterránea se presenta en la tabla 3.

<b>Programación actividades</b>	Revisión de información. Verificación geológica, censo de obras, monitoreo
<b>Selección de puntos</b>	Manantiales, Norias, pozos, piezómetros
<b>Diseño de campaña muestreo</b>	Orientado, aleatorio
<b>Periodicidad</b>	Quincenal, mensual, trimestral, anual
<b>Técnica de toma de muestras</b>	Descarga de pozos, monitoreo discreto vertical
<b>Validación</b>	Blancos ( trabajo de campo, transporte) Cruce de Muestras
<b>Determinaciones in situ</b>	Parámetros físico-químicos, Colorimetría
<b>Manejo de muestras</b>	Envases, botellas, conservadores
<b>Transporte de muestras</b>	Conservación a baja temperatura, Tiempo de traslado
<b>Capacidad almacenamiento lab.</b>	Preservación de muestras, optimización monitoreo
<b>Resolución</b>	Laboratorio Bacteriológico, inorgánico, orgánico
<b>Manejo de datos</b>	Químico, geológico, hidrogeoquímico, salud
<b>Criterios</b>	Concentraciones, valores críticos, modelación
<b>Hipótesis</b>	Fuentes, mecanismos de migración, afectaciones ambientales
<b>Correlaciones</b>	Geológicas, hidrogeológicas, fuentes
<b>Verificaciones</b>	Monitoreo, fuentes, analíticas
<b>Presentación de resultados</b>	Cadenas de custodia, documentos oficiales Productos académicos

Tabla 3. Protocolo de monitoreo para aguas subterráneas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

SSA 2000; Norma Oficial Mexicana 127-SSA-2002, México.

USEPA, 2001; Primary Standard for drinking water

WHO, 1998; Standards and Guidelines for Drinking Water

## Contaminación de Acuíferos-Mecanismos de Migración

Dr. Ramiro Rodríguez Castillo  
Instituto de Geofísica UNAM

La cada vez mayor dependencia en el abastecimiento de agua potable de los recursos hídricos subterráneos pone de relevancia la importancia que adquiere el conocer si la calidad del agua subterránea esta siendo alterada. Esto puede repercutir a mediano y largo plazo en la salud de la población abastecida. Mas del 60 % del abastecimiento nacional depende de sistemas acuíferos. Existen zonas en donde la única fuente la constituyen los acuíferos locales. Los problemas asociados a la calidad del agua están rebasando en algunas regiones a los de cantidad. En ambos casos se requiere de parametrizar los sistemas acuíferos.

### CONTAMINACION Y ALTERACION DE LA CALIDAD

Por contaminación, en Hidrogeología, se entiende la alteración de la calidad natural del agua, física, química o biológica, ya sea como consecuencia directa o indirecta de la actividad del hombre o por razones naturales. Esto provoca que el agua pueda ser impropia para los usos a los que se destinaba antes de la contaminación, pero no necesariamente.

La definición anterior implica el conocimiento de la **calidad natural** del agua. La cual variara no nada mas geográficamente sino incluso temporalmente. Para conocerla hay que determinar las concentraciones normales, **valores de fondo**, de los principales constituyentes del agua. Se ha tratado de restringir el termino contaminación a la normatividad vigente para agua para consumo humano. Lo cual en el caso de México, deja fuera una gran cantidad de compuestos orgánicos. También se hace referencia a la normatividad de la Agencia de Protección Ambiental norteamericana, EPA y a los criterios de la Organización Mundial de la Salud, OPS.

El caso de los metales es ilustrativo al respecto. En una zona pueden tenerse valores de, por ejemplo, 0.02 mg/L de arsénico, los cuales pueden corresponder a los valores de fondo naturales en dicha área. Si las concentraciones se incrementan a 0.04 mg/L, desde el punto de vista normativo nacional, el agua no esta contaminada. Sin embargo si lo esta, si tomamos en cuenta la norma americana, 0.01 mg/L. Pero si analizamos el proceso del incremento a los contenidos de As, la calidad natural del agua esta siendo afectada por alguna fuente, esto es se contaminó.

Es por este tipo de situaciones que actualmente cuando se trata de definir procesos de contaminación se hace referencia a los valores de fondo del elemento en cuestión. Si las concentraciones rebasan sistemáticamente las anteriores concentraciones "normales", el agua esta siendo contaminada. Cuando se trata de compuestos orgánicos, hidrocarburos, agroquímicos y/o productos de transformación, sus valores "normales" en el agua son cero, por lo tanto cualquier

cantidad detectada significaría que el acuífero está contaminado, aunque no se rebasen los valores de referencia (normas, criterios ecológicos)

## PRESENCIA Y MOVILIDAD DE CONTAMINANTES

El sitio de origen de los contaminantes se denomina **fuentes**, esta puede ser potencial o activa dependiendo si esta o no generando lixiviados. La sola presencia de elementos o sustancias contaminantes en una fuente no implica que estos estén migrando hacia el acuífero. Una fuente inactiva, es potencial, ya que pueden darse las condiciones para que posteriormente si pueda generar lixiviados.

La alteración de la calidad no se da únicamente con elementos o sustancias que pudieran afectar la salud humana. Los flujos subterráneos pueden incorporar excesos de elementos no normados o que pueden rebasar valores de referencia sin que su consumo provoque afectaciones verdaderas a la salud. Pero cuando se hace referencia a contaminantes por lo general se trata de sustancias cuya **toxicidad**, puede poner en riesgo la salud de quien consume ese tipo de agua por periodos continuos y prolongados.

La cantidad de contaminante, **carga**, es un aspecto fundamental en la caracterización de las fuentes. Esta no solo depende de la cantidad de material que contiene el elemento sino de la concentración del mismo. Un gran volumen con una muy baja concentración puede equivaler a poco volumen con muy alta concentración. La relevancia de la carga se incrementa cuando se hace referencia a la toxicidad del contaminante y a sus valores normativos. Mientras que en la mayoría de los metales la norma nacional e internacional es del orden de 0.05 mg/L para algunos compuestos orgánicos ésta baja dos ordenes de magnitud, 0.0007 mg/L como el caso del dieldrin. En este caso, 1 Kg de dieldrin podría contaminar cerca de 1.5 Millones de m<sup>3</sup> de agua ;;

La movilidad de los contaminantes depende de varios factores, uno de los más importantes es su solubilidad. Ha medida que la solubilidad se incrementa es más probable que pueda migrar hacia sistemas acuíferos. Si existe agua en la fuente, el **soluto** se incorporará a ésta y se podrá desplazar desde la fuente. Si no hay humedad suficiente en la fuente, los contaminantes no podrán moverse. De allí que puedan ser más "riesgosas" fuentes con material líquido que sólido.

Habría que considerar que existen sustancias insolubles en agua pero solubles en otro tipo de líquidos, como es el caso de un buen número de agroquímicos. Estos, si bien son de muy baja solubilidad en agua, son solubilizables en hidrocarburos. La presencia conjunta de este tipo de compuestos puede incorporar pesticidas u otro tipo de agroquímico al agua subterránea.

Las condiciones físico químicas prevalecientes en la fuente también influyen en la movilidad de los contaminantes. Cambios importantes en las mismas, por ejemplo en las condiciones Redox, los cuales solo se dan en casos muy

particulares, pueden alterar el *status* de la fuente y movilizar elementos o sustancias "riesgosas".

## MECANISMOS DE MIGRACION

Una vez que el soluto se moviliza en la desde la fuente, este tiene un complejo camino que recorrer antes de incorporarse al agua subterránea. Dependiendo del tipo de fuente, el suelo es un primer obstáculo que deben vencer los *lixiviados*. Si existe cobertura vegetal, el sistema reticular y la actividad microbológica pueden actuar retener y/o degradar para algunas sustancias.

La interacción del lixiviado que pasa la capa de suelo con el material que conforma la *zona vadosa*, también llamada no saturada puede también retardar su migración o lograr que éste se quede retenido indefinidamente en la roca. En el Altiplano Mexicano hay Cuencas donde los niveles estáticos se encuentran a mas de 100m de profundidad.

Los fenómenos de *retardo lineal* (adsorción, absorción, sorpción, intercambio químico) y la conductividad hidráulica, *K*, de los diferentes estratos que integran la zona vadosa propician que algunos solutos nunca arriben al acuífero o que tarden periodos largos de tiempo, meses o años. Grandes espesores de material arcillosos con valores muy bajos de *K* frenan los solutos. Un soluto no reactivo, como los cloruros, tarda mas de 3 años en atravesar una capa de 10m de arcilla. En cambio medios fracturados o de doble porosidad facilitan un rápido desplazamiento.

Los solutos que logran incorporarse al flujo subterráneo se desplazan en él advectiva y dispersivamente. En las inmediaciones de la fuente al conjunto de los solutos, lixiviados, integrado al flujo se le denomina *pluma contaminante*. Las plumas muestran una geometría muy bien definida en el entorno inmediato de las fuentes (menos de un 1Km), a distancias mayores ya no son identificables. Mientras que la *advección* depende de la velocidad del agua, la *dispersión* esta en función de las características del medio y del soluto. Esta última comprende la *difusión*, la cual se da a nivel micro. Ambos fenómenos originan en medios porosos velocidades muy bajas de los solutos, del orden de metros o hasta centímetros por día.

Los *NAPL's*, líquidos de fase no acuosa, tienen un comportamiento particular. Su interacción con el medio físico y el agua es diferente. Son muy sensibles a cambios de *K* lo que hace que puedan quedar "atrapados" en heterogeneidades del medio. Existen *NAPL's* densos y ligeros. Los ligeros, *LNAPL's*, como la gasolina o el diesel, flotan sobre el agua, en cambio los densos, *DNAPL's*, como el cloroformo y los bifenilos policlorados (PCB's) se desplazan hasta el fondo del acuífero o hasta capas de menor *K*. Estos presentan una viscosidad menor que la del agua.

La solubilidad de los NAPL's es muy baja, pero generan fases solubles y gaseosas que se incorporan lentamente al agua. Su persistencia ambiental es alta. Sus residuales siguen actuando inclusive años después de que la fuente fue desactivada.

El desplazamiento de los contaminantes depende de la velocidad del flujo y ésta a su vez del gradiente hidráulico. El gradiente es parcialmente controlado por la recarga y la extracción. Cambios drásticos en el régimen de extracción, sobretodo en medios urbanos, inciden en la movilidad de solutos y LNAPL's.

Las alteraciones naturales de la calidad del agua subterránea se originan por la circulación del agua por rocas con elementos lixiviables. Caso particular lo constituyen flujos termales. Concentraciones de arsénico, flúor, fierro, plomo, boro, selenio, cromo, compuestos de azufre entre otros pueden ser de origen natural. En algunas zonas, flujos profundos pueden acarrear radón. En todos los casos se trata de fuentes **difusas**.

La transcripción matemática del transporte de solutos esta basada en balances de masa y en ecuaciones de continuidad. Existen varios modelos matemáticos para el transporte de contaminantes, los cuales están acoplados a modelos de flujo, de donde toman los campos de velocidades. Aunque ya existen modelos para flujos multifásicos, éstos aún se pueden considerar en etapa de prueba.

## RELEVANCIA DE LA PARAMETRIZACION

Para estudiar un sistema y poder realizar simulaciones y predicciones sobre la evolución de algún fenómeno o proceso se requiere que el sistema tenga memoria. Esto es, es menester contar con información previa referente a la evolución espacial y temporal del proceso por investigar. Si no se cuenta con datos anteriores es prácticamente imposible llevar a cabo predicciones sobre el comportamiento futuro.

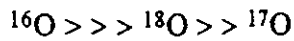
Los modelos de transporte requieren de información validada y sistematizada, la cual por lo general no es fácilmente accesible. La información más importante la constituyen cortes litológicos y bases de datos químicos. En el caso de concentraciones, un solo dato no es significativo. No es usual que se cuente con información sobre metales y mucho menos sobre compuestos orgánicos. Entre otros factores por el escaso número de laboratorios especializados y por el relativo alto costo. Una sola determinación del Índice BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) cuesta entre 75 a 100 US dólar.

Un adecuado conocimiento de la contaminación de un acuífero implica la instalación de sistemas de monitoreo discreto, a diferentes profundidades, piezómetros. El muestreo tradicional basado en descargas de pozos, solo proporciona información sobre presencia y es útil para conocer la calidad del agua abastecida.

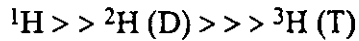


## MOLECULA DEL AGUA

Abundancia de isotopos de oxigeno

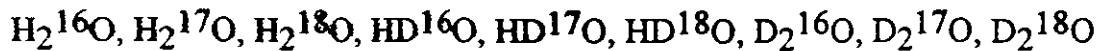


Abundancia de isotopos de hidrogeno

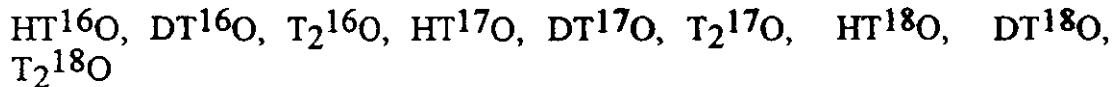


⇒ 18 moléculas diferentes, 9 radioactivas

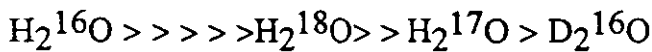
⇒ 9 moléculas estables de agua



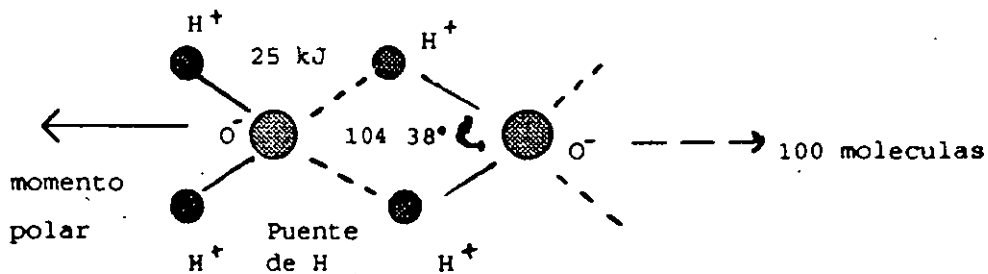
aunque, también es posible encontrar las siguientes moléculas



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 prácticamente incompresible.

## **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  $3.98^{\circ}\text{C}$
- 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.

## ACTIVIDADES ANTROPOGENICAS QUE APORTAN CONTAMINANTES AL AGUA SUBTERRANEA

DISPOSICION DE RESIDUOS	
SISTEMAS SEPTICOS	Bacterias, virus, nitratos, fosfatos cloruros, TCE
BASUREROS (ACTIVOS)	SDT, metales, Fe, Mn, Cd, acidos, compuestos orgánicos
POZOS INYECCION	SDT, bacterias, Na,
ALMACENAJE Y MANEJO MAT.	
TANQUES SUBTERRANEOS	B, T, X, hidrocarburos
AGROQUIMICOS	Nitratos, compuestos orgánicos
DUCTOS	B, T, X, hidrocarburos
ACTIVIDADES MINERAS	
JALES	Acidos, Fe, Mn, U, Th, Mo, Se, As
ACTIVIDADES PETROLERAS	
POZOS	Salmueras
ACTIVIDADES AGROPECUARIAS	
AGROQUIMICOS	Nitratos, fosfatos, compuestos orgánicos
IRRIGACION	SDT, nitratos, fosfatos
HECES ANIMALES	Nitratos, nitritos, bacterias, fosfatos
ACTIVIDADES URBANAS	
FUGAS DRENAJE	Bacterias, hidrocarburos, STD, plomo
FUGAS DUCTOS	Hidrocarburos { gasolinas }, solventes

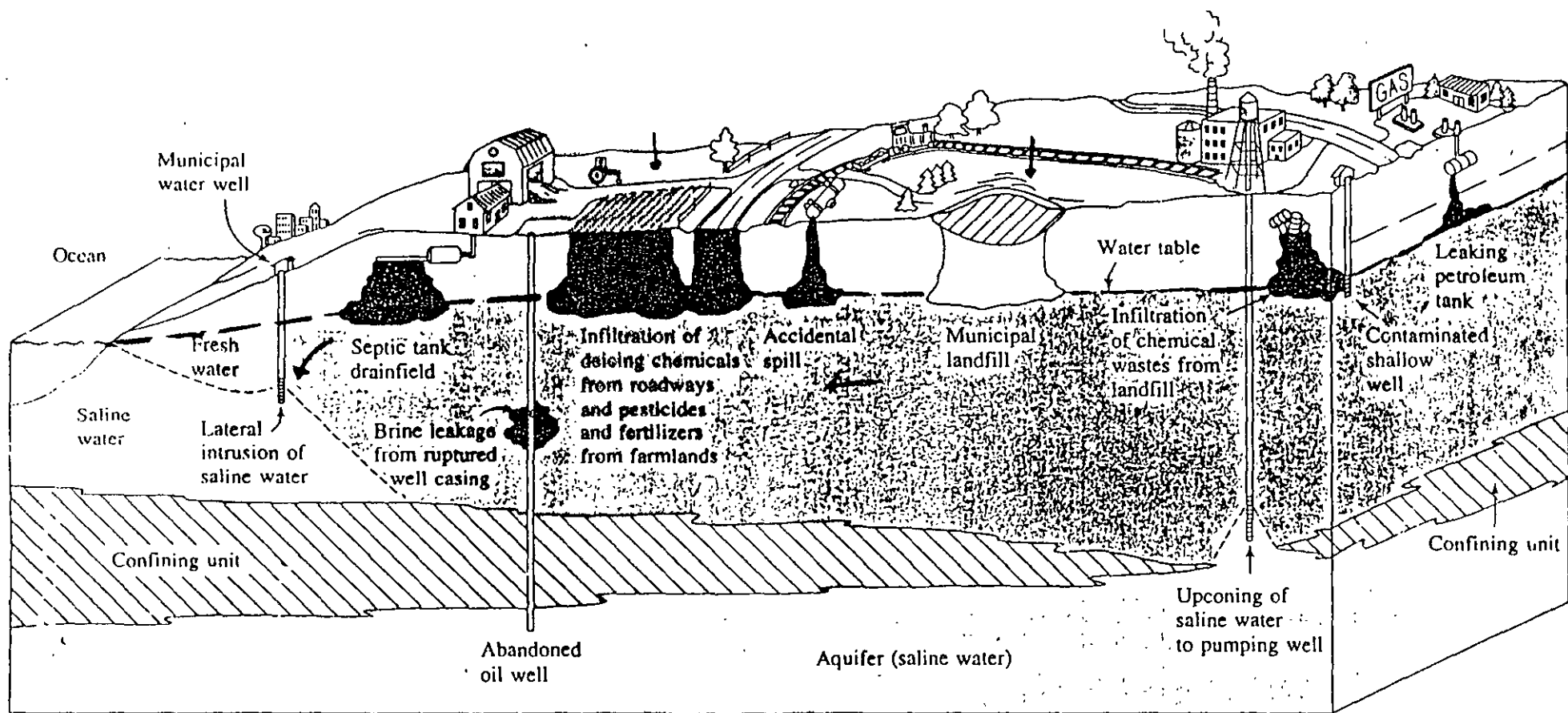


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

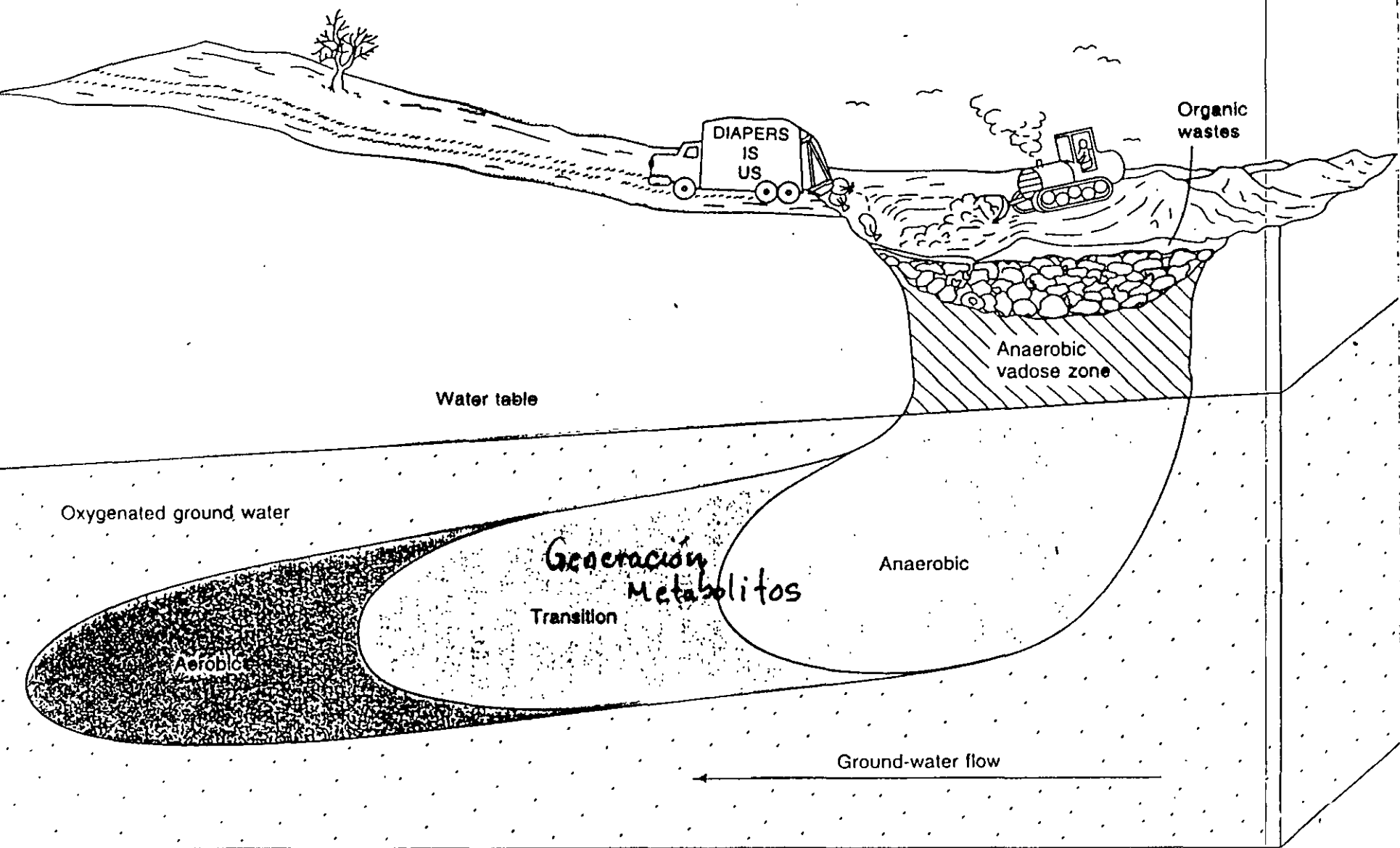
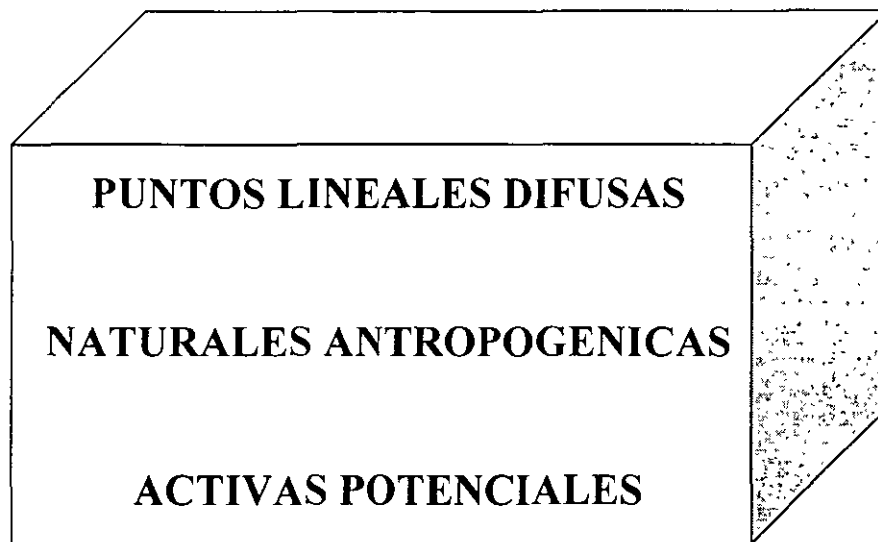


FIGURE 6.15 Geochemical zonation of the leachate plume from a landfill receiving organic waste.



**PERMANENTES INTERMITENTES PULSO**



**Xo Co to**

## **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 características físicas, químicas 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 característica 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

## Propiedades Físico-Químicas del agua

Propiedad	Simbología	Valor	Peculiaridades
Densidad	$\rho$	998.2 g/dm <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



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 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

Contaminant	Examples of uses
<b>Aromatic hydrocarbons</b>	
Acetanilide	Intermediate manufacturing, pharmaceuticals, <u>dye-stuffs</u>
Alkyl benzene sulfonates	Detergents
Aniline	<u>Dye-stuffs</u> , intermediate, photographic chemicals, pharmaceuticals, <u>herbicides</u> , <u>fungicides</u> , petroleum refining, explosives
Anthracene	<u>Dye-stuffs</u> , intermediate, semiconductor research
Benzene	Detergents, intermediate, <u>solvents</u> , antiknock gasoline
Benzidine	<u>Dye-stuffs</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	Dye-stuffs
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>Dye-stuffs</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>Dye-stuffs</u> , explosives, synthesis of drugs, biochemical research
n-Propylbenzene	Dye-stuffs, 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 dye-stuffs</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>Dye-stuffs</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	<u>Dyestuffs</u> , 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 (= Benzenehexachloride, or $\alpha$ -BHC)	<u>Insecticides</u>
$\beta$ -Hexachlorocyclohexane ( $\beta$ -BHC)	<u>Insecticides</u>
$\gamma$ -Hexachlorocyclohexane ( $\gamma$ -BHC, or Lindane)	<u>Insecticides</u>
Hexachlorocyclopentadiene	Intermediate for resins, <u>dyestuffs</u> , <u>pesticides</u> , <u>fungicides</u> , pharmaceuticals
Hexachloroethane	<u>Solvent</u> , pyrotechnics and smoke devices, explosives, organic synthesis
Hexachloronorbomadiene	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</b> (cont'd)	
RDX (Cyclonite)	<u>Explosives</u>
Simazine	<u>Herbicides</u>
Tetrachlorobenzene	NA <sup>o</sup>
Tetrachloroethanes (1,1,1,2 and 1,1,2,2)	Degreasers, <u>paint removers</u> , varnishes, <u>lacquers</u> , photographic film, organic synthesis, <u>solvent</u> , <u>insecticides</u> , fumigants, weed killer
Tetrachloroethylene (or perchloroethylene, PCE)	<u>Degreasers</u> , <u>drycleaning</u> , <u>solvent</u> , drying agent, chemical manufacturing, heat-transfer medium, <u>vermifuge</u>
Toxaphene	<u>Insecticides</u>
Triazine	<u>Herbicides</u>
1,2,4-Trichlorobenzene	<u>Solvent</u> , <u>dyestuffs</u> , <u>insecticides</u> , lubricants, heat-transfer medium (e.g., coolant)
Trichloroethanes (1,1,1 and 1,1,2)	<u>Pesticides</u> , <u>degreasers</u> , <u>solvent</u>
1,1,2-Trichloroethylene (TCE)	<u>Degreasers</u> , <u>paints</u> , <u>drycleaning</u> , <u>dyestuffs</u> , <u>textiles</u> , <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</u> , <u>herbicides</u> , <u>defoliant</u>
2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T)	<u>Herbicides</u> , <u>defoliant</u>
2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid (2,4,5-TP or Silvex)	<u>Herbicides</u> and <u>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> , <u>paints</u> and <u>varnishes</u> , flame retardants
2,3-Dimethylhexane	NA
Fuel oil	Fuel, heating
Gasoline	Fuel
Jet fuels	Fuel
Kerosene	Fuel, heating <u>solvent</u> , <u>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
4,5,8-Trimethyl-1-nonene	NA
Undecane	Petroleum research, organic synthesis
<b>Metals and cations</b>	
Aluminum	Alloys, foundry, <u>paints</u> , 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>dye stuffs</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, nonflare lighting for highways, laboratory reagent
Thallium	<u>Alloys</u> , glass, <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>dye stuffs</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

# **Subproductos potenciales del proceso de cloración**

---

**clorofenoles**

**ácidos acéticos clorados**

**hidrato de cloral**

**cloroacetona**

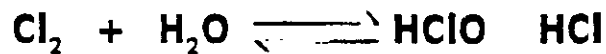
**cloruro cianogeno**

**2, 4, 6 triclorofenol**

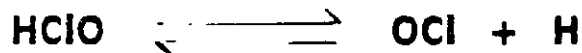
**cloroformo**

**bromodiclorometano**

## FORMACION DE COMPUESTOS ORGANOCLORADOS



Cloro + Agua      Acido hipocloroso + Acido clorhídrico

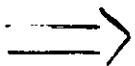


Acido hipocloroso      ion hipoclorito

### INTERACCION CON COMPUESTOS ORGANICOS

Reacción haloforma

cloración de metil acetona



Cloroformo



## ***Factores ocupacionales en la incidencia de cáncer***

Personas expuestas	Agente	Tipo de cáncer
Mineros y obreros (industria química)	Arsénico	Piel, pulmón, hígado
Obreros (industria de la construcción)	Asbesto	Mesotelioma
Obreros industria hule-cemento	Benceno	Leucemia
Obreros hule colorantes	Betanaftalina	Vejiga
Obreros industria plástica	Cloruro de vinilo	Hígado
Exposición a gases y vapores	Cromo	Aparato respiratorio
Mineros	Arsénico	Piel, pulmón e hígado
Obreros (manejo solventes)	Benceno	Leucemia

**FACTORES DE CONFUSION EN ESTUDIOS DE  
CANCERES ASOCIADOS A EXPOSICION DE  
COMPUESTOS ORGANICOS**

**EDAD  
(INFANTES, TERCERA EDAD)  
SEXO  
RAZA  
PREDISPOSICION GENETICA**

**FACTORES DE RIESGO ADICIONAL**

**REGIMEN ALIMENTICIO  
ALCOHOL  
TABACO**

**NIVEL EDUCATIVO  
POSICION LABORAL  
(EXPOSICION LABORAL)**

**REGION GEOGRAFICA  
TIPO DE RESIDENCIA  
(URBANA, MARGINAL, RURAL)  
DETECCION TEMPRANA ?  
(TIPO DE ASISTENCIA MEDICA)**

**RUTAS DE EXPOSICION**

**EXPOSICION CRUZADA**

ESTILO DE VIDA

**CAUSA**



**EFECTO**

EVALUACION  
CLINICA

**PERIODO DE EXPOSICION**

**EVALUACION INGESTA**

**MONITOREO**

**AGUA**

**SUELO**

**ROCAS**

**COMPROMISO INSTITUCIONAL**

**APOYO ECONOMICO**

**PARTICIPACION CIUDADANA**

**COORDINACION INTERINSTITUCIONAL**


**SOLUTO/NORMATIVIDAD**

**RUTA DE EXPOSICION**

**POBLACION EXPUESTA**

**BIOCINETICA**

**SOLUTOS**

**BIOMONITOREO** 

**REPRESENTATIVIDAD DATOS**

METALES PESADOS

CONCENTRACION PARA AGUA POTABLE EN mg/l

	NOM-127	EPA	OTROS
CADMIO	0.005	0.01	0.005 ◊
COBALTO	.....	.....	1.00 ◆
COBRE	0.20	1.00 °	0.05 ♣
CROMO	0.05	0.05	0.02 °
MERCURIO	0.001	0.002	0.002 ♣
NIQUEL	.....	.....	0.20 ◆
PLOMO	0.025	0.05	0.05 ◊
ZINC	5.00	.....	5.00 ♣

◊ CANADIA (MEXICANA)

◊ CCE

◆ FINE

° UNIZA

♣ WHO

Afectaciones potenciales a la salud por ingesta prolongada de agua con metales

<b>Cadmio</b>	<b>Disfunción renal. Enfermedad Itai Itai</b>
<b>Cobalto</b>	<b>anorexia, nausea, vómito (terapia con hierro)</b>
<b>Cobre</b>	<b>Vómitos, diarreas</b>
<b>Cromo</b>	<b>Irritación tracto intestinal. Cáncer estomacal</b>
<b>Mercurio</b>	<b>Neuralgia, fatiga Disturbios emocionales</b>
<b>Níquel</b>	<b>Cambio en el peso de órganos</b>
<b>Plomo</b>	<b>Neuropatía periférica, encefalopatía</b>
<b>Zinc</b>	<b>Malestares gástricos (terapias)</b>

## AFECTACIONES POR INGESTA DE INORGANICOS

Al	0.020	
As	0.05	Carcinógeno
Au	--	argirosis
Ba	0.70	Afectación al sistema circulatorio
Be	--	No hay casos reportados
B	--	Flora, insuficiente información
Cd	0.005	Afectación al riñon
Cianuros	0.07	Ataca a la titorides y al sistema nervioso
Cl	250	Sabor
Cu	2	Afecta higado y sistema gastrointestinal
Cr	0.05	Carcinógeno
Fe	0.30	Mancha ropa
F	1.5	Flourosis dental
Mn	0.15	Neurotóxico
Mo	--	Carcinógeno
Ni	--	Carcinógeno
Hg	0.001	El inorgánico afecta al riñon.
Nitrato	10.00 como N	Metahemoglobina
Nitritos	0.05 como N	Metahemoglobina
Na	200.	sabor
SDT	1.000.	sabor
Se	--	Afectación al higado
Zn	5.00	sabor

## Cuestionario ZIMAPAN

Fecha: \_\_\_\_\_ Entrevistador: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_ Domicilio: \_\_\_\_\_

Sexo: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_

Tiempo de Residencia (continuo) en Zimapán: \_\_\_\_\_ años

Tiempo de Residencia fuera de Zimapán:

lugar: \_\_\_\_\_ tiempo: \_\_\_\_\_ años

lugar: \_\_\_\_\_ tiempo: \_\_\_\_\_ años

### Antecedentes Familiares:

Defunciones por cancer:                      SI      NO

En caso positivo, tipo de cancer: \_\_\_\_\_ (Rel. fam. \_\_\_\_\_)

\_\_\_\_\_ (Rel. fam. \_\_\_\_\_)

### Antecedentes personales:

Tuberculosis: SI ( fecha \_\_\_\_\_ ) NO      Cirrosis:      SI ( fecha \_\_\_\_\_ ) NO

Hepatitis:      SI ( fecha \_\_\_\_\_ ) NO      Ictericia:      SI ( fecha \_\_\_\_\_ ) NO

Cancer:      SI ( fecha \_\_\_\_\_ ; tipo \_\_\_\_\_ )      NO

### Exploración física:

Color de piel:      Moreno      Moreno claro      , Blanco

Hipocromias: \_\_\_\_\_      Hiperchromias: \_\_\_\_\_

Hiperqueratosis:      SI ( palmar, plantar, torax, abdomen, \_\_\_\_\_ )      NO

Zonas verrugosas: \_\_\_\_\_

Pulsos arteriales: Disminuido [ D I ]

Muestra Cabello: SI      NO

a) Radial      b) Dorsal del pie

Clave: \_\_\_\_\_

Orina, sangre, uña

Depende de la sintomatología reportada para el soloto

Solo si se reportan anomalías externas



Toxicidad	Ingesta (LD <sub>50</sub> )
No tóxico	5.000 - 15.000
Levemente tóxico	500 - 5.000
Mediamente tóxico	50 - 500
Toxicidad alta	5 - 50
Extremadamente tóxico	1 - 5
Muy tóxico	- 1

mg/Kg peso corporal

LD<sub>50</sub>: Dosis a la cual se afectan mortalmente el 50 % de los individuos expuestos

# EVALUACION DE TOXICIDAD

Intensidad de Exposición. Edad, Patrón de Exposición, sexo

- Estilo de Vida -

## Dosis de Referencia. Drf

Valor de toxicidad usado frecuentemente para evaluar efectos no-cancerígenos debido a la exposición a un agente químico o físico

## NSENO (NOAEL)

En experimentos dosis/respuesta es el nivel de exposición al cual NO HAY incrementos biológicos o estadísticos significativos en la frecuencia o severidad de efectos adversos.

## NICENO (LOAEL)

El mínimo nivel de exposición al cual existen incrementos biológicos o estadísticos significativos en la frecuencia o severidad de efectos adversos.

**Ingesta Diaria Tolerable = NICENO/ FI**

FI = Factor de incertidumbre [ 1 - 10,000 ]

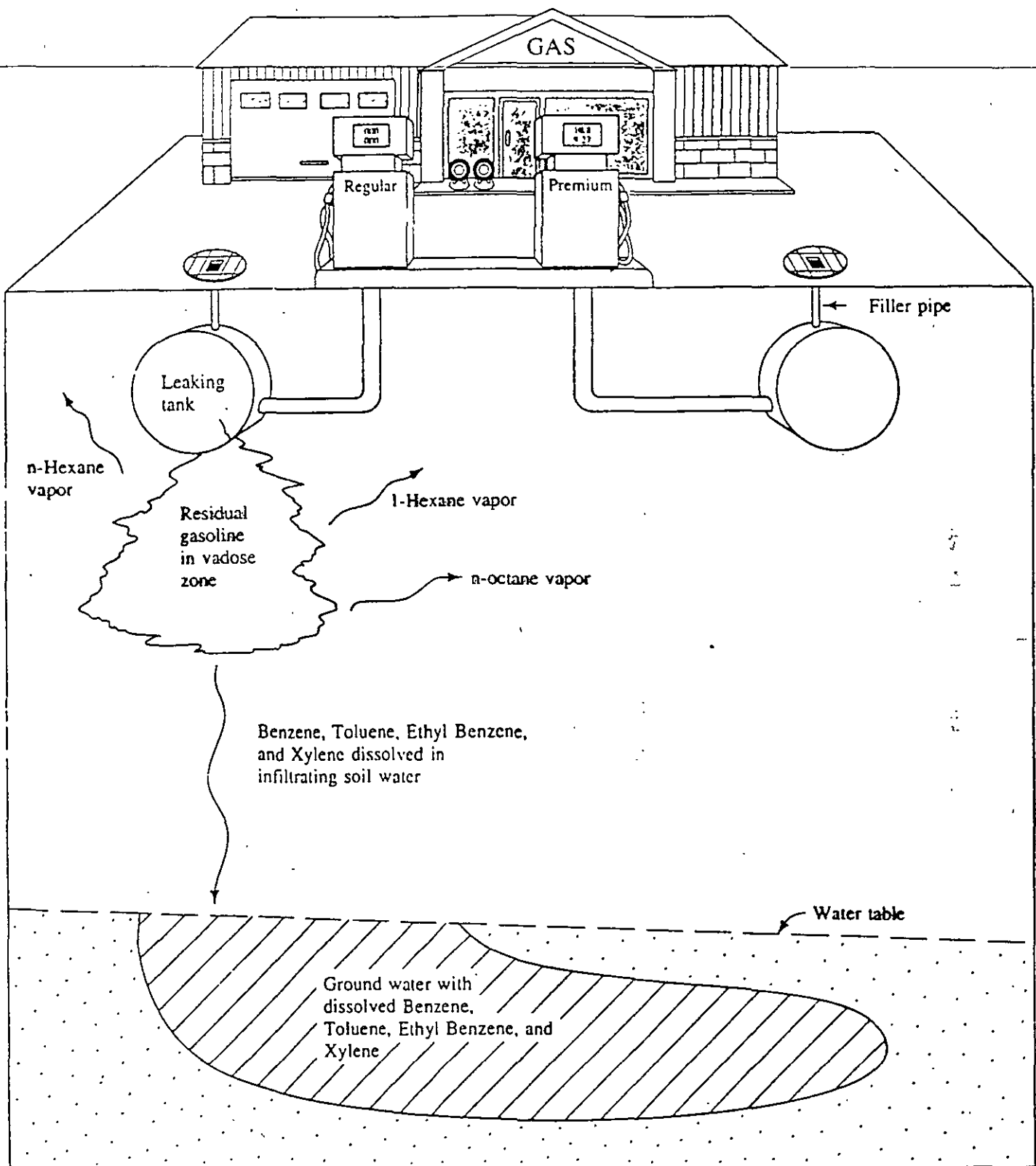


FIGURE 5.18 Process of ground water being contaminated by gasoline constituents from residual gasoline in the vadose zone.

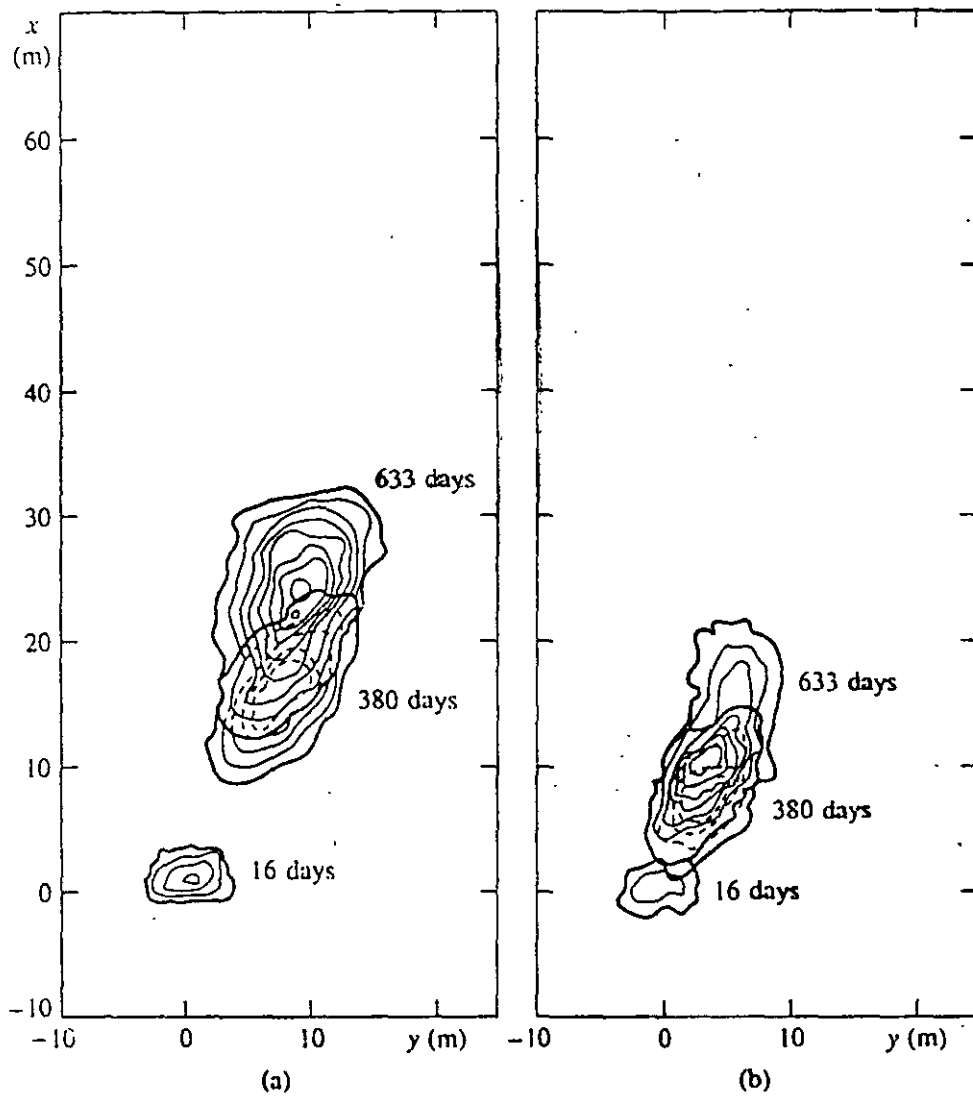


FIGURE 3.17 (a) Growth of carbon tetrachloride plume with time; (b) growth of tetrachloroethylene plume with time. Source: P. V. Roberts, M. N. Goltz, and D. M. Mackay, *Water Resources Research* 22, no. 13 (1986):2047-59. Copyright by the American Geophysical Union.

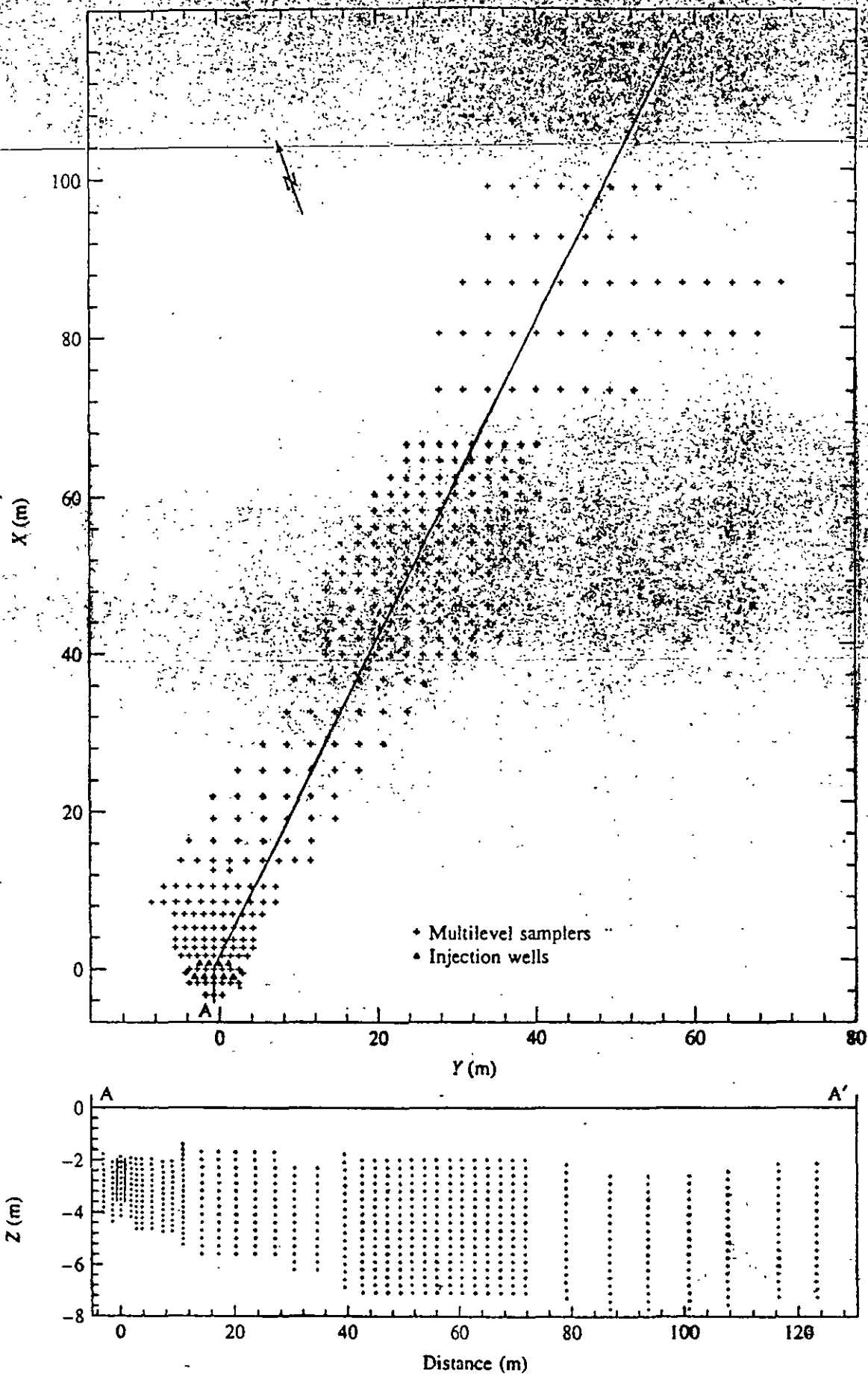
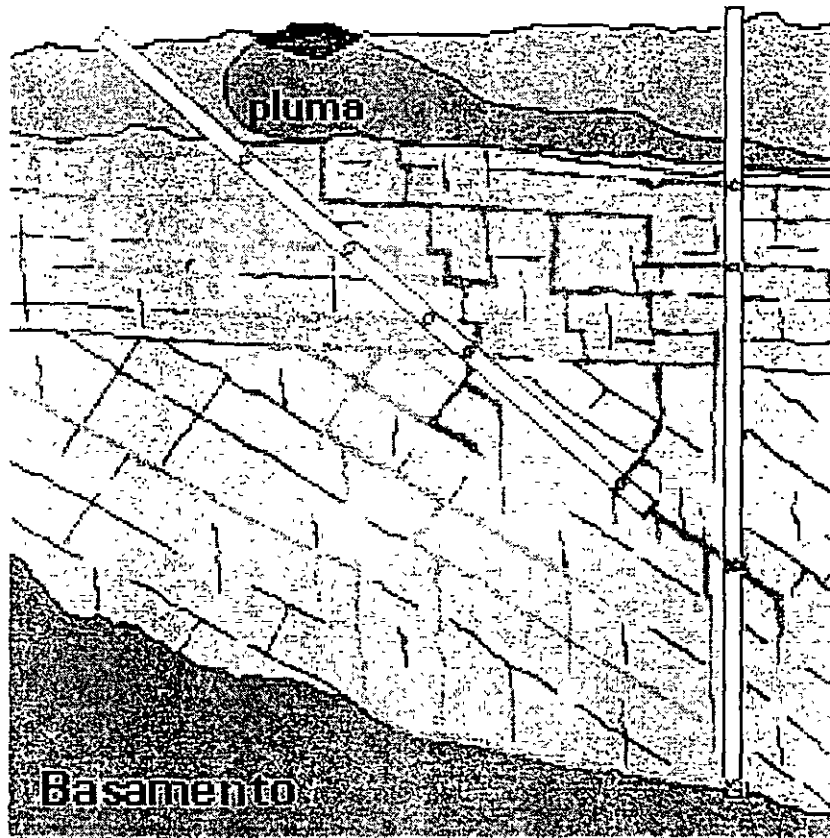


FIGURE 3.13 Location of multilevel sampling devices at the site of the Borden, Ontario, tracer test. Source: D. M. Mackay et al., *Water Resources Research* 22, no. 13 (1986):2017-30. Copyright by the American Geophysical Union.

Piezómetro Fuente Piezómetro



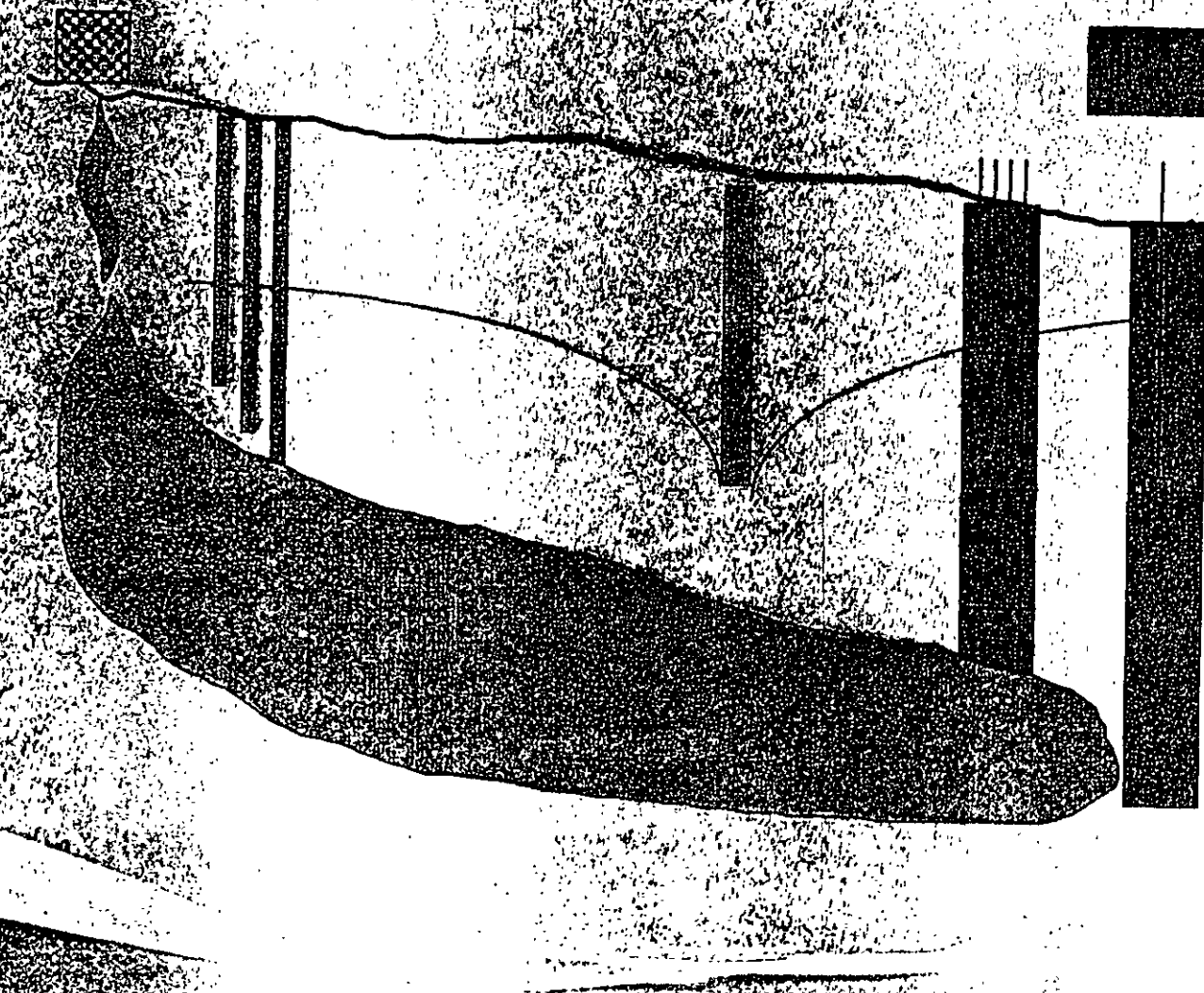
**Sistema multipiezométrico  
en medio fracturado  
con piezómetro inclinado**

# TECNICAS DE MONITOREO

PIEZOMETROS

POZOS

NIDOS PIEZOMETRICOS



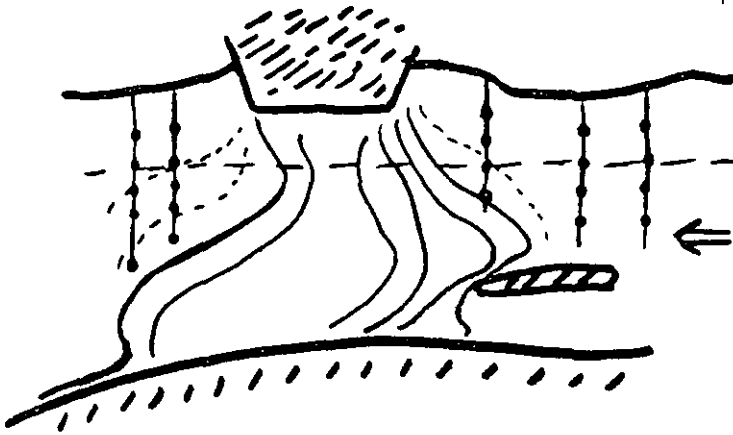
**Procesos someros  
cerca de la fuente  
Facil instalación  
Monitoreo vertical  
Volúmenes pequeños  
Volátiles  
Comparación con  
modelación**

## PROTOCOLO DE MONITOREO HIDROGEOQUIMICO

<b>PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDADES</b>	<b>VERIFICACION GEOLOGICA, CENSO DE OBRAS, MONITOREO</b>
<b>SELECCIÓN DE PUNTOS</b>	<b>NORIAS, MANANTIALES, POZOS, PIEZOMETROS</b>
<b>PERIODICIDAD</b>	<b>QUINCENAL, MENSUAL, TRIMESTRAL</b>
<b>TECNICA DE TOMA DE MUESTRA</b>	<b>DESCARGA DE POZOS, MONITOREO VERTICAL, BOTELLAS, PIEZOMETROS</b>
<b>VALIDACION</b>	<b>BLANCOS, MUESTRAS CRUZADAS</b>
<b>DETERMINACIONES IN SITU</b>	<b>PARAMETROS FISICO-QUIMICOS, COLORIMETRIA</b>
<b>MANEJO Y TRANSPORTE DE MUESTRAS</b>	<b>ENVASES, CONSERVACION BAJA TEMPERATURA, TIEMPO DE TRASLADO</b>
<b>CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO LAB.</b>	<b>PRESERVACION DE MUESTRAS, OPTIMIZACION DE MONITOREO</b>
<b>RESOLUCION</b>	<b>INORGANICO, BACTERIOLOGICO, COMPUESTOS ORGANICOS</b>
<b>MANEJO DE DATOS</b>	<b>QUIMICA, HIDRGEOLOGICA HIDROGEOQUIMICA, SALUD</b>
<b>CRITERIOS</b>	<b>MODELACION, VALORES CRITICOS, ISOLINEAS</b>
<b>HIPOTESIS ?;?</b>	<b>FUENTES, MECANISMOS DE MIGRACION AFECTACIONES AMBIENTALES</b>
<b>CORRELACIONES</b>	<b>GEOLOGICAS, HIDROGEOLOGICAS QUIMICAS</b>
<b>VERIFICACIONES</b>	<b>ANALITICAS, MONITOREO, FUENTES</b>
<b>COMUNICACION DE RESULTADOS</b>	<b>DOCUMENTO OFICIAL, REPORTE TECNICO, PRODUCTO ACADEMICO</b>



# SISTEMAS MONITOREO



QUE DESEAMOS  
MEDIR

QUE PODEMOS  
MEDIR

QUE MEDIMOS

INCREMENTO  
ABSORCION



COMO MEDIMOS

ACERO INOXID.

PVC RIGIDO

FIBRA VIDRIO IMPREGN. CON EPOXY

POLYINLIDENO 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 ¿ N PAPER'S !

APOYO ECONOM. - ACADEM

**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

## Tratamiento de los parámetros de transporte de solutos

<b>K</b>	<u>conductividad hidráulica</u>	Pruebas de bombeo
$\eta$	<u>porosidad</u>	valores literatura
<b>V</b>	<u>velocidad de agua</u>	Campo de velocidades
<b>C</b>	<u>concentración del soluto</u>	Monitoreo vertical periódico
<b>C<sub>o</sub></b>	<u>Concentración inicial</u>	Monitoreo, calibración
<b>t<sub>o</sub></b>	<u>tempo inicial</u>	inferido
<b>D</b>	<u>dispersión</u>	calibración y literatura ?
	<u>Valores puntuales</u>	<u>Representatividad ?</u>

Medios fracturados ?

Doble porosidad

Zona - no saturada, vadosa -

$$D_v = \alpha V(\theta_s) + \tau D_o$$

$V(\theta_s)$  = Velocidad vertical del soluto     $\theta_s$  = Contenido de humedad

Fluidos multifásicos

$K_f$  = Función de Distribución

$$\Rightarrow D = \alpha v + \tau D_0 \left( 1 + \frac{\rho}{\eta} \frac{K_f}{K_f} \right)^{-1}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v \frac{\partial C}{\partial x} - \left( \alpha v + \tau D_0 R^{-1} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

con

$$R = \left( 1 + \frac{\rho}{\eta} \frac{K_f}{K_f} \right) = \frac{v}{v_s} \quad \text{Factor de Retardo}$$

donde

$V_s$  = Velocidad del soluto al nivel de concentración  $C / C_0 = 0.5$

Si existe adsorción del soluto en el medio poroso

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v \frac{\partial C}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial S}{\partial t}$$

donde

S es la concentración del soluto adsorbido, si  $S = K_d C$

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = v \eta \frac{\partial C}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

**Ecuación simplificada unidimensional del transporte de solutos no - reactivos en medios granulares homogéneos e isótropos**

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v \frac{\partial C}{\partial x}$$

con

$v$  = velocidad media del agua

$D$  = dispersión [  $L^2 T^{-1}$  ]

$$D = D_m + D_e$$

$$D_m = \alpha v$$

Coficiente de Dispersión Mecánica

$$D_e = \tau D_o$$

Coficiente de Difusión Molecular

⇒

$$D = \alpha v + \tau D_o$$

$$D_o = D'_o \left(1 + \frac{\rho}{\eta} K_d\right)^{-1}$$

Coficiente de Difusión libre

$\rho$  = densidad del medio

$\eta$  = porosidad

$D'_o$  = de Difusión efectiva

$$D'_o = D_e f \eta \quad \text{ó} \quad D'_o = D_e (1 - \eta) \eta / 2$$

$$K_d = K_s / K_r$$

Coficiente de Distribución

**Potencial de migración en el agua subterránea de contaminantes orgánicos.**

Compuesto	Mobilidad Potencial	Potencial de Migración
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

## INTRODUCCIÓN

El riesgo de contaminación acuífera 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 (Foster y Hirata, 1991).

En general 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.

El concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea fue introducido por el hidrogeólogo francés Margat en la década de los 60's y aunque inicialmente se le relacionaba solo a aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos de contaminación y calidad del agua. Se puede decir que la vulnerabilidad es una propiedad natural del sistema acuífero que depende de la susceptibilidad de este sea adversamente afectado por una carga contaminante, debido al impacto humano y/o natural (Vrba y Zapotec, 1994).

En otras palabras la vulnerabilidad del acuífero depende de la inaccesibilidad a la zona saturada y de la capacidad de atenuación de los estratos encima de esta zona. La capacidad de atenuación del medio puede ser el resultado de su retención física y la reacción química con contaminantes. Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero, se relacionan además con factores asociados a la fuente contaminante en el subsuelo como; 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 varia espacialmente los diferentes grados de vulnerabilidad.

Los mapas de vulnerabilidad de agua subterránea involucran la identificación de áreas susceptibles de variar la calidad del agua subterránea, debido a la interacción de características fisico-químicas que aumentan o retardan el movimiento de contaminantes en el subsuelo.

En los últimos 30 años se han desarrollado varios métodos para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo ambiental, estos pueden ser de dos tipos:

1) Sistemas que utilizan tasas numéricas (Aquifer Vulnerability Index, Depth Recharge Aquifer Soil Topography Impact to vadose zone Conductivity hydraulic, Enviromental Risk Inventory System, Site Rating Methodology).

2) Sistemas no numéricas, los cuales pueden usar números para ordenar el incremento de vulnerabilidad o clasificar como altamente vulnerables o menos vulnerables.

Algunos de estos métodos (ERIS) fueron desarrollados para obtener índices de impacto a los diferentes partes del medio ambiental (agua superficial, agua subterránea, aire, contacto directo al humano, fuego y explosión).

## ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS (AVI)

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran 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 total (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  $c$ , menor vulnerabilidad.

Para construir el mapa de vulnerabilidad se necesitan las coordenadas del pozo en cuestión y se utiliza el  $\log c$  para cada pozo; se interpolan los valores de  $\log c$ . Esto da como resultado un zoneamiento de resistencias hidráulicas, las cuales están directamente relacionadas con la vulnerabilidad.

## ÍNDICE DRASTIC

El DRASTIC es un esquema de clasificación numérica desarrollado para 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 establecieron pesos de relativa importancia así como una escala de puntuación para la clasificación para cada factor. Los pesos de cada factor son dados de manera general y cuando aplicado a agroquímicos algunos de los pesos de los parametros cambian. Las siglas de DRASTIC se deriva de 7 factores (Aller et al. 1985):

$D$  = profundidad al agua subterránea,  $R$  = recarga neta,  $A$  = medio acuifero,  $S$  = tipo de suelo

$T$  = topografía (pendiente),  $I$  = impacto a la zona vadosa,  $C$  = conductividad hidráulica del acuifero

La determinación del índice DRASTIC involucra multiplicar cada uno de los parámetros  $r$  por la puntuación de peso  $w$  asignado a cada parámetro y se suma el total, como se indica a continuación.

$$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw = \text{Contaminación potencial}$$

Valores altos de la suma representan fuertes potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuifero. El valor de los pesos dados en las tablas 1 a 7 son dados para el índice general de DRASTIC.

1. En la tabla 1 se presenta la escala de valores para profundidad del agua subterránea; el peso de importancia ( $Dw$ ) en DRASTIC de este parametro es 5 puntos (Aller et al., 1985).
2. La tabla 2 contiene la clase de información para la recarga neta y su índice ( $Rw$ ) de DRASTIC es 4 puntos (Aller et al. op. cit.).
3. La tabla 3 muestra un esquema de rangos para la evaluación del medio acuifero. El peso de importancia de importancia para este factor en el índice ( $Aw$ ) de DRASTIC es de 3 puntos.
4. La información para la evaluación de tipo de suelo se incluye en la tabla 4, con su peso de importancia ( $Sw$ ) en el DRASTIC de 2 puntos (Aller et al. op. cit.).
5. La tabla 5 muestra los rangos de valores para topografía y su peso de importancia ( $Tw$ ) para este factor en el DRASTIC es de 1 puntos (Aller et al. op. cit.).
6. 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 ( $Iw$ ) para este factor será de 5 puntos (Aller et al. op. cit.).
7. Finalmente la tabla 7 resume información pertinente para la conductividad hidráulica del factor acuifero, con su peso de importancia ( $Cw$ ) 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 (in)	(mm)	Clase
Recarga Neta  $Rw = 4$	0-2	0 - 50	1
	2-4	50 - 1026	3
	4-7	102 - 178	6
	7-10	178 - 254	8
	> 10	> 254	9

Tabla 2.- Evaluación del factor de recarga neta en el DRASTIC



Parámetro	Rango	Clase
Impacto	Capa confinante	1
Zona Vadosa  Iw = 5	Limo/arcilla	2 - 6
	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/ft <sup>2</sup> )	(m/d)	(m/s)	Clase
Conductividad Hidraulica	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 ocurre una fuga o accidente y la sustancia contaminante ha salido de control, esta 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 receptores

Para agua superficial 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 agua subterránea 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.

## VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO 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.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

<b>Relleno Sanitario</b>	<b>Peso</b>
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.*

<b>Confinamiento Superficial</b>	<b>Peso</b>
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.

<b>Contenedores</b>	<b>Peso</b>
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.

<b>Pilas</b>	<b>Peso</b>
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.

	ERIS (F1)
FUENTES	RELLENO SANITARIO
AGUA SUPERFICIAL	0
AGUA SUBTERRÁNEA	0
CONTACTO DIRECTO	0
FUEGO/EXPLOSIÓN	1
HRS (MÁXIMO 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>	HRS VALOR	CAPACIDAD	ENTRENAMIENTO	EQUIPAMIENTO	DISCIPLINA	
F1	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 HRS\*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					
Promedio de la pendiente del terreno					
Facilidad de pendiente	< 3 %*	3 - 5 %	5 - 8 %	> 8 %	Pendiente del agua**
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.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 conductividad 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 siguiente 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.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 fracturadas, 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 ACUÍFERO	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

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 normalmente 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 capaces de detonación o descomposición o reacción explosiva en condiciones normales de presión y temperatura. Incluye materiales 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	
Limpiadores alcalinos	Bateria ácida
Líquidos corrosivos alcalinos	
Fluidos de baterías corrosivas alcalinas	Electrolito Acido
Aguas residuales cáusticas	Solventes
	Otros ácidos corrosivos
	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	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B
	Calcio
Agua	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	Residuos concentrados del Grupo 1-A o 1-B
Aldehidos	Residuos del Grupo 2-A
Hidrocarburos halogenados	
Hidrocarburos nitrados	
Hidrocarburos no saturados	
Otros componentes reactivos orgánicos y solventes	
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 sulfúricas	
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	Acido acético y otros ácidos orgánicos
Cloruros	Concentrado de ácidos minerales
Residuos del Grupo 2-A	
Acido cromico	
Residuos del Grupo 4-A	
Hipocloritos	Otros residuos combustibles y flamables
Nitratos	
Acido nítrico	
Percloratos	
Permanganatos	
Peróxido	
Otros oxidantes fuertes	
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 químicos

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 piezometros, 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 vía 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.

$$\text{Valor esperado} = [(p_1)*(p_2)*...*(p_n)*v]$$

$p_i$  = 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.

$$RSCS = (\text{Cantidad de la sustancia peligrosa} * \text{toxicidad/persistencia}) * 0.694$$

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.

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

Peso=3 Componentes altamente persistentes	Peso = 2, Componentes persistentes	Peso = 1, Componentes algo persistentes	Peso = 0, Componentes no persistentes
aldrin	acenaphthylene	acetylene dichloride	acetaldehyde
benzopyreno	atrazine	beheic acid, methyl ester	acetic acid
benzothiazole	(diethyl) atrazine	benzene	acetone
benzothuophene	barbital	benzene sulfonic acid	acetophenone
benzyl butyl phthalate	borneol	butyl benzene	benzoic acid
bromochlorobenzene	bromobenzene	butyl bromide	di-isobutyl carbinol
bromoform butanal	camphor	ε-caprolactam	docosane
bromophenyl phynyl ether	chlorobenzene	carbon-disulfide	eicosane
chlordan	1,2-bis-chloroethoxy ethane	o-cresol	ethanol
chlorohydroxy benzephenone	b-chloroethyl methyl ether	decane	ethylamine
bus-chlorosoprophyl ether	chloromethyl ether	1,2-dichloroethane	hexadecane
m-chloronitrobenzene	chloromethyl ethyl ether	1,2-dimethoxy benzene	methanol
DDE	3-chloropyridine	1,3-dimethyl naphalene	methyl benzoate
DDT	di-4-butyl-p-berzoquinone	1,4-dimethyl phenol	3-methyl butanol
di-bromobenzene	dichloroethyl ether	dioctyl adipate	methyl ethyl ketone
dibutyl phthalate	dihydrocarvone	n-decane	2-methylpropanol
1,4-dichlorobenzene	dimethyl sulfoxide	ethyl benzene	octadecane
dichlorodifluoroethane	2,6-dinitrotoluene	2-ethyl-n-hexane	pentadecane
dieldrin	cis-2-ethyl-4-methyl-1,3-dioxolane	o-ethyltoluene	pentanol
diethyl phthalate	trans-2-ethyl-4-methyl-1,3-dioxolane	isodecane	propanol
di(2-ethylhexyl) phthalate	guaiacol	isopropyl benzene	propylamine
dihexyl phthalate	2-hydroxyadiponitrile	limonene	tetradecane
di-isobutyl phthalate	isophorone	methyl ester of lignocenic acid	n-tridecane
dimethyl phthalate	indene	methane	n-undecane
4,6-dinitro-2-ammphenol	isoborneol	2-methyl-5-ethyl pyridine	
dipropyl phthalate	isopropenyl-r-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,-heptachloronorbonene	methylindene	nonane	
hexachlorobenzene	methylindene chloride	octane	
hexachloro-1,3-butadiene	nitroanisole	acetyl chloride	
hexachlorocyclohexane	nitrobenzene	pentane	
hexachloroethane	1,1,2-trichloroethylene	phenyl benzoate	
methyl benzothiazole	trimethyl-mexo-hexahydrotriazine	phthalic anhydride	
pentachlorobiphenyl	isomer	propylbenzene	
pentachlorobiphenol		l-terpineol	
1,1,3,3,-tetrachloroacetone		toluene	
tetrachlorophenyl		vinyl benzene	
tuomethylbenzothiazole		xylene	
trichlorobenzene			
trichlorophenyl			
trichlorofluormethane			
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> <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.</p>

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, máscara 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 persistencia				
Peso para toxicidad	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.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

	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/EXPLOSIÓN	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.

**RECEPTORES HUMANOS**

Se hizo una evaluación de riesgo en receptores humanos, para cada una de las fuentes con cada uno de los mecanismos de transporte.

**ERIS Agua Superficial–Receptor Humano**

Los pesos para población por distancia se manejaron 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
POBLACIÓN ACTUAL	0
POBLACIÓN EN t1	0
POBLACIÓN EN t2	0
POBLACIÓN EN t3	0
POBLACIÓN TOTAL	0
USO DE AGUA SUPERFICIAL	3
POBLACIÓN/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—Receptor 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
POBLACIÓN ACTUAL	0
POBLACIÓN EN t1	0
POBLACIÓN EN t2	0.01
POBLACIÓN EN t3	0.07
POBLACIÓN TOTAL	0.08
USO DE AGUA SUBTERRÁNEA	3
POBLACIÓN/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—Receptor 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.



**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 vía aire - blanco humano son resumidos en la tabla 48.

FUENTES	F1
POBLACIÓN ACTUAL	0
POBLACIÓN EN t1	0
POBLACIÓN EN t2	0
POBLACIÓN EN t3	0
POBLACIÓN TOTAL	0
POBLACIÓN/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-Receptor humano para diferentes fuentes.

**ERIS Contacto Directo—Receptor Humano**

El valor del ERIS esta en función del numero de personas como se ve en la tabla 49. Los datos de ERIS de contacto directo son dados en la tabla 50.

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.

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 —Receptor 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
POBLACIÓN ACTUAL	0
POBLACIÓN EN t1	0
POBLACIÓN EN t2	0
POBLACIÓN EN t3	0
POBLACIÓN TOTAL	0
POBLACION EN DOS MILLAS	1
USO DEL SUELO	1
VALOR CRUDO TOTAL	2
VALOR NORMALIZADO X 12.5 *	25

Tabla 52.- Valores de ERIIS vía 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.

**AMBIENTES SENSIBLES RECEPTORES**

**ERIS Ruta de Agua Superficial-Sensibilidad Ambiental**

Los posibles ambientes sensibles (habitas 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 ERIIS vía agua superficial - ambientes sensibles receptores, para diferentes fuentes

**ERIS Ruta Aire-Sensibilidad Ambiental**

La sensibilidad ambiental se obtiene de la tabla 53. El resumen de los valores de ERIIS vía aire - ambientes sensibles receptores se da en la tabla 55.

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 55.- Valores de ERIIS 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 habitats criticos.

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 habitats criticos	> 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.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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)**

POBLACIÓN ACTUAL	VALOR DE ERIS BLANCO HUMANO	CRS	BLANCO AMBIENTES SENSIBLES	RIESGO HUMANO	RIESGO AMBIENTAL	M.A.S
0.07	26.56	0	33.33	0	0	AGUA SUPERFICIAL
0.07	26.72	23.42		43.8		AGUA SUBTERRÁNEA
0.07	36.36	0	33.33	0	0	AIRE
0.07	33.33	0	33.33	0	0	AIRE
0.07	30.30	0	33.33	0	0	AIRE
0.07	20	0	33.33	0	0	CONTACTO DIRECTO
0.07	25	0	33.33	0	0	FUEGO/EXPLOSIÓN

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.

**METODOLOGÍA DE PUNTUACIÓN DE SITIOS (SRM)**

La metodología de puntuación de sitios fue desarrollada para priorizar sitios de superfund en términos de acciones de remediación, en los Estados Unidos de Norteamérica (Kufs et al., 1980).

El SRM tiene tres elementos: (1) Sistema de Factor de Puntuación, (2) Sistema de puntuación adicional, (3) Sistema de marcación.

El primer término es usado para una puntuación inicial de un sitio de disposición de residuos, basado en una serie de 31 parámetros, a los cuales se le aplica un peso de acuerdo a los rangos considerados para cada uno, como se muestra en la tabla 63.

Los 31 parámetros se dividen en 4 categorías de acuerdo a su enfoque: (1) receptores, (2) mecanismos de transporte, (3) características de los residuos y (4) prácticas en el manejo de residuos. Para cada factor se considera una escala de cuatro niveles (0 no presenta riesgo potencial a 3 que representa un alto riesgo potencial). Las escalas han sido definidas de tal manera que los factores de puntuación pueden ser evaluados típicamente sobre bases de información accesible en dependencias públicas o privadas, o datos obtenidos en visitas al sitio.

No todos los factores de puntuación se evalúan con la misma magnitud de impacto potencial ambiental. En consecuencia un valor numérico llamado multiplicador es asignado a cada factor de acuerdo con su relativa magnitud de impacto.

Los multiplicadores originalmente definidos se basaron en resultados de pruebas de campo. Estos valores son multiplicados por factores de puntuación apropiado, resultando valores para cada uno de los parámetros.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

El sistema de puntuación adicional agrega factores especiales como facilidad de localización, diseño, operación que no puede ser manejada satisfactoriamente en los factores de puntuación.

Estos factores pueden presentar riesgo que pueden ser inusualmente serio, único del sitio o que no son evaluables por las escalas de puntuación, se pueden asignar puntos adicionales a cada categoría (Receptores, 50 puntos; Transporte, 25 puntos; Características de los residuos, 20 puntos; Practicas en el manejo de residuos, 30 puntos). En la tabla 64 se da una guía de aplicación del método.

Niveles de la escala de puntuación				
Factores de puntuación	0	1	2	3
	<b>Receptores</b>			
Población a 1000ft a la redonda	0	1 a 25	26 a 100	> 100
Distancia a pozos de agua potable	> 3 millas	1 a 3 millas	3001ft a 1 milla	0 a 3000ft
Zona de uso del suelo	Completamente remota (no es aplicable)	Agrícola	Comercial /industrial	Residencial
Ambientes críticos	No hay ambientes críticos	Areas naturales vírgenes	Pantanos planicies de inundación, áreas de reserva	Hábitats mayores o especies en peligro de extinción
<b>Rutas</b>				
Evidencias de contaminación	Sin contaminación	Evidencia indirecta	Comprobación positiva de observación directa	Comprobación positiva de análisis de laboratorio
Nivel de contaminación	Sin contaminación	Niveles bajos, niveles traza o desconocidos	Niveles moderados o niveles que no pueden ser percibidos en una visita pero pueden ser confirmados con análisis de laboratorio	Niveles altos o niveles altos que pueden ser percibidos durante una visita al sitio
Tipo de contaminación	Sin contaminación	Sólo contaminación del suelo	Contaminación de la biota	Aire, agua, o contaminación de materia alimenticia
Distancia de agua superficiales cercanas	> 5 millas	1 a 5 millas	1001 ft a 1 milla	0 a 1000 ft
Profundidad al agua subterránea	> 100 ft	51 a 100 ft	21 a 50 ft	0 a 20 ft
Precipitación neta	< -10 in	-10 a +5 in	+5 a +20 in	> +20 in
Permeabilidad del suelo	> 50% de arcilla	30% a 50% de arcilla	15% a 30% de arcilla	0 a 15 % de arcilla
Permeabilidad de la roca fresca	Impermeable	Relativamente impermeable	Relativamente permeable	Muy permeable
Profundidad a la roca fresca	> 60 ft	31 a 60 ft	11 a 30 ft	0 a 10 ft
<b>Características de los residuos</b>				
Toxicidad	Nivel 0 del SAX o NEFPA	Nivel 1 del SAX o NEFPA	Nivel 2 del SAX o NEFPA	Nivel 3 del SAX o niveles 3 o 4 del NEFPA
Radioactividad	< niveles de fondo	1 a 3 veces los valores de fondo	3 a 5 veces los valores de fondo	+ de 5 veces los valores de fondo
Persistencia	Componentes fácilmente biodegradables	Fuertes cadenas de hidrocarburos	Forma anillos y es sustituido por otros componentes	Metales, componentes policíclicos hidrocarburos halogenados
Ignibilidad	Punto de ignición > 200°F o nivel 0 NEFPA	Punto de ignición de 140°F a 200°F o nivel 1 NEFPA	Punto de ignición de 80°F a 140°F o nivel 2 NEFPA	Punto de ignición de < 80°F o niveles 3 ó 4 NEFPA

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

Corrosividad	pH de 6 a 9	pH de 5 a 6 ó 9 a 10	pH de 3 a 5 ó 10 a 12	pH de 1 a 3 ó 12 a 14
Solubilidad	Insoluble	ligeramente insoluble	Soluble	Muy soluble
Volatilidad	Presión de vapor < 0.1 mm Hg	Presión de vapor de 0.1 a 25 mm Hg	Presión de vapor de 25 a 78 mm Hg	> 78 mm Hg
Estado físico	Sólido	Lodoso	Líquido	Gas
<b>Prácticas de manejo de residuos</b>				
Seguridad del sitio	Cerca con candados	Guardia de seguridad pero sin cerca	Localización remota o cerca rota	Sin barreras
Cantidad de residuo peligroso	0 a 250 tons	251 a 1000 tons	1001 a 2000 tons	> 2000 tons
Cantidad total de residuos peligrosos	0 a 10 acres ft	11 a 100 acres ft	101 a 250 acres ft	> 250 acres ft
Incompatibilidad de residuos	No se presentan residuos incompatibles	Presentes pero no poseen un peligro	Presentes y poseen un peligro a futuro	Presentes y poseen un inmediato peligro
Usa cubiertas	Arcilla u otra cubierta resistente a componentes orgánicos	Cubierta sintética o concreto	Asfalto-cubierta en la base	No usa cubierta
Uso de sistemas de colección de lixiviados	Adecuado sistema de tratamiento y colección de lixiviados	Colección y llama controlada	Ventilación y tratamiento inadecuado	Sin colección sin tratamiento
Uso y condiciones del contenedor	Se usan contenedores y parece en buenas condiciones	Los contenedores son usados pero tiene pocas fugas	Los contenedores son usados pero tiene algunas fugas	No usa contenedores

Tabla 63. Evaluación de factores y escalas para la metodología de puntuación de sitios.

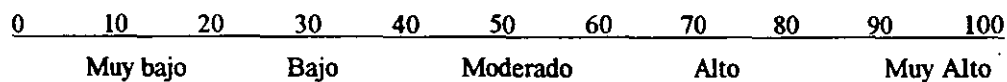
Ejemplo de posibles situaciones	Asignación de puntuación sugerida
<b>Receptores (50 puntos máximo)</b>	
Sitio usado por residentes cercanos, especialmente niños (por ejemplo un sitio puede estar lejos y/o cercado, pero puede ser utilizado comúnmente por niños como área de juego o por adultos)  Tipo de construcciones cercanas (escuelas vs almacén)  Presencia de suministros de agua superficiales, acuíferos o áreas de recarga de acuíferos cercanas al sitio  Tipo de usos de suelo adyacentes (lecherías, plantas empacadoras de alimentos y plantas de tratamiento de aguas son casos extremos)  Presencia de fuentes de recursos naturales económicamente importantes (tierras agrícolas, criaderos de pescados)  Presencia de rutas de transporte importantes   Población residencial con más de 100 gentes en 1000ft	0 a 4 puntos si es usado ocasionalmente por adultos, 4 a 10 puntos si es usado regularmente por adultos, de 10 a 20 puntos si es usado regularmente por niños  0 a 6 puntos para construcciones de uso público (tiendas de auto servicio), 5 a 15 puntos para escuelas y hospitales  0 a 30 puntos dependiendo de la proximidad de suministros de agua potable y la extensión en la cual es usada.  0 a 10 puntos para uso recreacional, 10 a 30 puntos para usos de comida o relacionadas al agua.  0 a 20 puntos dependiendo del número de gentes afectada.  0 a 2 puntos para ferrocarriles, 2 a 6 puntos para carreteras y 4 a 10 puntos para rutas peatonales y vías para bicicletas.  1 a 10 puntos por 25 o más gentes
<b>Rutas (25 puntos máximo)</b>	
Susceptibilidad erosionar y producir avenidas, e inestabilidad de pendientes   Actividad sísmica	0 a 4 puntos si es un problema potencial, 4 a 8 puntos si es un problema moderado, 8 a 12 puntos si es un problema severo.  0 a 10 puntos dependiendo de su susceptibilidad a efectos adversos.
<b>Características de los residuos (20 puntos máximo)</b>	

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

Sustancias que son cancerígenas, teratogénas o mutagénas Algunos niveles altos de residuos radiactivos  Sustancias con un alto potencial de bioacumulación Sustancias que son infecciosas	4 puntos por sustancia  5 puntos si es mínima la cantidad, 15 puntos si son cantidades significativas 2 puntos por sustancia 0 a 5 puntos para residuos que contienen sustancias conocidas transmisible patógenas dependiendo de la potencialidad del residuo.
<b>Prácticas de manejo de residuos (30 puntos máximo)</b>	
No hay disciplina o medidas de seguridad del personal en sitios activos  Incineradores abiertos (sitios activos)  Sitio abandonado  Residuos sin mapeo o registro  Fuentes de calor o líneas de corriente cercanas a áreas con residuos explosivos o inflamables < 18 in de cubierta sobre rellenos sanitarios inactivos   < 6 in de cubierta diaria sobre rellenos sanitarios activos   Cantidad total de residuos > 250 acre-ft Cantidad total de residuos peligrosos > 2000 tons (2370 yardas cúbicas)	0 a 4 puntos dependiendo del número de personas y sus responsabilidades  0 a 10 puntos dependiendo de la regularidad, práctica y tipo de residuo incinerado  0 a 5 puntos dependiendo de las razones de su abandono  0 a 8 puntos dependiendo de la presencia de residuos incompatibles o peligrosos  0 a 8 puntos dependiendo de la proximidad y potencial de ignición.  0 a 4 puntos para problemas no aparentes, 4 a 8 puntos para bolsas de aire, 6 a 12 puntos para vapores peligrosos.  0 a 8 puntos dependiendo de la proximidad y potencial de ignición  0 a 2 puntos para problemas no aparentes, 2 a 4 puntos para bolsas de aire, 3 a 6 puntos para vapores peligrosos  1 a 15 puntos por 10 acre-ft 1 a 25 puntos por 4000 tons (4750 yardas cúbicas)

Tabla 64. Guía para el sistema de puntuación adicional en la metodología de puntuación de sitios.

Una vez evaluado y sumados la puntuación de los diferentes parámetros, se ubica el valor total del sitio en una escala, cuyo rango va de 0 a 100, de esta manera se puede obtener los niveles de riesgo potencial para un sitio.





BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Allen, L., T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Petty, and G. Hackett, 1985. DRASTIC: A Standar System for Evaluation Ground Water Pollution Potential Usin 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).
- Armenta Hernández M.A., Contribución a los Mecanismos de Transporte del Cromo en el Acuífero de León Gto., Tesis Doctorado, Instituto de Geofísica-UNAM, 1992.
- Armenta 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 Geofisica-UNAM, 1992.
- Foster, Stephen and Hirata, Ricardo, "Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas". Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 1991, 81 pp.
- Kufs, C., D. Twedell, S. Paige, R. Wetzel, P. Spooner, R. Colonna, y M. Kilpatrick, 1980. "Ratin of the Hazard Potencial of Waste Disposal Facilities" en Proceeding of the National Conference on Manegement of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, (Silver Spring, MD: Hazardous Material Control Research Institute.), pp30-41.
- 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: Ronneseth, K.° Wei, M. and Gallo, M., 1994 Evaluating 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).
- oytek, J. ; "Aplication of Downhole Geophysical Methods in Ground Water Monitoring"; The Second Symposium on Aquifer Restauration and Ground Water Monitoring,; 1983; National Water Well Association, Worthington, ohio, pp. 276-278. (original no consultado, citado en: Canter L., W. Knox, R. y Fairchild, D., M. (1988). Ground Water quality protection. Lewis Publisher, Inc. 562 p.
- Wilson Albert, R., "Enviromental Risk: Identification and Management, Lewis Publisher Inc., 1991.

## Potencial de migración en el agua subterránea de contaminantes

Compuesto	Mobilidad Potencial	Potencial de Migración
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

## INTRODUCCIÓN

El riesgo de contaminación acuífera 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 (Foster y Hirata, 1991)

En general 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.

El concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea fue introducido por el hidrogeólogo francés Margat en la década de los 60's y aunque inicialmente se le relacionaba solo a aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos de contaminación y calidad del agua. Se puede decir que la vulnerabilidad es una propiedad natural del sistema acuífero que depende de la susceptibilidad de este sea adversamente afectado por una carga contaminante, debido al impacto humano y/o natural (Vrba y Zapotec, 1994)

En otras palabras la vulnerabilidad del acuífero depende de la inaccesibilidad a la zona saturada y de la capacidad de atenuación de los estratos encima de esta zona. La capacidad de atenuación del medio puede ser el resultado de su retención física y la reacción química con contaminantes. Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero, se relacionan además con factores asociados a la fuente contaminante en el subsuelo como: 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 identificación de áreas susceptibles de variar la calidad del agua subterránea, debido a la interacción de características físico-químicas que aumentan o retardan el movimiento de contaminantes en el subsuelo.

En los últimos 30 años se han desarrollado varios métodos para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo ambiental, estos pueden ser de dos tipos:

1) Sistemas que utilizan tasas numéricas (Aquifer Vulnerability Index, Depth Recharge Aquifer Soil Topography Impact to vadose zone Conductivity hydraulic, Environmental Risk Inventory System, Site Rating Methodology).

2) Sistemas no numéricos, los cuales pueden usar números para ordenar el incremento de vulnerabilidad o clasificar como altamente vulnerables o menos vulnerables.

Algunos de estos métodos (ERIS) fueron desarrollados para obtener índices de impacto a los diferentes partes del medio ambiental (agua superficial, agua subterránea, aire, contacto directo al humano, fuego y explosión)

## ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS (AVI)

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran 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 total (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  $c$ , menor vulnerabilidad

Para construir el mapa de vulnerabilidad se necesitan las coordenadas del pozo en cuestión y se utiliza el  $\log c$  para cada pozo, se interpolan los valores de  $\log c$ . Esto da como resultado un zonamiento de resistencias hidráulicas, las cuales están directamente relacionadas con la vulnerabilidad

## ÍNDICE DRASTIC

El DRASTIC es un esquema de clasificación numérica desarrollado para evaluar la contaminación potencial del agua subterránea para un sitio dado. Este esquema de clasificación se basa en 7 factores escogido por un gran número de científicos geohidrologos en toda la unión americana. También los científicos establecieron pesos de relativa importancia así como una escala de puntuación para la clasificación para cada factor. Los pesos de cada factor son dados de manera general y cuando es aplicado a agroquímicos algunos de los pesos de los parámetros cambian. Las siglas de DRASTIC se deriva de 7 factores (Aller et al. 1985):

$D$  = profundidad al agua subterránea,  $R$  = recarga neta,  $A$  = medio acuifero,  $S$  = tipo de suelo

$T$  = topografía (pendiente),  $I$  = impacto a la zona vadosa,  $C$  = conductividad hidráulica del acuifero

La determinación del índice DRASTIC involucra multiplicar cada uno de los parámetros  $r$  por la puntuación de peso  $w$  asignado a cada parámetro y se suma el total, como se indica a continuación.

$$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = \text{Contaminación potencial}$$

Valores altos de la suma representan fuertes potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuifero. El valor de los pesos dados en las tablas 1 a 7 son dados para el índice general de DRASTIC

- 1 En la tabla 1 se presenta la escala de valores para profundidad del agua subterránea; el peso de importancia ( $Dw$ ) en DRASTIC de este parámetro es 5 puntos (Aller et al., 1985).
- 2 La tabla 2 contiene la clase de información para la recarga neta y su índice ( $Rw$ ) de DRASTIC es 4 puntos (Aller et al. op. cit.).
- 3 La tabla 3 muestra un esquema de rangos para la evaluación del medio acuifero. El peso de importancia de importancia para este factor en el índice ( $Aw$ ) de DRASTIC es de 3 puntos.
- 4 La información para la evaluación de tipo de suelo se incluye en la tabla 4, con su peso de importancia ( $Sw$ ) en el DRASTIC de 2 puntos (Aller et al. op. cit.).
- 5 La tabla 5 muestra los rangos de valores para topografía y su peso de importancia ( $Tw$ ) para este factor en el DRASTIC es de 1 puntos (Aller et al. op. cit.).
- 6 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 ( $Iw$ ) para este factor será de 5 puntos (Aller et al. op. cit.).
- 7 Finalmente la tabla 7 resume información pertinente para la conductividad hidráulica del factor acuifero, con su peso de importancia ( $Cw$ ) 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 (in)	(mm)	Clase
Recarga Neta  $Rw = 4$	0-2	0 - 50	1
	2-4	50 - 102.6	3
	4-7	102 - 178	6
	7-10	178 - 254	8
	> 10	> 254	9

Tabla 2 - Evaluación del factor de recarga neta en el DRASTIC



## VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO 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 estan 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 captacion 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 rodadas 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 captacion de fugas o en peligro de colapso	3

Tabla 8c - HRS de Pila de Residuos para transporte en agua superficial

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

<b>Relleno Sanitario</b>	<b>Peso</b>
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.*

<b>Confinamiento Superficial</b>	<b>Peso</b>
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.

<b>Contenedores</b>	<b>Peso</b>
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

<b>Pilas</b>	<b>Peso</b>
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.

	ERIS (F1)
FUENTES	RELLENO SANITARIO
AGUA SUPERFICIAL	0
AGUA SUBTERRÁNEA	0
CONTACTO DIRECTO	0
FUEGO/EXPLOSIÓN	1
HRS (MÁXIMO 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>	HRS VALOR	CAPACIDAD	ENTRENAMIENTO	EQUIPAMIENTO	DISCIPLINA	
F1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00046
TASA DE** CONVERSION	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

$$PCMRS = \text{CONDICIONES ACTUALES} * \text{VALOR DEL HRS} * \text{CAPACIDAD} * \text{ENTRENAMIENTO} * \text{EQUIPAMIENTO} * \text{DISCIPLINA} * 0.00046$$

$$PCMRS(F1) = (1 * 1 * 1 * 1 * 1 * 100) / 215625 = 0.00046$$

### 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

Canudad 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

Intervencion del terreno					
Promedio de la pendiente del terreno					
Facilidad de pendiente	< 3 %*	3 - 5 %	5 - 8 %	> 8 %	Pendiente del agua**
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 intervencion del terreno

\*Esta columna sera usada tanto para terrenos que tienen una pendiente < 3 % o 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

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

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 (n/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 fracturadas, 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 FISICO 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

VULNERABILIDAD DE ACUIFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

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 capaces de detonación o descomposición o reacción explosiva en condiciones normales de presión y temperatura. Incluye materiales 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; reaccion 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	
Berlio	
Limpiadores químicos	Calcio
Litio	
Potasio	
Sodio	
Pólvo 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

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

Grupo 3-A	Grupo 3-B
Alcoholes	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B
	Calcio
Agua	Litio
	Metales hidridos
	Potasio
	SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , SOCl <sub>2</sub> , PCl <sub>3</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	Residuos concentrados del Grupo 1-A o 1-B
Aldehidos	Residuos del Grupo 2-A
Hidrocarburos halogenados	
Hidrocarburos nitrados	
Hidrocarbonos no saturados	
Otros componentes reactivos orgánicos y solventes	
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 sulfúricas	
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	Acido acético y otros ácidos orgánicos
Cloruros	Concentrado de ácidos minerales
Residuos del Grupo 2-A	
Acido cromico	
Residuos del Grupo 4-A	
Hipocloritos	Otros residuos combustibles y flamables
Nitratos	
Acido nítrico	
Percloratos	
Permanganatos	
Peróxido	
Otros oxidantes fuertes	
Consecuencias potenciales: Fuego, explosión o reacciones violentas	

Tabla 24f - Materiales incompatibles del Grupo 6 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 químicos

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
IGNICION	0
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *2.22	0

Tabla 31.- Valor de ERIS normalizado vía 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  $i$ ,  $n$  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.*

$$\text{TMRS} = \text{Probabilidad de uso (para cada mecanismo de transporte)} \cdot \text{valor normalizado para cada ruta de transporte}$$

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

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

Peso = 3 Componentes altamente persistentes	Peso = 2, Componentes persistentes	Peso = 1, Componentes algo persistentes	Peso = 0, Componentes no persistentes
aldrin	acnaphthylene	acetylene dichloride	acetaldehyde
benzopyreno	strazne	beberac acid, methyl ester	acetic acid
benzothiazole	(diethyl) strazne	benzene	acetone
benzothioephene	bigrtai	benzene sulfonic acid	acetophenone
benzyl butyl phthalate	borneol	butyl benzene	benzoic acid
bromochlorobenzene	bromobenzene	butyl bromide	di-isobutyl carbinol
bromoform butanal	camphor	ε-caprolactam	docosane
bromophenyl phynyl ether	chlorobenzene	carbon-disulfide	eicosene
chlordan	1,2-bis-chloroethoxy ethane	o-cresol	ethanol
chlorohydroxy benzephenone	b-chloroethyl methyl ether	decane	ethylamine
bis-chlorosopropyl ether	chloromethyl ether	1,2-dichloroethane	hexadecane
m-chloronitrobenzene	chloromethyl ethyl ether	1,2-dimethoxy benzene	methanol
DDE	3-chloropyridine	1,3-dimethyl naphalene	methyl benzoate
DDT	di-4-butyl-p-benzoquinone	1,4-dimethyl phenol	3-methyl butanol
di bromobenzene	dichloroethyl ether	dioctyl adipate	methyl ethyl ketone
di butyl phthalate	dihydrocarvone	n-decane	2-methylpropanol
1,4-dichlorobenzene	dimethyl sulfoxide	ethyl benzene	octadecane
dichlorodifluoroethane	2,6-dinitrotoluene	2-ethyl-n-hexane	pentadecane
dieldrin	cis-2-ethyl-4-methyl-1,3-dioxolane	o-ethyltoluene	pentanol
diethyl phthalate	trans-2-ethyl-4-methyl-1,3-dioxolane	isodecane	propanol
di(2-ethylhexyl) phthalate	guaiacol	isopropyl benzene	propylamine
dihexyl phthalate	2-hydroxyadiponitrile	limonene	tetradecane
di-isobutyl phthalate	isoborone	methyl ester of lignocenic acid	n-tridecane
dimethyl phthalate	indene	methane	n-undecane
4,6-dinitro-2-aminophenol	isoborneol	2-methyl-5-ethyl pyndane	
dipropyl phthalate	isopropenyl-r-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-heptachloronorbonene	methylindene	nonane	
hexachlorobenzene	methylindene chloride	octane	
hexachloro-1,3-butadiene	nitroanisole	octyl chloride	
hexachlorocyclohexane	nitrobenzene	pentane	
hexachloroethane	1,1,2-trichloroethylene	phenyl benzoate	
methyl benzothiazole	trimethyl-nitro-hexahydrotriazine	phthalic anhydride	
pentachlorobiphenyl	isomer	propylbenzene	
pentachlorobiphenol		1-terpineol	
1,1,1,3-tetrachloroacetone		toluene	
tetrachlorophenyl		vinyl benzene	
thiomethylbenzothiazole		xylene	
trichlorobenzene			
trichloronaphenyl			
trichlorofluoromethane			
2,4,6-trichlorophenol			
triphenyl phosphate			
bromodichloromethane			
bromoform			
carbon tetrachloride			
chloroform			
chloromochloromethane			
di bromodichloroethane			
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> <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 hendas físicas después de continuas o repetidas en pequeños exposiciones, en periodos de días, meses o años</p>

Tabla 35.- Rangos de toxicidad SAX



**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 respiracion, mascara protectora, botas, guanics, vendas alrededor de las piernas, brazos, cintura. La superficie de la piel l no debe ser expuesta.
5. Unos cuanto soplidos del gas o vapor pueden causar la muerte. o el gas, vapor o liquido podria 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 persistencia				
Peso para toxicidad	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 - Matnz 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.

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

	PROBABILIDAD DE USO	ERIS FI	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.

RECEPTORES HUMANOS

Se hizo una evaluación de riesgo en receptores humanos, para cada una de las fuentes con cada uno de los mecanismos de transporte.

ERIS Agua Superficial-Receptor Humano

Los pesos para población por distancia se manejaron 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, bañearse)	6
Agua potable	9

Tabla 42.- Peso para uso de agua superficial

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN 11	0
POBLACION EN 12	0
POBLACION EN 13	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—Receptor Humano**

Los resultados de ERIS aguas subterráneas - blanco humano son resumidos en la tabla 45 y 46.

Uso del agua subterránea.	Peso
Sin uso (acuifero extremadamente salino, extremadamente baja producción)	0
Comercial, industrial o irrigación y otras fuentes de agua disponibles no usadas pero podrian 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 11	0
POBLACION EN 12	0.01
POBLACION EN 13	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—Receptor 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.

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

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 vía 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-Receptor humano para diferentes fuentes

**ERIS Contacto Directo—Receptor Humano**

El valor del ERIS esta en función del numero de personas como se ve en la tabla 49. Los datos de ERIS de contacto directo son dados en la tabla 50.

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.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION 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 —Receptor 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 I1	0
POBLACION EN I2	0
POBLACION EN I3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION EN DOS MILLAS	1
USO DEL SUELO	1
VALOR CRUDO TOTAL	2
VALOR NORMALIZADO X 12.5 *	25

Tabla 52.- Valores de ERIS vía 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.

### AMBIENTES SENSIBLES RECEPTORES

#### ERIS Ruta de Agua Superficial-Sensibilidad Ambiental

Los posibles ambientes sensibles (habitas 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 - ambientes sensibles receptores, 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 - ambientes sensibles receptores 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 habitats criticos.

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 habitats criticos	> 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 SANTARIO (F1)**

POBLACION ACTUAL	VALOR DE ERIS BLANCO HUMANO	CRS	BLANCO AMBIENTES SENSIBLES	RIESGO HUMANO	RIESGO AMBIENTAL	M.A.S
0.07	26.56	0	33.33	0	0	AGUA SUPERFICIAL
0.07	26.72	23.42		43.8		AGUA SUBTERRÁNEA
0.07	36.36	0	33.33	0	0	AIRE
0.07	33.33	0	33.33	0	0	AIRE
0.07	30.30	0	33.33	0	0	AIRE
0.07	20	0	33.33	0	0	CONTACTO DIRECTO
0.07	25	0	33.33	0	0	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.

**METODOLOGÍA DE PUNTUACIÓN DE SITIOS (SRM)**

La metodología de puntuación de sitios fue desarrollada para priorizar sitios de superfund en términos de acciones de remediación, en los Estados Unidos de Norteamérica (Kufs et al., 1980).

El SRM tiene tres elementos: (1) Sistema de Factor de Puntuación, (2) Sistema de puntuación adicional, (3) Sistema de marcación.

El primer término es usado para una puntuación inicial de un sitio de disposición de residuos, basado en una serie de 31 parámetros, a los cuales se le aplica un peso de acuerdo a los rangos considerados para cada uno, como se muestra en la tabla 63

Los 31 parámetros se dividen en 4 categorías de acuerdo a su enfoque: (1) receptores, (2) mecanismos de transporte, (3) características de los residuos y (4) prácticas en el manejo de residuos. Para cada factor se considera una escala de cuatro niveles (0 no presenta riesgo potencial a 3 que representa un alto riesgo potencial). Las escalas han sido definidas de tal manera que los factores de puntuación pueden ser evaluados típicamente sobre bases de información accesible en dependencias publicas o privadas, o datos obtenidos en visitas al sitio.

No todos los factores de puntuación se evalúan con la misma magnitud de impacto potencial ambiental. En consecuencia un valor numérico llamado multiplicador es asignado a cada factor de acuerdo con su relativa magnitud de impacto.

Los multiplicadores originalmente definidos se basaron en resultados de pruebas de campo. Estos valores son multiplicados por factores de puntuación apropiado, resultando valores para cada uno de los parámetros.



## VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

El sistema de puntuación adicional agrega factores especiales como facilidad de localización, diseño, operación que no puede ser manejada satisfactoriamente en los factores de puntuación.

Estos factores pueden presentar riesgo que pueden ser inusualmente serio, único del sitio o que no son evaluables por las escalas de puntuación, se pueden asignar puntos adicionales a cada categoría (Receptores, 50 puntos; Transporte, 25 puntos; Características de los residuos, 20 puntos; Practicas en el manejo de residuos, 30 puntos). En la tabla 64 se da una guía de aplicación del método.

Niveles de la escala de puntuación				
Factores de puntuación	0	1	2	3
	<b>Receptores</b>			
Población a 1000ft a la redonda	0	1 a 25	26 a 100	> 100
Distancia a pozos de agua potable	> 3 millas	1 a 3 millas	300ft a 1 milla	0 a 3000ft
Zona de uso del suelo	Completamente remota (no es aplicable)	Agrícola	Comercial /industrial	Residencial
Ambientes críticos	No hay ambientes críticos	Áreas naturales vírgenes	Pantanos planicies de inundación, áreas de reserva	Hábitats mayores o especies en peligro de extinción
<b>Rutas</b>				
Evidencias de contaminación	Sin contaminación	Evidencia indirecta	Comprobación positiva de observación directa	Comprobación positiva de análisis de laboratorio
Nivel de contaminación	Sin contaminación	Niveles bajos, niveles traza o desconocidos	Niveles moderados o niveles que no pueden ser percibidos en una visita pero pueden ser confirmados con análisis de laboratorio	Niveles altos o niveles altos que pueden ser percibidos durante una visita al sitio
Tipo de contaminación	Sin contaminación	Sólo contaminación del suelo	Contaminación de la biota	Aire, agua o contaminación de materia alimenticia
Distancia de agua superficiales cercanas	> 5 millas	1 a 5 millas	1001 ft a 1 milla	0 a 1000 ft
Profundidad al agua subterránea	> 100 ft	51 a 100 ft	21 a 50 ft	0 a 20 ft
Precipitación neta	< -10 in	-10 a +5 in	+5 a +20 in	> +20 in
Permeabilidad del suelo	> 50% de arcilla	30% a 50% de arcilla	15% a 30% de arcilla	0 a 15 % de arcilla
Permeabilidad de la roca fresca	Impermeable	Relativamente impermeable	Relativamente permeable	Muy permeable
Profundidad a la roca fresca	> 60 ft	31 a 60 ft	11 a 30 ft	0 a 10 ft
<b>Características de los residuos</b>				
Toxicidad	Nivel 0 del SAX o NEPPA	Nivel 1 del SAX o NEPPA	Nivel 2 del SAX o NEPPA	Nivel 3 del SAX o niveles 3 o 4 del NEPPA
Radioactividad	< niveles de fondo	1 a 3 veces los valores de fondo	3 a 5 veces los valores de fondo	+ de 5 veces los valores de fondo
Persistencia	Componentes fácilmente biodegradables	Fuertes cadenas de hidrocarburos	Forma anillos y es sustituido por otros componentes	Metales, componentes policíclicos hidrocarburos halogenados
Ignibilidad	Punto de ignición > 200°F o nivel 0 NEPPA	Punto de ignición de 140°F a 200°F o nivel 1 NEPPA	Punto de ignición de 80°F a 140°F o nivel 2 NEPPA	Punto de ignición de < 80°F o niveles 3 ó 4 NEPPA

**VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL**

Corrosividad	pH de 6 a 9	pH de 5 a 6 ó 9 a 10	pH de 3 a 5 ó 10 a 12	pH de 1 a 3 ó 12 a 14
Solubilidad	Insoluble	ligeramente insoluble	Soluble	Muy soluble
Volatilidad	Presión de vapor < 0.1 mm Hg	Presión de vapor de 0.1 a 25 mm Hg	Presión de vapor de 25 a 78 mm Hg	> 78 mm Hg
Estado físico	Sólido	Lodoso	Líquido	Gas
<b>Prácticas de manejo de residuos</b>				
Seguridad del sitio	Cerca con candados	Guardia de seguridad pero sin cerca	Localización remota o cerca rota	Sin barreras
Cantidad de residuo peligroso	0 a 250 tons	251 a 1000 tons	1001 a 2000 tons	> 2000 tons
Cantidad total de residuos peligrosos	0 a 10 acres ft	11 a 100 acres ft	101 a 250 acres ft	> 250 acres ft
Incompatibilidad de residuos	No se presentan residuos incompatibles	Presentes pero no poseen un peligro	Presentes y poseen un peligro a futuro	Presentes y poseen un inmediato peligro
Usa cubiertas	Arcilla u otra cubierta resistente a componentes orgánicos	Cubierta sintética o concreto	Asfalto-cubierta en la base	No usa cubierta
Uso de sistemas de colección de lixiviados	Adecuado sistema de tratamiento y colección de lixiviados	Colección y llama controlada	Ventilación y tratamiento inadecuado	Sin colección sin tratamiento
Uso y condiciones del contenedor	Se usan contenedores y parece en buenas condiciones	Los contenedores son usados pero tiene pocas fugas	Los contenedores son usados pero tiene algunas fugas	No usa contenedores

Tabla 63. Evaluación de factores y escalas para la metodología de puntuación de sitios.

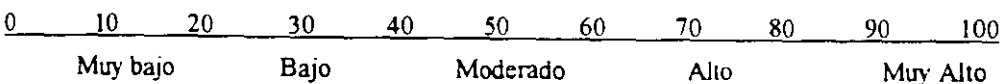
Ejemplo de posibles situaciones	Asignación de puntuación sugerida
<b>Receptores (50 puntos máximo)</b>	
Sitio usado por residentes cercanos, especialmente niños (por ejemplo un sitio puede estar lejos y/o cercado, pero puede ser utilizado comúnmente por niños como area de juego o por adultos)  Tipo de construcciones cercanas (escuelas vs almacén)  Presencia de suministros de agua superficiales, acuíferos o areas de recarga de acuíferos cercanas al sitio  Tipo de usos de suelo adyacentes (lechernas, plantas empacadoras de alimentos y plantas de tratamiento de aguas son casos extremos)  Presencia de fuentes de recursos naturales económicamente importantes (tierras agrícolas, criaderos de pescados)  Presencia de rutas de transporte importantes   Población residencial con más de 100 gentes en 1000ft	0 a 4 puntos si es usado ocasionalmente por adultos, 4 a 10 puntos si es usado regularmente por adultos, de 10 a 20 puntos si es usado regularmente por niños  0 a 6 puntos para construcciones de uso publico (tiendas de auto servicio), 5 a 15 puntos para escuelas y hospitales  0 a 30 puntos dependiendo de la proximidad de suministros de agua potable y la extensión en la cual es usada.  0 a 10 puntos para uso recreacional, 10 a 30 puntos para usos de comida o relacionadas al agua  0 a 20 puntos dependiendo del número de gentes afectada.  0 a 2 puntos para ferrocarriles, 2 a 6 puntos para carreteras y 4 a 10 puntos para rutas peatonales y vías para bicicletas.  1 a 10 puntos por 25 o más gentes
<b>Rutas (25 puntos máximo)</b>	
Susceptibilidad erosionar y producir avenidas, e inestabilidad de pendientes  Actividad sísmica	0 a 4 puntos si es un problema potencial, 4 a 8 puntos si es un problema moderado, 8 a 12 puntos si es un problema severo.  0 a 10 puntos dependiendo de su susceptibilidad a efectos adversos.
<b>Características de los residuos (20 puntos máximo)</b>	

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

Sustancias que son cancerígenas, teratogénicas o mutagénicas	4 puntos por sustancia
Algunos niveles altos de residuos radiactivos	5 puntos si es mínima la cantidad, 15 puntos si son cantidades significativas
Sustancias con un alto potencial de bioacumulación	2 puntos por sustancia
Sustancias que son infecciosas	0 a 5 puntos para residuos que contienen sustancias conocidas transmisible patógenas dependiendo de la potencialidad del residuo.
<b>Prácticas de manejo de residuos (30 puntos máximo)</b>	
No hay disciplina o medidas de seguridad del personal en sitios activos	0 a 4 puntos dependiendo del número de personas y sus responsabilidades
Incineradores abiertos (sitios activos)	0 a 10 puntos dependiendo de la regularidad, práctica y tipo de residuo incinerado 0 a 5 puntos dependiendo de las razones de su abandono
Sitio abandonado	0 a 8 puntos dependiendo de la presencia de residuos incompatibles o peligrosos
Residuos sin mapeo o registro	0 a 8 puntos dependiendo de la proximidad y potencial de ignición. 0 a 4 puntos para problemas no aparentes, 4 a 8 puntos para bolsas de aire, 6 a 12 puntos para vapores peligrosos.
Fuentes de calor o líneas de corriente cercanas a áreas con residuos explosivos o inflamables	0 a 8 puntos dependiendo de la proximidad y potencial de ignición
< 18 in de cubierta sobre rellenos sanitarios inactivos	0 a 2 puntos para problemas no aparentes, 2 a 4 puntos para bolsas de aire, 3 a 6 puntos para vapores peligrosos 1 a 15 puntos por 10 acre-ft
< 6 in de cubierta diaria sobre rellenos sanitarios activos	1 a 25 puntos por 4000 tons (4750 yardas cúbicas)
Cantidad total de residuos > 250 acre-ft	
Cantidad total de residuos peligrosos > 2000 tons (2370 yardas cúbicas)	

Tabla 64. Guía para el sistema de puntuación adicional en la metodología de puntuación de sitios.

Una vez evaluado y sumados la puntuación de los diferentes parámetros, se ubica el valor total del sitio en una escala, cuyo rango va de 0 a 100, de esta manera se puede obtener los niveles de riesgo potencial para un sitio.



BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Aller, L., T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Petty, and G. Hackett, 1985, DRASTIC: A Standar System for Evaluation Ground Water Pollution Potential Usin 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, Insituto 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.
- Kufs, C., D. Twedell, S. Paige, R. Wetzal, P. Spooner, R. Colonna, y M. Kilpatrick, 1980. "Rain of the Hazard Potencial of Waste Disposal Facilities" en Proceeding of the National Conference on Manegement of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, (Silver Spring, MD: Hazardous Material Control Research Institute.), pp30-41.
- 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: Ronneseth, K. Wei, M. and Gallo, M., 1994 Evaluating 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).
- Voytek, J. : "Aplicacion of Downhole Geophysical Methods in Ground Water Monitoring"; The Second Symposium on Aquifer Restauration and Ground Water Monitoring., 1983, National Water Well Association, Worthington, Ohio. pp. 276-278 (original no consultado, citado en Canter L., W. Knox, R. y Fairchild, D., M. (1988). Ground Water quality protecuon Lewis Publisher, Inc. 562 p.
- Wilson Albert, R., "Enviromental Risk: Identufication and Management, Lewis Publisher Inc., 1991.

---

---

**X** Congreso Nacional de Geoquímica  
16-20 de octubre, 2000, Temixco, Mor.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA, UNAM**  
**INSTITUTO NACIONAL DE GEOQUÍMICA, A.C**

Sobretiro del trabajo

**GEOQUÍMICA AMBIENTAL DEL CROMO**

M. A. Armienta H

*Actas INAGLQ* (2000), vol 6, no 1, 41-51

## GEOQUÍMICA AMBIENTAL DEL CROMO

M. A. Armienta H

Instituto de Geofísica, UNAM. México D.F. 04510, México. E-mail: victoria@tonatiuh.igeofcu.unam.mx

### 1. Introducción

El cromo es un metal necesario para el metabolismo de plantas y animales. Sin embargo, en concentraciones elevadas es dañino para la salud. Este elemento se encuentra en el ambiente principalmente en dos estados de oxidación. Cr(III) y Cr(VI), cada uno tiene propiedades tóxicas y comportamiento geoquímico ambiental diferente. El Cr(VI) es la forma más móvil y nociva del elemento (alrededor de 100 a 1000 veces más tóxica que el cromo trivalente), mientras que el Cr(III) es necesario para el metabolismo de la glucosa (Mertz, 1974, Barrett et al., 1985; Richard y Bourgh, 1991). La ingestión de pequeñas dosis de Cr(VI) durante largo tiempo puede provocar erosión y color amarillo de los dientes, irritación gastrointestinal, úlcera gastroduodenal, hepatitis y nefritis. La vía más expedita de ingreso del cromo al organismo es la respiratoria. La inhalación de polvos de cromo hexavalente es capaz de ocasionar irritación en las mucosas, afección nasofaríngea, faringitis, perforación del tabique nasal, laringitis, bronquitis crónica, fibrosis y cáncer pulmonar. El contacto de compuestos de Cr(VI) con la piel induce alergias dérmicas, dermatitis, necrosis y corrosión dérmica (Galvao y Corey, 1987; Hamilton and Wetterhan, 1988; Kotás y Stasicka, 2000).

La mayoría de las rocas y suelos contienen pequeñas cantidades de cromo. El mineral más común es la cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), en la cual el metal se presenta en su forma trivalente. En la Tabla 1 se listan los principales minerales de cromo. En su estado natural los minerales de cromo son muy insolubles, pero los procesos de intemperización y la acción bacteriana pueden incrementar su solubilidad y por lo tanto influir en su movilidad ambiental.

Las concentraciones de cromo en las rocas ígneas aumentan conforme el contenido de sílice disminuye y muestran una fuerte correlación positiva con los contenidos de níquel y magnesio. El cromo en estas rocas se presenta principalmente en la cromita. Las rocas sedimentarias arcillosas también tienden a concentrar grandes cantidades de cromo, principalmente las fosforitas, bauxita y minerales lateríticos de hierro, formados por la alteración de rocas ultrabásicas (Mertz, 1974). En la tabla 2 se presentan los contenidos usuales de cromo en diferentes tipos de rocas.

Durante el intemperismo de las rocas, el cromo tiende a oxidarse produciendo aniones complejos solubles. De esta manera aunque las concentraciones usuales en el suelo varían de 10 a 150 mg/kg, algunos suelos pueden alcanzar contenidos altos de cromo, principalmente aquellos derivados de basaltos o serpentinadas.

Tabla 1 Principales Minerales de Cromo

Cromita	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$
Donatita	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Zn})(\text{Cr}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2\text{O}_4$
Eskolaita	$\text{Cr}_2\text{O}_3$
Guyanaita	$\text{CrOOH}$
Bracewalita	$\text{CrOOH}$
Grimaldiita	$\text{CrOOH}$
Stictita	$\text{Mg}_{18}\text{Cr}_6(\text{OH})_{48}[\text{CO}_3]_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Barbertonita	$\text{Mg}_6\text{Cr}_2(\text{OH})_{16}[\text{CO}_3] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Daubr�elita	$\text{FeCr}_2\text{S}_4$
Brezina�ita	$\text{Cr}_3\text{S}_4$
Heideita	$(\text{Fe}, \text{Cr})_{1+x}(\text{Ti}, \text{Fe})_2\text{S}_4$
Carlsbergita	$\text{CrN}$
Tarapac�ita	$\text{K}_2[\text{CrO}_4]$
Lopezita	$\text{K}_2[\text{Cr}_2\text{O}_7]$
Cromatita	$\text{Ca}[\text{CrO}_4]$
Croco�ita	$\text{Pb}[\text{CrO}_4]$
Santan�ita	$\text{Pb}_{11}\{\text{CrO}_4\}\text{O}_{12}$
Vauquelinita	$\text{Pb}_2\text{Cu}[\text{CrO}_4][\text{PO}_4]\text{OH}$
Fornacita	$(\text{Pb}, \text{Cu})_3[(\text{Cr}, \text{As})\text{O}_4]_2(\text{OH})$
Hemihedrita	$\text{ZnF}_2\text{Pb}_{10}[\text{CrO}_4]_6[\text{SiO}_4]_2$
Knorringita	$\text{Mg}_3\text{Cr}_2[\text{SiO}_4]_3$
Uvarovita	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2[\text{SiO}_4]_3$
Ureyita	$\text{NaCr}[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Krinovita	$\text{NaMg}_2\text{Cr}[\text{Si}_3\text{O}_{10}]$
Kotchube�ita	$(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6[(\text{Si}, \text{Al}, \text{Cr})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$

(A partir de Nriagu, 1988)

El cromo se encuentra en concentraciones comprendidas entre 0.01 y 0.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la atmósfera. La contaminación de origen industrial por fábricas de cemento, asbesto y por los gases procedentes de vehículos con motor de combustión puede elevar las concentraciones de cromo en el aire hasta valores peligrosos.

En el agua las concentraciones naturales de cromo son bajas. Normalmente en los ríos varía de 0.1 a 5  $\mu\text{g}/\text{l}$ , en los océanos es inferior a 5  $\mu\text{g}/\text{l}$  (Mertz, 1974; Galvao y Corey, 1987).

En el ambiente ocupacional, las industrias que presentan mayor riesgo de contaminación ambiental por la presencia de cromo en sus procesos y residuos son las del cemento, colorantes, construcción, curtidurías, galvanoplastia, material fotográfico, material refractario, metalurgia, y

pinturas (principalmente las anticorrosivas). Su uso en las plantas hidroeléctricas es otra fuente de contaminación ambiental (Galvao y Corey, 1987).

Tabla 2 Concentraciones de cromo en diferentes tipos de rocas

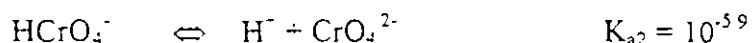
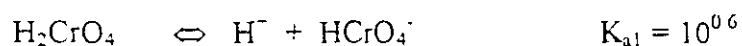
Tipo de Roca	Concentración Usual (ppm)
Ultramáficas y serpentinas	1100-3400
Basaltos y Gabros	60-420
Andesitas, dioritas	10-200
Rocas graníticas	2-60
Calizas y dolomitas	11 (promedio)
Areniscas	35 (promedio)
Arcillas y lutitas	1-200

(A partir de Mertz, 1974)

## 2. Química del cromo

El cromo existe en varios grados de oxidación con diferente grado de estabilidad ( $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^0$ ,  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{4+}$ ,  $\text{Cr}^{5+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$ ) En la naturaleza se encuentra principalmente como Cr(III) y Cr(VI)

El Cr(VI) es fuertemente oxidante y existe solamente como especies oxo en forma de iones cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) y dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ). En el agua los iones cromato pueden formar las especies acidas  $\text{H}_2\text{CrO}_4$  y  $\text{HCrO}_4^-$  con las siguientes constantes de acidez.



Cuando las concentraciones de Cr(VI) exceden a  $10^{-2}$  M el ión  $\text{HCrO}_4^-$  dimeriza y forma el ión dicromato



En el agua el  $\text{Cr}^{3+}$  se encuentra rodeado por dos esferas de coordinación ligadas fuertemente entre sí. La hidrólisis del Cr(III) produce las especies mononucleares  $\text{CrOH}^{2+}$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$  y  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , existen también las especies polinucleares  $\text{Cr}_2(\text{OH})_2^{4+}$  y  $\text{Cr}_3(\text{OH})_4^{5+}$  (Baes y Mesmer, 1976), aunque en condiciones ambientales la formación de complejos polinucleares está poco favorecida. El  $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot \text{ac}$  es un compuesto con baja solubilidad en el rango de pH 5.5 a 12. Las formas dominantes del Cr(III) en el ambiente son los complejos  $\text{CrOH}^{2+} \cdot \text{ac}$  y  $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot \text{ac}$ , (Richard y Bourg, 1991, Kotás y Stasicka, 2000).



El Cr(III) forma complejos octaédricos hexacoordenados con una amplia variedad de ligandos orgánicos e inorgánicos, en los cuales el punto de unión puede ser el átomo de oxígeno (agua, ácidos carboxílicos, fosfatos), de nitrógeno (amoníaco, piridinas, aminas) o de azufre (grupos sulfhidrilo) del ligando, puede también formar complejos con halogenuros y sulfato. La mayoría de los equilibrios se establecen lentamente, los compuestos son no lábiles y el intercambio de los ligandos es lento (Cotton y Wilkinson, 1978)

### 3. Hidrogeoquímica

El potencial de óxido-reducción (Eh) y el pH del agua determinan las especies en que se encuentre este elemento. A los valores de pH comunes en las aguas naturales (6 a 8) el Cr(VI) en forma de  $\text{HCrO}_4^-$  y  $\text{CrO}_4^{2-}$  predomina en condiciones oxidantes, es decir a valores altos de Eh, y el Cr(III) en forma de  $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$  y de  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  en condiciones más reductoras, esto es a valores menores de Eh. Los equilibrios en solución acuosa para las diferentes especies del cromo en función del Eh y pH del agua han sido graficados por Pourbaix (1963), Hem (1977) y Kotás y Stasicka (2000). Sin embargo, para aplicar este tipo de diagramas a los medios naturales se debe considerar la cinética de los equilibrios

El Cr(III) precipita en el rango de pH de las aguas naturales, en forma de  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  con una Kps de  $10^{-30}$ . En presencia de Fe(III) se puede formar el precipitado  $(\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x})(\text{OH})_3$ , donde x es la fracción mol de Cr, cuyo producto de solubilidad es menor al correspondiente al  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (Rai et al., 1987, Sass y Rai, 1987)

Por otro lado, el Cr(III) puede formar complejos con sustancias orgánicas presentes en las aguas superficiales y subterráneas como resultado de procesos naturales o de contaminación. La formación de complejos cuando los ligandos son moléculas discretas o iones incrementa la solubilidad del Cr(III). Sin embargo, si se liga a sistemas macromoleculares tales como los ácidos húmicos, los complejos formados son relativamente inmóviles (Kotás y Stasicka, 2000).

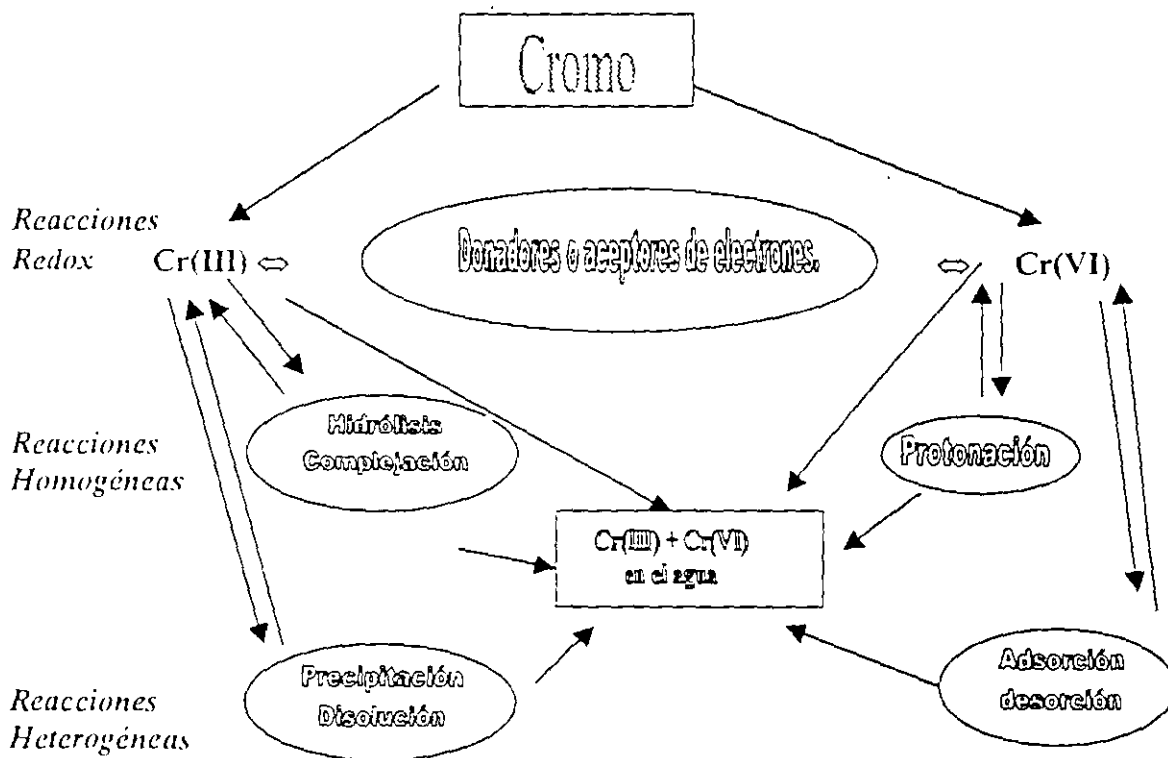
El cromo puede cambiar su grado de oxidación a través de reacciones de óxido-reducción con otras especies presentes comúnmente en el agua. El Cr(VI) puede reducirse principalmente al reaccionar con Fe(II), materia orgánica, y especies del azufre. El Cr(III) puede oxidarse al reaccionar con  $\text{O}_2$  y  $\text{MnO}_2$  (Schroeder y Lee, 1975; Bartlett y James, 1979; Kotás y Stasicka, 2000). Se ha encontrado que la velocidad de reducción del Cr(VI) con ácido fúlvico se incrementa fuertemente al decrecer el pH (Wittbrodt y Palmer, 1995). La reducción de Cr(VI) con ácido mandélico es catalizada por el  $\text{TiO}_2$ , para lo cual se requiere la adsorción del Cr(VI) sobre el óxido de titanio (Deng y Stone, 1996). Por otro lado, se ha observado que la oxidación del Cr(III) en presencia de  $\text{MnO}_2$  no se modifica por las concentraciones de  $\text{O}_2$  y que su velocidad no es lineal con el tiempo en soluciones ácidas, mientras que en soluciones ligeramente ácidas y básicas, la oxidación del Cr(III) es muy lenta y está limitada por la baja solubilidad del  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (Eary y Rai, 1987)

Tanto el Cr(III) como el Cr(VI) pueden adsorberse en material aluvial, en arcillas, así como en óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, presentes en los acuíferos (James y Bartlett, 1983; Stollenwerk y Grove, 1985; Rai et al., 1987; Zachara et al., 1987; Koppelman y Dillard, 1980). El comportamiento de la adsorción con el pH es diferente para ambas especies de cromo. La adsorción del Cr(VI) decrece al aumentar el pH del agua debido a la disminución en la carga positiva del medio adsorbente. Por otro lado la adsorción de Cr(III) aumenta con el contenido de materia orgánica del suelo y a valores más básicos de pH ya que las superficies se cargan más negativamente (Calder, 1988; Richard y Bourg, 1991). La adsorción del Cr(VI) es una reacción de complejación entre los cromatos acuosos y los sitios hidroxilo-específicos, cada complejo superficial de Cr(VI) ocupa 3-4 sitios superficiales de hidroxilo (Richard y Bourg, 1991). A mayor fuerza iónica decrece la adsorción del cromato lo que se debe a la disminución de la actividad del  $\text{CrO}_4^{2-}$ , a la reducción de la atracción coulombica por las especies de cromato en las superficies sólidas o a la presencia de otros aniones que compiten con el cromato (Richard y Bourg, 1991).

La movilidad del cromo en el agua subterránea depende de su solubilidad y de su tendencia a adsorberse por el material acuífero. Estos factores a su vez son función de las características químicas del agua y del material sólido del acuífero (Calder, 1988).

### 3.1 Ciclo Hidrogeoquímico del cromo

Los diferentes procesos que se producen en el agua se pueden resumir en el siguiente ciclo hidrogeoquímico del cromo



(Modificado de Richard y Bourg, 1991)

#### 4. Geoquímica del cromo en el suelo

La principal fuente del cromo en los suelos es el intemperismo del material parental. La especie principal del cromo es el  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ac o  $\text{Cr}(\text{III})$  adsorbido. La forma dominante del  $\text{Cr}(\text{III})$  depende del pH; los productos de hidrólisis que se forman son especies catiónicas, las cuales se adsorben fácilmente en arcillas (Bartlett y Kimble, 1976; Kotás y Stasicka, 2000). La formación de complejos de  $\text{Cr}(\text{III})$  con ácidos húmicos lo hace insoluble y lo inmoviliza en el suelo. En contraste, ligandos móviles tales como el ácido cítrico, ácido dietilen-triamino-pentaacético y ácido fúlvico forman complejos solubles de  $\text{Cr}(\text{III})$ , que posibilitan su movimiento y oxidación a  $\text{Cr}(\text{VI})$  (James, 1996). Por otro lado, la solubilidad de estos complejos disminuye a medida que el pH aumenta (Bartlett y James, 1988).

En condiciones neutras a alcalinas, el  $\text{Cr}(\text{VI})$  existe principalmente en forma soluble aunque también puede estar como cromatos moderadamente solubles. En suelos más ácidos el  $\text{HCrO}_4^-$  es la forma predominante. Los iones  $\text{CrO}_4^{2-}$  y  $\text{HCrO}_4^-$  son las formas más móviles del cromo, las cuales pueden ser fácilmente absorbidas por las plantas así como lixiviarse a capas profundas del suelo. Sin embargo, ciertas proporciones de  $\text{Cr}(\text{VI})$  pueden ligarse al suelo en función de la composición y del pH. Como ya se ha señalado, el ion  $\text{CrO}_4^{2-}$  puede adsorberse en goetita,  $\text{FeO}(\text{OH})$ , óxidos de aluminio y otros coloides del suelo cuya superficie esté cargada positivamente (Richard y Bourg, 1991).

El cromo puede oxidarse, reducirse y formar complejos constituyendo un ciclo geoquímico en el suelo, en el cual intervienen los óxidos de manganeso, los óxidos de hierro, las especies de azufre y los compuestos orgánicos (Kotás y Stasicka, 2000). Se ha encontrado que el  $\text{Cr}(\text{VI})$  se puede reducir a  $\text{Cr}(\text{III})$  solamente en la capa superficial del suelo y que la velocidad de reducción depende del pH y del contenido de ácidos húmicos. No se ha observado oxidación significativa del  $\text{Cr}(\text{III})$  en suelos arenosos y chernozem (Prokisch et al., 1997).

El pH del suelo determina tanto la especiación del cromo como la carga de las superficies con las cuales reaccione. Al aumentar el pH del suelo decrece la adsorción de aniones conforme disminuye la carga positiva y también disminuye la remoción de  $\text{Cr}(\text{VI})$  por reducción. La formación de complejos también influye en la adsorción de  $\text{Cr}(\text{III})$ ; se ha encontrado que la cantidad del ion acomplejado que se adsorbe en clorita, caolinita e illita depende del tipo de arcilla así como del ligante. El complejo, una vez adsorbido sufre un proceso de hidrólisis en el cual se intercambia el ligante por moléculas de agua, (Koppelman y Dillard, 1980).

La absorción del cromo por los vegetales que se desarrollan en suelos contaminados depende de diversos factores como las características del suelo, la concentración y especiación del cromo en la solución del suelo, el transporte del metal de la superficie de la raíz hacia la raíz, y la translocación de la raíz al tallo y a otras partes de la planta (Alloway, 1995).

## 5. Geoquímica ambiental del cromo en León, Guanajuato

A partir de la detección de concentraciones altas de cromo en algunos pozos del valle de León, Guanajuato se inició a una serie de estudios en el Instituto de Geofísica, UNAM, para identificar las fuentes del contaminante y estudiar su comportamiento ambiental. Se desarrolló un programa interdisciplinario que incluyó el muestreo y análisis químicos de parámetros fisico-químicos, Cr total y Cr(VI) de pozos ubicados en todo el valle, además de un reconocimiento geológico, estudio hidrogeológico e interpretación hidrogeoquímica, lo que posibilitó determinar las fuentes y los niveles de cromo aportados por cada una de ellas. Los análisis de cromo se efectuaron por espectrofotometría de absorción atómica para cromo total y por espectrofotometría uv-visible a través de formación de un complejo con difenil-carbocida para Cr(VI). El análisis de algunas muestras se efectuó también por polarografía impulsional. La presencia de cromo se ha debido tanto a la influencia humana como a procesos geoquímicos naturales. El uso de compuestos de cromo en el curtido de pieles en más de 600 pequeñas empresas de León, hacía suponer que las aguas residuales de las curtidurías ocasionaban la contaminación del agua subterránea. El desarrollo de la investigación permitió rechazar esta hipótesis e identificar el origen real del cromo en el sistema acuifero. Al suroeste del valle se localizó un área aproximadamente de 8 km<sup>2</sup> con altas concentraciones de Cr(VI), que alcanzaron en uno de los pozos 50 mg/L, en el entorno de una fábrica de cromatos (QC). Las características químicas generales del agua y el análisis químico de los materiales residuales producidos, permitieron identificar a la lixiviación de uno de los residuos como el origen de la contaminación en esta área. Por otro lado, al sur de la ciudad de León se detectaron concentraciones hasta 0.04 mg/L de Cr(VI), en pozos ubicados en un área aproximada de 180 km<sup>2</sup>. Estos niveles han resultado de la lixiviación e infiltración de las cenizas de las ladrilleras diseminadas en esta parte del valle, las cuales se producían al quemar el cuero residual que se utilizaba como combustible. Debido al proceso de curtido, los cueros presentan cromo, principalmente Cr(III), pero al quemarse, el cromo se oxida a Cr(VI) lo que incrementa la movilidad de este elemento. La acción del riego y la lluvia sobre las cenizas posibilitó su infiltración hacia el acuifero. Finalmente el reconocimiento geológico, el análisis de las rocas ultramáficas que afloran al este del valle, y las características hidrogeoquímicas generales del agua, permitieron identificar a los procesos de intemperización de estas rocas como el origen del cromo (hasta 0.015 mg/L de Cr(VI)) en el agua subterránea de sus inmediaciones (Armienta et al., 1993, Rodríguez y Armienta, 1995).

Para conocer los procesos geoquímicos del cromo en el área con mayores concentraciones se efectuó una investigación que incluyó la perforación de piezómetros de 30 metros de profundidad y la obtención de los núcleos resultantes sin utilizar lodos que pudieran alterar las muestras. Los piezómetros se ubicaron en sitios para los cuales se esperaba diferente grado de influencia de la fuente contaminante (residuos de la fábrica QC). En los núcleos se efectuó el análisis de cromo total, Cr(VI), Fe y Mn a intervalos de 60 cm. Se determinaron las concentraciones de Cr(VI) y de Cr total en el agua de los piezómetros a 3 profundidades, y se obtuvieron las características litológicas de los núcleos. Los resultados indicaron que la reducción de Cr(VI) por el hierro de la matriz sólida, en las zonas saturada y no saturada, es un proceso geoquímico importante en esta área. Se observó una adsorción significativa de Cr(VI) por las capas de arcillas y limos, y

despreciable por las capas de arenas y gravas. Se determinó una distribución preferencial del Cr(VI) en la fase acuosa en la zona saturada. Por otro lado no se detectó que ocurriera el proceso de oxidación del Cr(III) por el manganeso (Armienta y Queré, 1995).

En esta misma zona se investigó la movilidad del cromo en suelos. El estudio incluyó el análisis de Cr(VI) y cromo total en muestras superficiales y a 30 cm de profundidad en una malla de 200 m de lado. Se analizaron también algunas muestras mediante el procedimiento de extracción secuencial selectiva (Tessier et al., 1979). Las determinaciones de cromo total se realizaron por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. Se encontró que alrededor de 0.9 km<sup>2</sup> están contaminados con cromo, con concentraciones que alcanzan los 12960 mg/kg, principalmente como Cr(III). Los contenidos de Cr(VI) fueron bajos (inferiores a 0.5 mg/kg) en la mayoría de los sitios, con excepción de un punto en el que la concentración fue de 65 mg/kg. Se determinó que la contaminación del suelo se produjo principalmente por la emisión de polvos de la fábrica de cromatos. Las mayores concentraciones de Cr(VI) resultaron del almacenamiento temporal de agua con altas concentraciones de Cr(VI) utilizada por la empresa en un aljibe aledaño a la misma. En algunos sitios, el cromo se acumuló por el desagüe de efluentes de curtidurías y por el mal manejo de la materia prima y productos de QC. Las determinaciones por extracción secuencial selectiva mostraron que en los suelos más contaminados el cromo se fija principalmente en los óxidos de Fe y Mn. En los suelos menos contaminados el Cr se encuentra principalmente en la fracción de materia orgánica y sulfuros. Se observó además que el Cr(III) se retiene preferencialmente en la capa superficial del suelo (Armienta-Hernández y Rodríguez-Castillo 1995; Armienta et al., 1996)

Las investigaciones han incluido también la evaluación de los contenidos de cromo en plantas que se desarrollan en el área de Q.C. y en la zona irrigada con aguas residuales de la ciudad de León, contiguas a la presa El Mastranzo. En esta última zona se encontraron las mayores concentraciones de cromo total en los sedimentos del fondo de la presa. En ninguna de las muestras de suelo se detectó Cr(VI). Los valores de pH del suelo variaron de ligeramente ácidos hasta ligeramente básicos (8.33). Algunas muestras analizadas por extracción secuencial selectiva presentaron las mayores proporciones de cromo en la fracción de materia orgánica y sulfuros. Las concentraciones de cromo en los vegetales analizados para las dos áreas variaron entre las diferentes especies y órganos de las plantas, siendo mayores en las raíces. Se encontró que a pesar de que el cromo se encuentra como Cr(III) en el área de El Mastranzo, su asociación con la materia orgánica del suelo posibilita su absorción por los vegetales.

Se profundizó en el estudio de los procesos geoquímicos que aportan cromo a las aguas superficiales y subterráneas al este del valle de León. La investigación incluyó un reconocimiento geológico a detalle y la obtención de muestras de aguas superficiales y subterráneas. Además, se identificaron y se tomaron muestras de las principales unidades litológicas con posibilidades de liberar al cromo. En las muestras de roca se efectuaron estudios mineralógicos por petrografía, minerografía y difracción de rayos X, y se determinaron las concentraciones totales de cromo. Se efectuaron experimentos con algunas rocas seleccionadas que incluyeron el estudio por microscopía electrónica de barrido antes y después de un ataque ácido. Se analizaron también las concentraciones de cromo, hierro, magnesio, aluminio y calcio en los lixiviados obtenidos en este ataque. Con base en las observaciones y experimentos realizados se concluyó que el cromo

procede principalmente de las unidades ultramáficas y sus productos de alteración, ubicados en la Sierra de Guanajuato. Los eventos hidrotermales y tectónicos que han ocurrido en esta Sierra han incrementado la liberación del contaminante. Las serpentinitas fueron las rocas que presentaron un mayor potencial contaminante. Los arreglos texturales y mineralógicos juegan un papel importante en el proceso de liberación del cromo. Se propuso que la desintegración de los bordes de exsolución de las cromitas es el principal proceso geoquímico de aporte natural del cromo (Robles-Camacho y Armienta, 2000).

## 6. Conclusiones

La cuantificación de las concentraciones totales de cromo no es suficiente para determinar los procesos geoquímicos ambientales de este elemento. Para ello, es necesario considerar las especies en las que se encuentra en los diversos compartimentos ambientales. Aunque en general la movilidad del Cr(VI) es mayor que la del Cr(III), diferentes condiciones fisico-químicas pueden influir en la misma. Para determinar las formas químicas en que se encuentre el cromo se requieren métodos analíticos específicos tales como la espectrofotometría de absorción atómica con tratamientos específicos de las muestras, la polarografía, la cromatografía de iones y la espectrofotometría uv-visible, entre otros. El estudio de las muestras sólidas mediante extracción secuencial selectiva provee información indispensable para conocer la situación de estabilidad permanente o lábil del cromo en los suelos. En las investigaciones de contaminación ambiental por metales pesados debe tenerse siempre en cuenta la posibilidad tanto de un aporte natural como del ocasionado por la actividad humana.

## Referencias

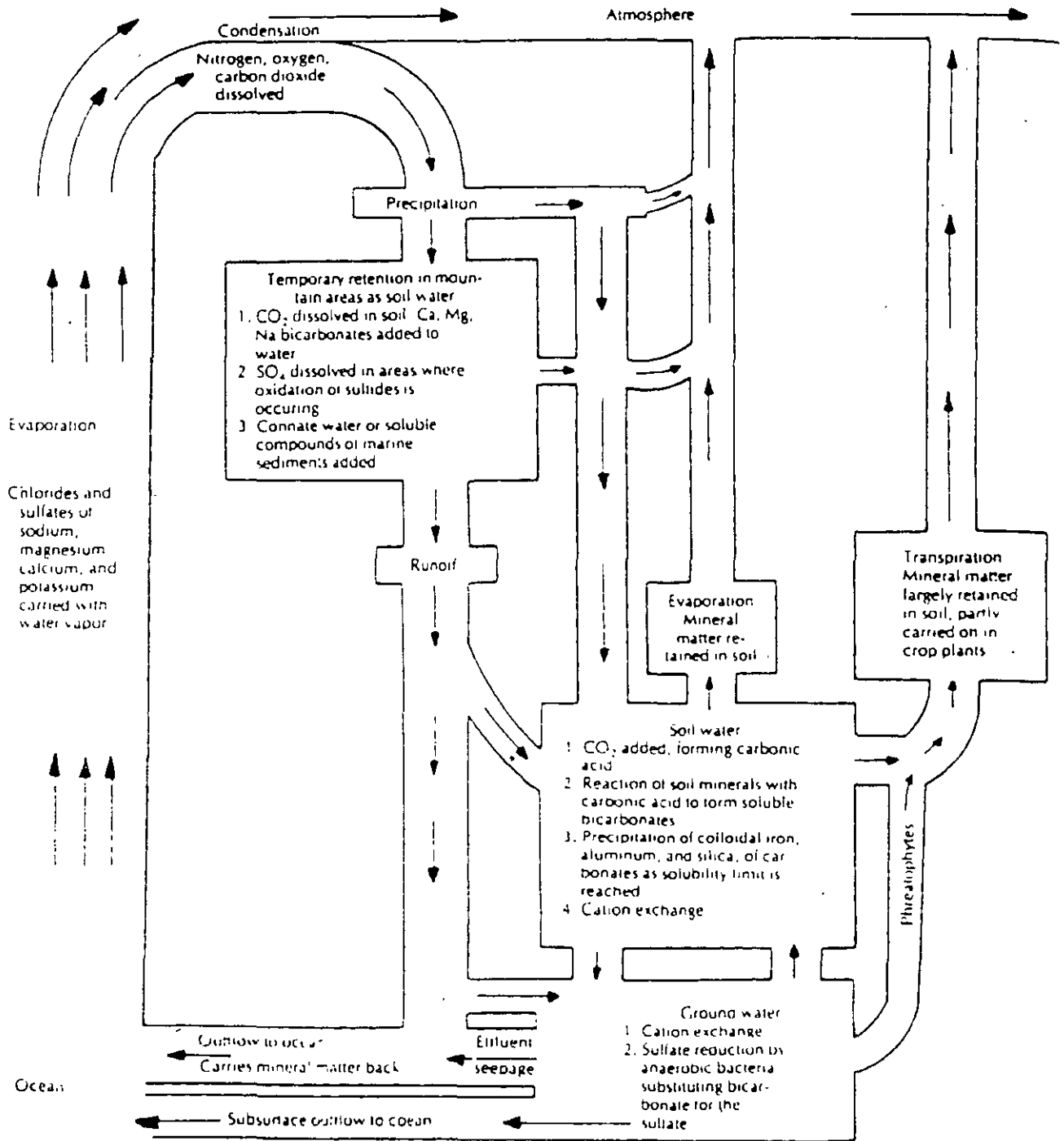
- Alloway B. J. 1995 Soil processes and the behaviour of metals. En: BJ Alloway (ed) Heavy metals in soils Blackie Academic and Professional, London, pp 11-37
- Armienta M.A., R. Rodríguez, A. Quere, F. Juárez, N. Cenicerros, A. Aguayo. 1993. Groundwater Pollution with chromium in Leon Valley México. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 54, 1-13
- Armienta-Hernandez M.A. and Rodríguez-Castillo R., 1995. Environmental Exposure to Chromium Compounds in the Valley of Leon, México. *Environmental Health Perspectives*. 103, 47-51
- Armienta M.A., Quere A., 1995 Hydrogeochemical Behavior of Chromium in the Unsaturated Zone and in the Aquifer of Leon Valley, México. *Water, Air & Soil Pollution*, 84, 11-29.
- Armienta M.A., Rodríguez R., Cenicerros N., Juárez F., Cruz O., 1996. Distribution, Origin and Fate of Chromium in Soils in Guanajuato, México. *Environmental Pollution*. 91, 391-397.
- Baes Ch F., Mesmer R.E., 1976. The hydrolysis of cations. John Wiley & Sons, N.Y.
- Barrett J., O'Brien P., Pedrosa de Jesús J., 1985 Chromium(III) and the glucose tolerance factor. *Polyhedron*, 4, 1-14.

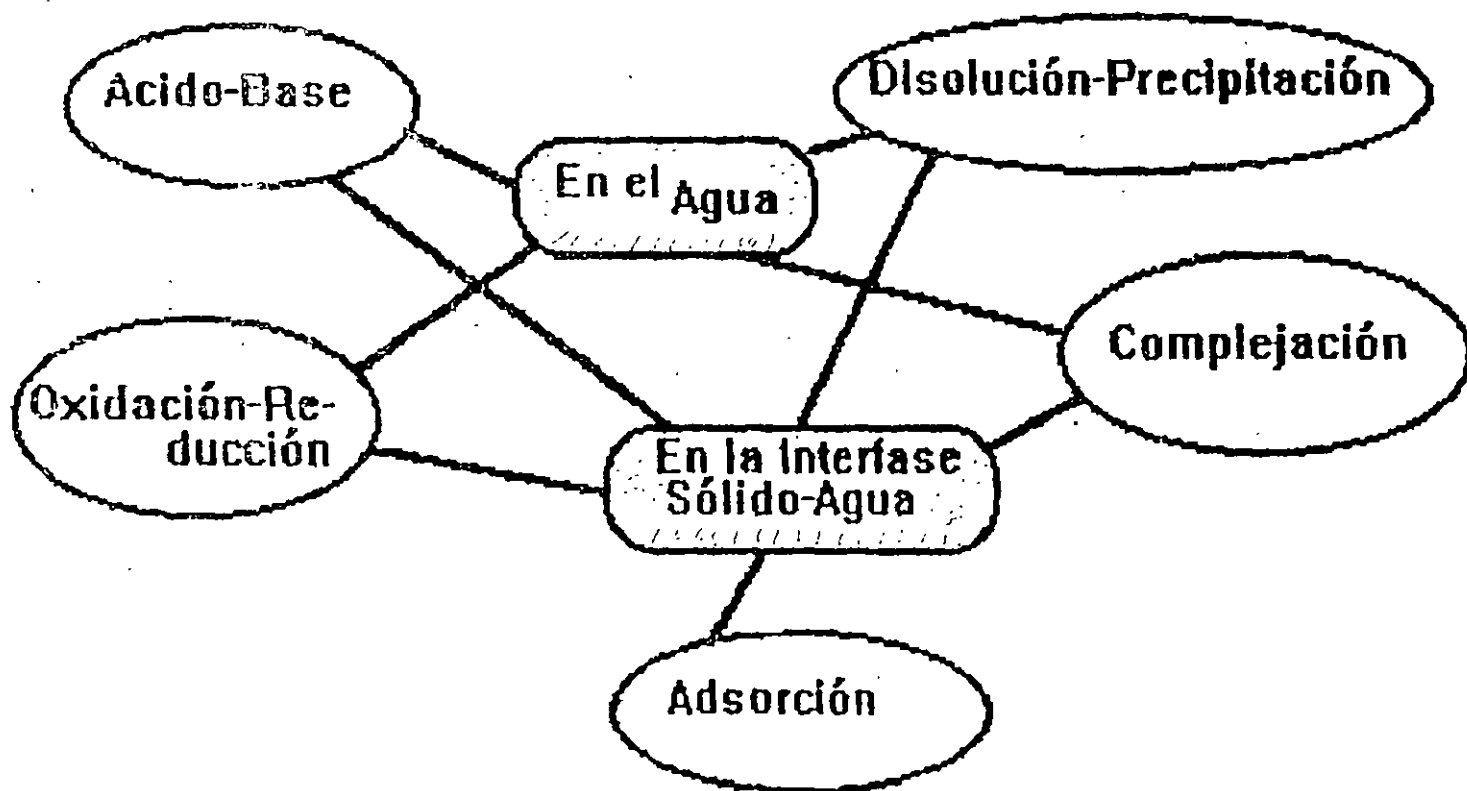
- Bartlett R.J., James B.R., 1979. Behavior of chromium in soils:III. Oxidation. *J. Environ. Qual.* 8, 31-34.
- Bartlett R.J., James B.R., 1988. Mobility and bioavailability of chromium in soils. En: J. O. Nriagu y E. Nioeber (eds.) *Chromium in the Natural and Human Environments*. John Wiley & Sons, N.Y., pp 268-304.
- Bartlett R.J., Kimble J.M., 1976. Behavior of chromium in soils: I. Trivalent Form. *J. Environ. Qual.* 5, 379-382.
- Calder L.M., 1988. Chromium contamination of groundwater. En: J. O. Nriagu y E. Nioeber (eds.) *Chromium in the Natural and Human Environments*. John Wiley & Sons, N.Y., pp 215-229.
- Cotton F.A., Wilkinson G., 1978. *Química Inorgánica Avanzada*, Limusa, México.
- Deng B., Stone A.T., 1996. Surface-catalyzed Chromium(VI) reduction: The TiO<sub>2</sub>-CrVI-Mandelic Acid System, 1996. *Environ. Sci. Technol.* 30, 463-472.
- Eary E.L., Rai D., 1987. Kinetics of Cr(III) oxidation to Chromium (VI) by reaction with manganese dioxide, *Environ. Sci. Technol.* 21, 1187-1193.
- Galvão L.A.C., Corey G., 1987. Cromo, Serie Vigilancia 5, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Metepec, México.
- Hamilton J.W., Wetterhahn, K.E., 1988. Chromium. En: H.G. Seiler, H. Sigel, A. Sigel (eds.) *Handbook on toxicity of inorganic compounds*, Marcel Dekker Inc., N.Y. and Basel, pp. 239-250.
- Hem J.D., 1977. Reactions of metal ions at surfaces of hydrous iron hydroxide, *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 527-538.
- James B.R., 1996. The challenge of remediating chromium-contaminated soil. *Environ. Sci. Technol.* 30, 248-251.
- James B.R. y Bartlett R.J., 1983. Behaviour of chromium in soils:VII. Adsorption and reduction of hexavalent forms. *J. Environ. Qual.* 12, 169-172.
- Koppelman M.H., Dillard J.G., 1980. Adsorption of Cr(NH<sub>3</sub>)<sub>6</sub><sup>3+</sup> and Cr(en)<sub>3</sub><sup>3+</sup> on clay minerals and the characterization of chromium by X-Ray photoelectron spectroscopy. *Clays and Clay Minerals.* 28, 211-216.
- Kotás J., Stasicka Z., 2000. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. *Environmental Pollution*, 107, 263-283.
- Mertz W., 1974. Chromium. En: *Geochemistry and the environment*. National Academy of Sciences, Washington D.C., V. I, pp 29-35.
- Nriagu J.O., 1988. Production and uses of chromium. En: J. O. Nriagu y E. Nioeber (eds.) *Chromium in the Natural and Human Environments*. John Wiley & Sons, N.Y., pp 81-103.
- Pourbaix M., 1963. *Atlas d'Equilibres Electrochimiques*. Gauthiers-Villars, Paris, pp 256-271.
- Prokisch J., Katz S.A., Kovács B., Gyori Z., 1997. Speciation of chromium from industrial wastes and incinerated sludges. *J. of Chromatography.* 774, 363-371.
- Rai C., Sass B.M., Moore D.A., 1987. Chromium(III) Hydrolysis constants and solubility of Chromium(III) Hydroxide. *Inorg. Chem.* 26, 345-349.
- Richard F.C. y Bourg A.C.M., 1991. Aqueous geochemistry of chromium. a review, *Wat. Res.* 25, 807-816.
- Robles-Camacho J., Armienta M.A., 2000. Natural chromium contamination of groundwater at León Valley, México. *Journal of Geochemical Exploration.* 68, 167-181.

- Rodríguez-C. R., and Armienta-H M.A., 1995. Groundwater chromium pollution in the Río Turbio Valley, Mexico: Use of pollutants as chemical tracers. *Geofísica Internacional*. 34, 417-426.
- Sass B.M., Rai D., 1987. Solubility of Amorphous Chromium(III)-Iron(III) Hydroxide Solid solutions. *Inorg. Chem.* 26,2228-2232.
- Schroeder D.C., Lee G.F., 1975. Potential transformation of chromium in natural waters. *Water, Air and Soil Pollution*. 4, 355-365.
- Stollenwerk K.G., Grove D.B., 1985. Adsorption and desorption of hexavalent chromium in an alluvial aquifer near telluride. Colorado, *J. Environ. Qual.* 14, 150-155.
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate metals. *Anal. Chem.* 51, 844-851.
- Wittbrodt P.R., Palmer C.D., 1995. Reduction of Cr(VI) in the presence of excess soil fulvic acid, *Environ Sci. Technol.* 29, 255-263.
- Zachara J.M., Girvin D.C., Schmidt R.L., Resch C.T., 1987. Chromate adsorption on amorphous iron oxyhydroxide in the presence of major groundwater ions. *Environ. Sci. Technol.* 21, 589-594



FIGURE 6-3. GEOCHEMICAL CYCLE OF SURFACE AND GROUND WATER





Unidades para expresar la concentración  
de una disolución

Nombre	Definición	Unidades más frecuentes
Por ciento en Peso (%) P / p	Unidades en peso de soluto contenidas en 100 unidades en peso de disolución	$\frac{\text{gramos de soluto}}{100 \text{ g de disolución}}$
Concentración en Peso	Peso de soluto contenido en una unidad de volumen de disolución	$\frac{\text{gramos de soluto}}{\text{litro de disolución}}$
Partes por millón ppm	Unidades en Peso de soluto contenidos en $10^6$ unidades en peso de disolución	$\frac{\text{miligramos de soluto}}{\text{kg de disolución}}$
Por ciento en volumen (%) p / v	Unidades en peso de soluto contenidas en 100 unidades en volumen de disolución	$\frac{\text{gramos de soluto}}{100 \text{ ml de disolución}}$
Molaridad (M)	Número de moles de soluto contenidas en 1 litro de disolución	$\frac{\text{moles de soluto}}{\text{litro de disolución}}$
Normalidad (N)	Número de equivalentes de soluto contenidos en 1 litro de disolución	$\frac{\text{equivalentes de soluto}}{\text{litros de disolución}}$
Formalidad (F)	Número de pesos fórmula gramo de soluto por litro de disolución	$\frac{\text{pesos fórmula g de soluto}}{\text{litro de disolución}}$
Molalidad (m)	Número de moles de soluto por kg de disolvente	$\frac{\text{moles de soluto}}{\text{kg de disolvente}}$
Fración molar de sustancia A (X)	Número de moles de A contenidos en el número total de moles	Adimensional

**TABLA 9.2: SOLUBILIDAD DEL OXIGENO EN AGUA A 25°C.**

<i>P</i> , Torr	Solubilidad, moles O <sub>2</sub> por litro de H <sub>2</sub> O = <i>M</i>	$\frac{M}{P} \times 10^6 \approx \text{const}$
175	0,000307	1,75
300	0,000500	1,67
414	0,000688	1,66
610	0,00100	1,64
760	0,00128	1 68

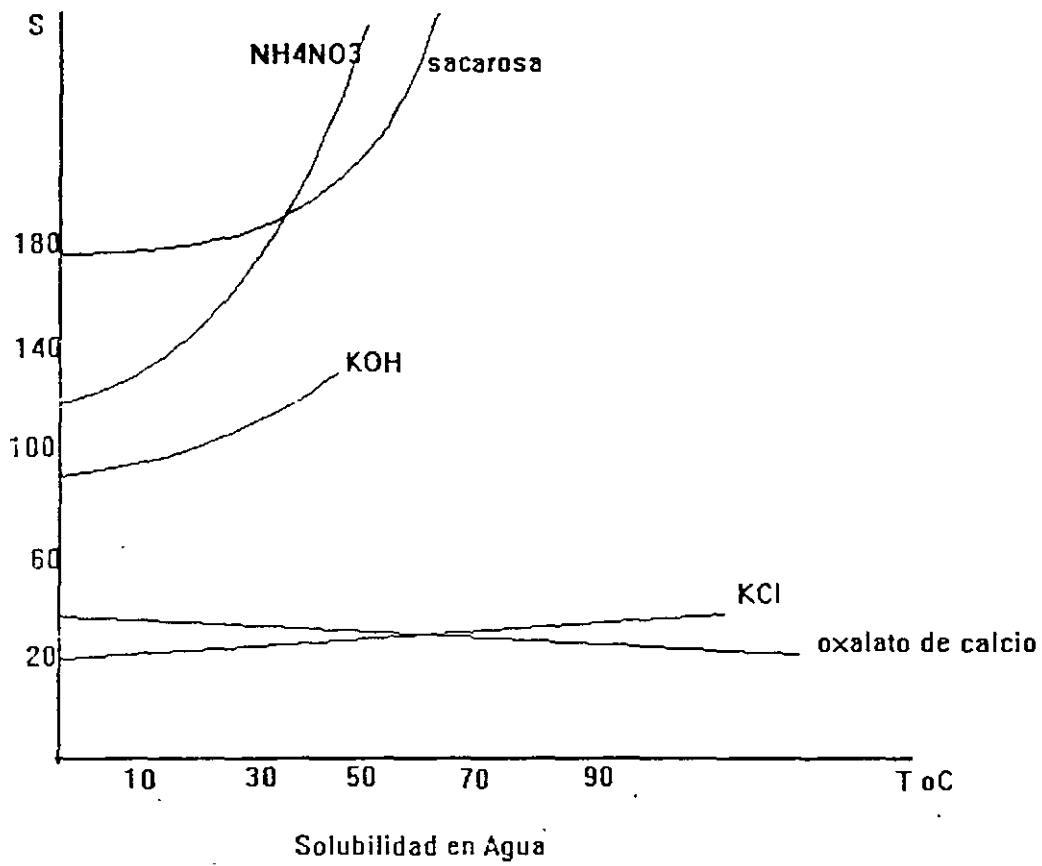
9.6 PROPIEDADES COLIGATIVAS 171

**TABLA 9.3: EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SOLUBILIDAD\* DE LOS GASES EN AGUA\*\***

<i>Gas</i>	Temperatura, °C				
	0	10	25	50	100
H <sub>2</sub>	0,000960	0,000873	0,000783	0,000717	0,000715
N <sub>2</sub>	0,00105	0,000830	0,000647	0,000485	0,000423
O <sub>2</sub>	0,00212	0,00170	0,00128	0,000933	0,000758
CO <sub>2</sub>	0,0765	0,0533	0,0343	0,0194	

\* La solubilidad se expresa en moles de gas disueltas por litro de agua

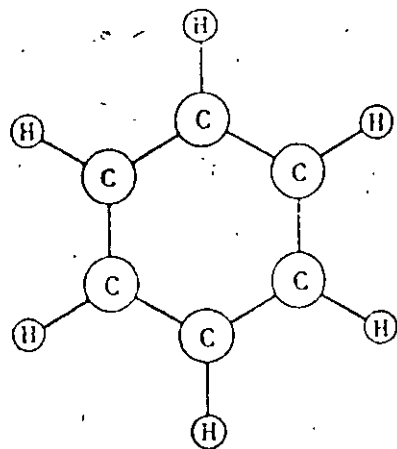
\*\* La presión del gas encima de la solución es 1 atm.



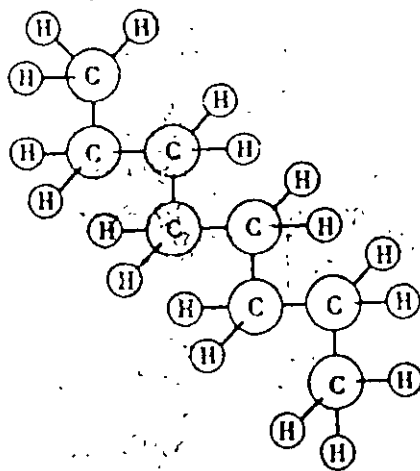
## 9.5 FACTORES QUE AFECTAN LA SOLUBILIDAD

FIGURA 9.4

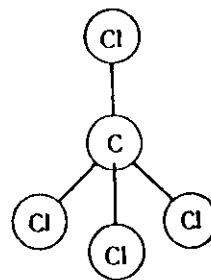
*Algunas moléculas no polares*



Benceno,  $C_6H_6$   
(Hexágono plano)



Octano,  $C_8H_{18}$   
(Cadena escalonada de 8 átomos de carbono)

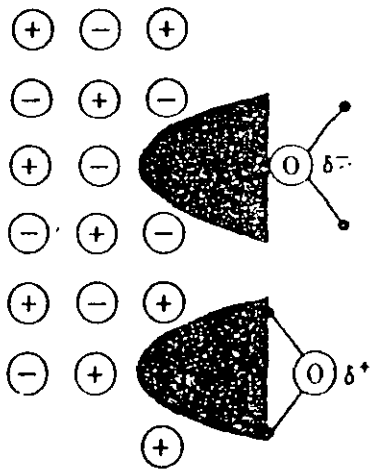


Tetracloruro de carbono,  $CCl_4$   
(Tetraedro regular de átomos de cloro)

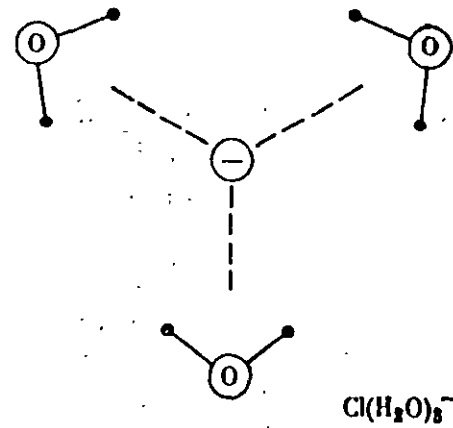
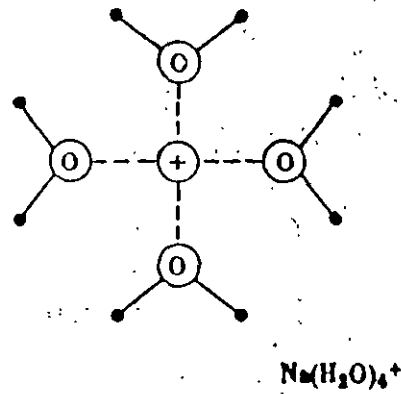
## EL ESTADO DE DISOLUCION

FIGURA 9.5

Mecanismo de disolución de un cristal iónico por un disolvente polar.



(a) Las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  neutralizan la carga iónica y 'liberan' los iones de la superficie.



(b) Las moléculas  $\text{H}_2\text{O}$  hidratan los iones en solución y neutralizan parcialmente su carga. Así se reduce la tendencia del  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$  a unirse nuevamente.

## Debye-Hückel

$$\bar{I} = 1/2 \sum m_i z_i^2$$

$$\log \gamma_i = -A z_i^2 \sqrt{I} \quad I < 10^{-2.3}$$

$$\log \gamma_i = -A z_i^2 \sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I}) \quad I < 10^{-1}$$

$$\log \gamma_i = -A z_i^2 \sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I}) + cI$$



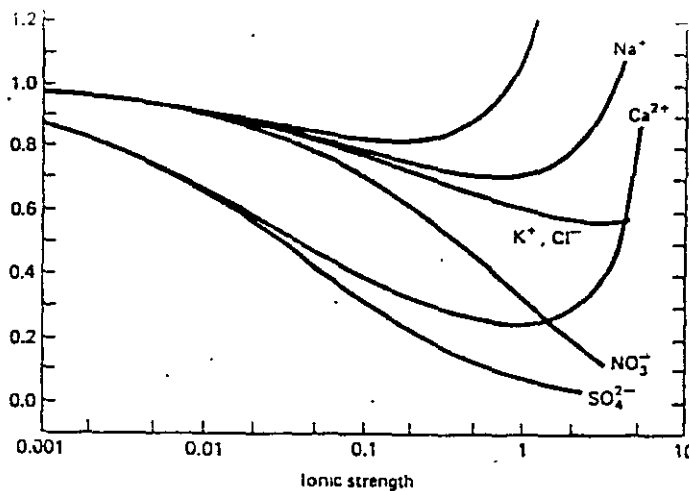


Figure 2-2 Approximate variation of activity coefficients with ionic strength (after Garrels and Christ 1965).

At higher ionic strengths the simple model fails because it requires an impossibly high concentration of anions around each cation, and vice versa. The equation can be modified to take account of the finite size of the ions, giving the equation

$$\log \gamma_i = \frac{-Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_0 \sqrt{I}} \quad (2-6)$$

$B$  is a constant depending only on  $P$  and  $T$ , and  $a_0$  is, in theory, the hydrated radius of the particular ion. In practice, the value of  $a_0$  is chosen to give the best fit to experimental data. Some values for the parameters in the Debye-Hückel equation are given in Table 2-1. Equation (2-6) is reasonably accurate up to ionic strengths of about  $10^{-1}$ .

Table 2-1 Parameters for the Debye-Hückel equation at 1 atmosphere pressure (adapted from Manov et al. 1943; Klotz 1950).

$T(^{\circ}\text{C})$	$A$	$B(\times 10^{-8})$	$a_0(\times 10^8)$	Ion
0	0.4883	0.3241	2.5	$\text{NH}_4^+$
5	0.4921	0.3249	3.0	$\text{K}^+, \text{Cl}^-, \text{NO}_3^-$
10	0.4960	0.3258	3.5	$\text{OH}^-, \text{HS}^-, \text{F}^-$
15	0.5000	0.3262	4.0	$\text{SO}_4^{2-}, \text{PO}_4^{3-}, \text{HPO}_4^{2-}$
20	0.5042	0.3273	4.0-4.5	$\text{Na}^+, \text{HCO}_3^-, \text{H}_2\text{PO}_4^-$
25	0.5085	0.3281	4.5	$\text{CO}_3^{2-}$
30	0.5130	0.3290	5	$\text{Sr}^{2+}, \text{Ba}^{2+}, \text{S}^{2-}$
40	0.5221	0.3305	6	$\text{Ca}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$
50	0.5319	0.3321	8	$\text{Mg}^{2+}$
60	0.5425	0.3338	9	$\text{H}^+, \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$

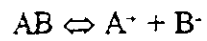
For higher ionic strengths, Eq. (2-6) can be modified by adding a further term,

$$\log \gamma_i = \frac{-Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_0 \sqrt{I}} + CI \quad (2-7)$$

where  $C$  is another constant (Davies 1962). The additional term can be justified on theoretical grounds, or it can be justified as an empirical fit to experimental data. An important consequence of the additional term is that it predicts that activity coefficients should increase with increasing ionic strength at high ionic strengths, in accord with experimental observations (Fig. 2-2). Wood (1975) was able to use an expression similar to Eq. (2-7) to predict the solubilities of evaporite minerals in highly saline brines. He considered the mean activity coefficients of salts rather than single-ion activity coefficients, and used experimental data from simple systems to calculate an expression corresponding to the constant  $C$ .

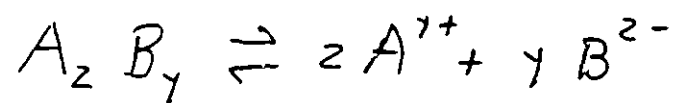
Other methods for calculating activity coefficients in concentrated solutions, such as the mean salt theory and Harned's rule, are given in the readings at the end of the chapter.

## DISOLUCION-PRECIPITACION



Constante del Producto de Solubilidad

$$K_{ps} = [A^+] [B^-]$$



$$K_{ps} = [A^{y+}]^z [B^{z-}]^y$$

TABLA 6-1 Constantes del producto de solubilidad a 25°C

Sólido	$pK_{so}$	Sólido	$pK_{so}$
Fe(OH) <sub>3</sub> (amorfo)	38	BaSO <sub>4</sub>	10
FePO <sub>4</sub>	17.9	Cu(OH) <sub>2</sub>	19.3
Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	33	PbCl <sub>2</sub>	4.8
Fe(OH) <sub>2</sub>	14.5	Pb(OH) <sub>2</sub>	14.3
FeS	17.3	PbSO <sub>4</sub>	7.8
Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	88	PbS	27.0
Al(OH) <sub>3</sub> (amorfo)	33	MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub>	12.6
AlPO <sub>4</sub>	21.0	MgCO <sub>3</sub>	5.0
CaCO <sub>3</sub> (calcita)	8.34	Mg(OH) <sub>2</sub>	10.7
CaCO <sub>3</sub> (aragonita)	8.22	Mn(OH) <sub>2</sub>	12.8
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (dolomita)	16.7	AgCl	10.0
CaF <sub>2</sub>	10.3	Ag <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	11.6
Ca(OH) <sub>2</sub>	5.3	Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.8
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	26.0	Zn(OH) <sub>2</sub>	17.2
CaSO <sub>4</sub>	4.59	ZnS	21.5
SiO <sub>2</sub> (amorfo)	2.7		

\* Constantes de equilibrio para la reacción  $A_xB_y(s) \rightleftharpoons xA^{r+} + yB^{s-}$ .

Table 12.1 Solubility Product Constants for Different Salts at 25°C

		pK <sup>a,b</sup>
<i>Carbonates</i>		
Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		11.09 (L)
BaCO <sub>3</sub>	witherite	8.1 (K) <sup>c</sup>
CaCO <sub>3</sub>	calcite	8.35 (K)
CaCO <sub>3</sub>	aragonite	8.22 (K)
CaCO <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	brucite	6.38 (L)
CaCO <sub>3</sub>	oculinite	13.7 (K), 12.0 (L)
CaCO <sub>3</sub>	sphaerocobalite	10.0 (K)
CaCO <sub>3</sub>		9.63 (L)
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	malachite	13.8 (K), 13.2 (L)
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	azurite	66.5 (L)
FeCO <sub>3</sub>	siderite	10.7 (K), 10.2 (L)
HgCO <sub>3</sub>		22.6 (L)
Hg <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	[Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> ][CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]	14.0 (L)
MgCO <sub>3</sub>	magnesite	7.5 (K), 7.46 (L)
MgCO <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	nesquehonite	5.6 (K), 4.67 (L)
MgCO <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	lansfordite	4.54 (L)
MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	dolomite	17.9 (L)
MnCO <sub>3</sub>	rhodochrosite	9.3 (K), 10.1 (L)
NiCO <sub>3</sub>		6.9 (K)
PbCO <sub>3</sub>	cerussite	13.1 (K), 13.5 (L)
Pb <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	phosgenite	20.0 (L)
Pb <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>		46.8 (L)
SiCO <sub>3</sub>	strontianite	9.0 (K) <sup>c</sup>
VO <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	{VO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> }[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]	10.6 (K)
ZnCO <sub>3</sub>	smithsonite	10.0 (20°C, K), 10.2 (L)
<i>Sulfates</i>		
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4.81 (K, L)
KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub>	alunite	80.95 (L)
BaSO <sub>4</sub>	barite	10.0 (K)
CaSO <sub>4</sub>	anhydrite	4.5 (K), 4.41 (L)
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	gypsum	4.6 (K), 4.63 (L)
CdSO <sub>4</sub>		0.044 (L)
CdSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O		1.59 (L)
CuSO <sub>4</sub>		-3.72 (L)
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O		2.61 (L)
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	brochantite	68.6 (L)
FeSO <sub>4</sub>		-2.65 (L)
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O		2.46 (L)
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		-2.89 (L)
KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	jarosite	96.5 (L)
HgSO <sub>4</sub>		3.34 (L)
Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		6.20 (L)
MgSO <sub>4</sub>		-8.18 (L)

Table 12.1 (continued)

		pK <sup>a,b</sup>
MnSO <sub>4</sub>		-3.43 (L)
MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O		-0.47 (L)
Mn <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		11.6 (L)
PbSO <sub>4</sub>	anglesite	7.8 (K), 7.79 (L)
SiSO <sub>4</sub>	celestite	6.5 (K)
ZnSO <sub>4</sub>	zinkovite	-3.41 (L)
<i>Sulfides</i>		
α-Ag <sub>2</sub> S		49.01 (L)
β-Ag <sub>2</sub> S		48.97 (L)
Ag <sub>2</sub> S		50.1 (K)
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	bismuthinite	100.0 (K)
CdS	oldhamite	0.78 (L)
CdS	greenockite	27.0 (K, L)
CoS(α)		21.3 (K)
CoS(β)		25.6 (K)
Cu <sub>2</sub> S	chalcocite	48.5 (K, L)
CuS	covellite	36.1 (K)
α-Fe <sub>0.93</sub> S	pyrrhotite	17.4 (L)
α-FeS	troilite	16.2 (L)
FeS	troilite	18.1 (K)
FeS <sub>2</sub>	pyrite	42.5 (L)
FeS <sub>2</sub>	marcasite	41.8 (L)
Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		88.0 (L)
α-HgS	cinnabar (red)	53.0 (K), 52.0 (L)
β-HgS	metacinnabar (black)	52.7 (K), 51.7 (L)
Hg <sub>2</sub> S	[Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> ][S <sup>2-</sup> ]	54.8 (L)
MgS		-5.59 (L)
MnS	(green)	13.5 (K), 11.7 (L)
MnS	(pink) alabandite	10.5 (K), 12.8 (L)
MnS <sub>2</sub>	hauerite	81.4 (L)
MoS <sub>2</sub>	molybdenite	?
α-NiS		19.4 (K)
γ-NiS		26.6 (K)
PbS	galena	17.5 (K, L)
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	stibnite	90.8 (K)
SnS		25.9 (K) <sup>c</sup>
α-ZnS	sphalerite	24.7 (K, L)
β-ZnS	wurtzite	22.5 (K, L)
<i>Phosphates</i>		
Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		16.0 (L)
AlPO <sub>4</sub>	berlinite	19.0 (L)
AlPO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	variscite	22.1 (K, L)

Table 12.1 (continued)

			pK <sup>a,b</sup>
H <sub>8</sub> K <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> · 18H <sub>2</sub> O	K taranakite		178.7 (I)
CaHPO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	brushite		6.57 (K, I)
CaHPO <sub>4</sub>	monite		6.89 (I)
α-Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			25.5 (I)
β-Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	whitlockite		28.7 (E), 28.9 (I)
Ca <sub>4</sub> H <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> · 5H <sub>2</sub> O	octacalcium phosphate		80.6 (I)
Ca <sub>10</sub> F <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub>	fluorapatite		119.2 (I)
Ca <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub>	hydroxyapatite		116.4 (I)
Ca <sub>4</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			18.1 (I)
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			16.9 (K, I)
Ca(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O			38.8 (I)
FePO <sub>4</sub> (amorph)			21.6 (K)
FePO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	strengite		26.4 (K, I)
Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	vivianite		36.0 (I)
H <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>			12.4 (I)
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>			0.21 (I)
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>			-3.60 (I)
MgHPO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	newberryite		5.82 (I)
MgKPO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O			10.6 (I)
MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	struvite		13.2 (I)
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			25.2 (I), 14.6 (I)
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	bobierite		25.0 (I)
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 22H <sub>2</sub> O			23.1 (I)
MnHPO <sub>4</sub>			12.9 (I)
Mn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			27.4 (I)
PbHPO <sub>4</sub>			11.4 (K), 11.5 (I)
Pb(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			114.7 (I)
Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			43.5 at 38 °C (K), 44.4 (I)
Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Br	bromopyromorphite		78.2 (I)
Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Cl	chloropyromorphite		83.7 (I)
Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> F	fluoropyromorphite		71.6 (I)
Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> OH	hydroxypyromorphite		76.8 (I)
(UO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	[UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> ] <sub>3</sub> [PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>2</sub>		49.7 (K)
UO <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	[UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> ][HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]		12.2 (K)
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	hopite		35.3 (I)
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			35.3 (K)

## Molybdates

Ag <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>		11.55 (I)
CaMoO <sub>4</sub>	powellite	7.94 (I)
CuMoO <sub>4</sub>		6.48 (I)
FeMoO <sub>4</sub>		7.70 (I)
MgMoO <sub>4</sub>		0.62 (I)
MnMoO <sub>4</sub>		4.13 (I)

Table 12.1 (continued)

		pK <sup>a,b</sup>
PbMoO <sub>4</sub>	wulfenite	16.0 (I)
ZnMoO <sub>4</sub>		4.49 (I)
Chlorides		
AgCl	cerargyrite	9.75 (K, L)
CuCl		6.7 (K)
PbCl <sub>2</sub>	cotunnite	4.8 (K)
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	[Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> ][Cl <sup>-</sup> ] <sub>2</sub>	17.9 (K)
Fluorides		
AgF		100.0 (L)
BaF <sub>2</sub>		5.8 (K)
CaF <sub>2</sub>	fluorite	10.4 (K)
MgF <sub>2</sub>	sellite	8.2 (K) <sup>c</sup>
PbF <sub>2</sub>		7.5 (K)
SrF <sub>2</sub>		8.5 (K)

<sup>a</sup> Expressed as -log K<sub>sp</sub>.<sup>b</sup> K = Krauskopf (1979), pp. 552-553, L = Lindsay (1979), calculated from standard free energies.<sup>c</sup> Uncertain by more than 0.8 (Krauskopf, 1979).

Substituting into equation 12.8 yields

$$(5.00 \times 10^{-2} - x)(7.00 \times 10^{-3} - x) = 10^{-4.6} \quad (12.11)$$

which reduces to a quadratic equation

$$x^2 - (5.7 \times 10^{-2})x + 3.25 \times 10^{-4} = 0 \quad (12.12)$$

We solve this equation by means of the quadratic formula (equation 11.18) and obtain two roots:  $x_1 = 5.05 \times 10^{-2}$  and  $x_2 = 6.45 \times 10^{-3}$ . We choose  $x_2$  because  $x_1$  reduces  $[\text{SO}_4^{2-}]$  in equation 12.10 to a negative value. Therefore, the amount of gypsum that will precipitate per liter of solution is  $6.45 \times 10^{-3} \times 172.17 = 1.11$  g. When equilibrium has been established after gypsum has precipitated, the IAP  $(5.00 - 0.645) \times 10^{-2} \times (7.00 - 6.45) \times 10^{-3} = 10^{-4.6}$ , as required for equilibrium. Note that the  $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$  ratio has increased by

more than a factor of 10 from its initial value of  $(5.00 \times 10^{-2})/(7.00 \times 10^{-3}) = 7.1$  to  $(4.35 \times 10^{-2})/(0.055 \times 10^{-2}) = 79.2$ . Evidently, the precipitation of a salt from a supersaturated solution not only reduces the concentrations of the ions but actually *changes the chemical composition* of the remaining solution.

If gypsum continues to precipitate from this solution, the activity of  $\text{SO}_4^{2-}$  approaches zero and the  $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$  ratio rises toward infinity. This phenomenon, which is illustrated in Figure 12.1, occurs during the evolution of brines by evaporative concentration and constitutes a *geochemical divide*. The solution we have been discussing is depleted in sulfate and is enriched in  $\text{Ca}^{2+}$  by the progressive precipitation of gypsum because its initial molar  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  ratio was greater than one. If  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-} < 1.0$ , precipitation of gypsum causes depletion in  $\text{Ca}^{2+}$  and enrichment in sulfate. Therefore, the value of the molar

TABLE 1-5.

**COMMON REACTIVE MINERALS  
IN SOIL AND AQUIFER ENVIRONMENTS**

***Carbonates***

- Calcite [CaCO<sub>3</sub>]
- Dolomite [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]
- Siderite [FeCO<sub>3</sub>]
- Rhodo-chrosite [MnCO<sub>3</sub>]
- Magnesian Calcite [(Ca,Mg)CO<sub>3</sub>]

***Sulfates***

- Gypsum [CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O]
- Alunite [KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>]
- Jarosite [KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>]
- Jurbanite [AlSO<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>]

***Silica***

- Chalcedony
- Amorphous silica

***Oxides/hydroxides***

- Ferrihydrite [Fe(OH)<sub>3</sub>]
- Goethite [FeOOH]
- Gibbsite [Al(OH)<sub>3</sub>]
- Nsutite [MnO<sub>2</sub>]

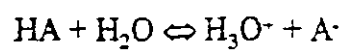
***Sulfides***

- Pyrite [FeS<sub>2</sub>]
- Mackinawite [FeS]
- Orpiment [As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>]

***Silicates***

- Clays
- Zeolites

## REACCIONES ACIDO-BASE



$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

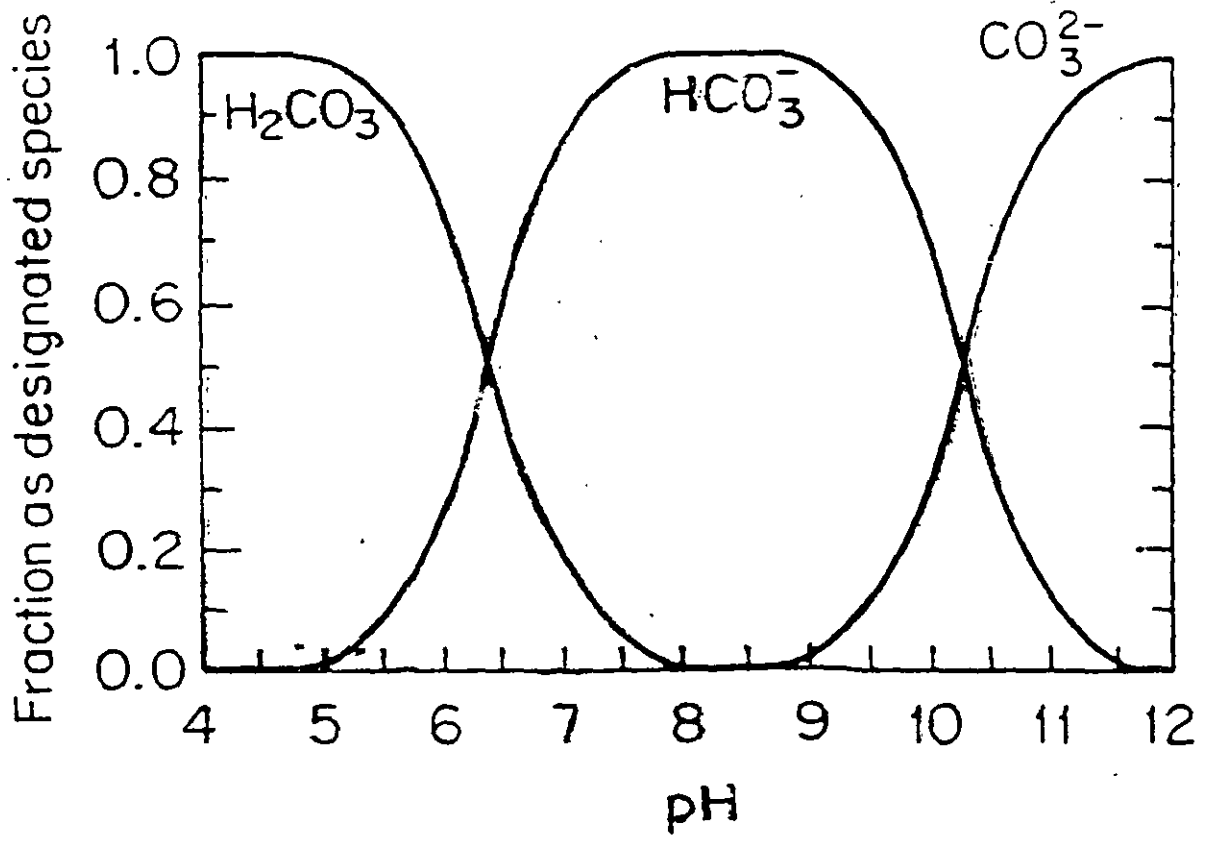
$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$\text{pK}_a = -\log K_a$$

Cuando  $\text{pH} = \text{pK}_a$

$$[\text{HA}] = [\text{A}^-]$$

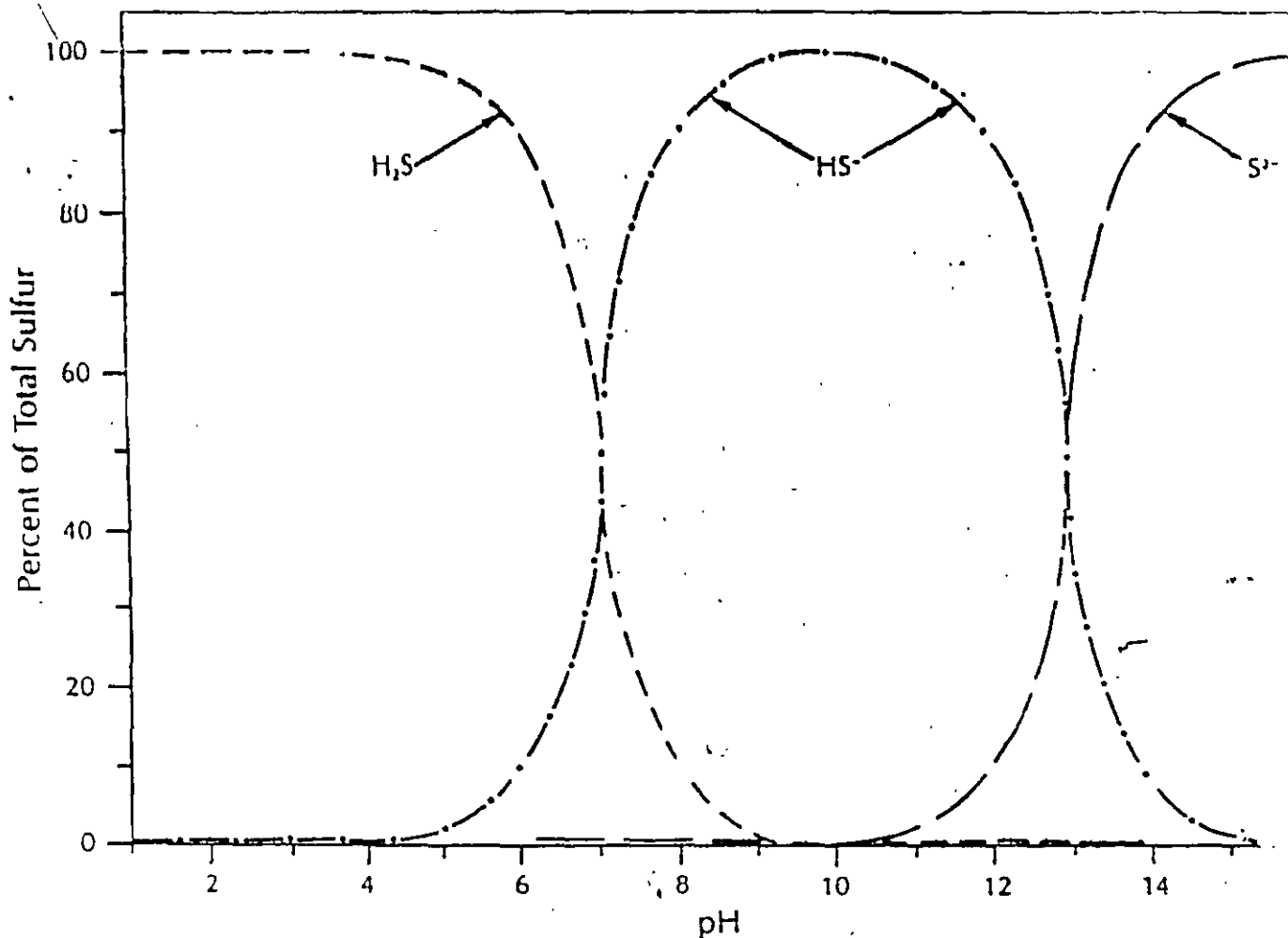
Predominio de Especies





Constantes de los pares ácido-base usuales en el agua

NOMBRE DEL ÁCIDO	FÓRMULA DEL ÁCIDO	FÓRMULA DE LA BASE	pK <sub>a</sub>
Ácido acético .....	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	4,75
Ion aluminio .....	Al <sup>3+</sup> , H <sub>2</sub> O	AlOH <sup>2+</sup>	5,0
Ion amonio .....	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>3</sub>	9,25
Ion anilinio .....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	4,6
Ácido arsenioso .....	H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,2
Ácido arsénico .....	H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2,2
	H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HAsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,0
	HAsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	~11,5
Ácido benzoico .....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CO <sub>2</sub> H	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	4,2
Ácido bórico .....	HBO <sub>3</sub>	BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,2
Ácido carbónico .....	CO <sub>2</sub> , aq	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6,4
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	10,3
Ácido crómico .....	H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	HCrO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,8
	HCrO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6,5
Ácido cítrico .....	H <sub>3</sub> A	H <sub>2</sub> A <sup>-</sup>	3,1
	H <sub>2</sub> A <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> A <sup>2-</sup>	4,8
	H <sub>2</sub> A <sup>2-</sup>	HA <sup>3-</sup>	6,4
	HA <sup>3-</sup>	A <sup>4-</sup>	16,0
Cupferrón .....	H Cup	Cup <sup>-</sup>	4,2
Ácido cianhídrico .....	HCN	CN <sup>-</sup>	9,3
Ácido dicloroacético .....	Cl <sub>2</sub> CHCO <sub>2</sub> H	Cl <sub>2</sub> CHCO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1,3
2,2'-dipiridilo .....	HA <sup>+</sup>	A	4,4
Ácido etilendiaminotetracético	H <sub>4</sub> A	H <sub>3</sub> A <sup>-</sup>	2,0
	H <sub>3</sub> A <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> A <sup>2-</sup>	2,7
	H <sub>2</sub> A <sup>2-</sup>	HA <sup>3-</sup>	6,2
	HA <sup>3-</sup>	A <sup>4-</sup>	10,3
Ácido fluorhídrico .....	HF	F <sup>-</sup>	3,2
Ácido fórmico .....	HCO <sub>2</sub> H	HCO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	3,8
Ion hexametilentetraminio ....	HA <sup>+</sup>	A	5,1
Ion hidroxilamonio .....	NH <sub>2</sub> OH <sup>+</sup>	NH <sub>2</sub> OH	6,1
Ácido hipocloroso .....	HClO	ClO <sup>-</sup>	7,5
Ácido hipofosforoso .....	H <sub>3</sub> PO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1,0
Ácido monocloroacético	ClCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> H	ClCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	2,9
Ácido nitroso .....	HNO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	3,3
Ácido ortofosfórico .....	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2,2
	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,2
	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	12,3
Ácido oxálico .....	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	HC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,25
	HC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>-</sup>	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4,3
Ion oxinio .....	H <sub>2</sub> Ox <sup>+</sup>	HOx	5,0
Oxina .....	HOx	Ox <sup>-</sup>	9,9
Ion tenantrolinio .....	HA <sup>+</sup>	A	5,0
Fenol .....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sup>-</sup>	9,5
Ion piridinio .....	HC <sub>5</sub> H <sub>4</sub> N <sup>+</sup>	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> N	5,2
Ácido pirofosfórico .....	H <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	H <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>-</sup>	1,0
	H <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>-</sup>	M <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	2,5
	H <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	HP <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>3-</sup>	6,1
	HP <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>3-</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>4-</sup>	8,5
Ion sulfato ácido .....	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,9
Ácido sulfhídrico .....	H <sub>2</sub> S	HS <sup>-</sup>	7,0
	HS <sup>-</sup>	S <sup>2-</sup>	12,9
Ácido sulfuroso .....	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,9
	HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	7,2
Ácido tartárico .....	H <sub>2</sub> A	HA <sup>-</sup>	3,0
	HA <sup>-</sup>	A <sup>2-</sup>	4,4



**Figure 11.3** The pH dependence of the abundances of S-bearing ions and molecules in a solution of  $H_2S_{(aq)}$  containing a fixed amount of S in solution (equation 11.79). Note that  $H_2S$  is dominant at  $pH < 7.0$ ,  $HS^-$  dominates between  $pH = 7.0$  and  $12.9$ , and that  $S^{2-}$  is dominant only at  $pH > 12.9$ . However, all of the ions are present at all values of the pH even though their abundances may be small compared to that of the dominant ion.

## OXIDACION-REDUCCION

Intercambio de electrones

Oxidante + ne  $\rightleftharpoons$  Reductor

Ley de Nernst

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \log \frac{I_{OxI}}{I_{RedI}}$$

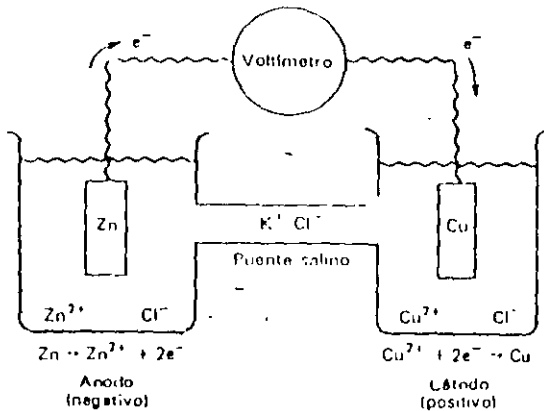
A 20 °C:

$$E = E_0 + \frac{0.058}{n} \log \frac{I_{OxI}}{I_{RedI}}$$

La aplicación de la ecuación de Nernst a las reacciones que se llevan a cabo en una celda electroquímica y en solución se ilustran en los ejemplos 7-6 y 7-7 respectivamente.

Ejemplo 7-6

Una celda de Daniell consta de un electrodo de zinc en una solución de cloruro de zinc conectado a un electrodo de cobre en una solución de cloruro cúprico.



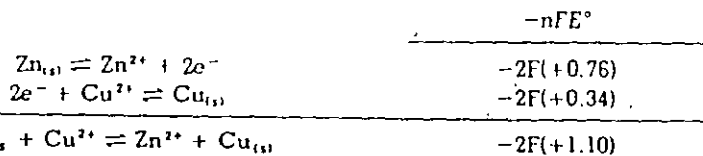
Cuál es la constante de equilibrio de la reacción de la celda a 25°C? De la tabla, 7-1,

$$E_{\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}}^{\circ} = -0.76 \text{ volt} \text{ y } E_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}}^{\circ} = +0.34 \text{ volt.}$$

ión

Suponiendo que en la celda se oxida el Zn y se reduce el Cu<sup>2+</sup>, la reacción de la celda

da



Así pues  $E_{\text{celda}}^{\circ} = 1.10$  volt. (Nótese que si se hubiese supuesto que se oxidaba el Cu<sup>2+</sup> y se reducía el Zn<sup>2+</sup>,  $E_{\text{celda}}^{\circ}$  tendría la misma magnitud absoluta pero no sería el contrario. En el equilibrio, cuando no fluye corriente por el circuito,  $E = 0$  y de la ecuación 7-8 se tiene

$$E^{\circ} = +1.1 = \left(\frac{0.059}{2}\right) \log K$$

Ejemplo 7-7

La determinación de Winkler para oxígeno disuelto implica la formación de  $\text{MnO}_{2(s)}$  por oxidación de  $\text{Mn}^{2+}$  con oxígeno. El  $\text{MnO}_{2(s)}$  reacciona después con  $\text{I}^{-}$  para formar  $\text{I}_{2(ac)}$ . Determinar el valor de  $E$  en una solución que contiene 8 mg de OD/litro en un punto en que la mitad del  $\text{MnO}_{2(s)}$  formado por reacción con el OD se ha reducido a  $\text{Mn}^{2+}$  por acción del  $\text{I}^{-}$  (que a su vez se ha oxidado a  $\text{I}_{2(ac)}$ ). La concentración de  $\text{H}^{+}$  es aproximadamente 1 M. En la determinación se utilizan las siguientes concentraciones y cantidades de reactivos:

1.  $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 2 ml de una solución con 400 g/litro por 300 ml de volumen de muestra.
2.  $\text{KI}$ : 2 ml de una solución con 150 g/litro por 300 ml de volumen de muestra.

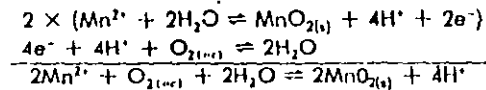
Solución

Despreciar los cambios en volumen causados por la adición de soluciones de  $\text{MnSO}_4$  y  $\text{KI}$ .

$$C_{\text{Mn}^{2+}} = \frac{400 \text{ g/litro } \text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}{2 \text{ ml}/300 \text{ ml muestra}} = 2.14 \text{ mol/litro} = 143 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$C_{\text{I}^{-}} = \frac{150 \text{ g/litro } \text{KI}}{2 \text{ ml}/300 \text{ ml muestra}} = 0.90 \text{ mol/litro} = 6 \times 10^{-3} \text{ M}$$

El ion manganesoso reacciona con el OD para formar óxido de manganeso,

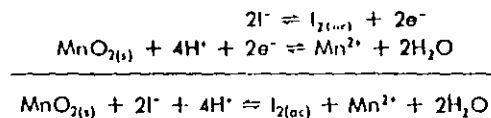


Así pues, 8 mg/litro de OD [= (8 mg/litro)(32,000 mg/mol) =  $2.5 \times 10^{-4}$  mol/litro] producirán  $2 \times 2.5 \times 10^{-4} = 5.0 \times 10^{-4}$  mol  $\text{MnO}_{2(s)}$ /litro.

Después de la reducción de la mitad del  $\text{MnO}_{2(s)}$  a  $\text{Mn}^{2+}$  con  $\text{I}^{-}$ ,

$$\begin{aligned} [\text{Mn}^{2+}] &= C_{\text{Mn}^{2+}} - \text{número de moles de } \text{MnO}_{2(s)} / \text{litro} \\ &= 1.43 \times 10^{-2} \text{ M} - 0.5(5.0 \times 10^{-4} \text{ M}) \\ &= 1.40 \times 10^{-2} \text{ M} \end{aligned}$$

La reacción de  $\text{MnO}_{2(s)}$  con  $\text{I}^{-}$  produce



Entonces

$$E_{\text{celda}}^{\circ} = E_{\text{I}_{2(ac)}/\text{I}^{-}}^{\circ} + E_{\text{MnO}_{2(s)}/\text{Mn}^{2+}}^{\circ} = -0.62 + 1.23 = +0.61$$

*Physical chemistry of aqueous solutions*

electrode negative, denoted by  $E_H = -0.763$  V ( $E_H$  signifies a measurement relative to the standard hydrogen electrode).

The hydrogen and zinc electrodes together form an electrochemical cell. Electrons produced at the zinc electrode travel through the external circuit, in which they do electrical work, to the hydrogen electrode, where they combine with hydrogen ions to produce hydrogen, the overall reaction being

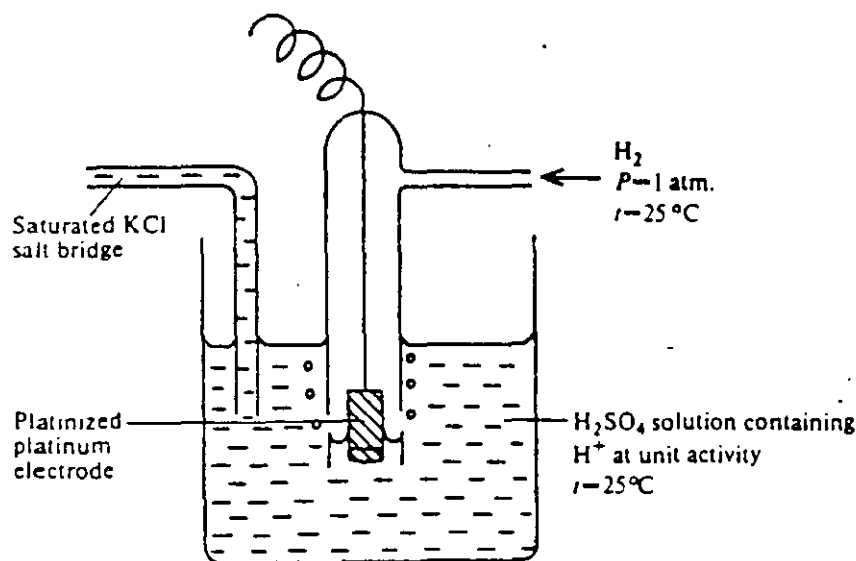
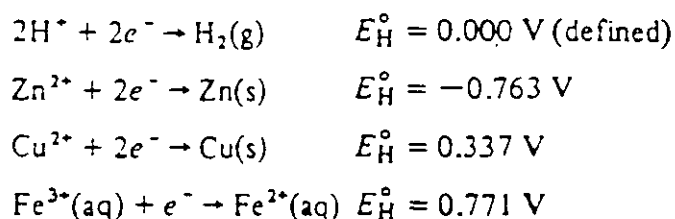


Fig. 3.7. Standard hydrogen electrode.

A standard electrode potential can be defined for any redox half-reaction—it is the  $E_H$  of an electrode when all reactants are present in their standard states at 25 °C and 1 atm pressure (for dissolved species, the standard state is unit activity). By the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) 1953 convention, standard electrode potentials are quoted for reactions written as reductions and the sign of the potential is the sign of the electrode when connected to a standard hydrogen electrode. (Certain lists of standard electrode potentials use another convention, in which the signs are reversed.) Examples of standard electrode potentials are



An extensive list of electrode potentials is given in Appendix II.

Standard electrode potentials enable the assessment of relative reducing and

*Algunos potenciales normales de sistemas sencillos en disolución acuosa:*

$\text{Co (CN)}_6^{3-} + e \rightleftharpoons \text{Co (CN)}_6^{4-}$	- 0 <sup>v</sup> ,8
$\text{Cr}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Cr}^{2+}$	- 0 <sup>v</sup> ,41
$\text{V}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{V}^{2+}$	- 0 <sup>v</sup> ,26
$2\text{H}^+ + e \rightleftharpoons \text{H}_2 \uparrow$	0 <sup>v</sup> ,00 para presión de $\text{H}_2 = 1$ atmósfera
$\text{Cu}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	+ 0 <sup>v</sup> ,15
$\text{Fe (CN)}_6^{3-} + e \rightleftharpoons \text{Fe (CN)}_6^{4-}$	0 <sup>v</sup> ,36
$\text{MnO}_4^- + e \rightleftharpoons \text{MnO}_4^{2-}$	0 <sup>v</sup> ,6
$\text{I}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	0 <sup>v</sup> ,62
$\text{Fe}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	0 <sup>v</sup> ,77
$2\text{Hg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Hg}_2^{2+}$	0 <sup>v</sup> ,91
$\text{Br}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	1 <sup>v</sup> ,09
$\text{Ti}^{3+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ti}^+$	1 <sup>v</sup> ,28
$\text{Cl}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1 <sup>v</sup> ,41
$\text{Ce}^{4+} + e \rightleftharpoons \text{Ce}^{3+}$	1 <sup>v</sup> ,7
$\text{Pb}^{4+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}$	1 <sup>v</sup> ,8
$\text{Co}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Co}^{2+}$	1 <sup>v</sup> ,8
$\text{Ag}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Ag}^+$	2 <sup>v</sup> ,0
$\text{F}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	2 <sup>v</sup> ,87

NOTAS. — 1.º Los oxidantes se clasifican por orden de fuerza creciente y los reductores, por orden de fuerza decreciente.

Un oxidante puede reaccionar con todo reductor que se encuentre por encima de él en la tabla, a la izquierda sobre la figura.

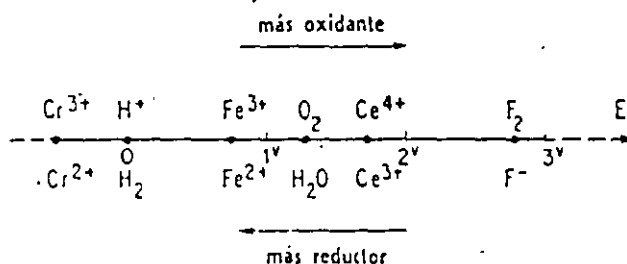


FIG. 3

Obsérvese que en el sistema  $\text{F}_2/2\text{F}^-$ ,  $\text{F}^-$  juega el papel de reductor. Ahora bien,  $\text{F}^-$  no puede reducir más que a los sistemas de potencial más elevado que el suyo, prácticamente a ninguno. Del mismo modo,  $\text{Ce}^{3+}$  no puede desempeñar el papel de reductor en medio ácido más que frente a oxidantes más energéticos que  $\text{Ce}^{4+}$ , o sea, en un número limitado de casos; es poco reductor. En el otro extremo de la escala

**Table 16.3** Electromotive Series Presented as Electrode Half-reactions in Order of Decreasing Strengths as Reducing Agents<sup>a</sup>

Reducing agent	Oxidizing agent	Standard electrode potential, V
Cs	Cs <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> -3.03
Li	Li <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> -3.04
K	K <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> -2.94
Ba	Ba <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -2.91
Sr	Sr <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -2.90
Ca	Ca <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -2.87
Na	Na <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> -2.71
Rb	Rb <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> -2.60
Y	Y <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -2.40
Mg	Mg <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -2.36
La	La <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -2.36
Ce	Ce <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -2.32
Sc	Sc <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -2.03
Be	Be <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -1.97
Th	Th <sup>4+</sup>	+ 4 e <sup>-</sup> -1.83
Al	Al <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -1.70
U	U <sup>4+</sup>	+ 4 e <sup>-</sup> -1.38
Mn	Mn <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -1.18
Nb	Nb <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -1.10
V	V <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -0.87
Zn	Zn <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.76
Cr	Cr <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -0.74
S <sup>2-</sup>	S	+ 2 e <sup>-</sup> -0.44
Fe	Fe <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.41
Cd	Cd <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.40
Co	Co <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.28
Ni	Ni <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.24
Mo	Mo <sup>3+</sup>	+ 3 e <sup>-</sup> -0.20
Sn	Sn <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.14
Pb	Pb <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> -0.13
<hr/>		
H <sub>2</sub>	2 H <sup>+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> 0.00
<hr/>		
Br	Br <sup>2</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> +0.29
Cu	Cu <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> +0.34
Cu	Cu <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> +0.52
I <sup>-</sup>	I <sub>2</sub>	+ 2 e <sup>-</sup> +0.53
Se <sup>2-</sup>	Se	+ 2 e <sup>-</sup> +0.67
Ag	Ag <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> +0.80
Hg	Hg <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> +0.85
Pd	Pd <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> +0.92
2 Br <sup>-</sup>	Br <sub>2</sub>	+ 2 e <sup>-</sup> +1.08
Pt	Pt <sup>2+</sup>	+ 2 e <sup>-</sup> +1.19
2 Cl <sup>-</sup>	Cl <sub>2</sub>	+ 2 e <sup>-</sup> +1.36
Au	Au <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> +1.69
Pt	Pt <sup>+</sup>	+ e <sup>-</sup> +2.64
2 F <sup>-</sup>	F <sub>2</sub>	+ 2 e <sup>-</sup> +2.88

<sup>a</sup>Based on  $G_f^\circ$  values in the Appendix

Evidently, the *standard electrode potentials* reflect the same property of the elements as *electronegativities* (Section 6.2) and both arise from the tendencies of atoms to have completely filled orbitals either by giving up or accepting electrons.

## 16.3 The Emf of Electrochemical Cells

The relationship between the free energy change of a chemical reaction and the activities of the reactants and products is given by an equation derived in Section 13.8 (equation 13.73),

$$\Delta G_R - \Delta G_R^\circ = RT \ln Q \quad (16.44)$$

where  $\Delta G_R$  is the free energy change of the reaction in any state,  $\Delta G_R^\circ$  is the free energy change in the standard state,  $R$  is the gas constant,  $T$  is the standard temperature in kelvins, and  $Q$  is the reaction quotient. We now convert  $\Delta G$  values to emf by substituting equation 16.23 into equation 16.44. After rearranging terms and converting to logarithms to the base 10, we have

$$E = E^\circ + \frac{2.303RT}{n\mathcal{F}} \log Q \quad (16.45)$$

Since  $R = 1.987 \times 10^{-3}$  kcal/deg·mol,  $T = 298.15$  K,  $\mathcal{F} = 23.06$  kcal/V·number of electrons transferred,

$$E = E^\circ + \frac{2.303 \times (1.987 \times 10^{-3}) \times 298.15}{n \times 23.06} \log Q \quad (16.46)$$

$$E = E^\circ + \frac{0.05916}{n} \log Q \quad (16.47)$$

Equation 14.47 provides a relationship between the activities of the reactants and products of an oxidation-reduction reaction, expressed by  $Q$ , and the emf that can be generated by the reac-

tion if it were split into two half-reactions in an electrochemical cell. When the reaction achieves equilibrium,  $\Delta G_R = 0$ ,  $E = 0$ , and  $Q = K$  where  $K$  is the equilibrium constant. Therefore, at equilibrium

$$E^\circ = -\frac{0.05916}{n} \log K \quad (16.48)$$

Equation 16.48 relates the emf of an oxidation-reduction reaction in the standard state to the equilibrium constant of that reaction.

We can apply these relationships to the Zn-Cu electrochemical cell represented by equation 16.41. When this reaction is neither in the standard state nor at equilibrium, the emf it generates is given by

$$E = E^\circ + \frac{0.05916}{2} \log \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad (16.49)$$

where  $E^\circ$  is the emf generated by the Zn-Cu cell in the standard state, which has a value of  $-1.10$  V as calculated in equation 16.24. Therefore, when the reaction is proceeding toward equilibrium, the emf is

$$E = -1.10 + 0.02958 \log \frac{[\text{Zn}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad (16.50)$$

In the standard state,  $[\text{Zn}^{2+}] = [\text{Cu}^{2+}] = 1.0$  and therefore  $\log [\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}] = 0$ . Consequently, in the standard state the emf is

$$E = E^\circ = -1.10 \text{ V} \quad (16.51)$$

At equilibrium,  $[\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}] = 10^{37.24}$  (equation 16.22). Therefore, at equilibrium

$$E = -1.10 + 0.02958 \times 37.24 = 0.00 \text{ V} \quad (16.52)$$

The progress of the reaction in the Zn-Cu cell is illustrated by plotting equation 16.50 in Figure 16.2 in coordinates of  $E$  and  $\log [\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}]$ . The straight line indicates how  $E$  changes from

Table 3.9 Redox Half-Reactions for Many Constituents  
That Occur in the Groundwater Environment

(1) $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	(18) $\frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{9}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{HS}^- + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
(2) $\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{H}_2(\text{g})$	(19) $\frac{1}{2}\text{S}(\text{s}) + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{H}_2\text{S}(\text{g})$
(3) $\text{H}_2\text{O} + e = \frac{1}{2}\text{H}_2(\text{g}) + \text{OH}^-$	(20) $\text{Fe}^{3+} + e = \text{Fe}^{2+}$
(4) $\frac{1}{3}\text{NO}_3^- + \frac{8}{3}\text{H}^+ + e = \frac{1}{6}\text{N}_2(\text{g}) + \frac{2}{3}\text{H}_2\text{O}$	(21) $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}^+ + e = \text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$
(5) $\frac{1}{2}\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{NO}_2^- + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	(22) $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 3\text{H}^+ + e = \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$
(6) $\frac{1}{8}\text{NO}_3^- + \frac{3}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{NH}_4^+ + \frac{1}{8}\text{H}_2\text{O}$	(23) $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{H}^+ + e = \text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$
(7) $\frac{1}{8}\text{NO}_2^- + \frac{4}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{NH}_4^+ + \frac{1}{8}\text{H}_2\text{O}$	(24) $\frac{1}{2}\text{FeS}_2(\text{s}) + 2\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S}(\text{g})$
(8) $\frac{1}{4}\text{NO}_3^- + \frac{3}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \frac{3}{8}\text{H}_2\text{O}$	(25) $\frac{1}{2}\text{Fe}^{2+} + \text{S}(\text{s}) + e = \frac{1}{2}\text{FeS}_2(\text{s})$
(9) $\frac{1}{2}\text{NO}_2^- + \frac{3}{2}\text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \frac{3}{4}\text{H}_2\text{O}$	(26) $\frac{1}{8}\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + e = \frac{1}{8}\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
(10) $\frac{1}{8}\text{N}_2(\text{g}) + \frac{4}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{NH}_4^+$	(27) $\frac{1}{4}\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + \frac{1}{4}\text{SO}_4^{2-} + \frac{9}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{3}{4}\text{H}_2\text{O}$
(11) $\frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{4}\text{H}_2\text{O}$	(28) $\frac{1}{4}\text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{s}) + \frac{1}{4}\text{SO}_4^{2-} + \frac{7}{4}\text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{3}{4}\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{4}\text{HCO}_3^-$
(12) $\frac{1}{4}\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + e = \frac{1}{4}\text{CH}_2\text{O} + \frac{1}{4}\text{H}_2\text{O}$	(29) $\frac{1}{2}\text{MnO}_2(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{HCO}_3^- + \frac{3}{2}\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{MnCO}_3(\text{s}) + \frac{3}{8}\text{H}_2\text{O}$
(13) $\frac{1}{2}\text{CH}_2\text{O} + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{CH}_3\text{OH}$	(30) $\text{Mn}^{2+} + 2e = \text{Mn}(\text{s})$
(14) $\frac{1}{8}\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{8}\text{H}_2\text{O}$	(31) $\frac{1}{2}\text{MnCO}_3 + \frac{1}{2}\text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{Mn}(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{HCO}_3^-$
(15) $\frac{1}{2}\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}^+ + e = \frac{1}{2}\text{CH}_4(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	(32) $\text{MnOOH}(\text{s}) + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}^+ + e = \text{MnCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
(16) $\frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{9}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{S}(\text{s}) + \frac{3}{8}\text{H}_2\text{O}$	(33) $\text{MnO}_2 + \text{H}^+ + e = \text{MnOOH}$
(17) $\frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{9}{8}\text{H}^+ + e = \frac{1}{8}\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	



## The Double Layer

The structure of the double layer has been the subject of a great deal of study, and several mathematical models are available to describe the distribution of ions within it (Westall and Hohl 1980). In general terms, the double layer consists of ions more or less attached to the solid surface (the *fixed* or *Stern* layer), and outside that a diffuse (or *Gouy*) layer in which the ions are free to move (Fig. 4-11). In the Gouy layer, the concentration of cations not balanced by anions decreases exponentially away from the boundary with the fixed layer. The ions in the fixed layer may be held by purely electrostatic forces, or by formation of complexes with groups on the surface of the solid (see Chapter 13).

The stability of a colloidal suspension depends on the thickness of the Gouy layer, which depends on the potential at the outside of the fixed layer and, approxi-

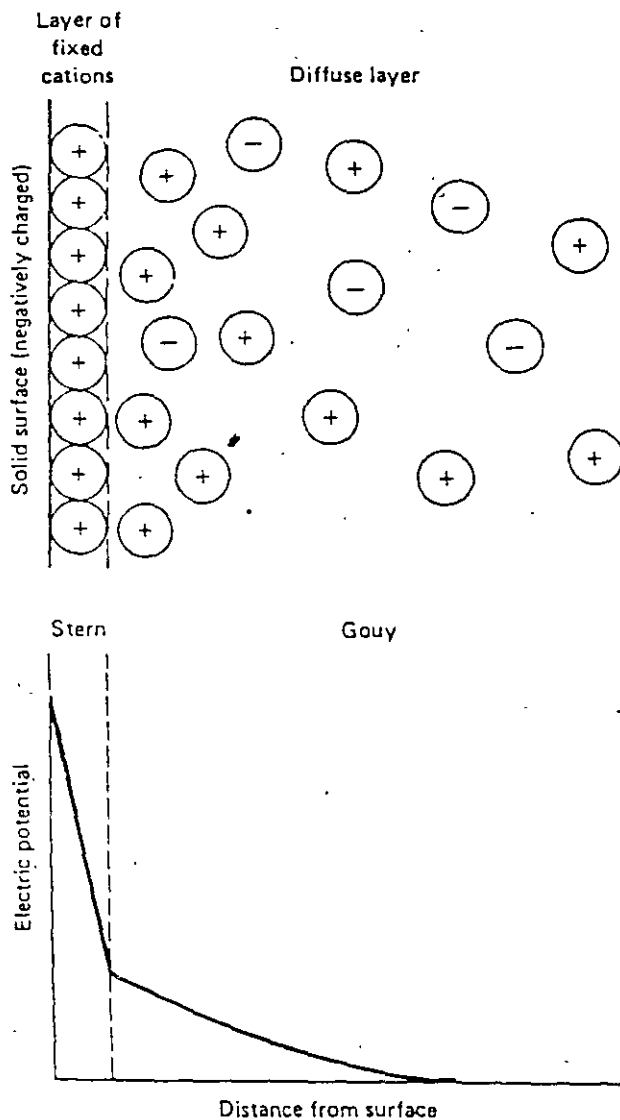


Figure 4-11 Schematic picture of the fixed (Stern) and diffuse (Gouy) layers.

In strongly alkaline solutions they will lose a proton and become



The net charge on a surface containing such hydroxyl groups will therefore vary with pH. In acid solutions, the surface will be positively charged; its cation-exchange capacity will be small (zero unless there is a specific chemical interaction between the cation and the surface), and it will have a finite anion-exchange capacity. In alkaline solutions, the surface will be negatively charged; anion-exchange capacity will be small or zero, and cation-exchange capacity will be significant. The pH at which the net charge on the surface is zero is called the *isoelectric point* (Table 4-1). Many transition metals, and some anions such as phosphate, are strongly adsorbed

**Table 4-1** Isoelectric points (pH) of some naturally occurring substances (from Parks 1965; Leckie and James 1974; James and MacNaughton 1977).

SiO <sub>2</sub> (quartz)	2.0	
SiO <sub>2</sub> (gel)	1.0-2.5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (corundum)	9.1	
Al(OH) <sub>3</sub> (gibbsite)	~9	
TiO <sub>2</sub> (anatase)	7.2	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (magnetite)	6.5	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (hematite)	5-9	(commonly 6-7)
FeO(OH) (goethite)	6-7	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · nH <sub>2</sub> O	6-9	
MnO <sub>2</sub> (various forms)	2	
Kaolinite	~3.5	
Montmorillonite	<2.5	

at oxide surfaces (see Chapter 13). When such species are adsorbed, the balance of electric charge at the surface is altered, and the *zero point of charge* (ZPC)—the pH at which the surface charge is zero—will differ from the isoelectric point, which is the ZPC when the only reactions affecting surface charge are adsorption and desorption of protons.

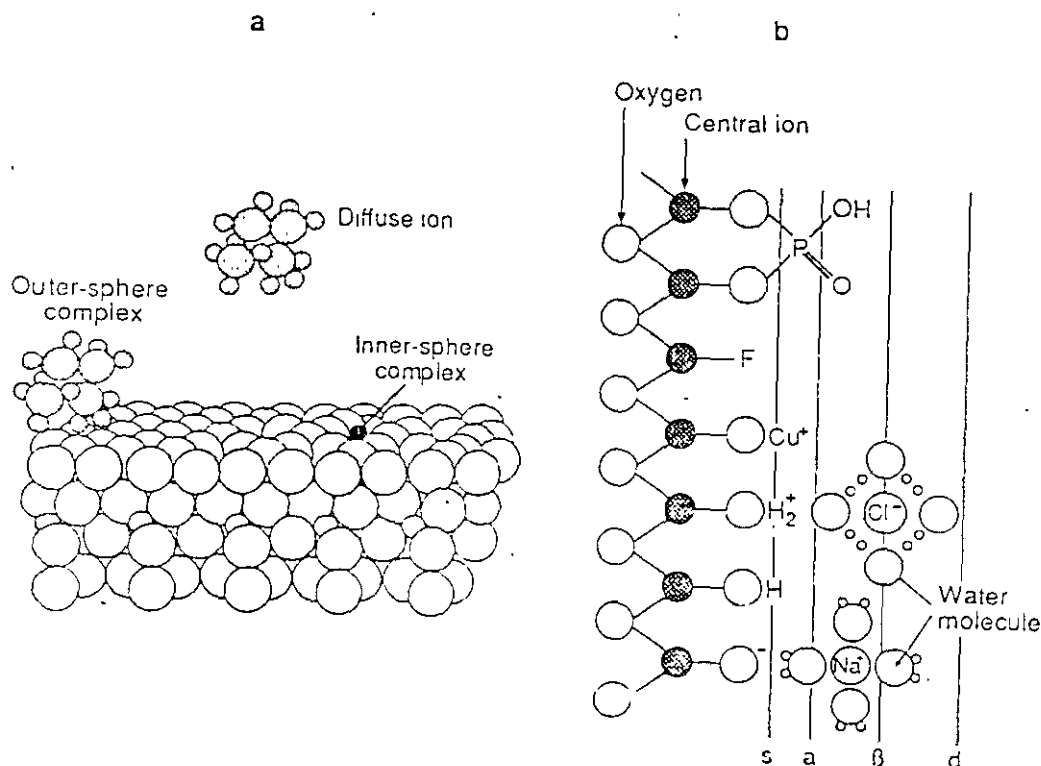
Parks (1967) showed that the isoelectric points of aluminosilicates could be predicted quite well on the basis of the number of SiOH and AlOH groups making up the surface. When the Al is octahedrally coordinated, AlOH groups have an isoelectric point of 9.2; when the Al is tetrahedrally coordinated, the isoelectric point is 6.8. SiOH groups have an isoelectric point of 1.8. An aluminosilicate surface with mostly SiOH groups will thus have a low isoelectric point, and a surface with mostly AlOH groups will have a relatively high isoelectric point. The isoelectric point is important because it determines the pH range in which the surface shows cation or anion exchange properties, and also the pH range in which stable colloidal suspensions can form.

The points of zero charge of many-type materials are presented in a tabulated way, upon pH and on the concentration (activities) of all potential-determining ions. Thus, in the case of calcite, possible potential-determining species, in addition to  $H^+$  and  $OH^-$ , are  $HCO_3^-$ ,  $CO_2$ , and  $Ca^{2+}$ ; various mechanisms of charge development are possible. When referring to a point of zero charge of such non-oxides the solution composition should be specified. In the absence of complications such as those caused by structural or adsorbed impurities, the point of zero charge of the solid should correspond to the pH of charge balance (electroneutrality) of potential-determining ions.

**Table 2.2** Point of Zero Charge caused by Binding or Dissociation of Protons <sup>a)</sup>

Material	pH <sub>pznpc</sub>	Material	pH <sub>pznpc</sub>
$\alpha-Al_2O_3$	9.1	$\delta-MnO_2$	2.8
$\alpha-Al(OH)_3$	5.0	$\beta-MnO_2$	7.2
$\gamma-AlOOH$	8.2	$SiO_2$	2.0
$CuO$	9.5	$ZrSiO_4$	5
$Fe_3O_4$	6.5	Feldspars	2 - 2.4
$\alpha-FeOOH$	7.8	Kaolinite	4.6
$\alpha-Fe_2O_3$	8.5	Montmorillonite	2.5
"Fe(OH) <sub>3</sub> " (amorph)	8.5	Albite	2.0
$MgO$	12.4	Chrysotile	>10

<sup>a)</sup> The values are from different investigators who have used different methods and are not necessarily comparable. They are given here for illustration.



**Figure 2.4**

Surface complex formation of an ion (e.g., cation) on the hydrous oxide surface. The ion may form an inner-sphere complex ("chemical bond"), an outer-sphere complex (ion pair) or be in the diffuse swarm of the electric double layer (From Sposito, 1989)

Fig. b shows a schematic portrayal of the hydrous oxide surface, showing planes associated with surface hydroxyl groups ("s"), inner-sphere complexes ("a"), outer-sphere complexes ("β") and the diffuse ion swarm ("d"). (Modified from Sposito, 1984)

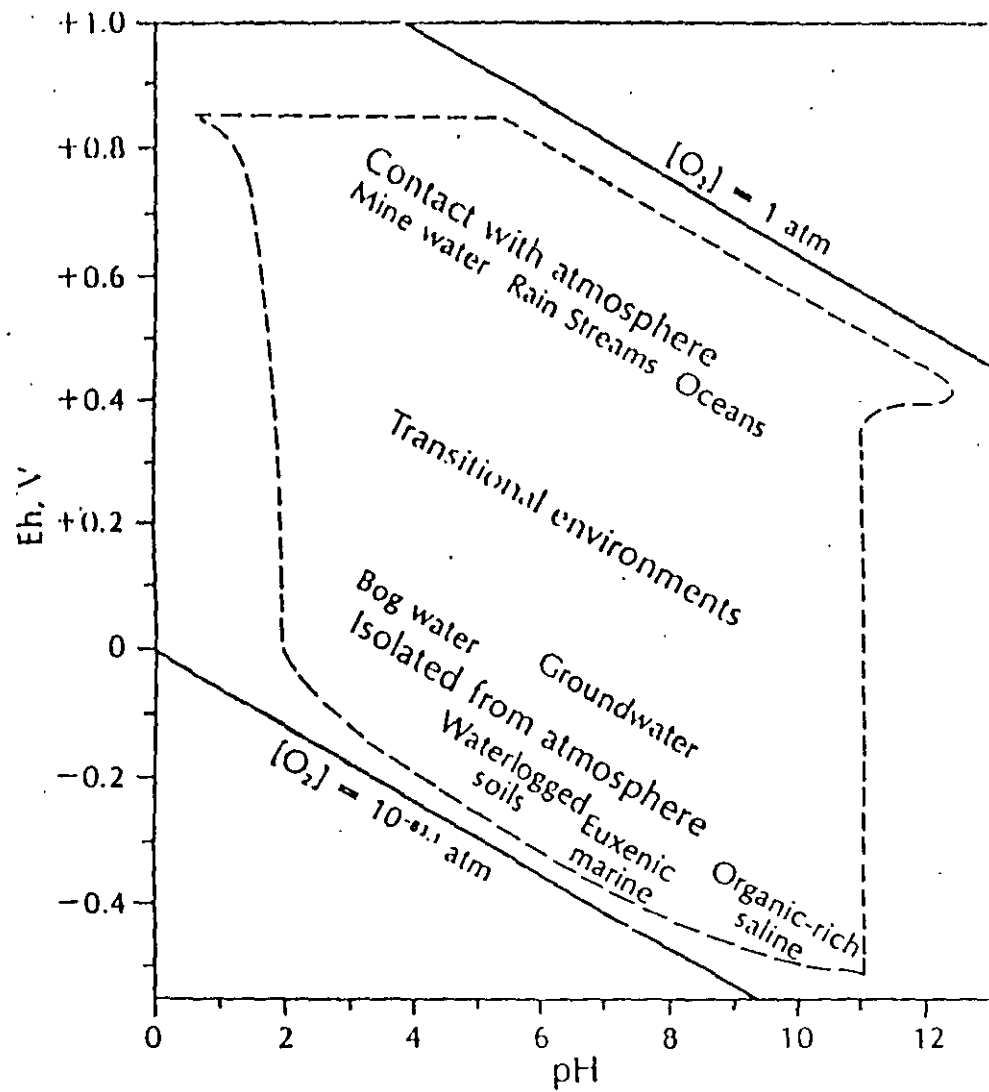


Figure 16.4 Range of Eh and pH conditions in natural environments based on data by Baas-Becking et al. (1960) and modified after Garrels and Christ (1965).

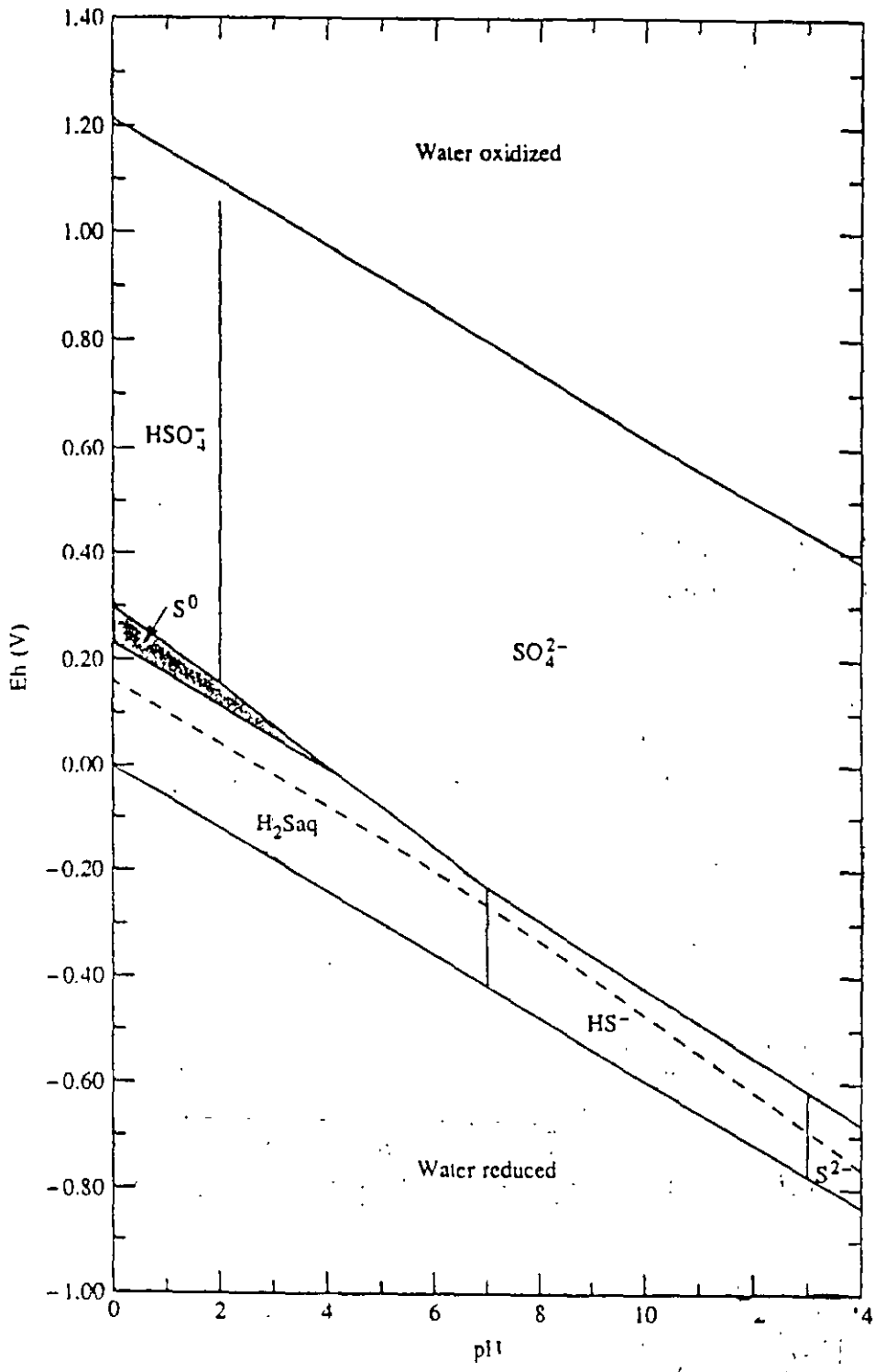
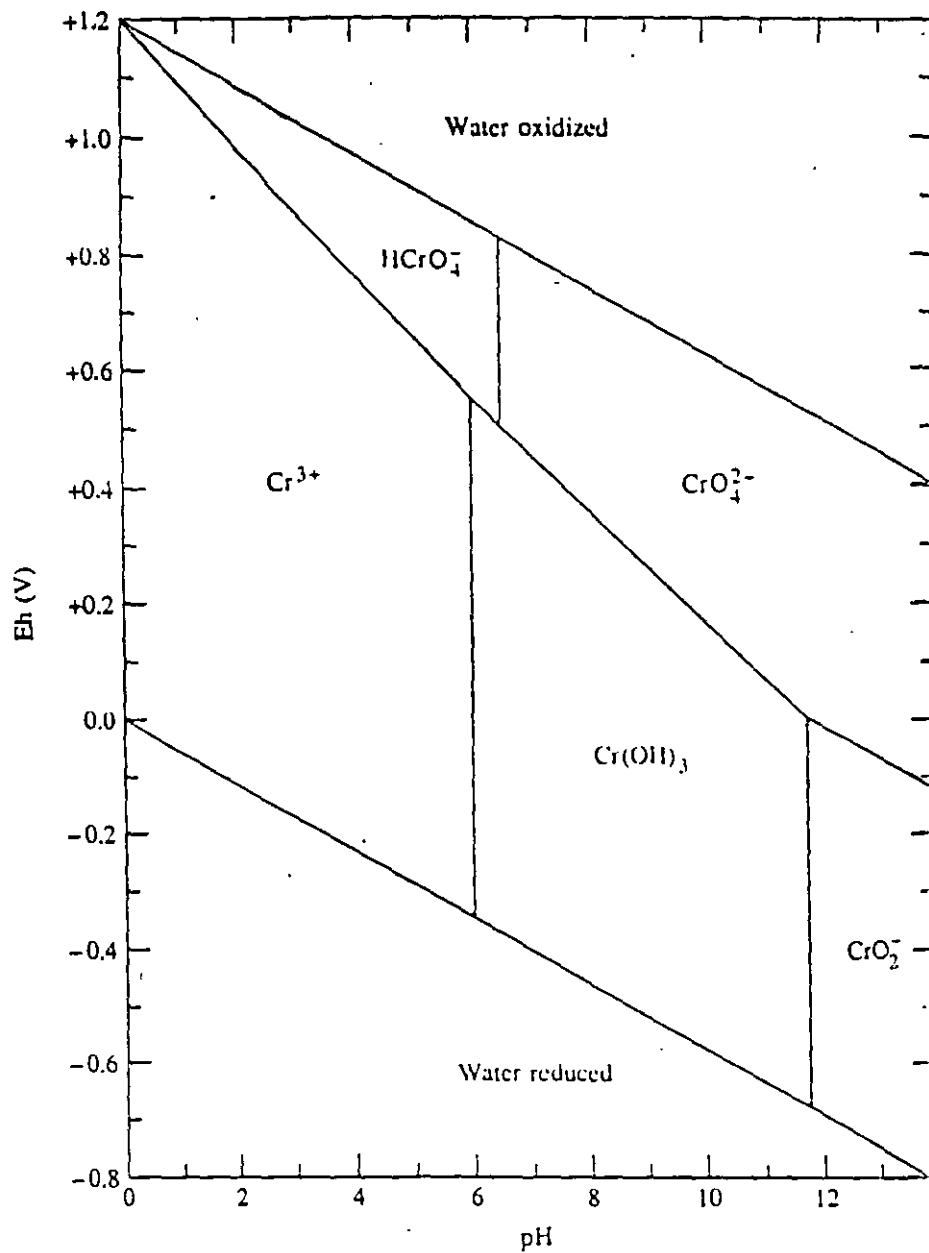


FIGURE 6.8 Eh-pH diagram for sulfur species at standard conditions with total dissolved sulfur activity of 96 mg/L. Source: J. D. Hem, *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters*, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, 1985



**FIGURE 6.10** Eh-pH diagram for chromium under standard conditions. Source: Modified Robertson, *Ground Water* 13, no. 6: 516-27. Used with permission. Copyright © 1975 by Journal Publishing Co.

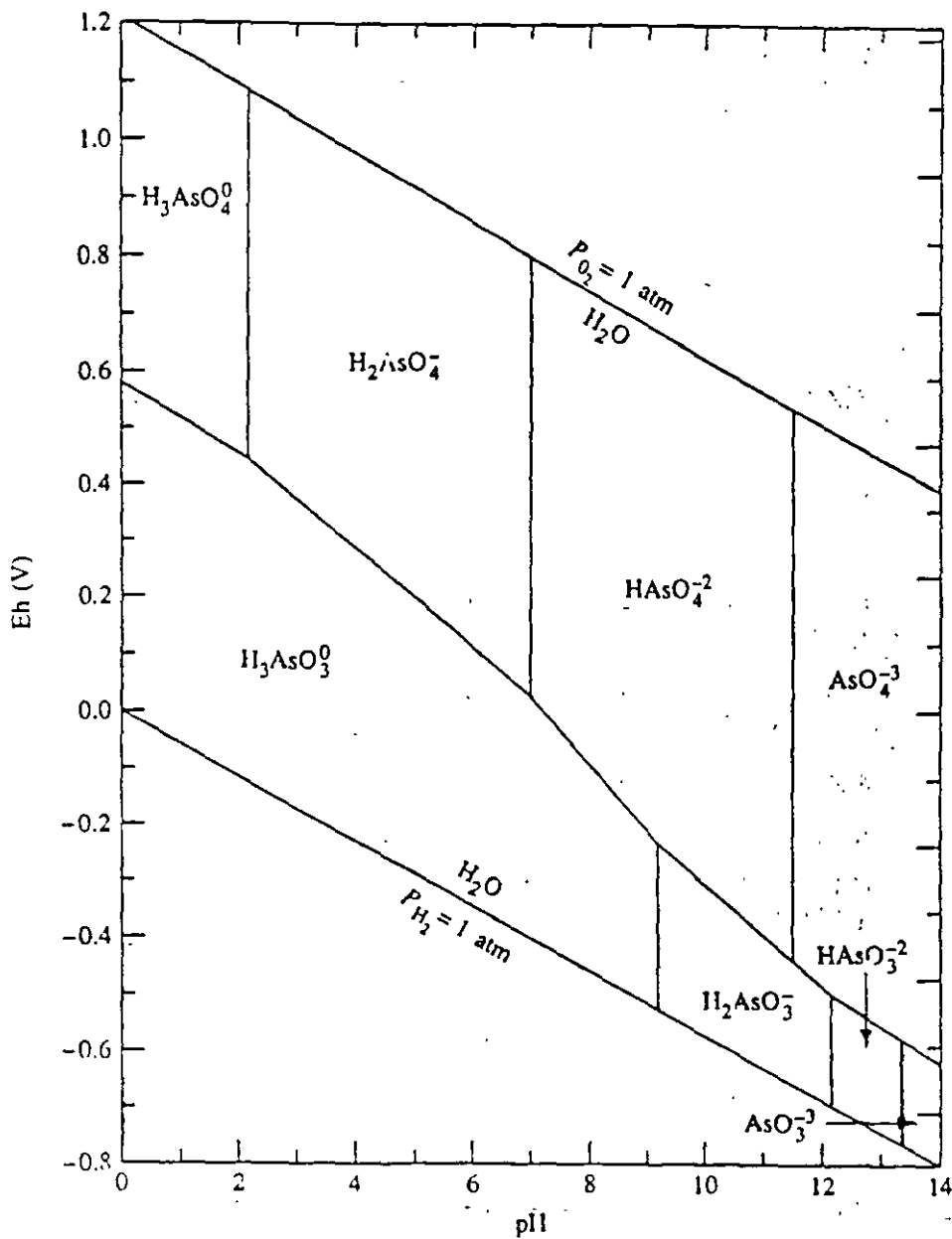
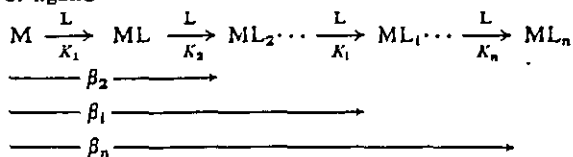


FIGURE 6.9 Eh-pH diagram for arsenic species under standard conditions. Source: A. H. Welch, M. S. Lico, and J. L. Hughes, *Ground Water* 26, no.3 (1988): 333-47. Used with permission. Copyright © 1988 by Water Well Journal Publishing Co.

Table 6-2 Formulation of Stability Constants†

## I. Mononuclear Complexes

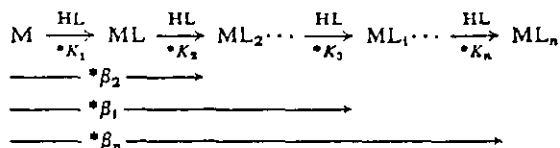
## (a) Addition of ligand



$$K_i = \frac{[ML_i]}{[ML_{(i-1)}][L]} \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{[ML_i]}{[M][L]^i} \quad (2)$$

## (b) Addition of protonated ligands



$$K_i = \frac{[ML_i][H^+]}{[ML_{(i-1)}][HL]} \quad (3)$$

$$\beta_i = \frac{[ML_i][H^+]^i}{[M][HL]^i} \quad (4)$$

## II. Polynuclear Complexes

In  $\beta_{nm}$  and  $\beta_{nm}^*$  the subscripts  $n$  and  $m$  denote the composition of the complex  $M_mL_n$  formed. [If  $m = 1$ , the second subscript ( $= 1$ ) is omitted.]

$$\beta_{nm} = \frac{[M_mL_n]}{[M]^m[L]^n} \quad (5)$$

$$\beta_{nm}^* = \frac{[M_mL_n][H^+]^n}{[M]^m[HL]^n} \quad (6)$$

† The same notation as that used in L. G. Sillén and A. E. Martell, *Stability Constants of Metal-Ion Complexes*, Special Publ., No. 17, The Chemical Society, London, 1964, is used.

At great dilution ( $pH \rightarrow 7$ ), most of the Cu(II) of a pure Cu-salt solution [e.g.,  $Cu(ClO_4)_2$ ] will occur as a hydroxo complex

$$\alpha_{CuOH^+} = \frac{[CuOH^+]}{Cu_T} = \left(1 + \frac{[H^+]}{K_1}\right)^{-1} = 0.91 \quad (3)$$

On the other hand, because of the small acidity of  $Mg^{2+}$ , even at infinite dilution the fraction of hydrolyzed  $Mg^{2+}$  ions of a solution of an  $Mg^{2+}$ -salt

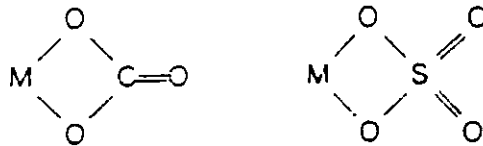
Complejo: Atomo central rodeado por iones o moléculas. Neutros, Cationicos, Anionicos  
 Ligando + ion metalico central  $\rightleftharpoons$  complejo



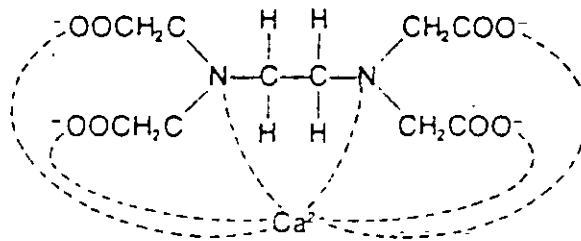
## Nomenclatura y definición de términos

con carbonilo (CO),  $\text{Ni}(\text{CO})_4^{2+}$ ; con la 1, 10-fenantrolina en el complejo  $\text{Ni}(\text{fenantrolina})_3^{2+}$  el número de coordinación es 6. El hierro (III) tiene los números de coordinación 6 para el agua,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  y el cianuro,  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3+}$ , pero 4 para el cloruro,  $\text{FeCl}_4^-$ .

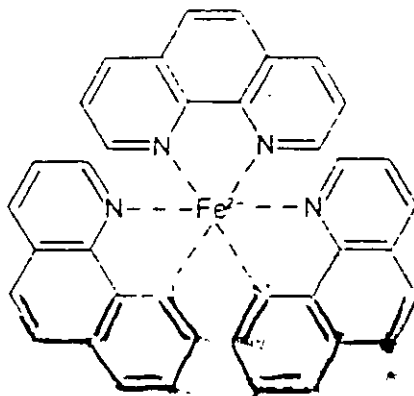
Los ligandos que se enlazan a un ion metálico central en un solo punto, como son  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{CN}^-$ , se llaman ligandos *monodentados*. Los ligandos que se fijan en dos o más sitios son ligandos *multidentados* o *agentes quelatantes*. El complejo formado por un agente quelatante y un ion metálico central se conoce como *quelato*. Por ejemplo, el cloruro forma un complejo monodentado con el ion mercúrico, mientras que el carbonato y el sulfato ocasionalmente pueden ser bidentados, fijándose al ion metálico central en dos sitios:



El agente quelatante  $\text{EDTA}^{4-}$  se puede fijar en seis sitios, ya que cada uno de los grupos acetato y los dos átomos de nitrógeno tienen pares de electrones libres necesarios para la formación de enlaces coordinados. Por ejemplo, el complejo del EDTA que se produce con el  $\text{Ca}^{2+}$  durante la determinación volumétrica de la dureza del agua es



Cada molécula del agente quelatante 1,10-fenantrolina, que se utiliza como indicador para el hierro en la terminación volumétrica de la prueba DQO, puede satisfacer dos sitios de coordinación con los pares de electrones en los dos átomos de nitrógeno en cada molécula. Con el  $\text{Fe}^{2+}$  se forma un complejo de color rojo con tres moléculas de 1,10-fenantrolina, satisfaciendo el número de coordinación de 6 para el ion  $\text{Fe}^{2+}$ .



### 6-3 The Stability of Hydrolysis Species

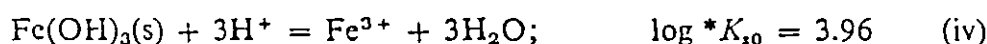
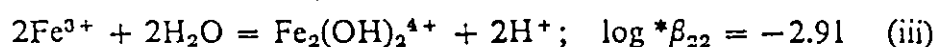
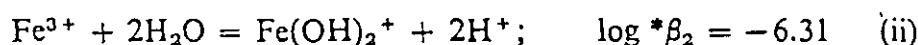
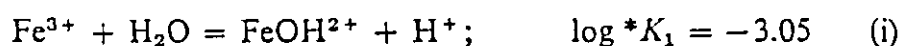
Quantitative application of known hydrolysis equilibria is illustrated in the next two examples.

**Example 6-1 The Hydrolysis of Iron(III).** The addition of  $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$  to  $\text{H}_2\text{O}$  may lead to the following soluble species:  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^{1+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$  and  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ .

Compute the equilibrium composition of:

1. A homogeneous solution to which  $10^{-4} M$  ( $10^{-2} M$ ) of iron(III) has been added and the pH adjusted within the range 1–4.5 with acid or base;
2. An iron(III) solution in equilibrium with amorphous ferric hydroxide.

The following equilibrium constants are available  $I = 3(\text{NaClO}_4)$  ( $25^\circ\text{C}$ ).



1. In the *homogeneous system*, the concentration condition [(vi) or (vii)] must be fulfilled.

$$\text{Fe}_T = [\text{Fe}^{3+}] + [\text{FeOH}^{2+}] + [\text{Fe}(\text{OH})_2^+] + 2[\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}] \quad (\text{vi})$$

$$\text{Fe}_T = [\text{Fe}^{3+}] \left( 1 + \frac{*K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{*K_1^2}{[\text{H}^+]^2} + \frac{2[\text{Fe}^{3+}]*\beta_{22}}{[\text{H}^+]^2} \right) \quad (\text{vii})$$

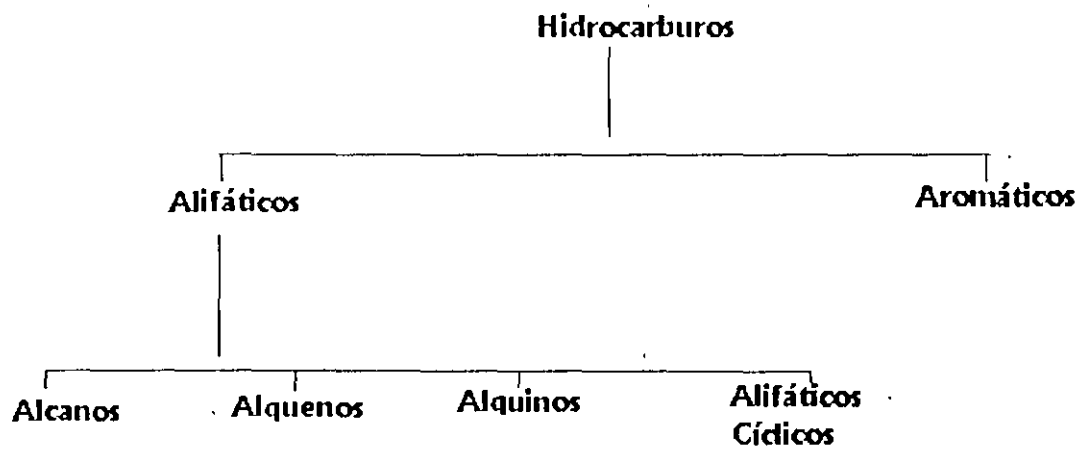
As with other polyprotic acids we may define successive distribution coefficients:  $\alpha_0 = [\text{Fe}^{3+}]/\text{Fe}_T$ ,  $\alpha_1 = [\text{FeOH}^{2+}]/\text{Fe}_T$ ,  $\alpha_2 = [\text{Fe}(\text{OH})_2^+]/\text{Fe}_T$  and  $\alpha_{22} = 2[\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}]/\text{Fe}_T$ . [ $\alpha_{22}$  gives the fraction of iron(III) present in the form of the dimer.]

Inspecting (vii) we note that the last term, proportional to the polymer concentration, is an implicit function of the concentration of iron(III).  $\alpha_0$  may be defined with the help of (i)–(iii) and (vii):

$$\alpha_0 = \left( 1 + \frac{*K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{*K_1^2}{[\text{H}^+]^2} + \frac{2\text{Fe}_T\alpha_0*\beta_{22}}{[\text{H}^+]^2} \right)^{-1} \quad (\text{viii})$$

or

$$\frac{\alpha_0^2 2\text{Fe}_T * \beta_{22}}{[\text{H}^+]^2} + \alpha_0 \left( 1 + \frac{*K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{*K_1^2}{[\text{H}^+]^2} \right) - 1 = 0 \quad (\text{ix})$$



## CONSTITUYENTES DEL PETROLEO

Fracción	T de destilación oC	Número de Carbonos
Gas	Debajo de 20°	C1-C4
Eter de petroleo	20-60°	C5-C6
Nafta ligero	60-100°	C6-C7
Gasolina natural	40-205°	C5-C10
Queroseno	175-325°	C12-C18 y aromáticos
Aceites	Arriba de 275°	C12 y mayores
Asfalto	Sólidos no volátiles	Estructuras policíclicas

TABLA 15.1:

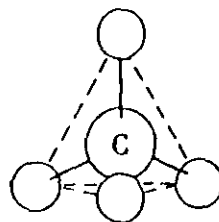
ESTRUCTURA DE LOS ALCANOS

Compuesto

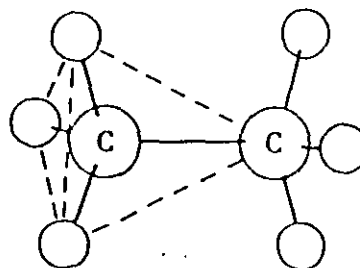
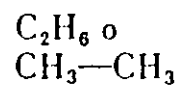
Fórmula

Estructura

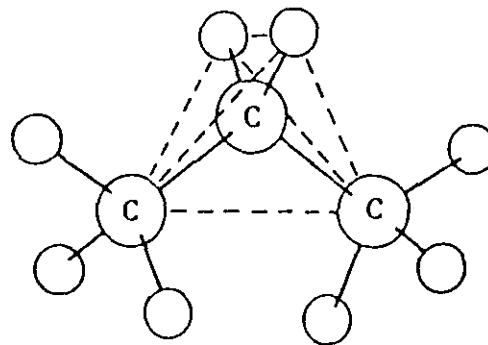
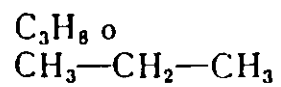
Metano



Etano



Propano



En estas reacciones de adición sólo hay un producto, un aceite incoloro. Cuando se trata la misma solución de bromo con un alcano, ocurre una reacción por sustitución muy lenta, de manera que el color rojo del bromo persiste. En luz brillante ciertos alcanos, como el isobutano, pueden reaccionar rápidamente con el  $\text{Br}_2$ . La evolución concomitante del  $\text{HBr}$  gaseoso que es poco soluble en tetracloruro de carbono, prueba que el bromo reacciona con el alcano. Por ejemplo,

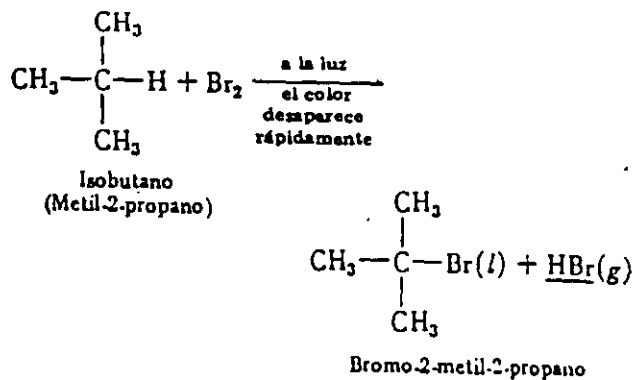
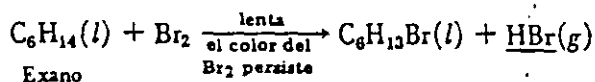


FIGURA 15.17

Conformaciones del *n*-butano y el *n*-pentano.

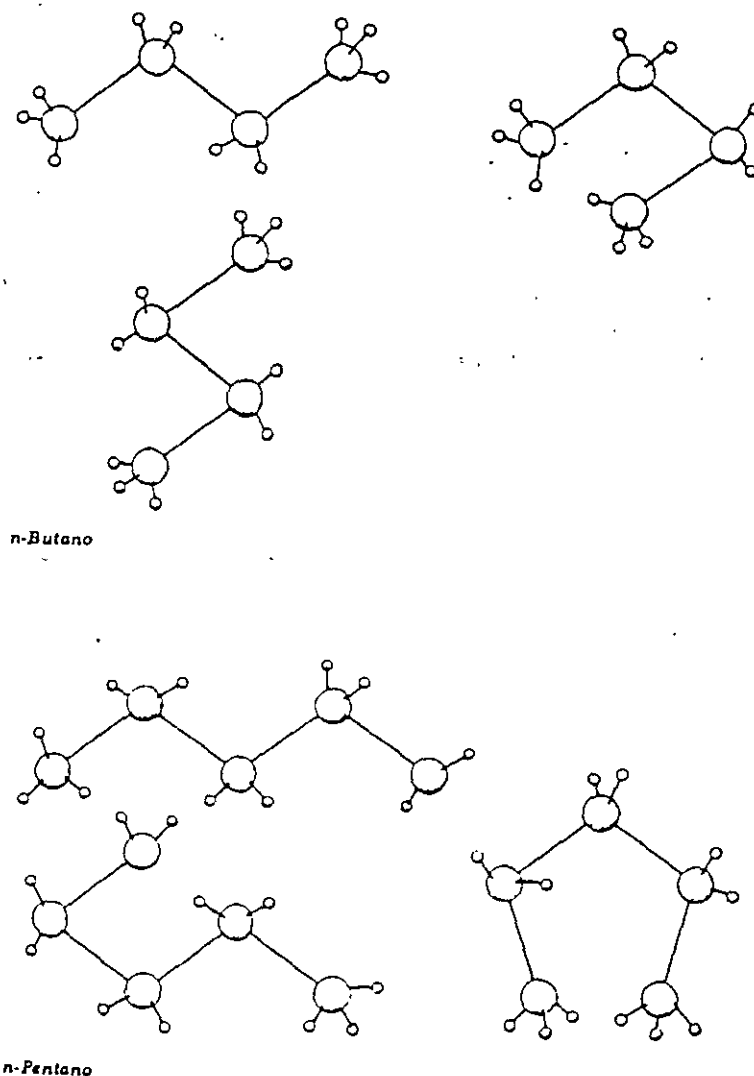


Tabla 3.1 Principales alcanos

Principales alcanos			
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa a 20°C
Metano	-183	-162	-
Etano	-172	-88.5	-
Propano	-187	-42	-
n-Butano	-138	0	-
n-Pentano	-130	36	0.626
n-Hexano	-95	69	0.659
n-Heptano	-90.5	98	0.684
n-Octano	-57	126	0.703
n-Nonano	-54	151	0.718
n-Decano	-30	174	0.730

Tabla 4.1 Principales alquenos

Principales alquenos			
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa a 20°C
Etileno	-169	-102	-
Propileno	-185	-48	-
Buteno	-	-6.5	-
Penteno	-	30	0.643
Hexeno	-138	63.5	0.675
Hepteno	-119	93	0.698
Octeno	-104	122.5	0.716
Noneno	-	146	0.731
Deceno	-87	171	0.743

Tabla 5.1 Principales alquinos

Principales alquinos			
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Densidad relativa a 20°C
Acetileno	-82	-75	-
Propino	-101.5	-23	-
Butino	-122	9	-

TABLA 15.7: GRUPOS FUNCIONALES

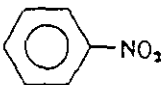
Grupo funcional	Nombre	Ejemplo	Nombre
$R-OH$	Hidroxi	$CH_3-CH(OH)-CH_3$	Propanol-2
$R-NH_2$	Amino	$CH_3CH_2-NH_2$	Etilamina
$R-COOH$	Acido Carboxílico	$CH_3CH_2-COOH$	Acido propanoico
$R-\overset{O}{\parallel}C-H$	Aldehído	$CH_3-\overset{O}{\parallel}C-H$	Acetaldehído
$R-\overset{O}{\parallel}C-R'$	Cetona	$CH_3-\overset{O}{\parallel}C-CH_3$	Acetona
$R-SH$	Tiol	$CH_3-SH$	Tiometano (metilmercaptano)
$R-NO_2$	Nitro		Nitrobenzeno

TABLA 15.8: GRUPOS FUNCIONALES DERIVADOS


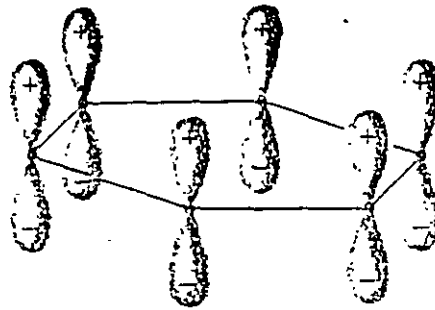
Grupo funcional derivado	Nombre	Ejemplo	Nombre
$R-O-\overset{O}{\parallel}C-R'$	Ester	$CH_3-O-\overset{O}{\parallel}C-$ 	Benzoato de metilo
$R-\overset{H}{\underset{ }{N}}-\overset{O}{\parallel}C-R'$	Amida	$\begin{array}{c} CH_3 \quad H \quad O \\   \quad   \quad    \\ CH-N-C-C_2H_5 \\   \\ CH_3 \end{array}$	N-Isopropilpropanamida
$R-O-R'$	Eter	$C_2H_5-O-C_2H_5$	Eter dietílico

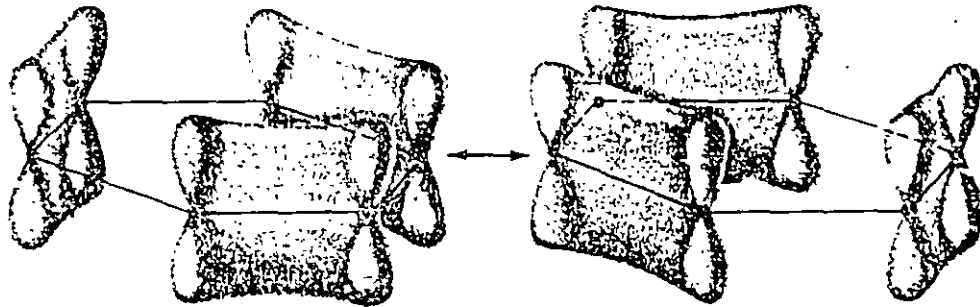


FIGURA 15.35

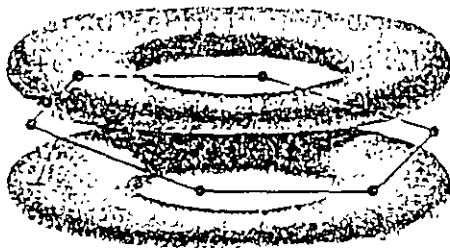
Enlaces  $\pi$  del benceno.



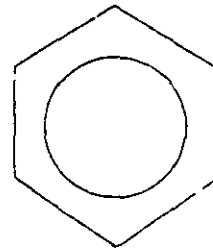
(a) Los seis orbitales atómicos  $2p_z$



(b) Estructuras del benceno según la teoría de enlace de valencia. En cada representación hay tres enlaces  $\pi$ .



(c) El orbital molecular  $\pi$  de menor energía que enlaza a todos los átomos de carbono.



(d) Símbolo del benceno que presenta deslocalización de los electrones de valencia.

TABLA 13.4: ALGUNOS DERIVADOS DEL BENCENO

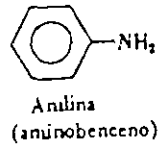
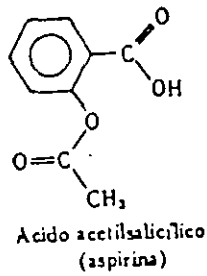
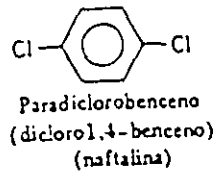
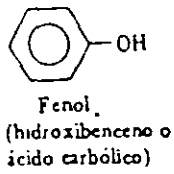
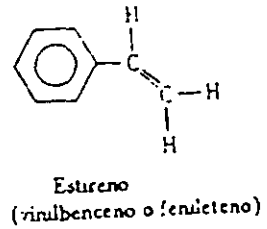
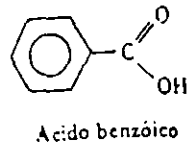
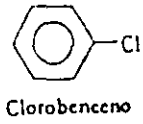
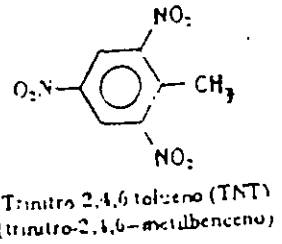
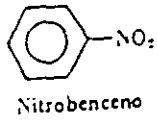
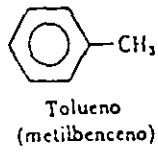
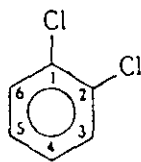
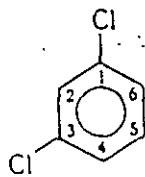


FIGURA 13.36

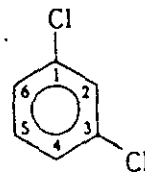
Los diclorobencenos.



(a) Ortodiclorobenceno.  
Dicloro 1,2-benceno



(b) Metadidiclorobenceno.  
Dicloro 1,3-benceno



(c) Paradiclorobenceno.  
Dicloro 1,4-benceno

**CONCEPTOS BÁSICOS DE QUÍMICA EN LOS  
ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN DE  
ACUÍFEROS**

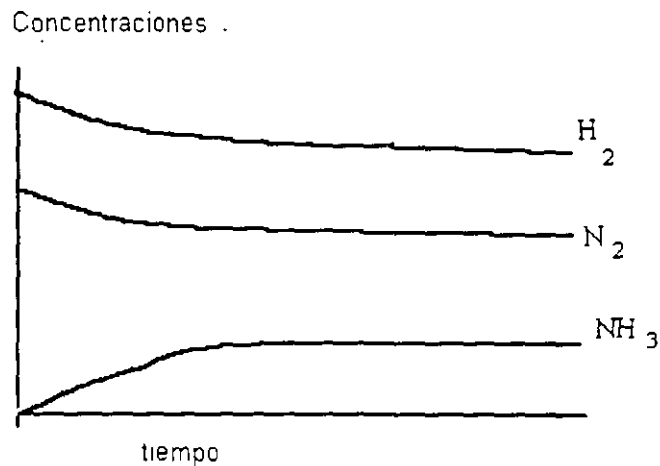
**POR: DRA. MA. AURORA ARMIENTA**

## CONCEPTOS BASICOS

### EQUILIBRIO QUÍMICO

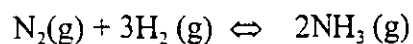
Cuando reaccionan dos o más sustancias decrecen sus concentraciones a lo largo del tiempo para dar lugar a la formación de productos. Algunas reacciones proceden hasta su terminación, en forma cuantitativa, aunque hay muchas que no lo hacen. En estas últimas la reacción se produce hasta que llega un momento en que las concentraciones de productos y reactivos así como las propiedades físicas del sistema permanecen constantes, se dice entonces que el sistema químico ha llegado a un estado de equilibrio.

En el equilibrio las reacciones directa e inversa ocurren a la misma velocidad, por lo que se trata de un equilibrio dinámico. La siguiente figura muestra como varían respecto al tiempo las concentraciones de  $N_2$ ,  $H_2$  y  $NH_3$  en una mezcla que se mantiene a  $500^\circ C$ .



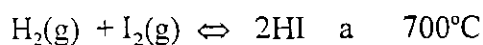
Fritz Haber al estudiar esta reacción observó que al principio la concentración de  $NH_3$  aumentaba continuamente, pero que a partir de un cierto momento alcanzaba un valor constante. De manera análoga, al iniciar la reacción disminuían las concentraciones de  $N_2$  y de  $H_2$  hasta que ya no decrecían más. A partir de un tiempo, que se conoce como el tiempo de equilibrio la composición de la mezcla se mantiene constante a pesar de la presencia de

ciertas cantidades de  $N_2$  y de  $H_2$ . La composición final de la mezcla de reacción corresponde a un equilibrio dinámico en el cual el amoníaco formado se descompone tan rápido como se produce, la ecuación química del equilibrio se expresa como:



Las letras entre paréntesis indican el estado físico de las especies reaccionantes, en este caso estado gaseoso (g). La doble flecha implica que la velocidad de la reacción de izquierda a derecha es igual que la de derecha a izquierda.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de un experimento llevado a cabo para la determinación de las concentraciones de equilibrio de la reacción siguiente:



Concentraciones iniciales (moles/l)			Concentraciones en equilibrio (moles/l)			
$H_2$	$I_2$	HI	$H_2$	$I_2$	HI	$\frac{[HI]_{eq}^2}{[H_2]_{eq}[I_2]_{eq}}$
0	0	4.49	0.48	0.48	3.53	54.4
11.15	9.95	0	2.91	1.71	16.48	54.7
11.34	7.51	2.53	4.77	0.94	15.67	54.6
11.34	7.51	0	4.56	0.74	13.54	54.5

Como se puede observar en la última columna de la tabla anterior, existe una relación constante entre los productos y los reactivos que no depende de las concentraciones iniciales. Esta relación se denomina constante de equilibrio, la cual es característica de la composición en equilibrio de una mezcla de reacción. La expresión de esta constante resulta de la ley de acción de masas.

## Constante de Equilibrio

De manera general para una reacción en equilibrio:



La velocidad de izquierda a derecha es:

$$v_{i-d} = k_i(A)^a(B)^b$$

La velocidad de derecha a izquierda:

$$v_{d-i} = k_d(C)^c(D)^d$$

En el equilibrio:

$$v_{i-d} = v_{d-i} \text{ por lo que: } k_i(A)^a(B)^b = k_d(C)^c(D)^d$$

De aquí:

$$\frac{k_i}{k_d} = K = \frac{(C)^c(D)^d}{(A)^a(B)^b}$$

Donde K es la constante de equilibrio de la reacción. Los productos C y D están en el numerador y los reactivos A y B en el denominador. Los paréntesis indican concentración. Cada concentración está elevada a una potencia igual al coeficiente estequiométrico de la ecuación balanceada. Cabe señalar que estrictamente en la constante de equilibrio deben incluirse las actividades de productos y reactivos, pero para los fines de estos apuntes consideraremos soluciones diluidas en las que la actividad se puede igualar a la concentración.

Cada reacción tiene su propia constante de equilibrio cuyo valor depende de la reacción específica y de la temperatura. El valor de la constante de equilibrio no depende de las concentraciones iniciales de los reactivos e indica el grado en que se verifica una reacción. Por ejemplo si una reacción tiene un valor de  $K = 160$  quiere decir que el numerador es 160 veces mayor que el denominador en el equilibrio. Por tanto esta reacción

y otras para las que  $K > 1$  son procesos que favorecen la formación de los productos, y se dice que están desplazadas a la derecha porque las concentraciones de los productos en el equilibrio son mayores que las de los reactantes (considerando los coeficientes estequiométricos). Las reacciones cuya  $K < 1$  son reacciones que favorecen a los reactantes. Las unidades de la constante de equilibrio dependen de las unidades en que se expresen las concentraciones y de la reacción en particular.

Para hacer cálculos que involucren la constante de equilibrio deben seguirse las siguientes reglas:

- 1.- La reacción debe estar escrita mediante una ecuación química balanceada.
- 2.- Los coeficientes estequiométricos de la ecuación química pasan a ser exponentes de las respectivas concentraciones en la expresión de la constante de equilibrio.
- 3.- Las concentraciones de equilibrio de los productos se colocan en el numerador y las de los reactivos en el denominador
- 4.- Las concentraciones de un líquido o un sólido puros (que no se encuentren en solución) no se incluyen en la expresión de la constante de equilibrio.

## ACTIVIDAD

La expresión correcta de la constante de equilibrio debe efectuarse en función de las actividades de las especies químicas. La actividad se relaciona con la concentración por:

$$a = \gamma c$$

donde  $a$ =actividad,  $\gamma$  = coeficiente de actividad y  $c$  = concentración.

El coeficiente de actividad ( $\gamma$ ) es función de la concentración, de la carga y naturaleza de todos los iones en una solución, de la carga del ión, y de la temperatura del agua.

Para determinar el coeficiente de actividad, es necesario conocer la fuerza iónica de la solución ( $I$ ).

$$I = \frac{1}{2} \sum (C_i Z_i^2)$$

Donde C es la concentración de cada ión y Z es la carga respectiva.

Para el cálculo del coeficiente de actividad generalmente se utiliza la teoría de Debye-Hückel, la cual se expresa por las siguientes ecuaciones para diferentes rangos de fuerza iónica:

Cuando  $I < 5 \times 10^{-3}$

$$-\log \gamma_i = 0.5 Z_i^2 I^{1/2}$$

Cuando  $I < 0.1$

$$-\log \gamma_i = AZ_i^2 I^{1/2} / (1 + Ba_i I^{1/2})$$

Cuando  $I > 0.1$

$$-\log \gamma_i = AZ_i^2 I^{1/2} / (1 + Ba_i I^{1/2}) + bI$$

Donde A = Constante que se relaciona con el disolvente, la presión y la temperatura

B = Constante que se relaciona con el disolvente, la temperatura y la presión.

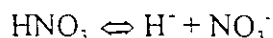
a = Constante que se relaciona con el diámetro del ion hidratado.

b = Puede ser una constante general o puede ser una constante específica del ion individual.

## ACIDOS Y BASES

### Aspectos generales.

A fines del siglo XIX Svante Arrhenius definió un ácido como un compuesto de hidrógeno que produce iones  $H^+$  al disolverse en agua, y una base como un compuesto que contiene oxhidrilos y que forma iones  $OH^-$  en solución acuosa. De esta manera la disolución de un ácido en agua se podría expresar como:





y la de una base como:  $\text{NaOH} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{OH}^-$

En la década de 1920, casi simultáneamente J.N. Brønsted y T.M. Lowry definieron un ácido como una sustancia capaz de donar protones y una base como una sustancia capaz de aceptarlos. De esta manera al disolverse un ácido en agua se produciría la transferencia de protones, por ejemplo para el ácido nítrico:



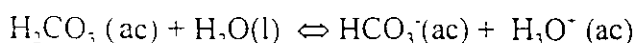
En la reacción anterior el ácido  $\text{HNO}_3$  dona protones a la base  $\text{H}_2\text{O}$ . Como producto de la reacción se forman la base conjugada  $\text{NO}_3^-$  y el ácido conjugado  $\text{H}_3\text{O}^+$ . El  $\text{HNO}_3$  y  $\text{NO}_3^-$  constituyen una pareja conjugada y el  $\text{H}_2\text{O}$  con el  $\text{H}_3\text{O}^+$  forman otra pareja conjugada.

Si se disuelve una base en el agua se tendrá por ejemplo para el amoníaco:



En esta reacción el ácido  $\text{H}_2\text{O}$  cede un protón a la base  $\text{NH}_3$  para formar el ácido conjugado  $\text{NH}_4^+$  y la base conjugada  $\text{OH}^-$ . Los pares ácido base son:  $\text{H}_2\text{O}$ (ácido 1) y  $\text{OH}^-$  (base conjugada 1) y  $\text{NH}_3$  (Base 2) y  $\text{NH}_4^+$  (ácido conjugado 2). Se les llama conjugados para subrayar el hecho de que están relacionados entre sí. no porque muestren alguna diferencia de comportamiento respecto a otros ácidos o bases.

Muchos ácidos se ionizan completamente al disolverse en agua, estos ácidos se conocen como ácidos fuertes. Existen otros ácidos que solamente forman iones en una cierta proporción y parte de los mismos permanece en forma molecular, estos ácidos son ácidos débiles o ácidos de fuerza media. Al disolverse los mismos se establece un equilibrio químico con el agua de la manera siguiente:



Un ácido débil como el ácido carbónico establece un equilibrio con el agua, en estas condiciones la relación entre las concentraciones de los productos y los reactivos se expresa por la constante de equilibrio.

$$K = \frac{(\text{HCO}_3^-)(\text{H}_3\text{O}^+)}{(\text{H}_2\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})}$$

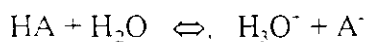
De manera general:



$$K = \frac{(\text{Base1})(\text{Acido2})}{(\text{Acido1})(\text{Base2})}$$

### Constante de acidez

En general para la disolución de un ácido débil en agua:



$$K = \frac{(\text{H}_3\text{O}^+)(\text{A}^-)}{(\text{H}_2\text{O})(\text{HA})}$$

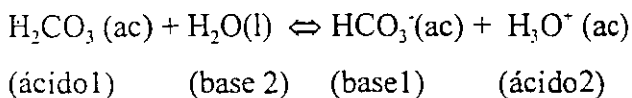
Comúnmente el número de moles de agua prácticamente no cambia al verificarse la reacción de manera que se puede escribir:

$$K_a = K(\text{H}_2\text{O}) = \frac{(\text{H}_3\text{O}^+)(\text{A}^-)}{(\text{HA})}$$

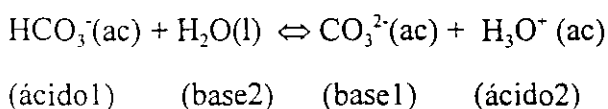
Donde  $K_a$  se conoce como constante de acidez. Su valor indica que tan fuerte es un ácido, mientras mayor sea el valor de  $K_a$  el ácido tendrá mayor fuerza (Se ionizará de forma más

completa). Existen tablas reportadas de constantes de acidez en condiciones normales donde se puede conocer la fuerza relativa de diferentes ácidos.

Algunas sustancias son capaces de comportarse como ácidos y como bases por ejemplo:

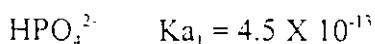
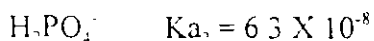


El  $\text{HCO}_3^-(\text{ac})$  puede a su vez disolverse en agua para dar:



El  $\text{HCO}_3^-$  se comporta en la primera reacción como base y en la segunda como ácido. Una sustancia con estas características se conoce como anfótero.

Según el número de hidrógenos (o protones) que puede donar un ácido, éstos se clasifican como monopróticos (cuando pueden donar un protón), dipróticos (2 protones), tripróticos (3 protones), polipróticos (en general más de un protón). La constante de acidez irá decreciendo con cada transferencia de protones, esto es tendrá un mayor valor para la transferencia del primer protón, menor para la del segundo (ya que la especie ácida queda con una carga negativa) y su valor será todavía menor para la transferencia del tercer protón (ya que es más difícil que el ácido con dos cargas negativas pierda una carga positiva). Por ejemplo para el ácido fosfórico:



## La ionización del agua.

El agua es uno de los anfóteros más abundantes en la naturaleza. Según la teoría de Bronsted Lowry el equilibrio ácido-base o de autoionización del agua puede expresarse como:



Con la constante de equilibrio:

$$K = \frac{(\text{H}_3\text{O}^+) (\text{OH}^-)}{(\text{H}_2\text{O}) (\text{H}_2\text{O})}$$

El equilibrio de auto-ionización del agua siempre debe satisfacerse, sin importar si otros ácidos o bases están presentes en la solución. Como la concentración del agua permanece prácticamente constante en soluciones diluidas se puede considerar:

$$K_{\text{dis}} = K_i = K_w = (\text{H}_3\text{O}^+) (\text{OH}^-)$$

$K_{\text{dis}} = K_w$  es la constante de ionización o de disociación del agua, su valor como todas las constantes de equilibrio depende de la temperatura por ejemplo:

<u>T °C</u>	<u>K<sub>w</sub></u>
10	2.92 X 10 <sup>-14</sup>
25	1.00 X 10 <sup>-14</sup>
50	5.46 X 10 <sup>-14</sup>

En el agua pura las concentraciones de  $\text{H}_3\text{O}^+$  y de  $\text{OH}^-$  son iguales, por lo que se define una solución neutra como aquella en la que  $(\text{H}_3\text{O}^+) = (\text{OH}^-)$ . Una solución ácida es aquella en la que  $(\text{H}_3\text{O}^+) > (\text{OH}^-)$ , y una solución básica aquella en la cual  $(\text{H}_3\text{O}^+) < (\text{OH}^-)$ .

## pH

La concentración de iones hidrógeno de las soluciones acuosas se da convencionalmente en términos de pH. El pH de una solución se define como el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno. Continuando con la suposición de que actividad es igual a concentración, se puede considerar que el pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno:

$$\text{pH} = -\log (\text{H}_3\text{O}^+)$$

El símbolo p significa logaritmo negativo, se puede también hablar de  $\text{pOH} = -\log(\text{OH}^-)$ ,

$$\text{pK}_a = -\log K_a$$

$$\text{pK}_w = \text{pH} + \text{pOH}.$$

El pH del agua pura a una temperatura de 25°C es de 7. Este valor no es arbitrario sino que resulta del valor de la constante de ionización del agua a esta temperatura, así:

$$K_w = 1 \times 10^{-14} = (\text{H}_3\text{O}^+) (\text{OH}^-)$$

Como en el agua pura por cada mol de  $\text{H}_3\text{O}^+$  se tiene una de  $\text{OH}^-$  se puede escribir:

$$K_w = 1 \times 10^{-14} = (\text{H}_3\text{O}^+) (\text{OH}^-) = (Y)(Y) = Y^2$$

$$Y = \sqrt{1 \times 10^{-14}} \quad Y = 1 \times 10^{-7} \quad Y = (\text{H}_3\text{O}^+) = 1 \times 10^{-7} \quad \text{pH} = -\log(\text{H}_3\text{O}^+) = -\log(1 \times 10^{-7}) \\ = 7$$

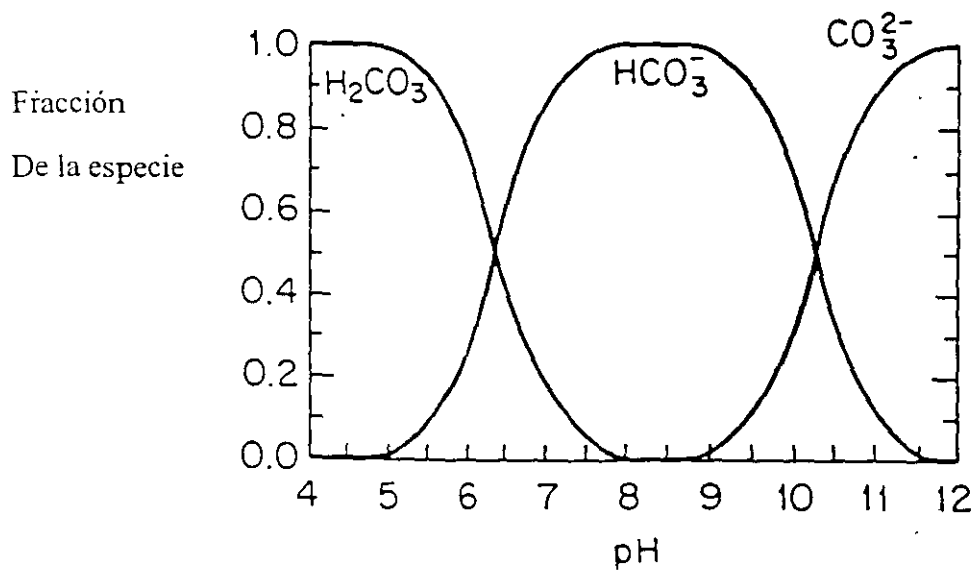
$$Y \text{ también } Y = (\text{OH}^-) = 1 \times 10^{-7} \quad \text{pOH} = -\log(1 \times 10^{-7}) = 7$$

Al disolver un ácido en agua se incrementa la concentración de iones hidronio respecto a la del agua pura por lo que el pH será menor que 7. Al disolver una base en agua la concentración de iones  $\text{OH}^-$  aumenta y en consecuencia la concentración de iones

hidronio disminuye para preservar el valor de  $K_w$ , y el pH será mayor que 7. En una solución neutra las concentraciones de iones hidronio y  $\text{OH}^-$  son iguales y el pH es igual a 7.

#### Especiación de los Ácidos:

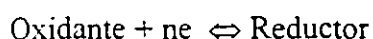
En las aguas naturales tanto los ácidos monopróticos como los polipróticos pueden existir en diferentes especies en función del pH del agua y de las constantes de acidez para la pérdida de cada protón. En la siguiente figura se muestra el diagrama de predominio de especies para el ácido carbónico a 25°C.



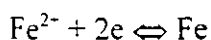
Según este diagrama a un pH de 8.5 el ácido carbónico estará presente en el agua como  $\text{HCO}_3^-$ , pero a un pH de 11 predominará el  $\text{CO}_3^{2-}$ .

## OXIDANTES Y REDUCTORES

Se define la oxidación como la pérdida de electrones y la reducción como la ganancia de electrones. Los oxidantes son especies químicas capaces de fijar electrones. Los reductores son capaces de cederlos. Una reacción de óxido-reducción puede expresarse por el siguiente par oxido-reductor:



Ejemplo:



El Fe es un reductor que puede ceder electrones

Los iones ferrosos,  $\text{Fe}^{2+}$ , son oxidantes pues son capaces de ganar electrones.

El Fe se oxida y el  $\text{Fe}^{2+}$  se reduce.

En el agua pueden ocurrir diferentes reacciones de óxido-reducción. Cada reacción de oxidación se acompaña por una de reducción y viceversa, de manera que se mantiene un balance electrónico.

El potencial que se produce por cada par óxido-reductor se expresa mediante la Ecuación de Nernst:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Ox})}{(\text{Red})}$$

Donde  $E^{\circ}$  es el potencial normal de la reacción (en Volts), esto es el que tendría la reacción si todas las especies participantes tuvieran actividad unitaria. R es la constante universal de los gases ( $8.314 \times 10^{-1}$  kJ/K.mol). F es la constante de Faraday (96.484 kJ por volt equivalente gramo). T es la temperatura absoluta (en °Kelvin). (Ox) y (Red) son las actividades de la especie oxidada y la especie reducida respectivamente. A 20°C la reacción puede escribirse como:

$$E = E^{\circ} + \frac{0.058}{n} \log \frac{(\text{Ox})}{(\text{Red})}$$

El potencial de una reacción en que intervengan varias especies oxidantes y reductoras puede expresarse como:

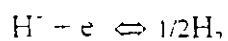
$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Producto de las actividades de las especies oxidadas})}{(\text{Producto de las actividades de las especies reducidas})}$$

La actividad de los electrones en solución  $p_e$  se calcula por la siguiente ecuación:

$$p_e = \frac{F}{2.303RT} E_h$$

A 25°C  $p_e = 16.9 E_h$

Los potenciales normales para diversos elementos se determinan respecto al electrodo normal de hidrógeno, al cual se le ha asignado un  $E^{\circ} = 0.0$  volts. Para determinar el potencial normal de una reacción de óxido-reducción se conecta una barra del elemento (electrodo) al cual se desea determinar el potencial normal, sumergida en una solución 1M de los iones de este elemento, por medio de un alambre metálico al electrodo normal de hidrógeno, el potencial normal del elemento en cuestión se mide a través de un voltímetro. El electrodo normal de hidrógeno está formado por una lámina de platino sumergida en una solución de HCl 1M a 25°C, por la cual se hace pasar hidrógeno gaseoso puro, en la cual se produce la reacción:



Al conectarse con otro electrodo el  $H_2$  se puede oxidar o bien el  $H^+$  reducirse.

De esta manera se han determinado los potenciales normales de diferentes elementos.



## CÍCLO DEL NITRÓGENO

### *1. Aspectos Generales*

En el medio ambiente el nitrógeno existe en diferentes especies químicas y en más de un estado de oxidación. Se conoce como **ciclo del nitrógeno** a la circulación de las varias formas de nitrógeno a través de la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera, por medio de procesos químicos y biológicos. La forma más abundante del nitrógeno se encuentra en el aire, en el cual se presenta en su forma molecular (como  $N_2$ ) y constituye alrededor del 79% en volumen (aproximadamente  $39 \times 10^{20}$  g de nitrógeno)

El  $N_2$  gaseoso cambia su estado de oxidación y se convierte en compuestos químicos que contienen nitrógeno a través de procesos que se conocen como "fijación de nitrógeno". Para ello se requiere una gran cantidad de energía debido al triple enlace que une los dos átomos de nitrógeno ( $N \equiv N$ ). La fijación biológica natural se lleva a cabo por las algas azul-verde y ciertos organismos relacionados que tienen la capacidad de la fotosíntesis, y por ciertas especies de bacterias que usan la materia orgánica como fuente de energía. Además, actualmente la producción de abono, la combustión y los cultivos de leguminosas han duplicado la cantidad fijada anualmente.

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).

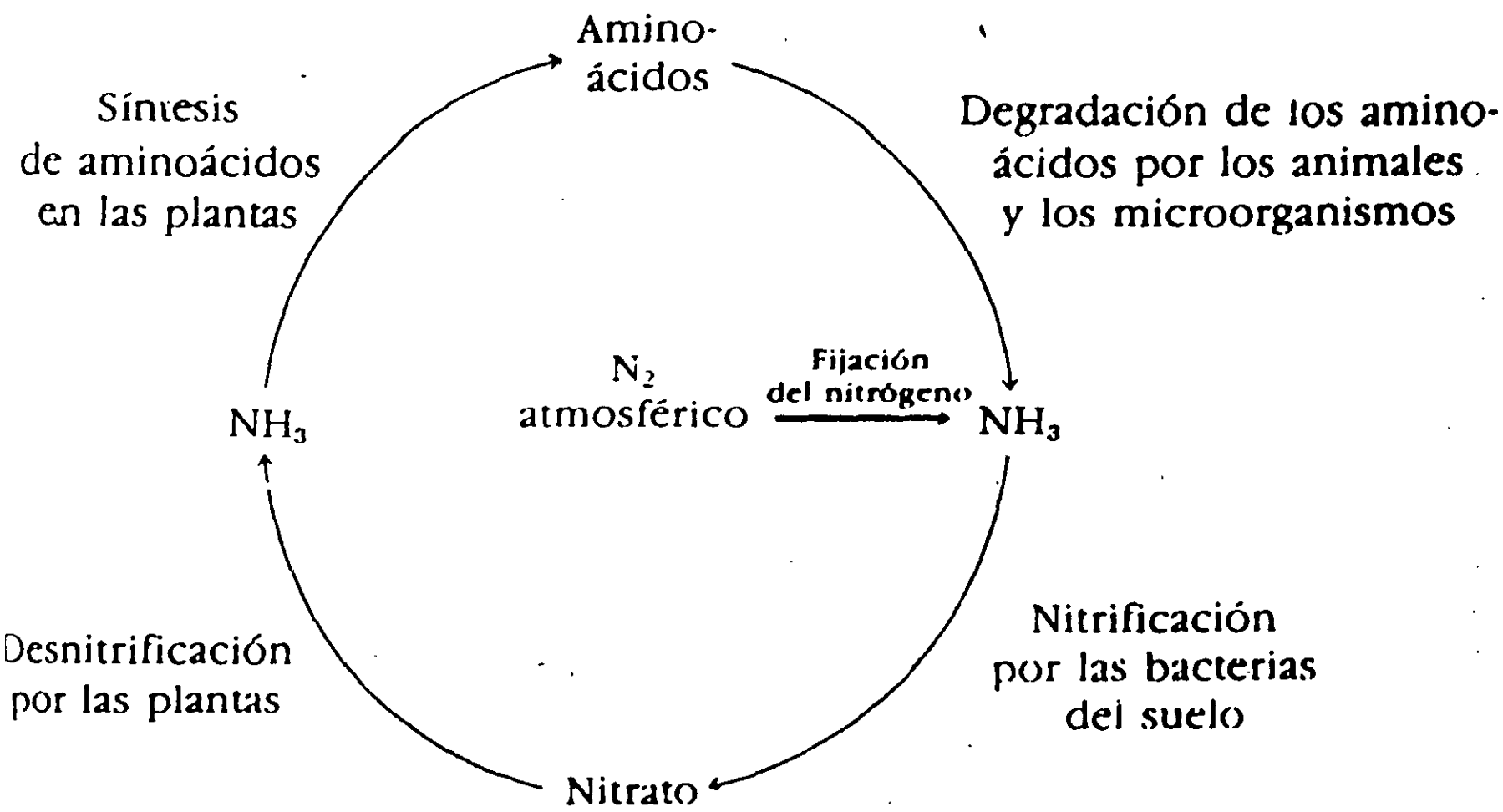


Figura 1

La primera etapa de este ciclo, la fijación del nitrógeno, en la cual el nitrógeno atmosférico se convierte en compuestos de nitrógeno inorgánico, es efectuada principalmente (90%) por ciertas bacterias y algas azules. Una cantidad mucho menor de Nitrógeno libre es fijada por medios abióticos (rayos, radiación uv, equipo eléctrico) y por conversión a amoniaco a través del proceso Haber-Bosch.

Se reconocen 2 clases de bacterias fijadoras de Nitrógeno: bacterias de vida libre (no-simbióticas), incluyendo la ciano bacteria (alga azul-verde) Anabaena y Nostoc y tales géneros como Azotobacter, Beijerinckia, y Clostridium, y bacterias mutualistas (simbióticas) tales como Rhyzobium, asociada con las plantas leguminosas, y Spirillum lipoferum, asociada con los pastos de cereales. Las bacterias simbióticas invaden las raíces de las plantas anfitrionas, donde se multiplican y estimulan la formación de nódulos de las raíces, que son crecimientos de células de plantas y bacterias en asociación íntima. Dentro de los nódulos las bacterias convierten el Nitrógeno libre en nitratos, que la planta anfitriona utiliza para su desarrollo

El nitrógeno queda así en forma útil para la mayoría de los organismos vivos. Además existen bacterias del suelo que obtienen su energía oxidando el amoniaco para formar nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y posteriormente, nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). A este proceso se le conoce como **nitrificación**. El nitrógeno que usan las plantas está en su mayoría en su forma oxidada. Debido a la abundancia y actividad de las bacterias nitrificantes, casi todo el amoniaco que llega al suelo se oxida a nitrato. Por otro lado, 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**. La bacteria responsable de la denitrificación usa nitrato en lugar de oxígeno para su proceso respiratorio en condiciones anaerobias. Esta transformación requiere una fuente de carbono orgánico para que la bacteria metabolice y se produzca  $\text{CO}_2$  como resultado de este metabolismo. El proceso de conversión del nitrógeno orgánico a  $\text{NH}_4^+$  se conoce como **amonificación**. Los restos de todos los seres vivientes- y sus

productos residuales- son descompuestos por microorganismos en el proceso de amonificación .

El amoniaco 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 amoniaco al suelo donde las bacterias nitrificantes lo convierten nuevamente en nitrito y en nitrato.

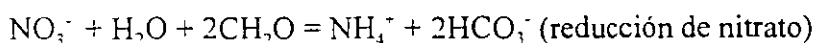
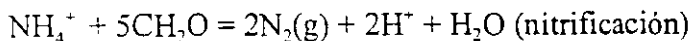
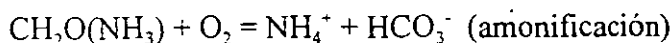
## *2. El Nitrógeno en las Aguas Subterráneas.*

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 amoniaco.

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 catiónica 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.

Los procesos de transformación de una especie en otra se llevan a cabo a través de estas reacciones principales:



La influencia del hombre en el ciclo del nitrógeno incluye la producción y el uso de fertilizantes sintéticos como el amoniaco y otros compuestos de nitrógeno, además del riego con aguas negras y la utilización de estiércol como fertilizante.

En la Tabla 1 se presentan las especies más importantes en las que se encuentra el nitrógeno en las aguas naturales:

TABLA 1. Principales formas del nitrógeno en las Aguas Naturales

Grado de Oxidación	Especies
V	$\text{NO}_3^-$
III	$\text{HNO}_2$ y $\text{NO}_2^-$
0	$\text{N}_2$
-III	$\text{NH}_4^+$ y $\text{NH}_3$

El pH del agua determinará las especies predominantes para cada grado de oxidación.

Debido a las distintas formas químicas en que existe en el agua, 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. Los iones amonio y cianuro son capaces de formar complejos solubles muy estables con ciertos iones metálicos, que pueden estar presentes en algunos tipos de efluentes industriales.

En la áreas rurales puede haber concentraciones excesivas de nitratos debido al estiércol y/o a fosas sépticas. Esto ocurre principalmente donde se tiene una gran concentración de ganado o donde se utiliza el estiércol como fertilizante.

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  $\text{NH}_4^+$ . 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. El nitrato es estable en presencia de oxígeno, en los suelos aireados de cultivo. Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  que se encuentran normalmente en las aguas subterráneas no están limitadas por su solubilidad. Los  $\text{NO}_3^-$  puedan 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 denitrificación, 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. Bajo condiciones reductoras la materia orgánica decaerá a amoníaco. Por ejemplo, los efluentes de fosas sépticas normalmente tienen altas

concentraciones de amoníaco y poco de nitrato. Si el agua subterránea a la que se descargan tiene condiciones reductoras, el nitrógeno permanecerá en forma de amoníaco. Si, por el contrario prevalecen condiciones oxidantes, las bacterias convertirán el amoníaco a nitrato. Este proceso aunque es posible que se desarrolle en el agua subterránea, se realiza en condiciones no favorables debido a la ausencia de materia orgánica adecuada para el crecimiento de las bacterias denitrificantes. Además el tipo de suelo, la velocidad de descarga de los efluentes y el espesor de la zona no saturada influyen en las transformaciones de las especies del nitrógeno y por lo tanto en la calidad del agua subterránea.

El nitrógeno se presenta en la naturaleza en forma de dos isótopos  $^{14}\text{N}$  y  $^{15}\text{N}$ . El  $^{14}\text{N}$  es el más abundante de los dos en la atmósfera. Por medio de la relación  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  en los nitratos es posible distinguir si éste procede de residuos humanos y animales o de fertilizantes minerales. La relación  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  se expresa comúnmente como el valor  $\delta^{15}\text{N}$ , que se define por:

$$\delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = \frac{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{muestra}} - (^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{estándar}}}{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{estándar}}} \times 1000$$

donde ‰ significa partes por mil. Si el valor de  $\delta^{15}\text{N}$  es positivo, entonces el nitrato de la muestra ha sido enriquecido en  $^{15}\text{N}$  respecto al estándar. Para el nitrógeno el estándar es la composición atmosférica. El nitrato procedente de residuos animales y humanos generalmente tiene un  $\delta^{15}\text{N}$  en exceso de  $\pm 10 \text{ ‰}$ . Los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  para nitratos procedentes de fertilizantes minerales se espera que sean inferiores a aquellos de residuos animales. Sin embargo, la interpretación debe ser cuidadosa ya que puede ocurrir fraccionación isotópica debido a procesos de transformación del nitrógeno. Los procesos

que afectan la composición isotópica de los nitratos en las aguas subterráneas incluyen la denitrificación y la mezcla de aguas.

Los contenidos excesivos de nitrato en el agua potable en concentraciones mayores de 45 mg/L son capaces de 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  $\text{NO}_3^-$ . La metahemoglobinemia es una condición en la cual se reduce la capacidad de los glóbulos rojos para acarrear el oxígeno. Esta afectación es causada por los nitritos que se forman por reducción de los nitratos generalmente a través de la acción microbiana dentro o fuera del organismo. La persona intoxicada toma una coloración azul debido a la reducción del oxígeno en la sangre. La población de mayor riesgo la constituyen los niños menores a 6 meses de edad.



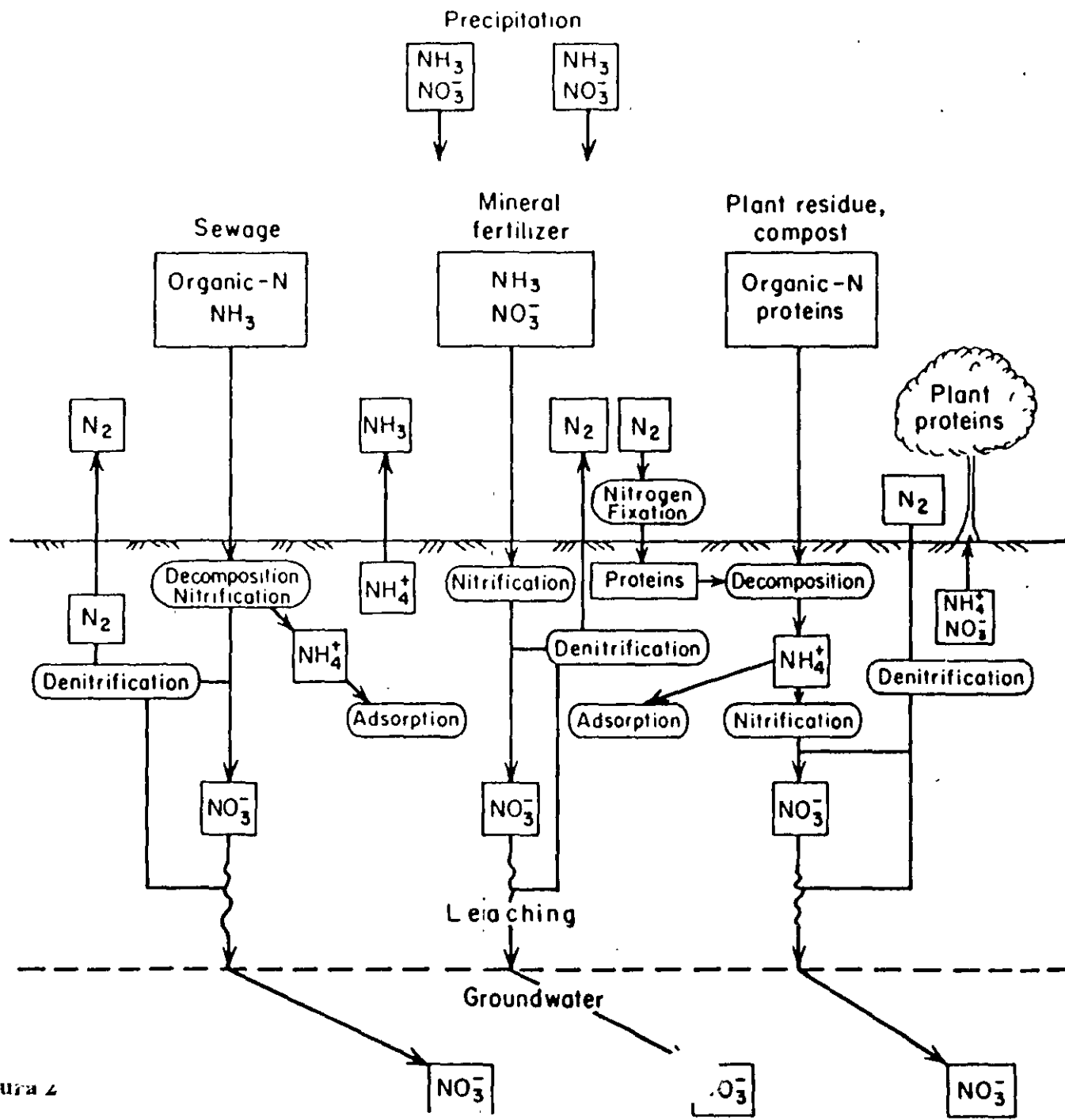


Figura 2

## CICLO DEL FIERRO

### *1. 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 puede formar polisulfuros ferrosos como pirita o marcasita. Cuando el azufre es menos abundante puede formarse la 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 pasar a la solución acuosa está afectada fuertemente por las condiciones ambientales, especialmente por 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.

### *2. El Hierro en las Aguas Subterráneas*

## 2. 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 monihidróxido ferroso  $\text{FeOH}^+$  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  $\text{FeSO}_4$  puede ser importante en soluciones conteniendo unos cuantos miligramos de sulfato por litro. Muchas moléculas orgánicas complejan al hierro ferroso, y los complejos formados pueden ser muchos 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 importante ante pequeñas modificaciones en el pH o el Eh del agua.

El hierro férrico 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

El ión férrico 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 óxi-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 pueden ocurrir procesos redox de coprecipitación que controlen la solubilidad de otros metales en solución. Este proceso puede reducir la concentración de metales tóxicos en el agua y utilizarse como un método de tratamiento de las aguas naturales.

La presencia de bacterias puede aumentar o disminuir la concentración de Fe disuelto.

### 3. 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.

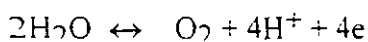
Este tipo de diagramas potencial-pH fue desarrollado por Pourbaix en Bélgica en años anteriores a la segunda Guerra Mundial. Aunque se trata de un diagrama teórico, las predicciones respecto al comportamiento del hierro se ajustan bastante a su comportamiento real.

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 por el dominio de estabilidad Eh-pH del agua.

Los límites del diagrama están dados por las reacciones de oxidación y de reducción del agua.

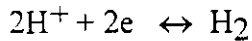
El agua se oxida según la reacción:



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:

$$E = 0.00 + (0.06/2) \log \frac{[\text{H}^+]^2}{p\text{H}_2}$$

$$E = -0.06 \text{ pH}$$

El diagrama Eh-pH para el fierro considerando la formación de hidróxidos, para una concentración de Fe(III)=Fe(II) = 10<sup>-6</sup>M. se elaboraría como se explica a continuación. Las actividades de las fases sólidas y del agua se consideran igual a 1.

$$E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}} = 0.78\text{V}$$

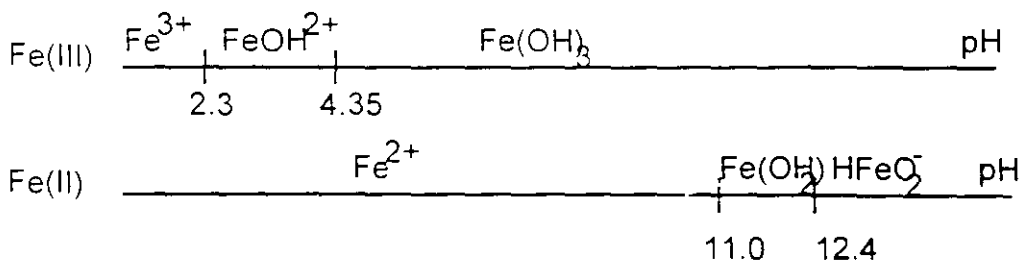
$$K_{\text{eq}} = 10^{-2.3} = \frac{[\text{FeOH}^{2+}][\text{H}^+]}{[\text{Fe}^{3+}]} \quad \text{para } \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{FeOH}^{2+} + \text{H}^+$$

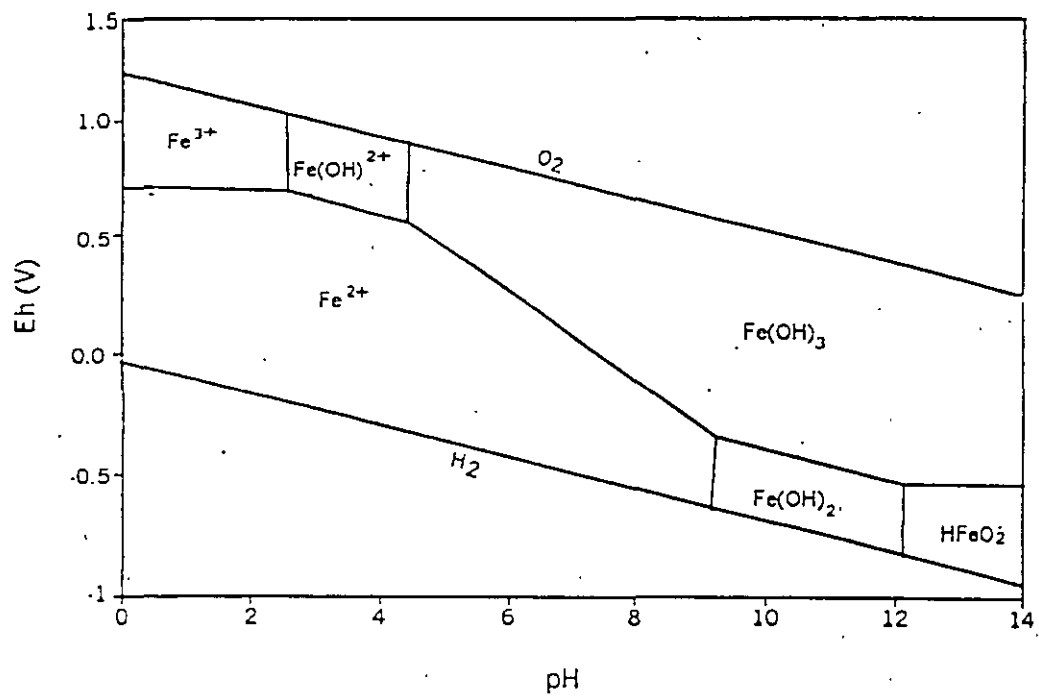
$$K_{\text{eq}} = 10^{-3.4} = \frac{[\text{Fe}(\text{OH})_2^+][\text{H}^+]}{[\text{Fe}(\text{OH})_2^{2+}]} \quad \text{para } \text{FeOH}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2^+ + \text{H}^+$$

$$pK_s \text{Fe}(\text{OH})_2 = 15.1$$

$$K_{\text{eq}} = 10^{-31.58} = \frac{[\text{HFeO}_2^-][\text{H}^+]^3}{[\text{Fe}^{2+}]} \quad \text{para } \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HFeO}_2^- + 3\text{H}^+$$

Por facilidad se puede iniciar la construcción del diagrama especificando las especies de Fe<sup>2+</sup> y de Fe<sup>3+</sup> en los diversos rangos de pH:





Evolución del sistema Fe(III)/Fe(II) en función del pH

Para  $\text{pH} < 2.3$ :

El sistema es independiente del pH. El potencial es igual a 0.77V

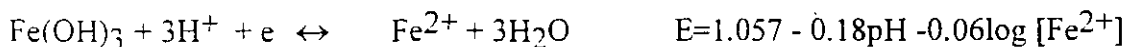
Para  $2.3 < \text{pH} < 4.3$ :

El sistema  $\text{FeOH}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$  depende del pH según



Para  $4.3 < \text{pH} < 11.0$ :

El sistema  $\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Fe}^{2+}$  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



Para construir el diagrama Eh-pH con base en estas reacciones y ecuaciones se dibujan las líneas correspondientes y se delimitan de esta manera los campos de estabilidad de cada una de las especies químicas (Figura 3). Para interpretar el diagrama, la ubicación del punto que corresponda para ciertos valores de pH y Eh definirá la forma química predominante en la que se encuentra el Fe en el agua.

#### *4. 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.

Además, las bacterias oxidantes del azufre es muy importante tienen un papel muy importante en la producción del drenaje ácido de minas, que involucra la disolución del hierro a través de la aceleración de la reacción de oxidación de minerales tales como pirita y arsenopirita.

## REFERENCIAS

- Alpers C.N., Blowes D.W., 1994, Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation, ACS Symposium Series, Washington D.C.
- 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
- Charlot G., 1980. Curso de Química Analítica General, Toray-masson, Barcelona, 282 pp.
- 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., 1997, The Geochemistry of natural Waters, Prentice-Hall, N.J., 435 pp.

Fetter C.W., 1993. Contaminant Hydrogeology, Macmillan Publ. Co., NY.

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 and 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.

Hiscock K.M., Dennis P.F., Feast N.A., Fairbairn J.D., 1997. Experience in the use of stable nitrogen isotopes to distinguish groundwater contamination from leaking sewers in urban areas. En: Groundwater in the Urban Environment, Chilton et als (eds), Balkema, Rotterdam, p 427-432.

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.

Mariotti A., 1998, Nitrate: un polluant de longue durée, *Pour la Science*, 249, p 60-65.

Pankow J.F., 1991, *Aquatic Chemistry Concepts*, Lewis Publishers, Chelsea. 683 pp.

Riversa C.N., Barrett M.H., Hiscock K.M., Dennis P.F., Feast N.A., Lerner D.N.. 1996, Use of nitrogen isotopes to identify nitrogen contamination of the Serwood sandstone aquifer beneath the city of Nottingham, United Kingdom, *Hydrogeology Journal*, 4, 1996.

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.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



... Ciencias de la tierra

6

# **CURSOS ABIERTOS**

## **MODULO I CA-206 RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES INORGÁNICOS**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



... Ciencias de la tierra

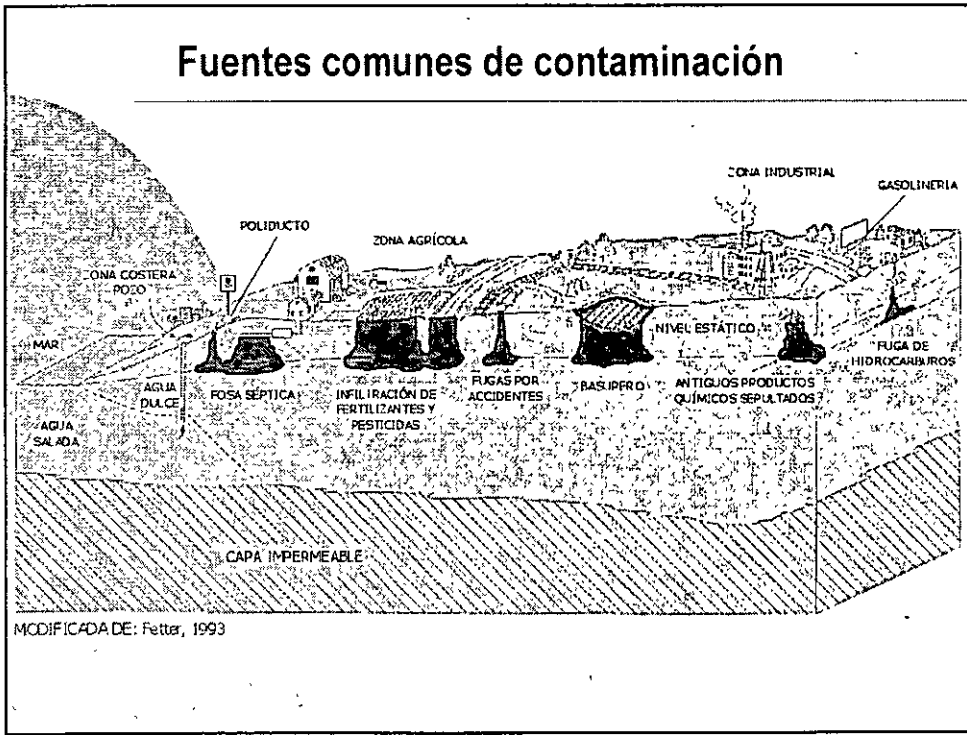
# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
LA CONTAMINACION**

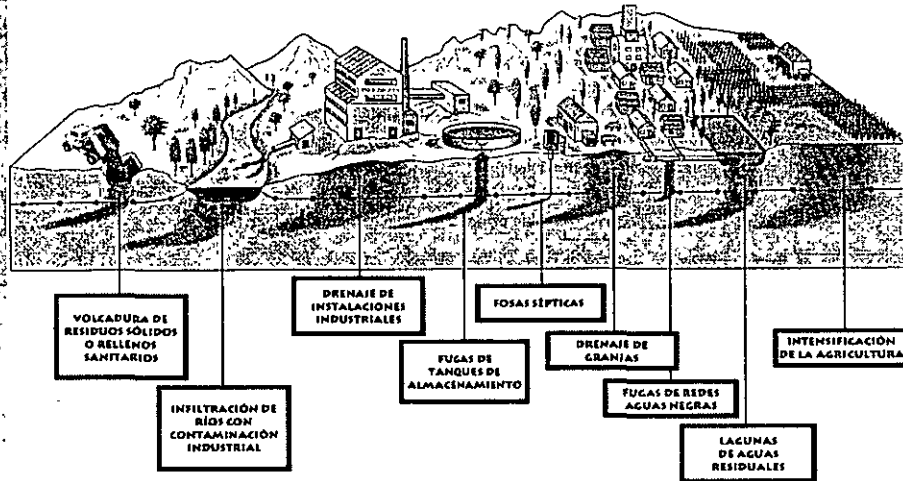
Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería

# La contaminación

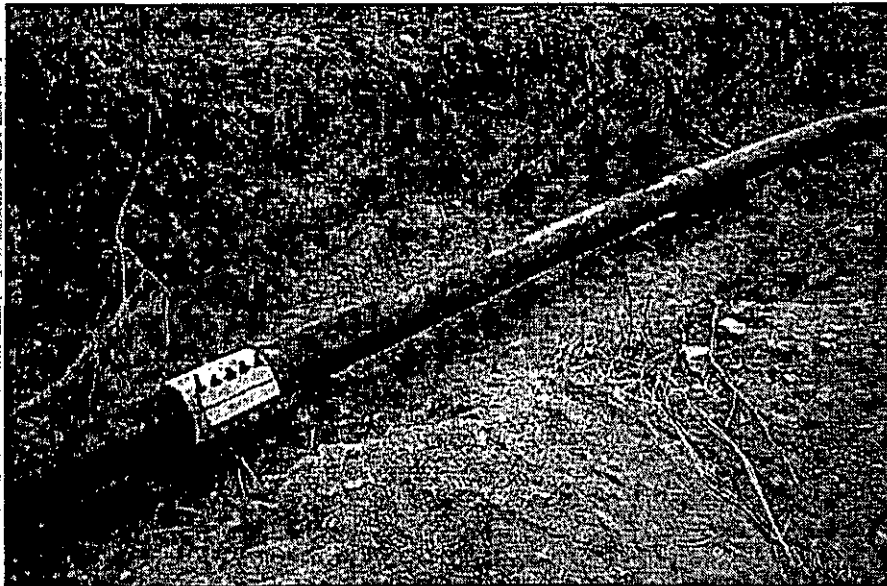
Por Ing. Juan Manuel Lesser



Procesos comunes de contaminación del agua subterránea




DE: S. FOSTER, 2002



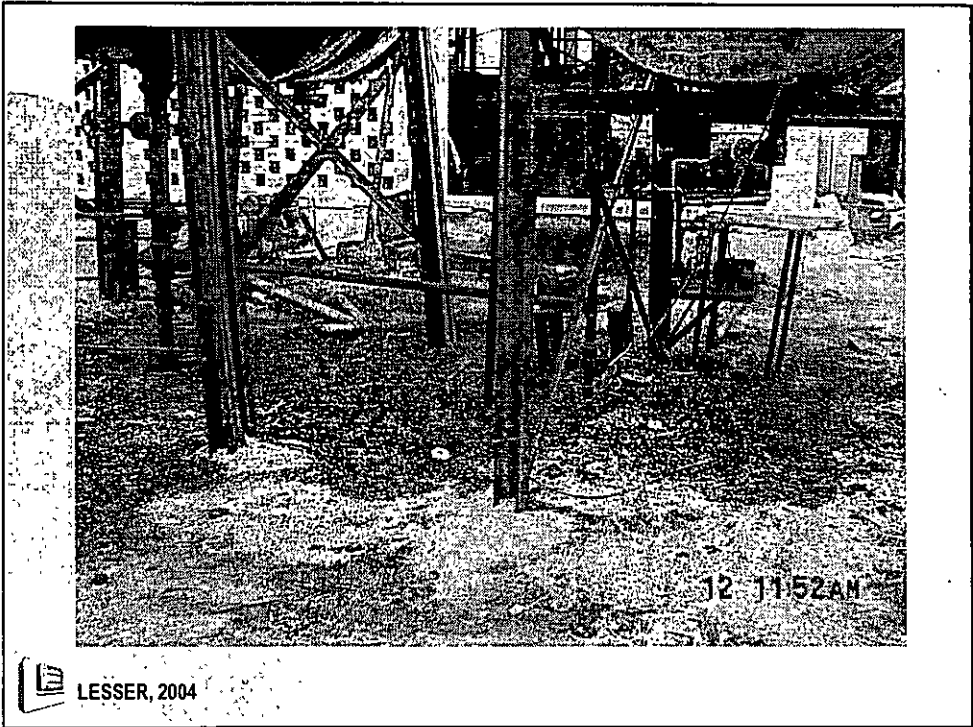
LESSER, 2004



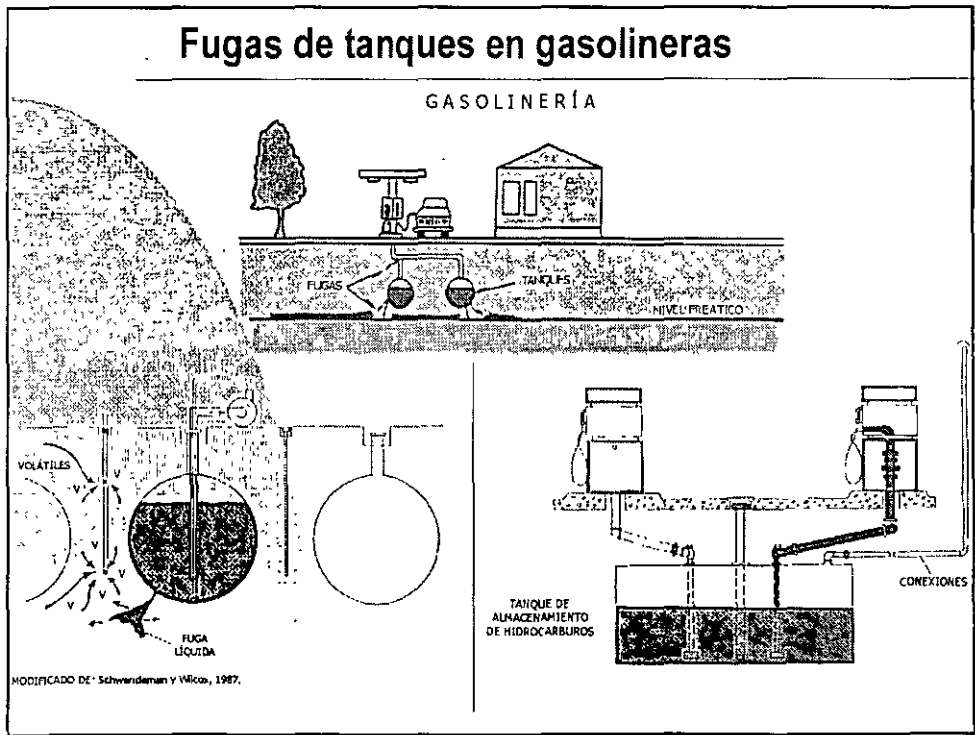
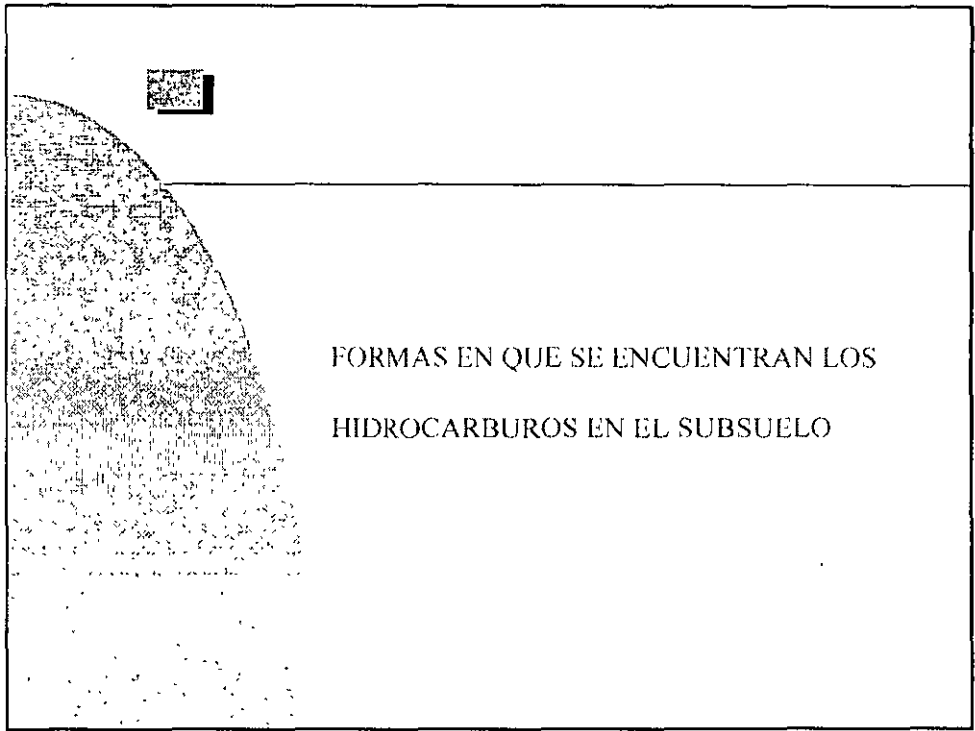
 LESSER, 2004



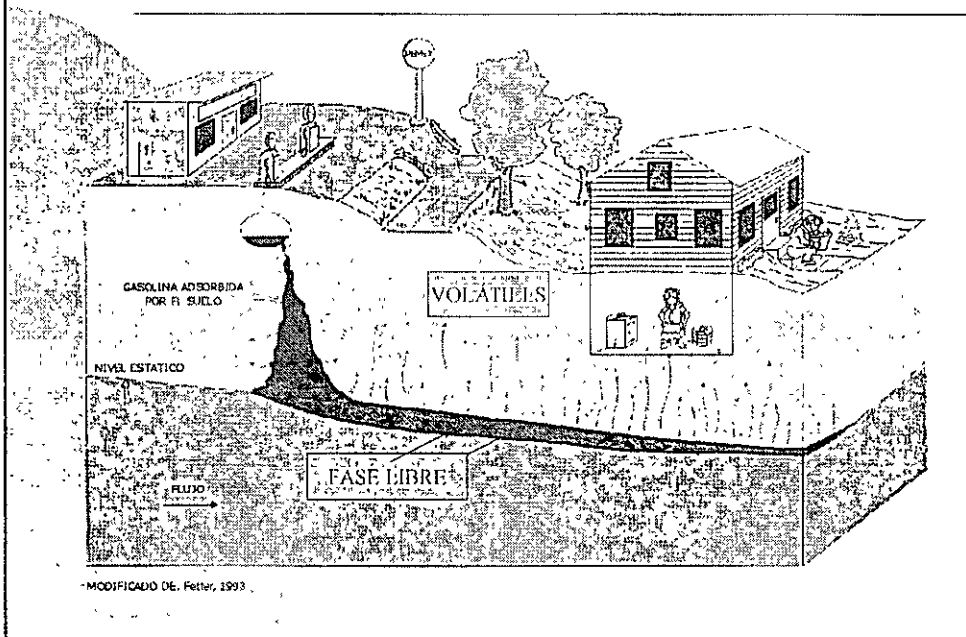
 LESSER, 2004



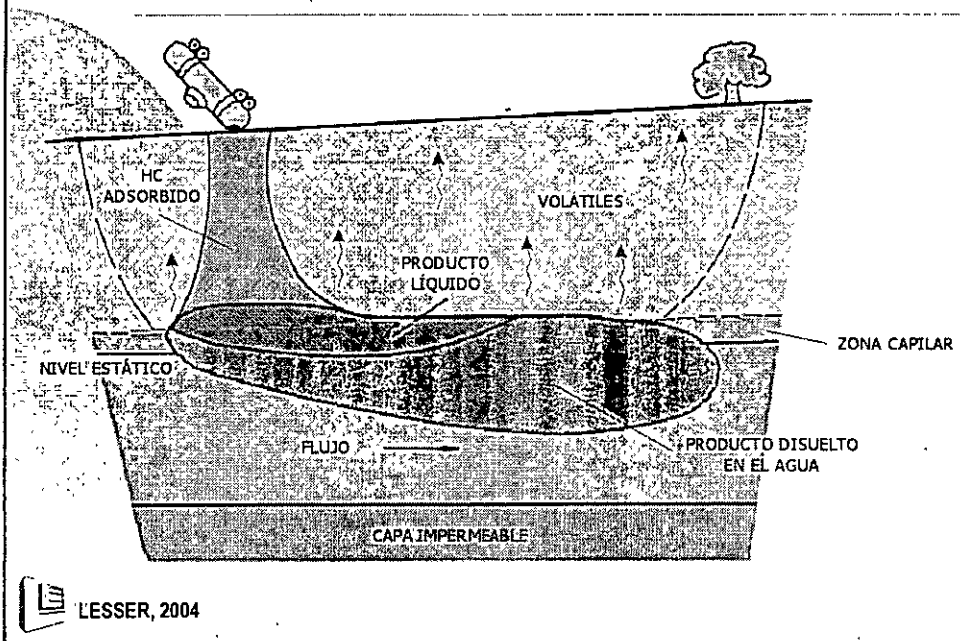




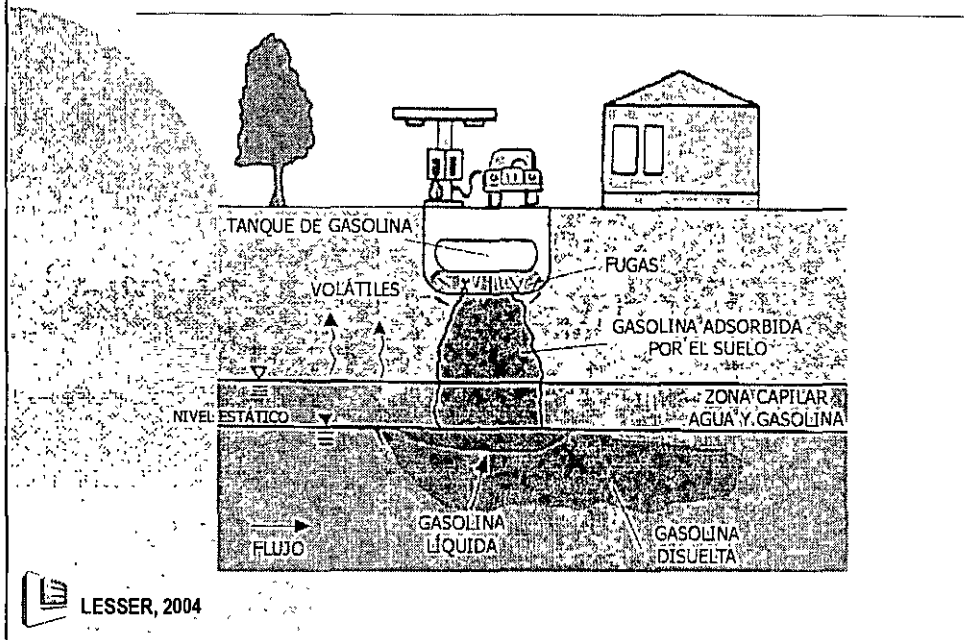
## Fugas, fase libre y volátiles



## HC libre, adsorbido, volátil y en solución



## Contaminación de suelo y agua



## Capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas

	ADSORCIÓN POR EL SUELO (%)	CAPACIDAD DE VOLATILIZACIÓN (%)	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			

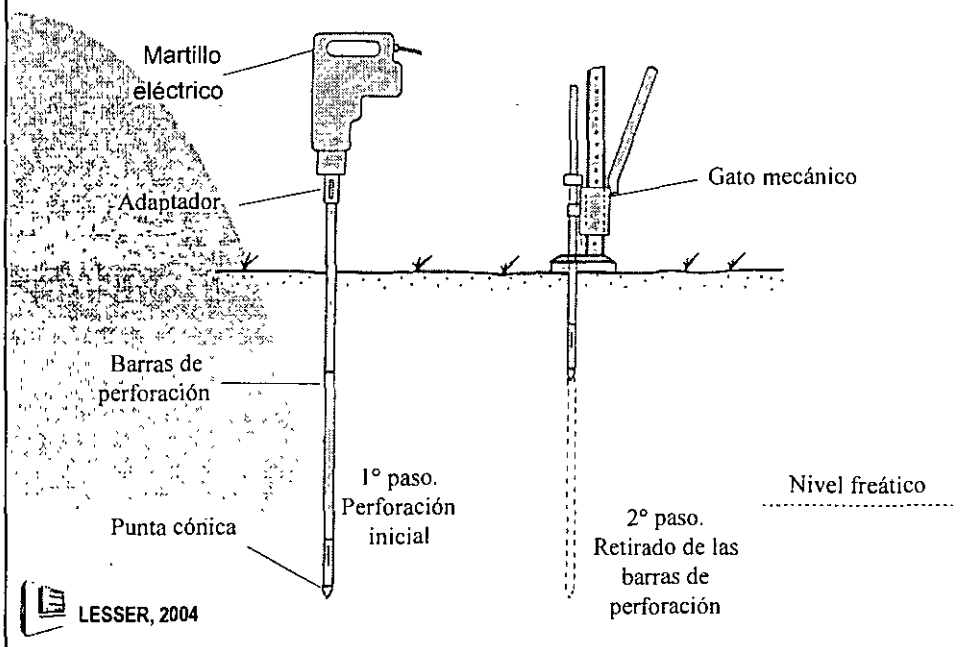
De: Fleischer et al 1986

LESSEY, 2004

## PERFORACION DE POZOS DE MEDICION

LESSER, 2004

### Perforación de pozos de medición



## Perforaciones de medición

Espacio requerido:  
3, x 3' m

Tiempo por perforación:  
30 minutos por pozo



 LESSER, 2004



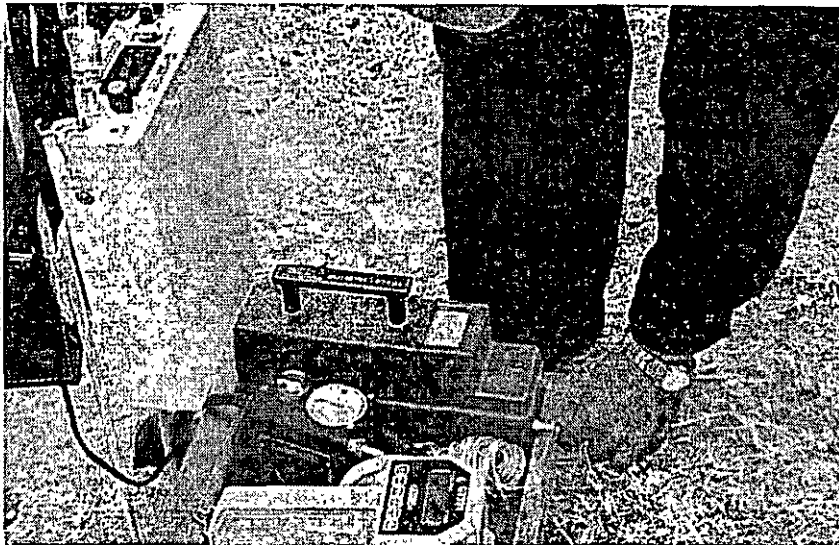
 LESSER, 2004




 LESSER, 2004


- MEDICION DE VOLATILES,  
EXPLOSIVIDAD, NIVEL  
ESTATICO Y ESPESOR DE  
PRODUCTO LIBRE

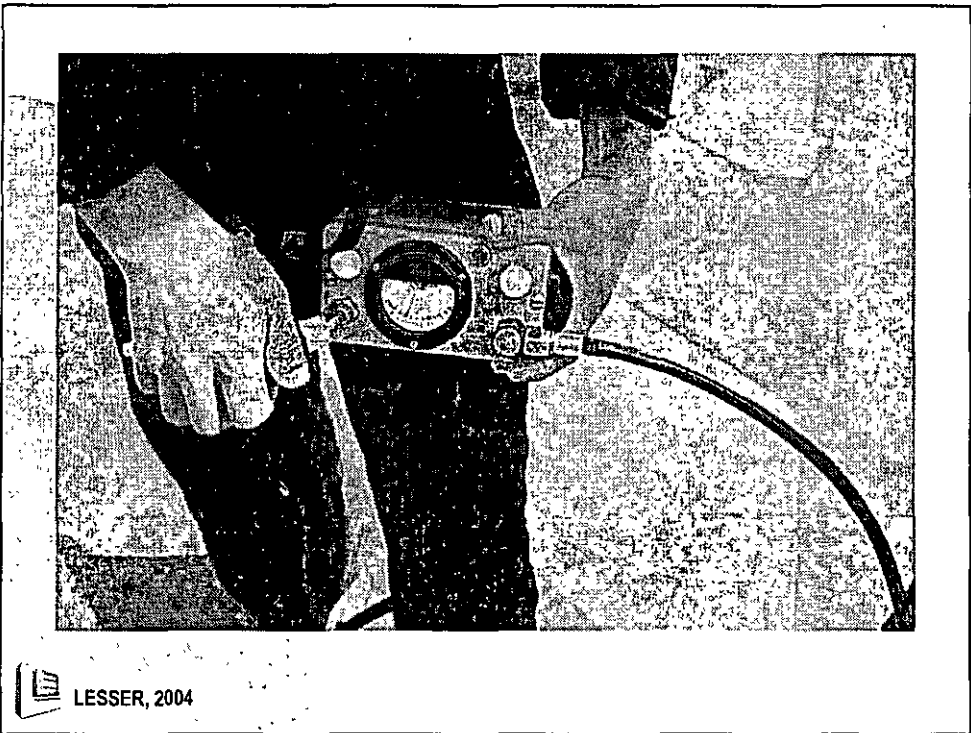
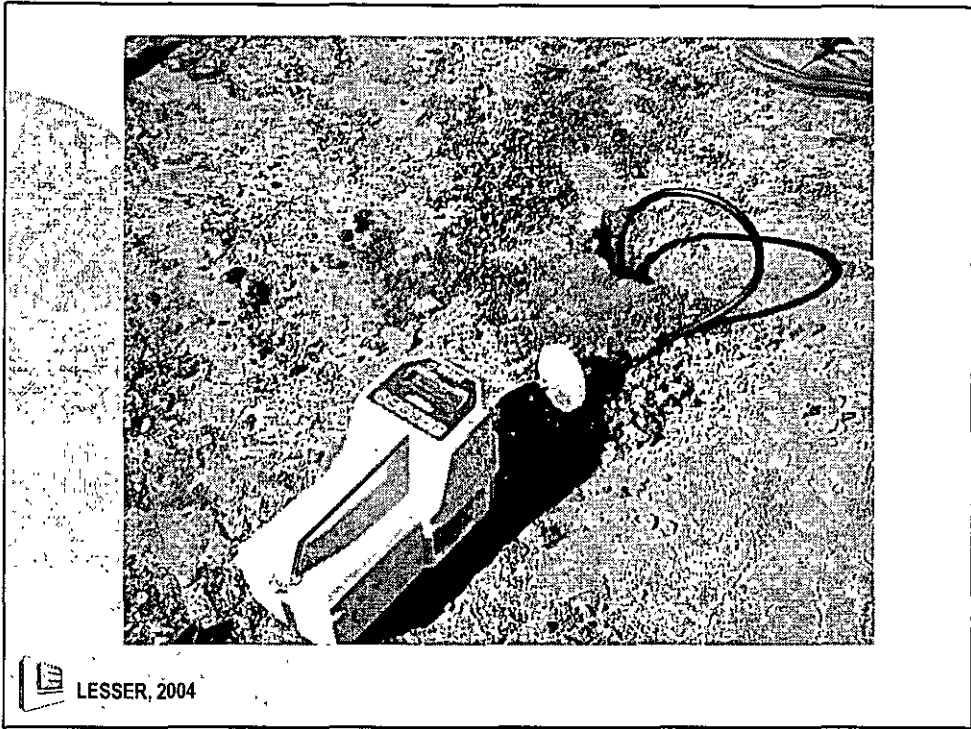
 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



 LESSER, 2004





- HIDROCARBUROS VOLÁTILES = 8,000 ppm
- EXPLOSIVIDAD = 100%



HIDROCARBUROS VOLÁTILES = 55 ppm  
EXPLOSIVIDAD = 0%

### RESPUESTA DE LOS MEDIDORES DE VOLÁTILES


EN GASOLINA

RESPUESTA FRANCA,  
CLARA

EN DIESEL

RESPUESTA LENTA,  
SE MUEVE EL  
MARCADOR

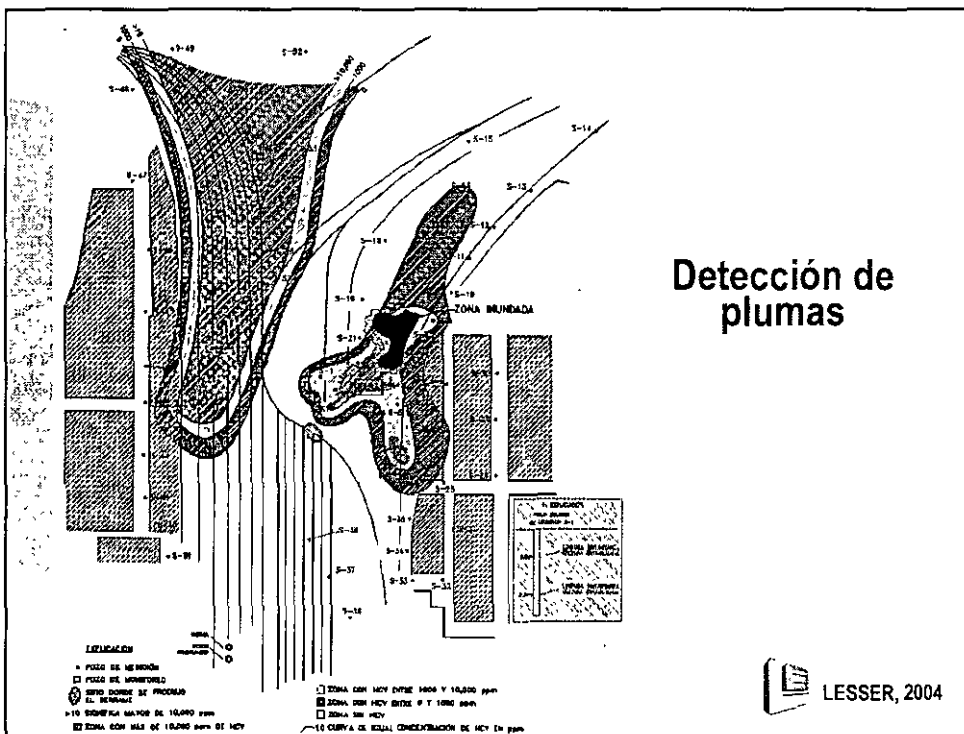
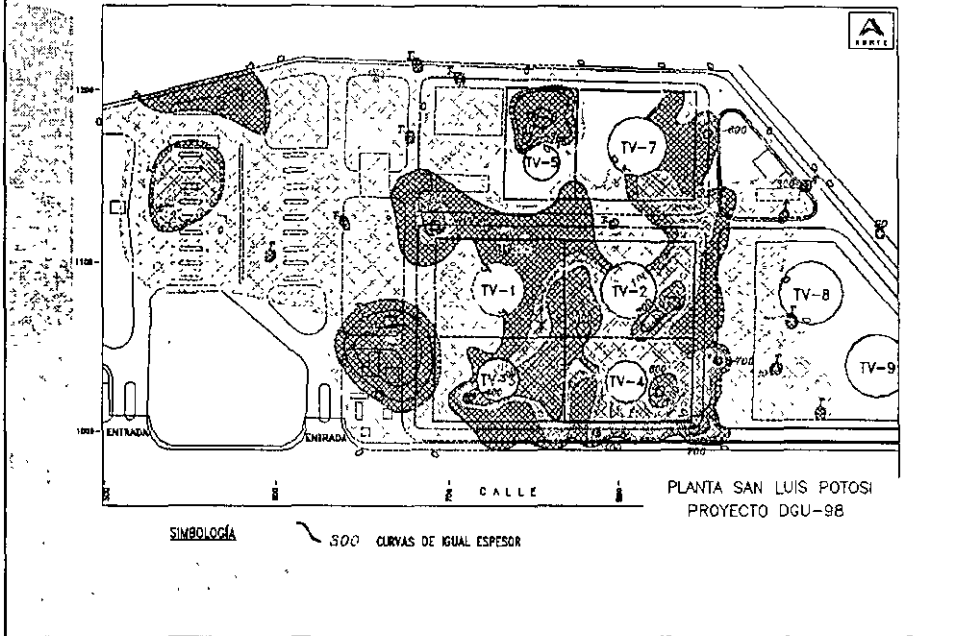
## ▣ Delimitación de plumas

 LESSER, 2004

## Detección de pluma

 LESSER, 2004

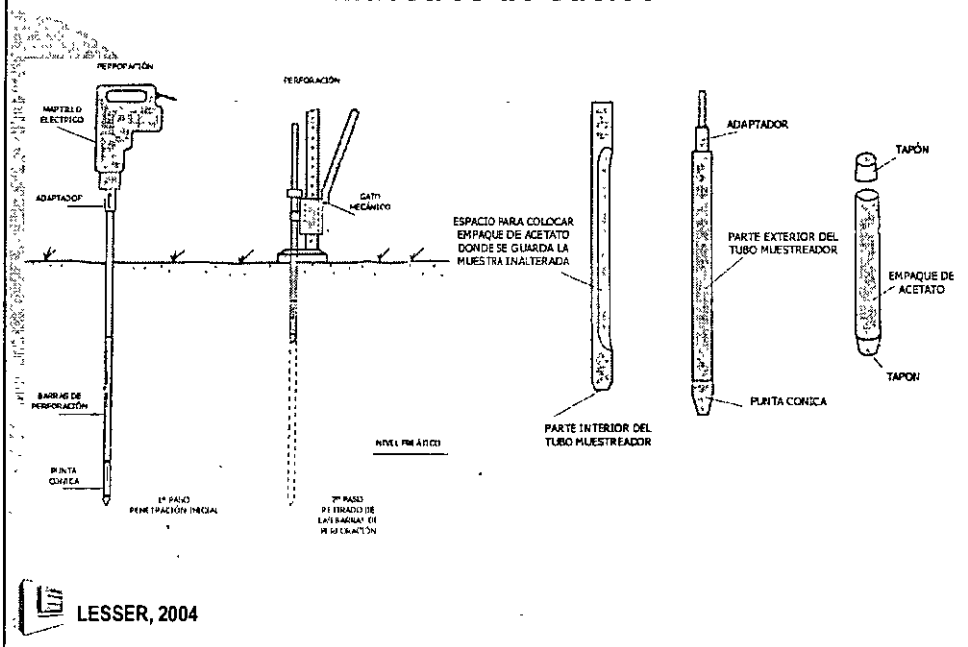
## Espesor de producto libre

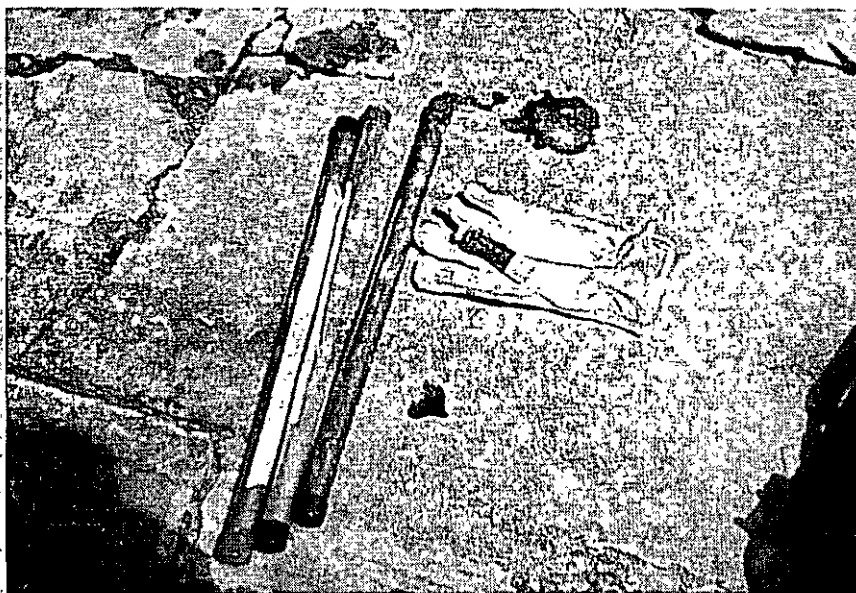



## Muestreo de suelo inalterado

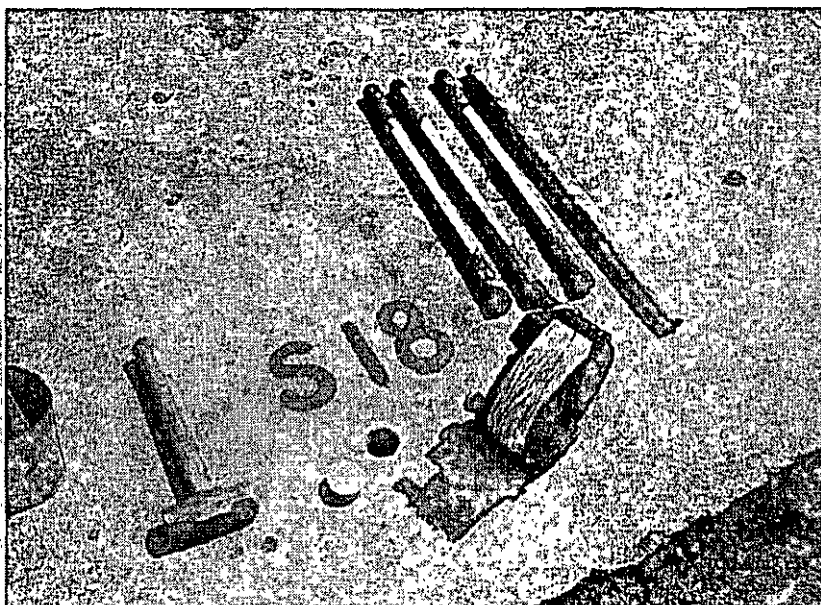
LESSER, 2004


## Muestreo de suelos

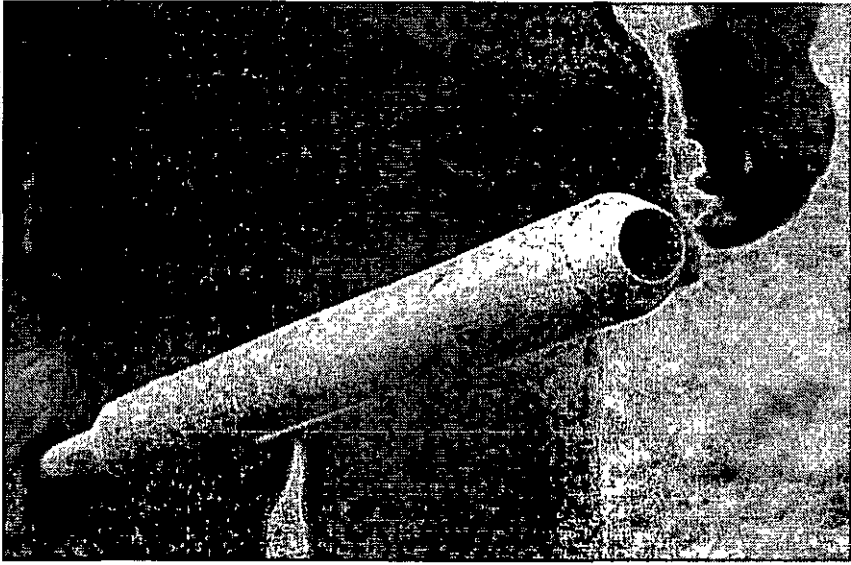




 LESSER, 2004.




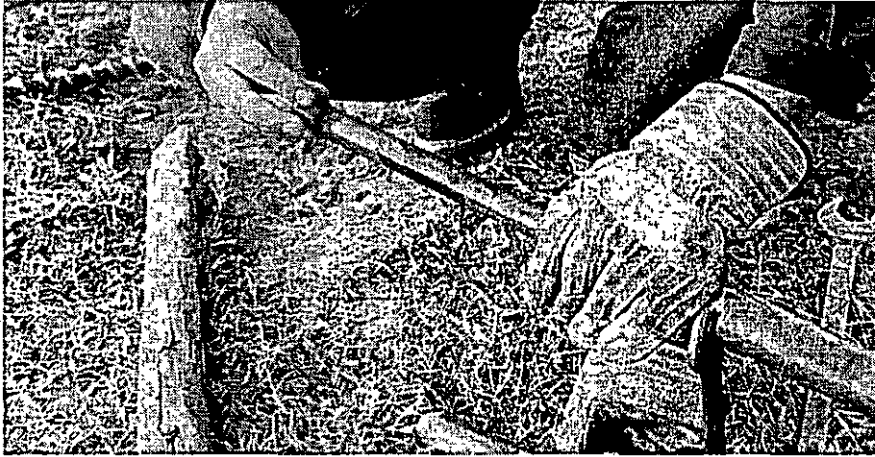
 LESSER, 2004.



 LESSER, 2004




 LESSER, 2004




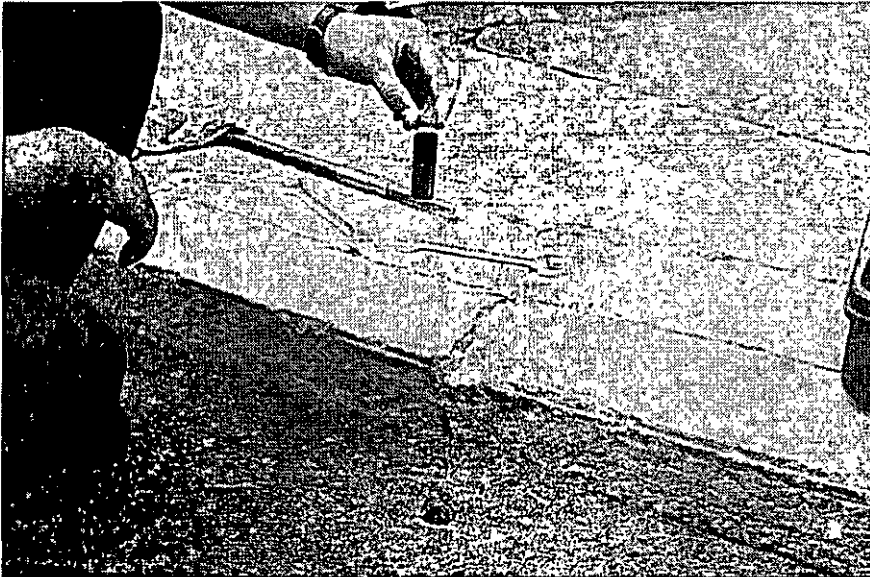
 LESSER, 2004

- Muestreo de producto libre

 LESSER, 2004




 LESSER, 2004

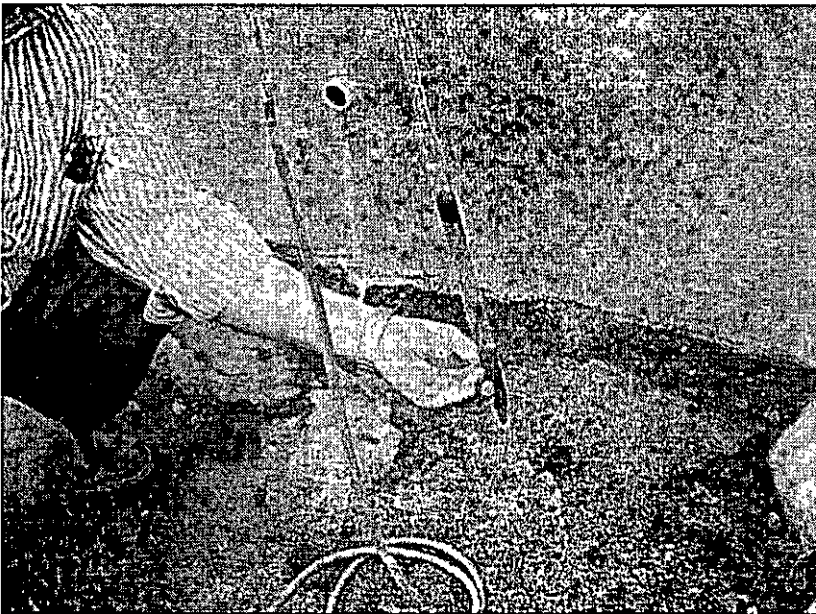



 LESSER, 2004





 LESSER, 2004



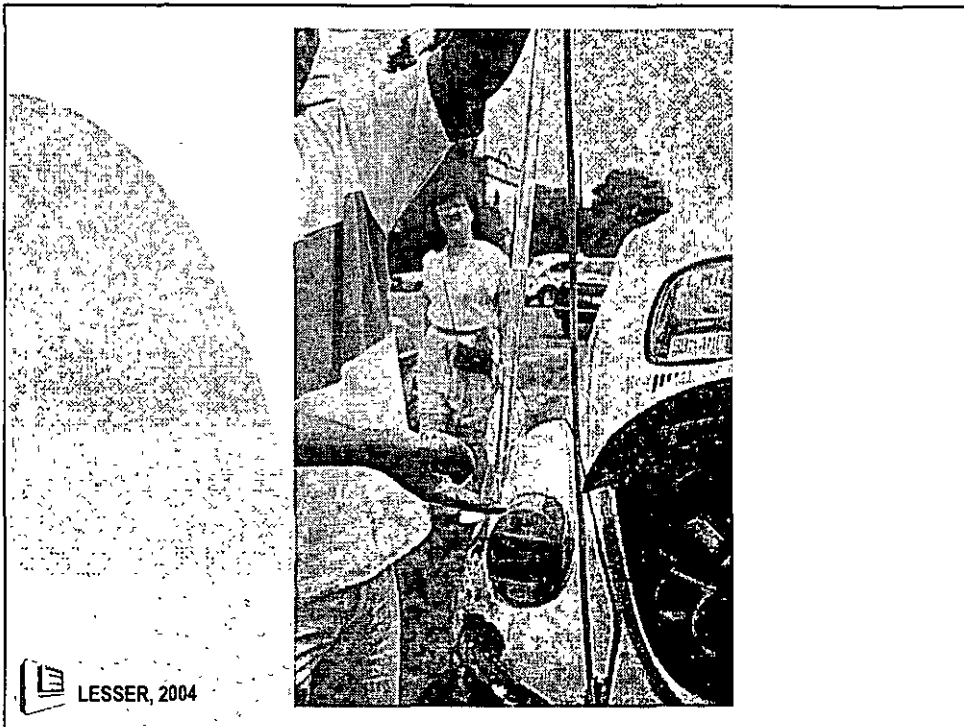
 LESSER, 2004



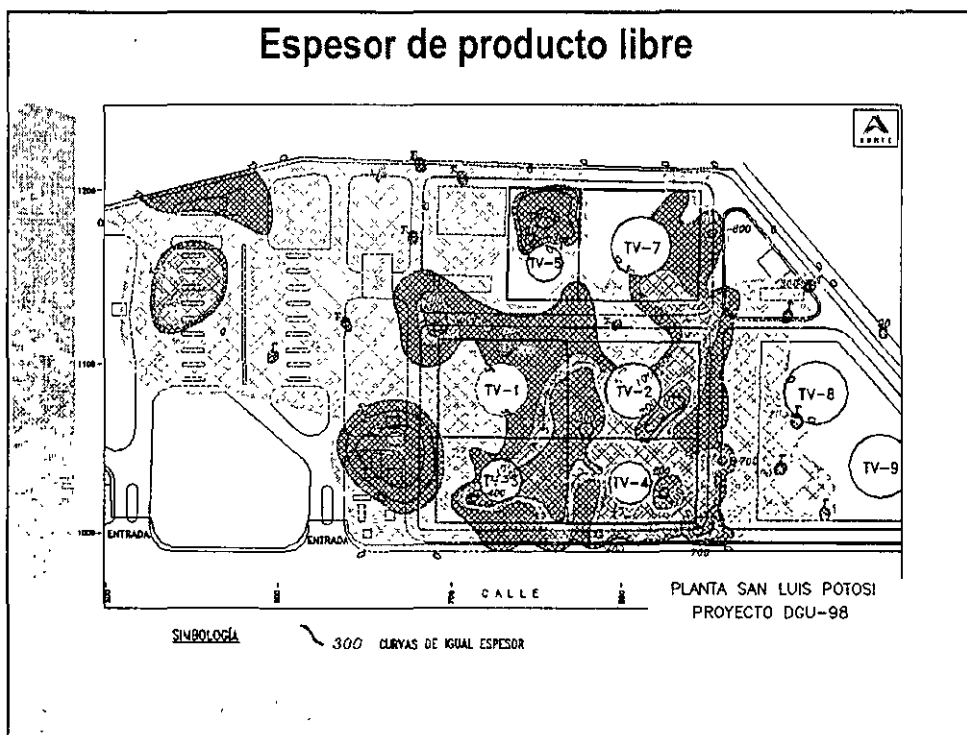
 LESSER, 2004

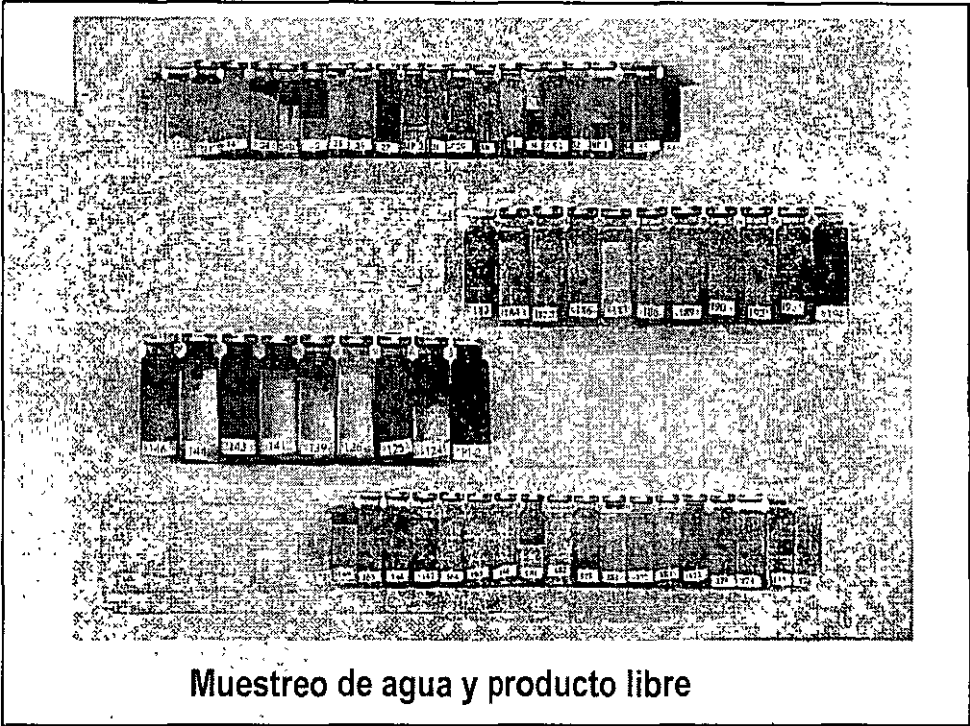


 LESSER, 2004

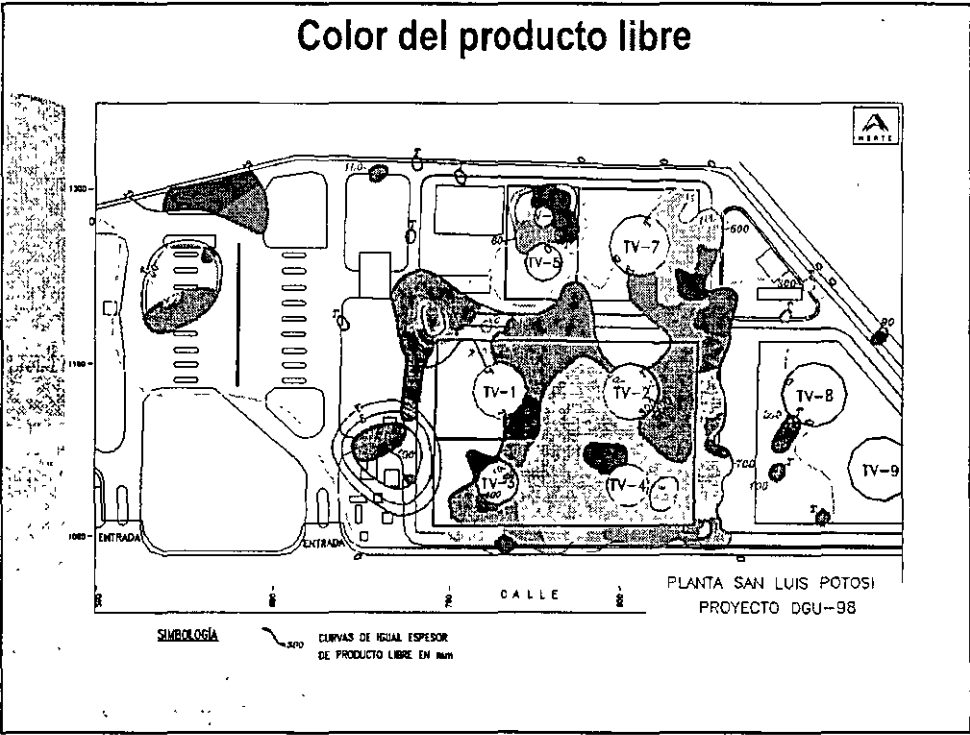


## Espeor de producto libre




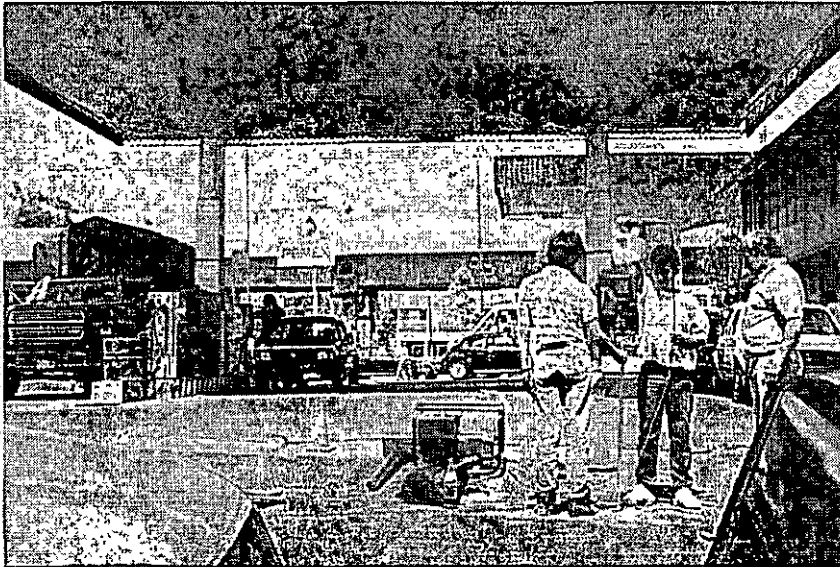


Muestreo de agua y producto libre

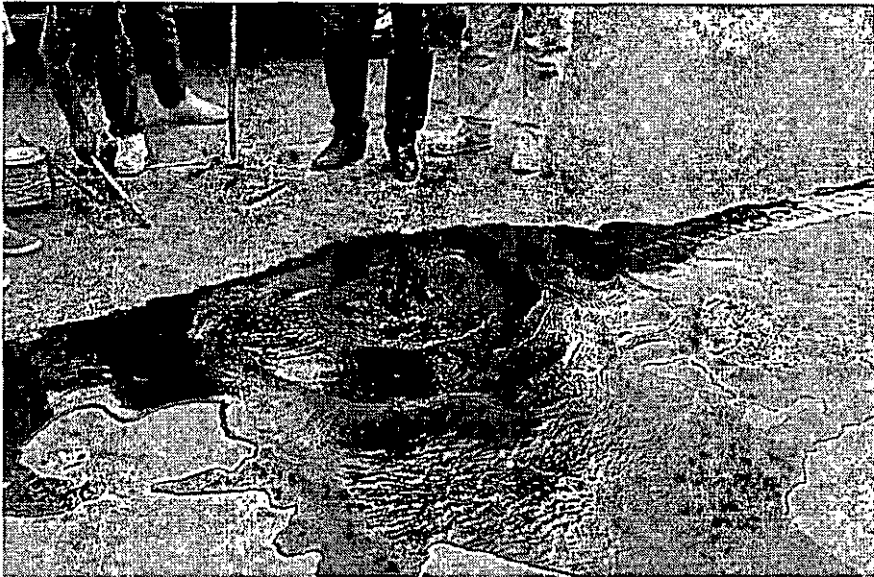




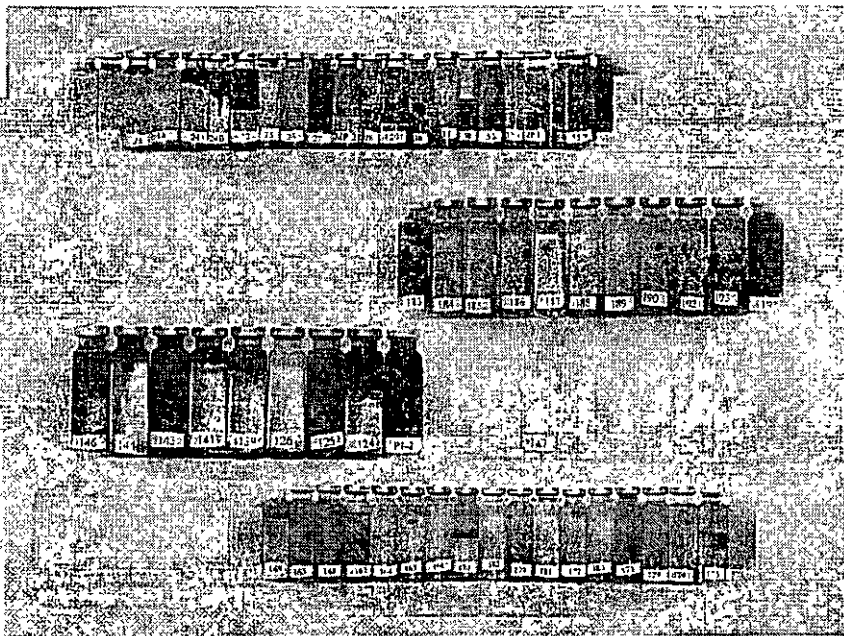
 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



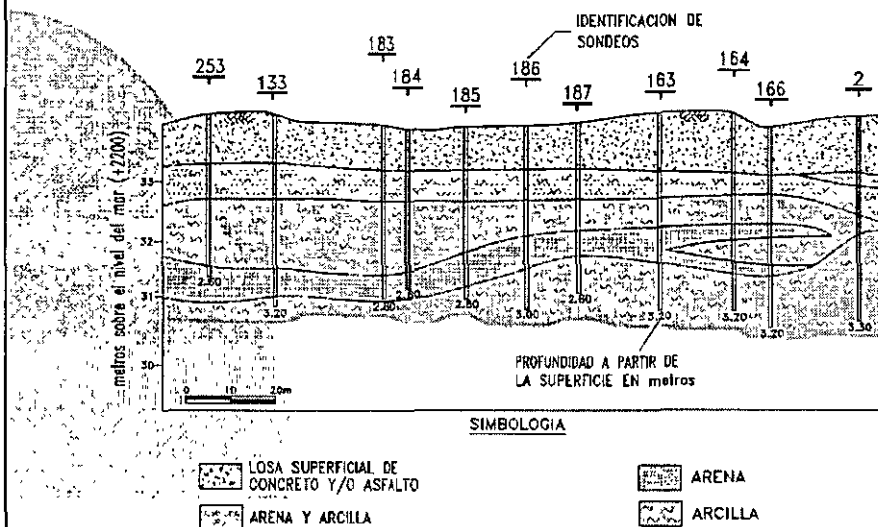
Muestreo de agua y producto libre

## ■ Construcción de secciones litológicas



LESSER, 2004

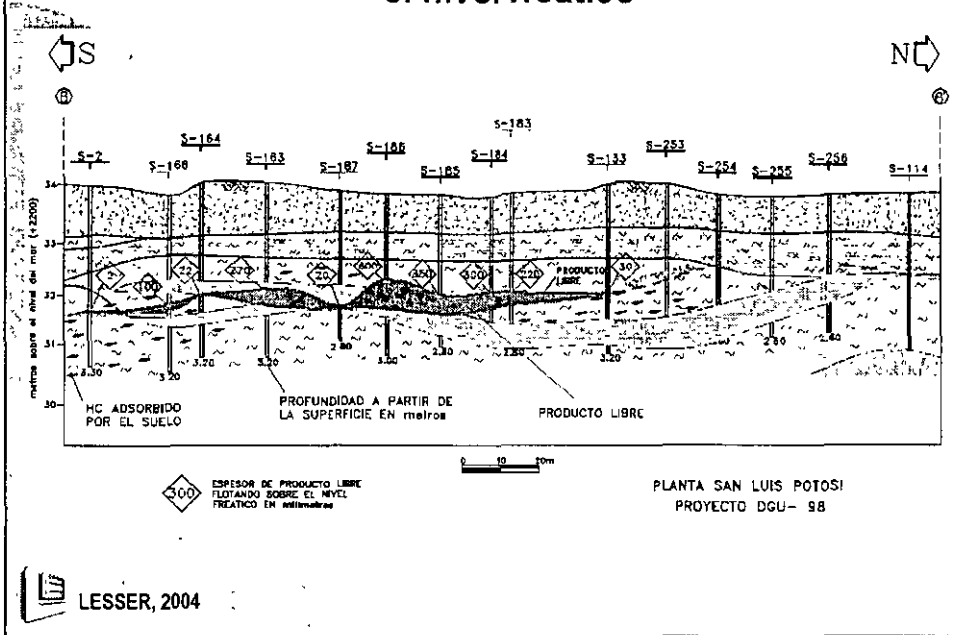
### Sección litológica



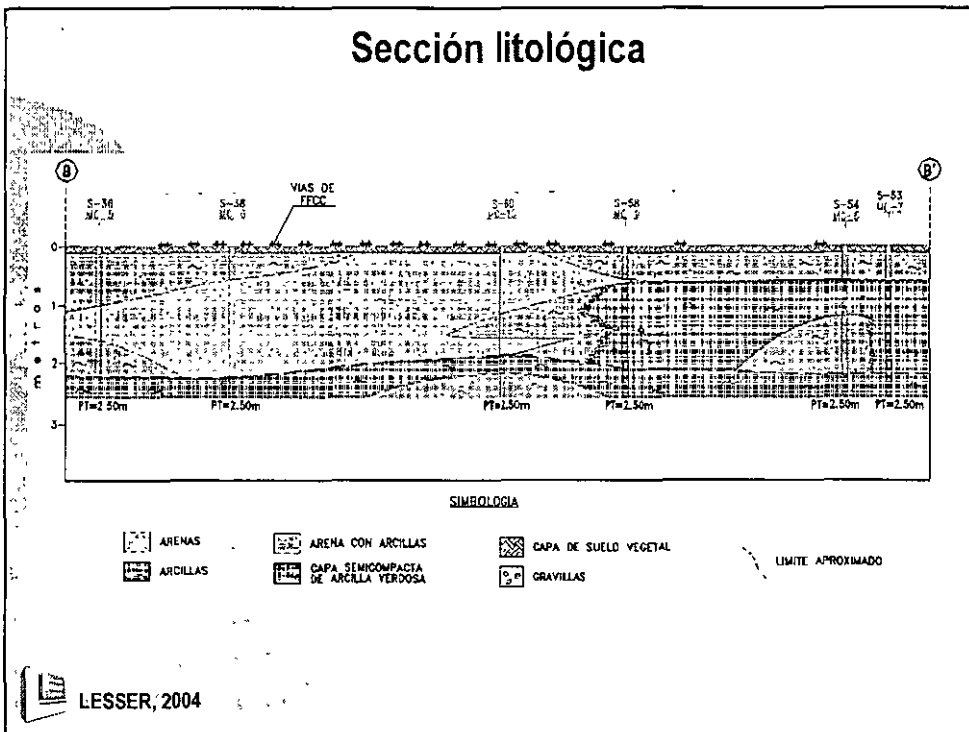
UBICACION: SECCION ESTE-OESTE AL CENTRO DEL PREDIO

LESSER Y SAVAL, 2000

## Producto libre flotando sobre el nivel freático

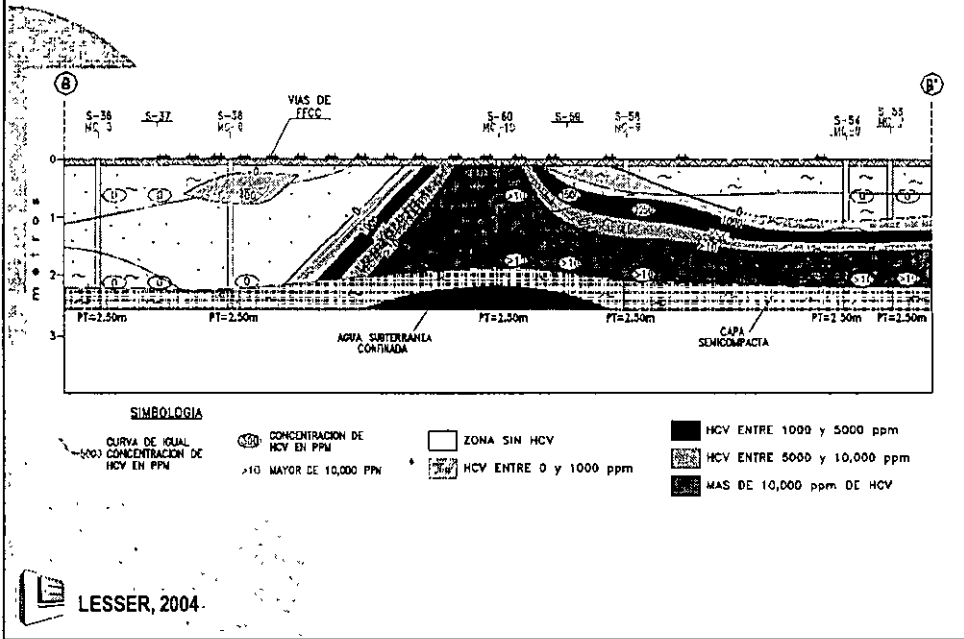


## Sección litológica

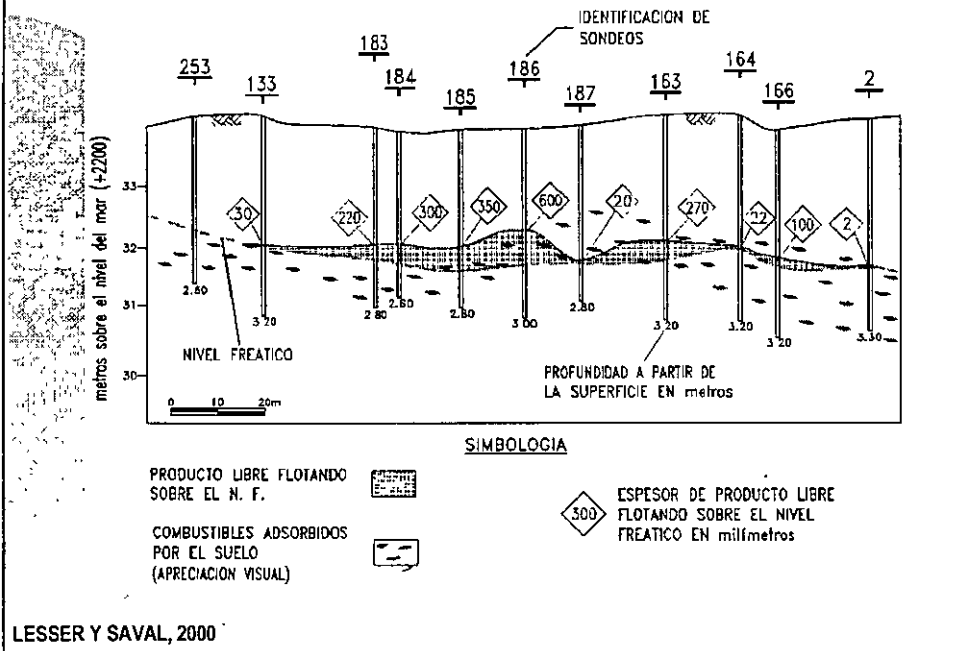




## HCs volátiles en el subsuelo



## Sección mostrando el espesor de producto libre flotando sobre el nivel freático y horizonte con hidrocarburos adsorbidos en el suelo





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

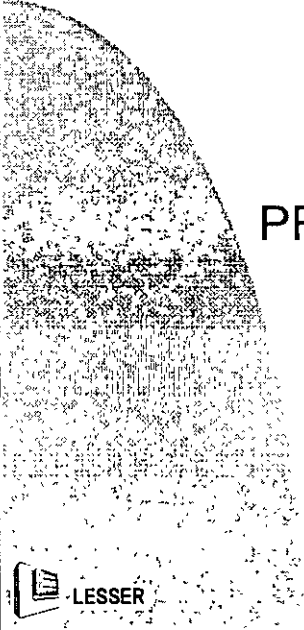


... Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
MÉTODOS DE PROSPECCIÓN Y  
PERFORACIÓN**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería




# METODOS DE PROSPECCION Y PERFORACION

 LESSER

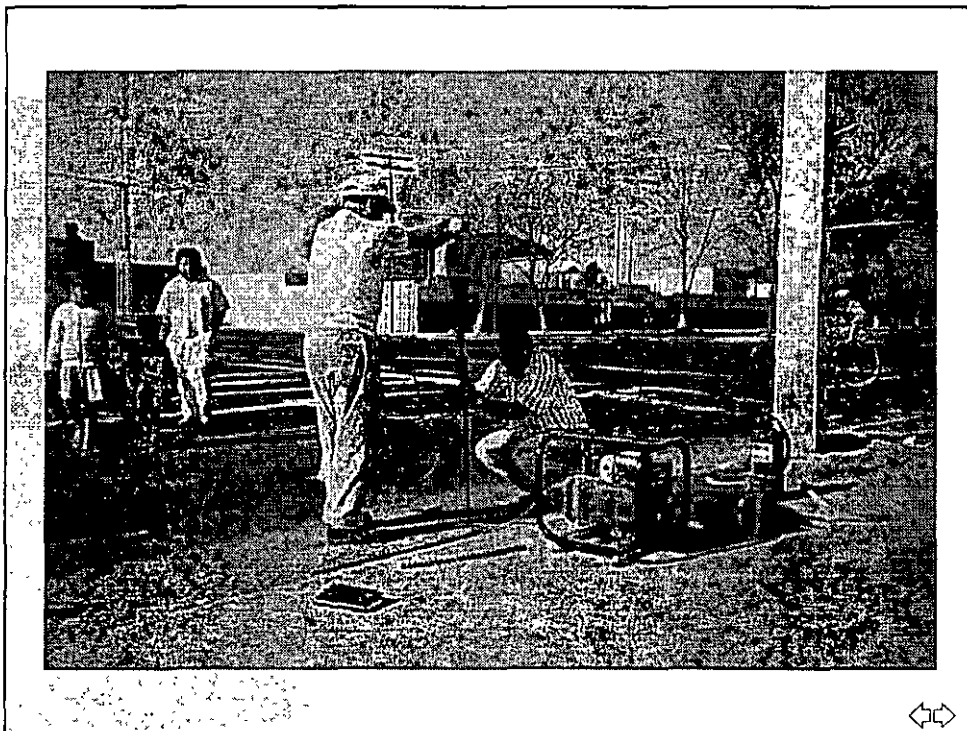
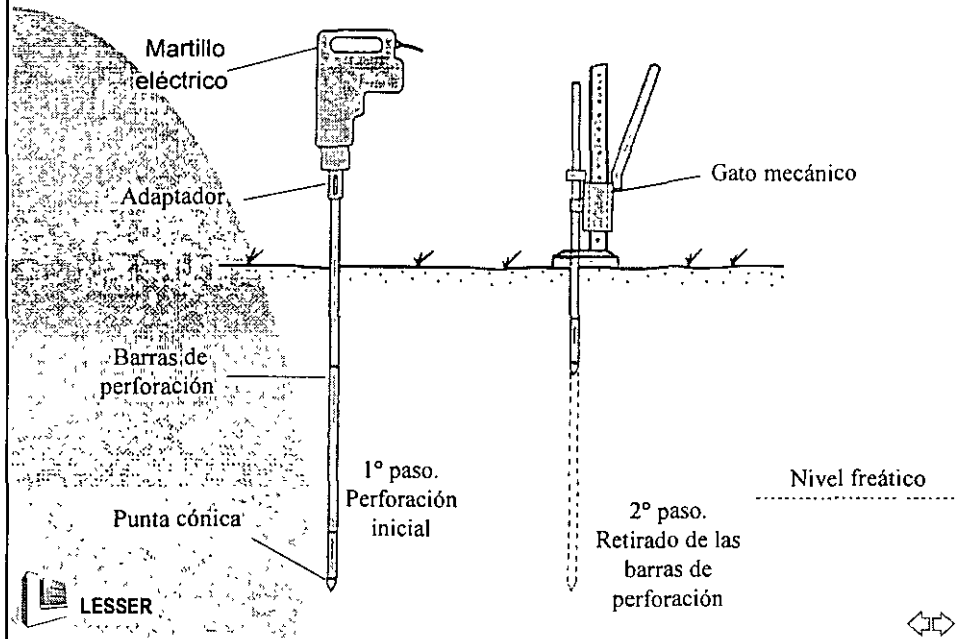


# PERFORACION DE POZOS DE MEDICION

 LESSER



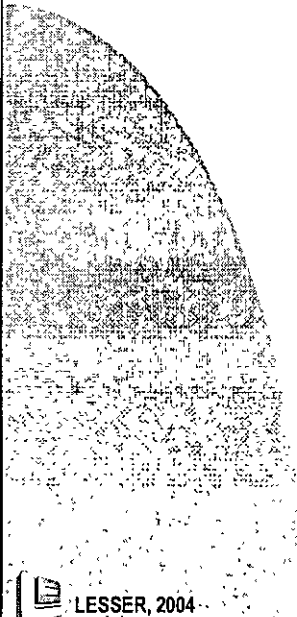
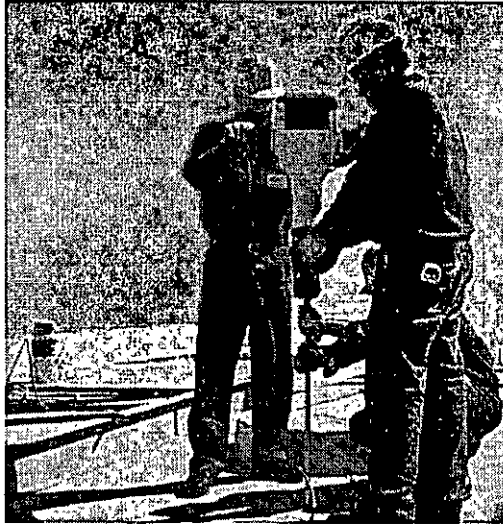
## Perforación de pozos de medición



## Perforaciones de medición

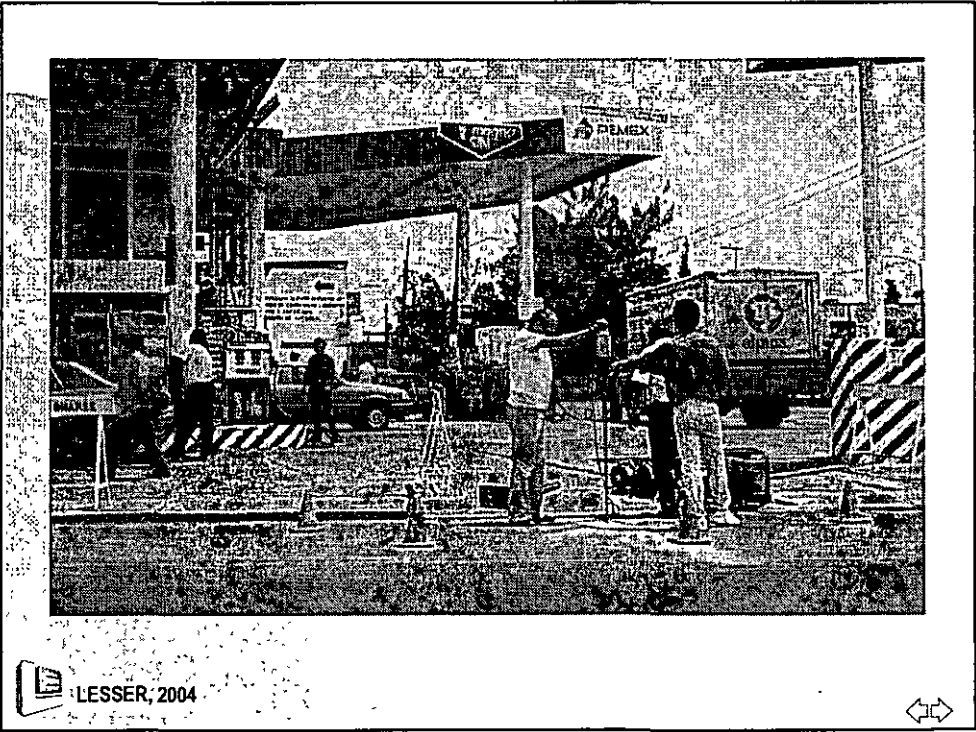
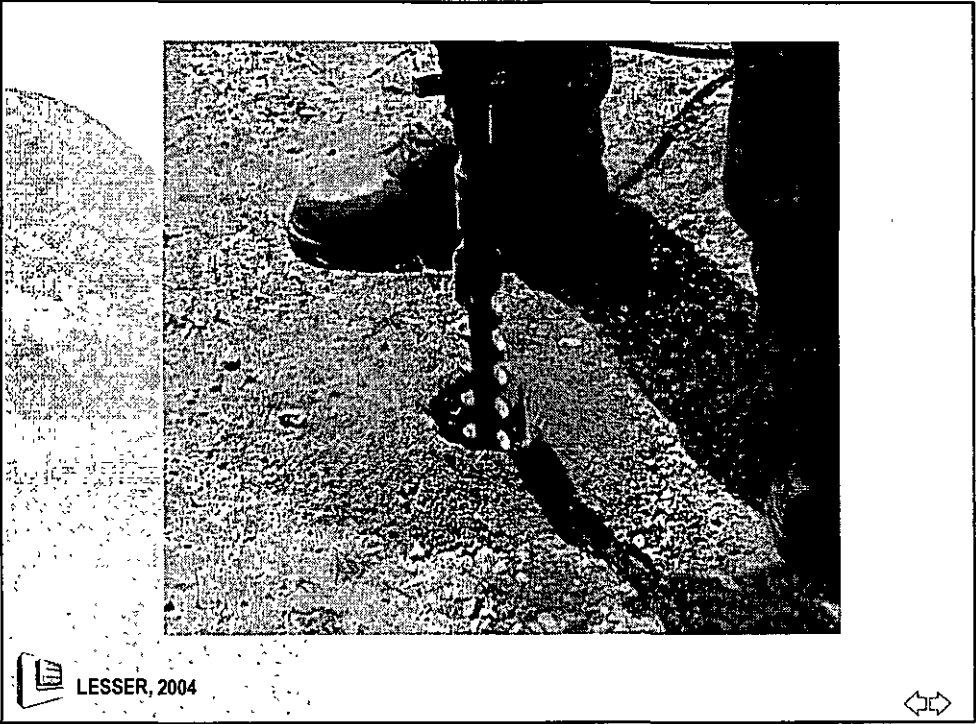
Espacio requerido:  
3 x 3 m

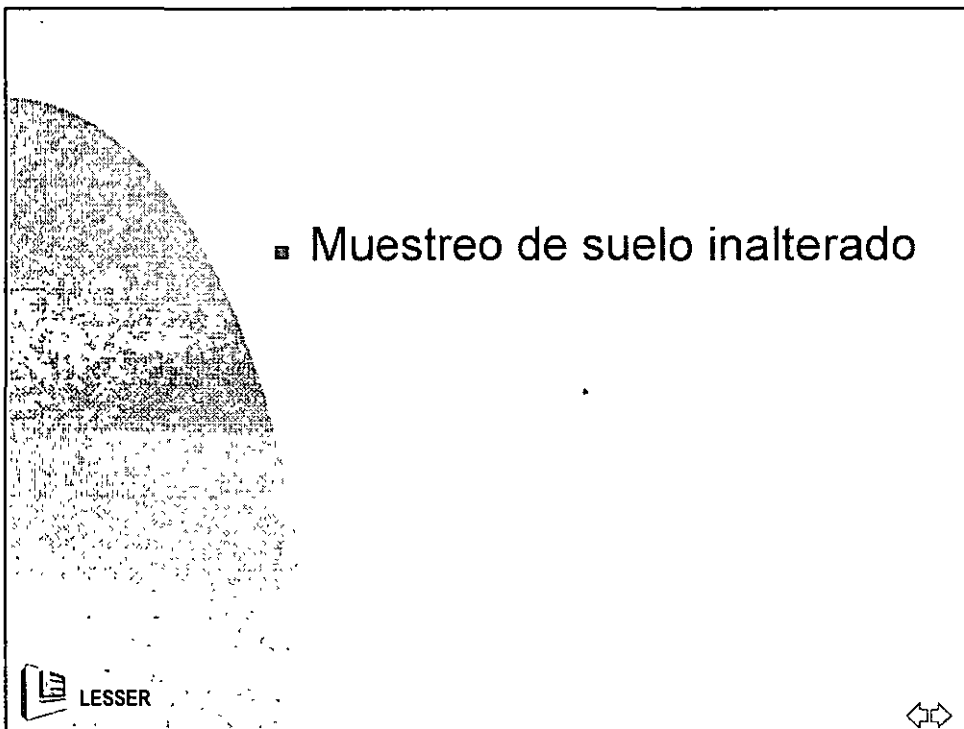
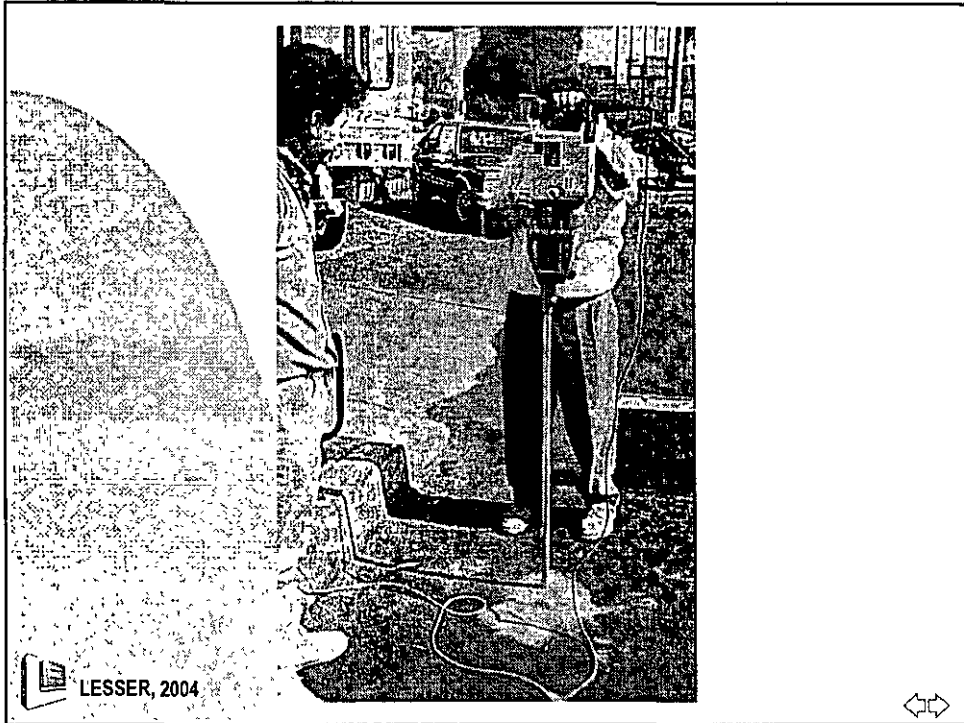
Tiempo por perforación:  
30 minutos por pozo



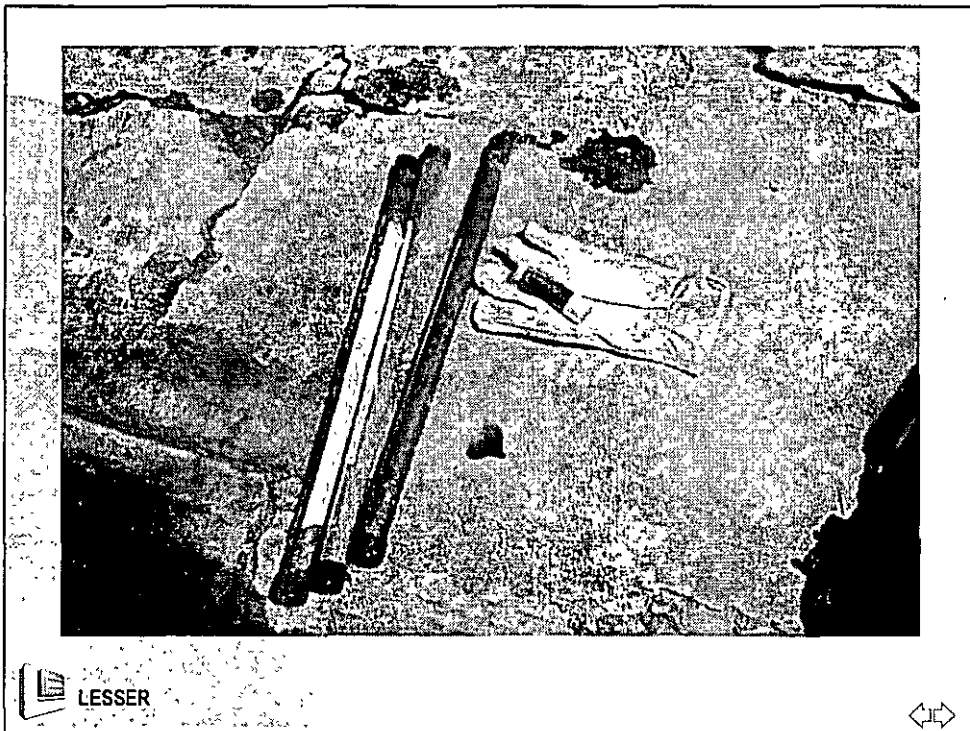
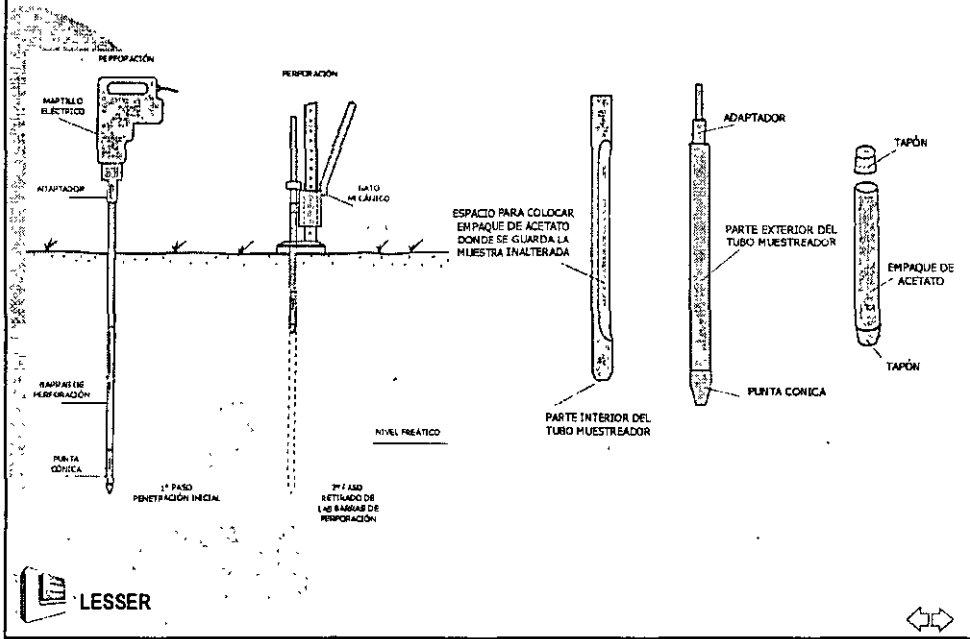
LESSER, 2004



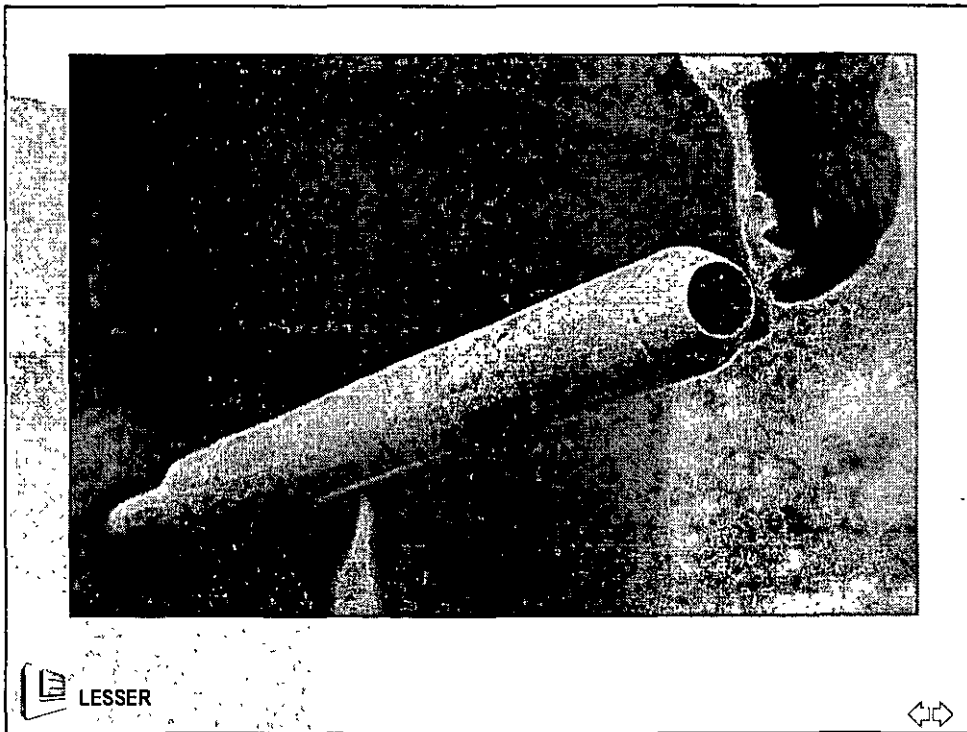
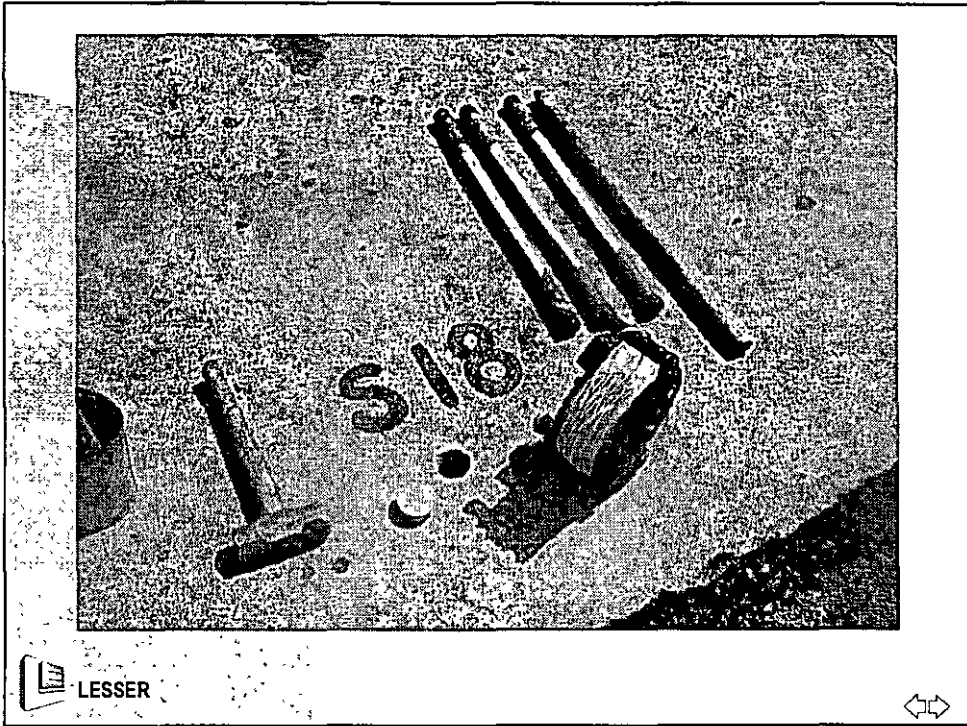




# Muestreo de suelos





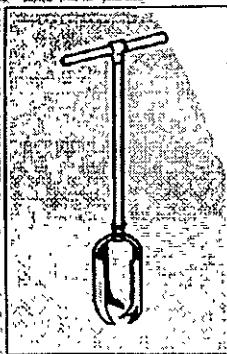




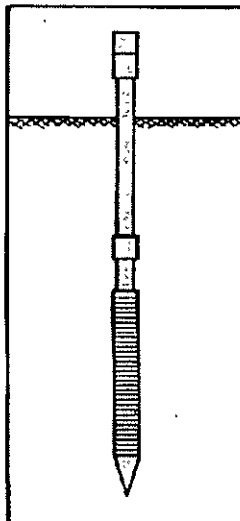
## Otras herramientas de perforación



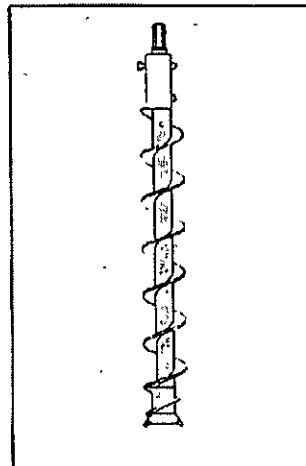
Muestreador manual

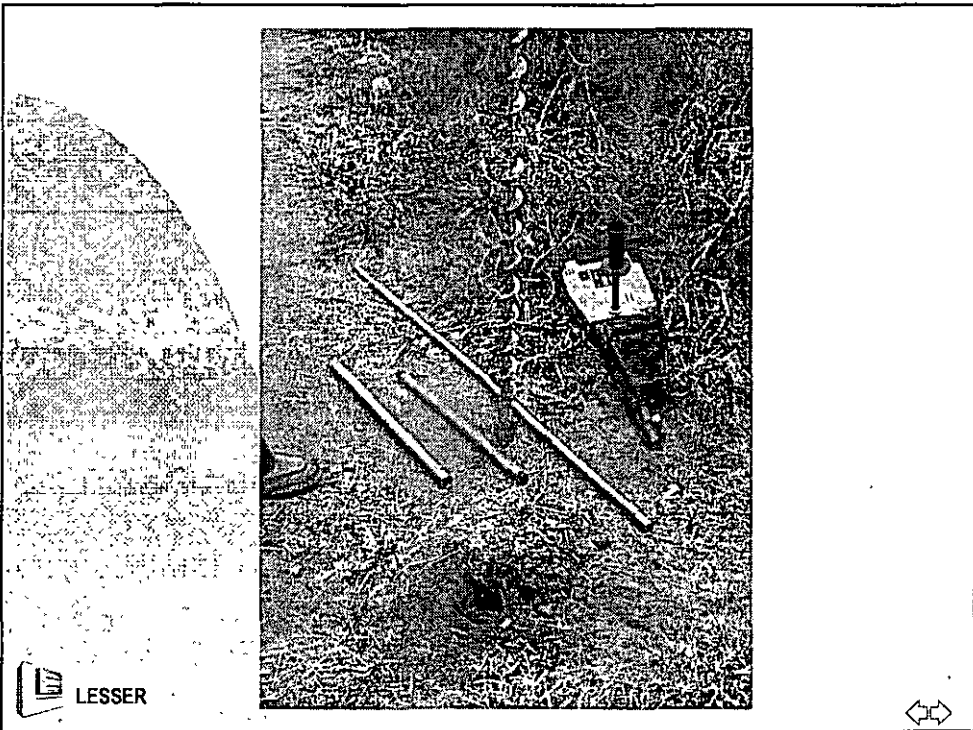
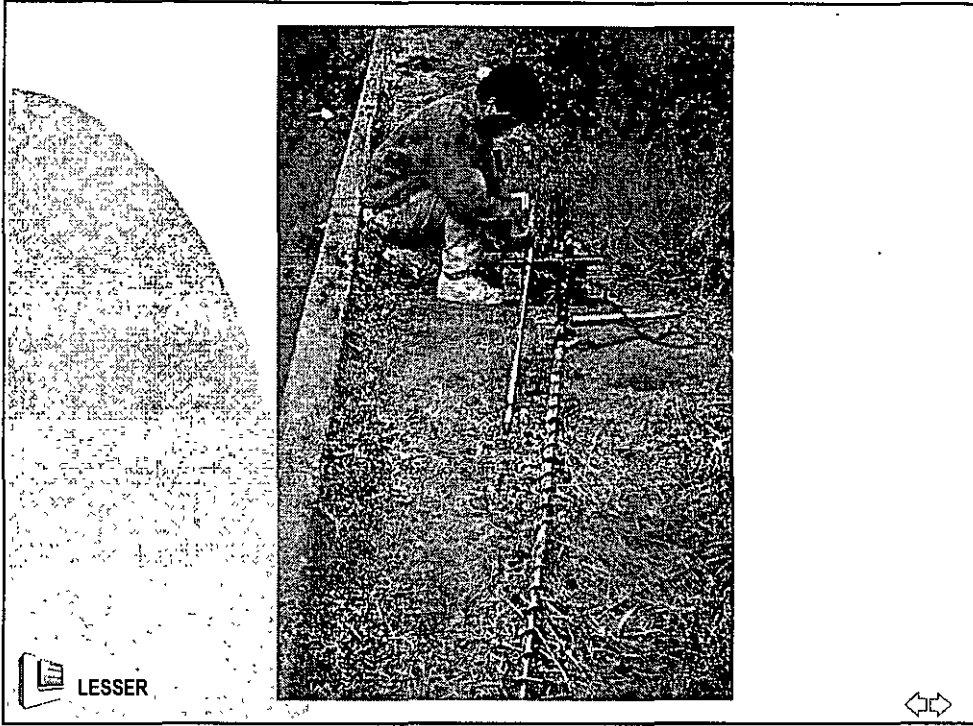


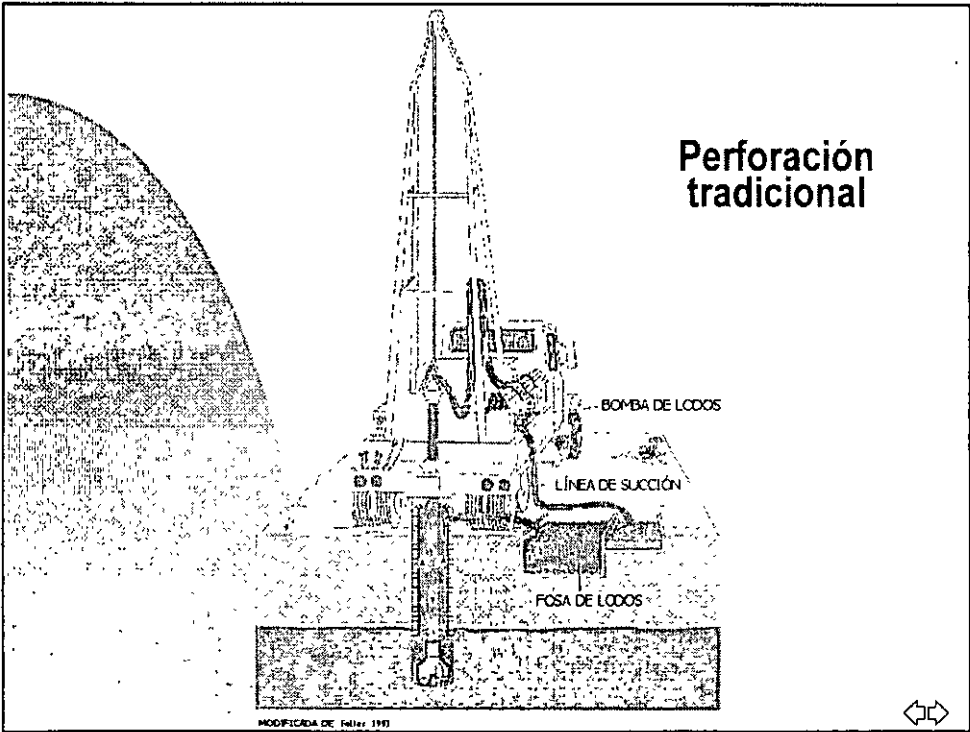
Muestreador mediante  
incado de tubería

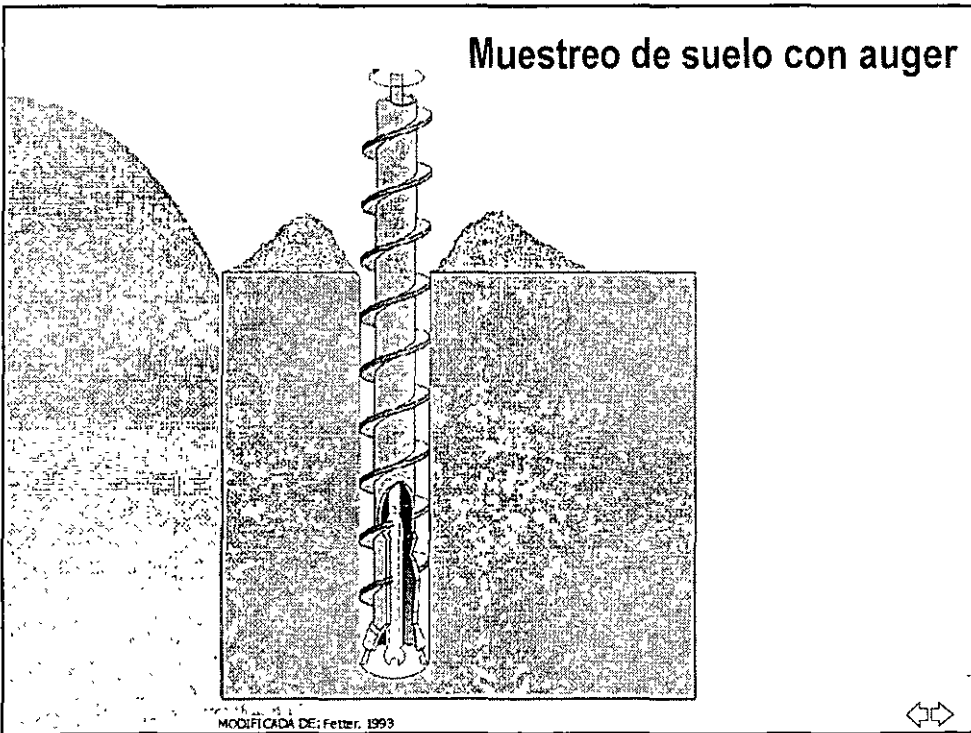
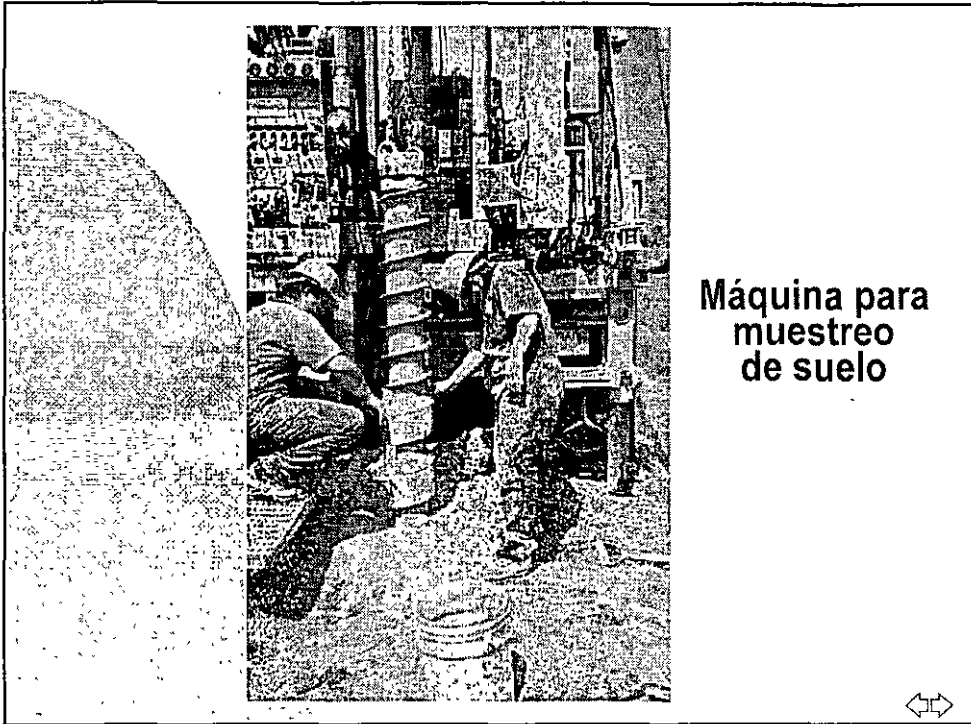


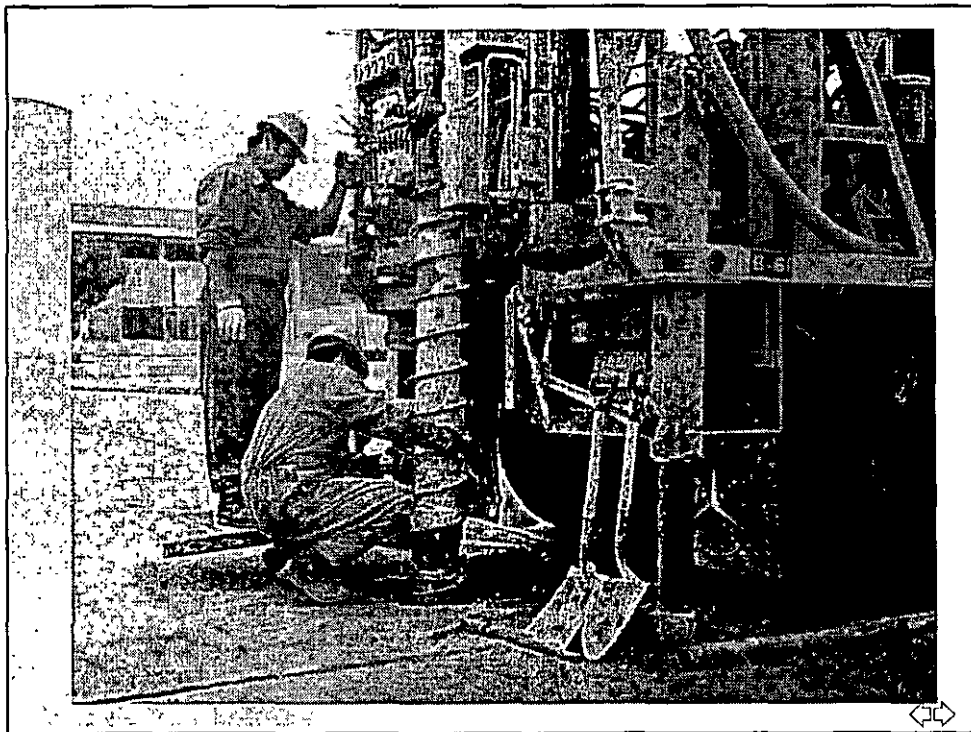
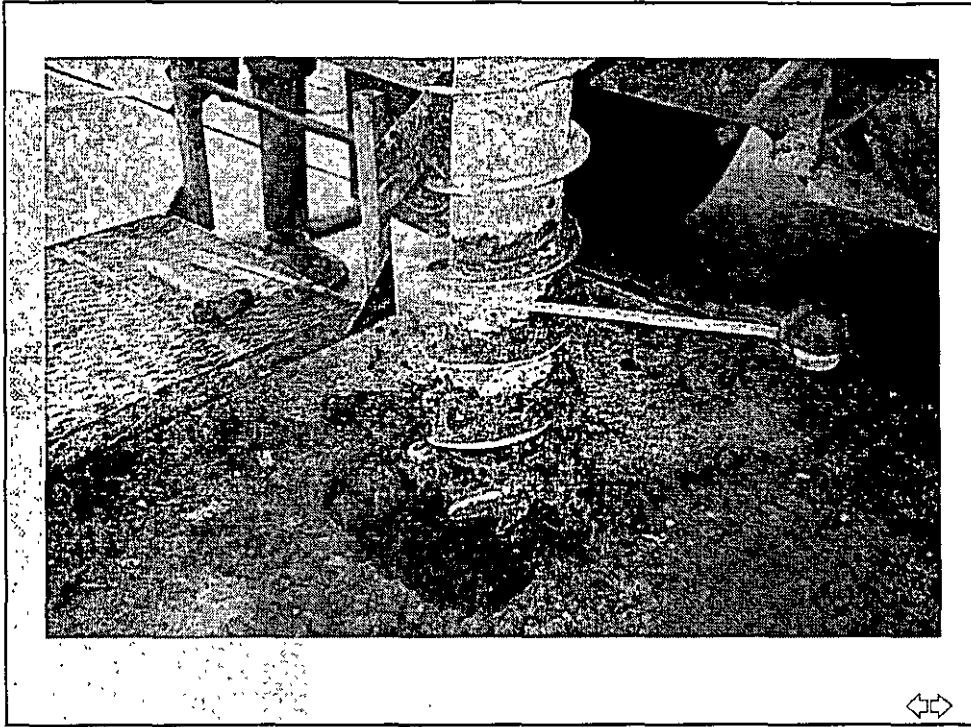
Muestreador de  
máquina rotaria





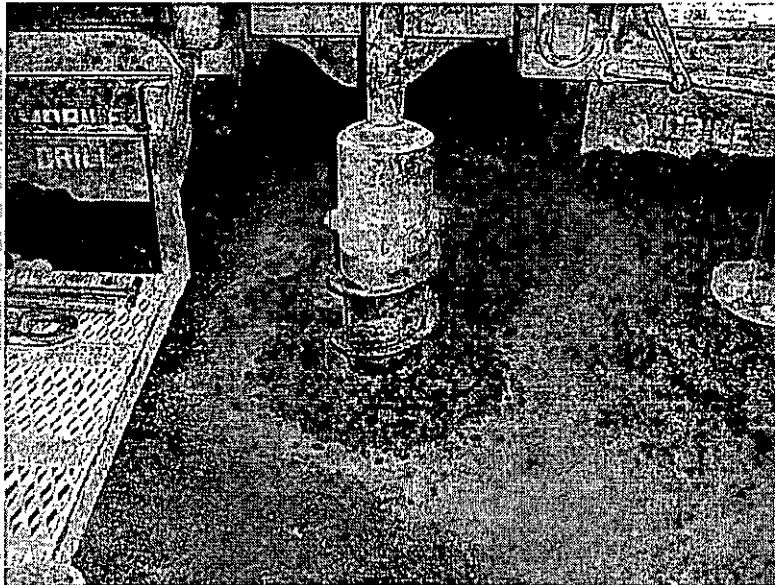
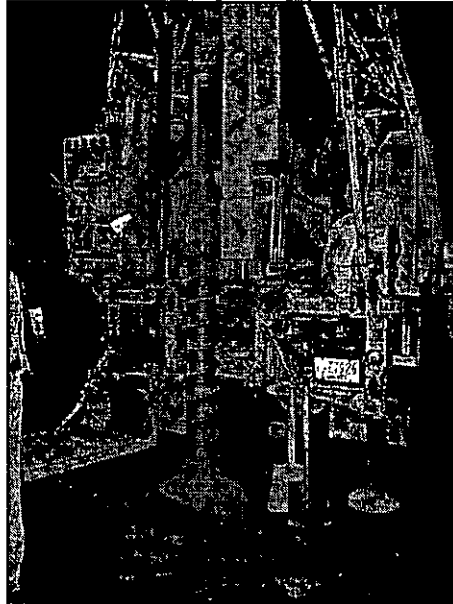









PERFORACION  
DE POZOS PARA  
EXTRACCION DEL  
PRODUCTO LIBRE

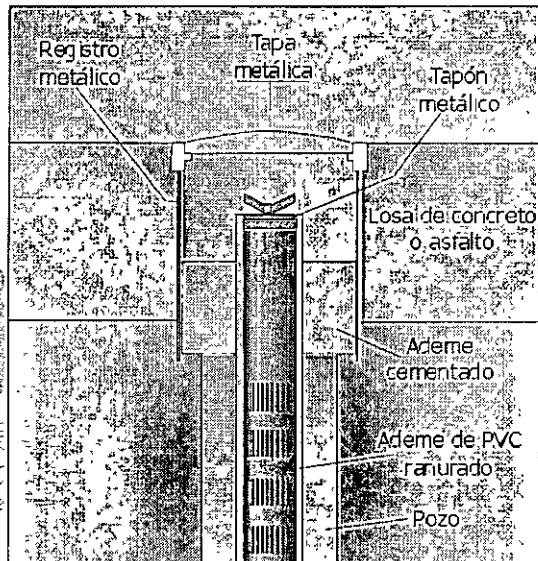






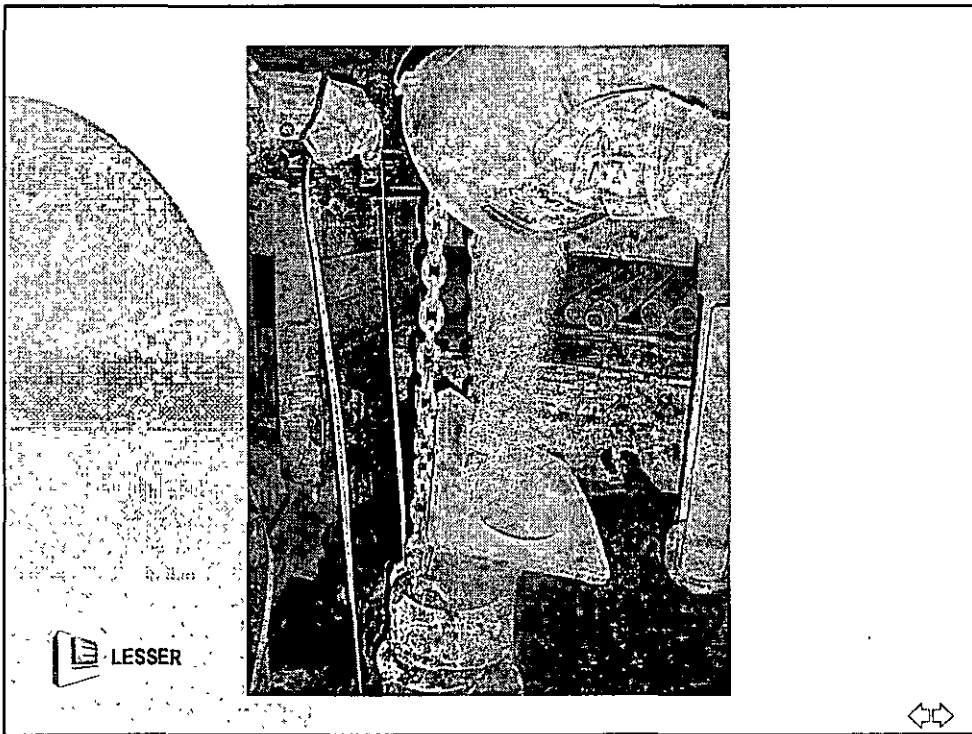
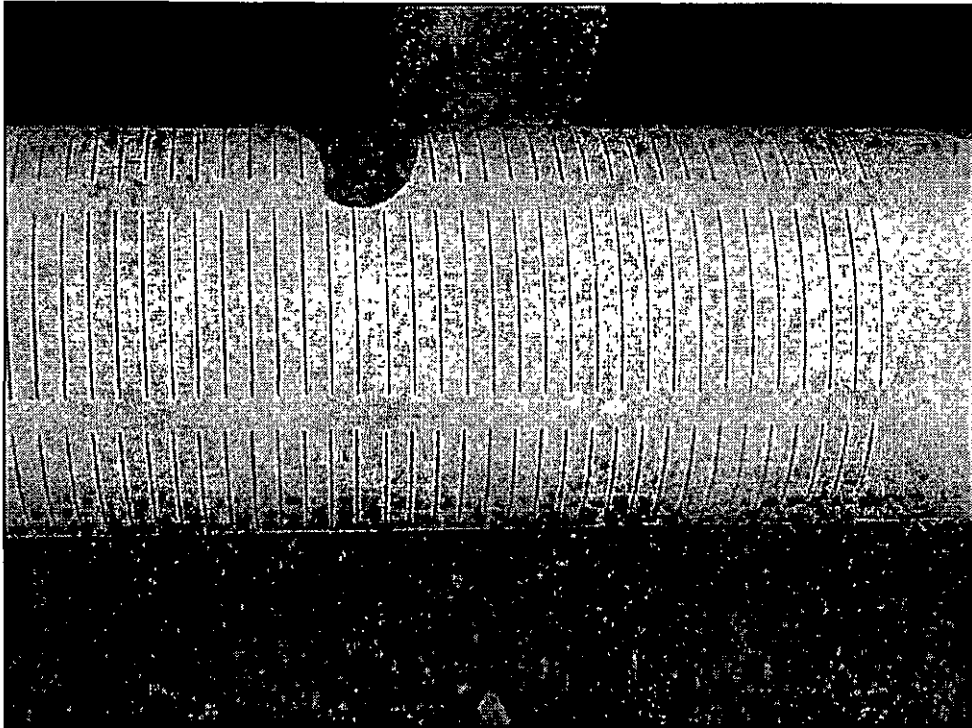
## Terminación de los pozos

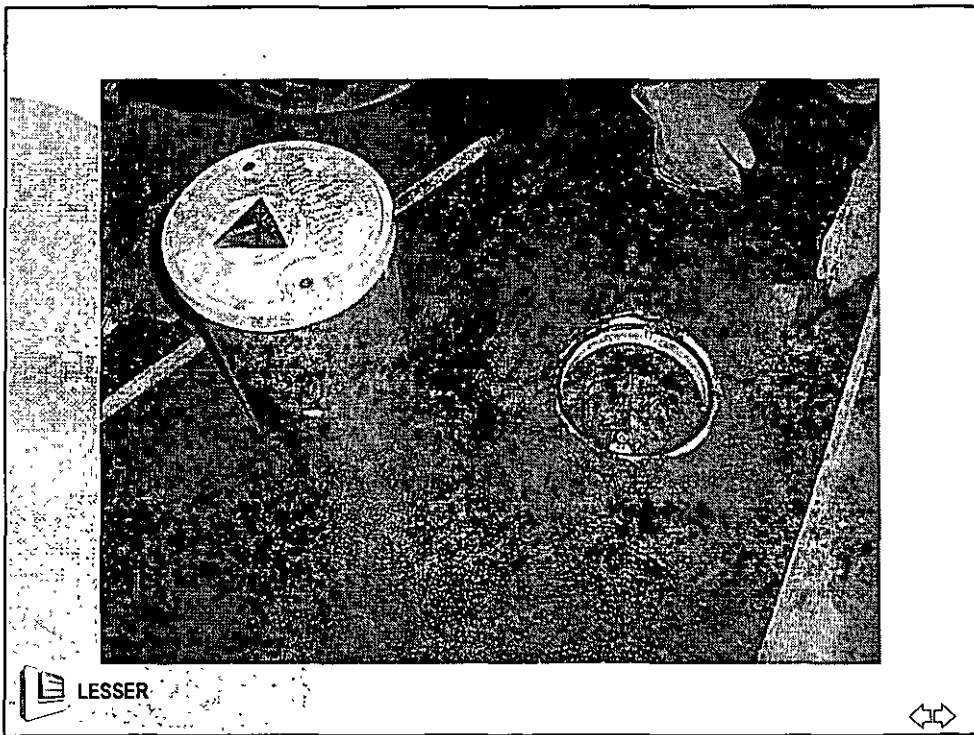
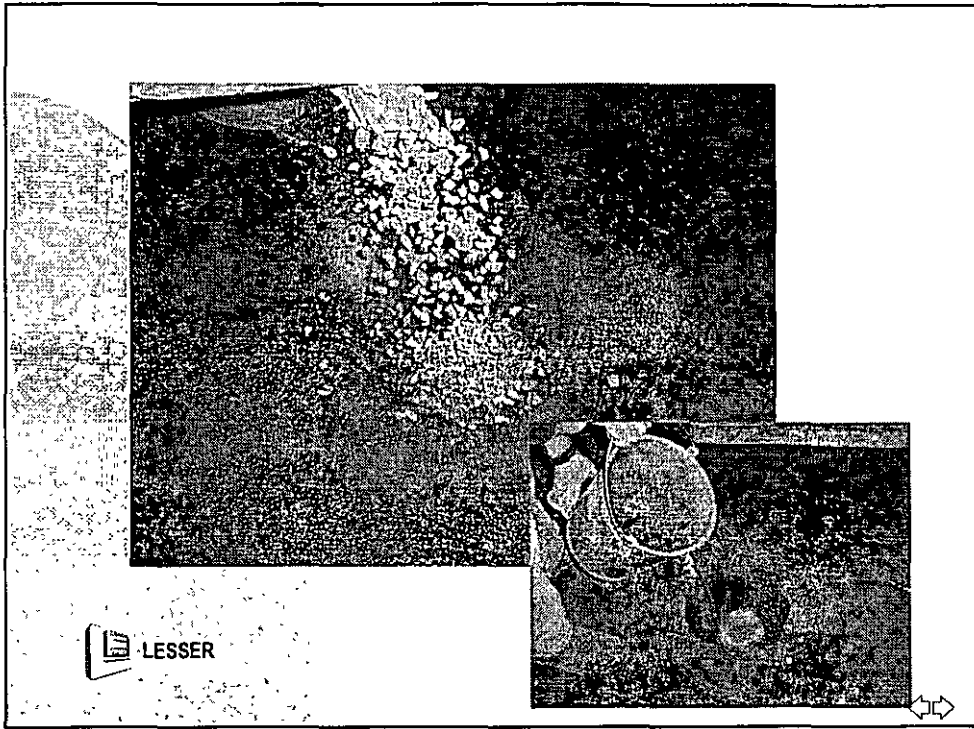
 LESSER

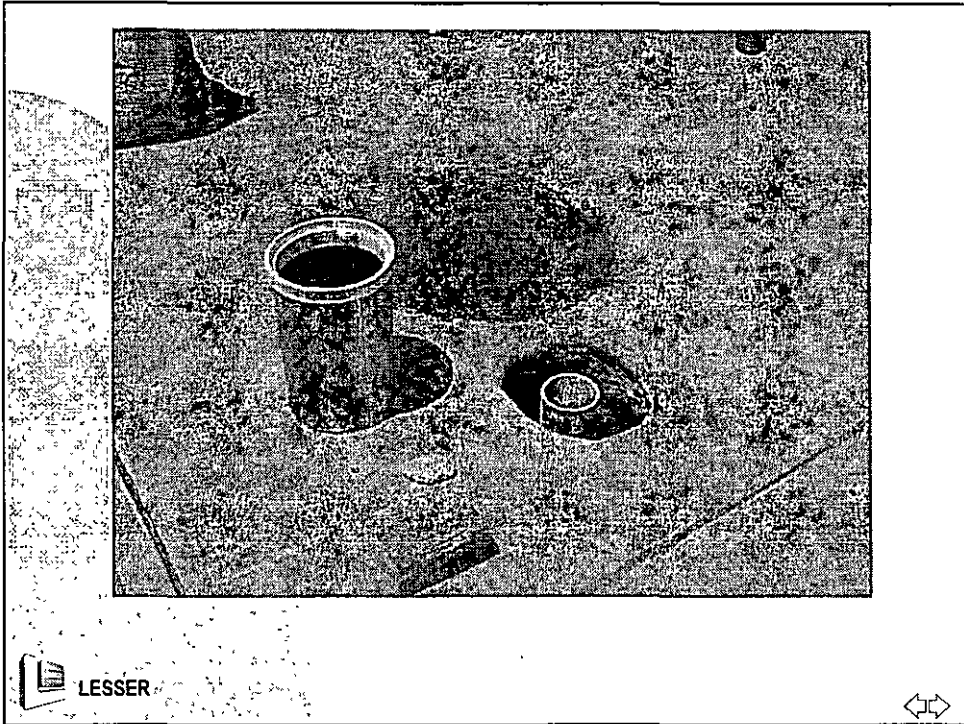


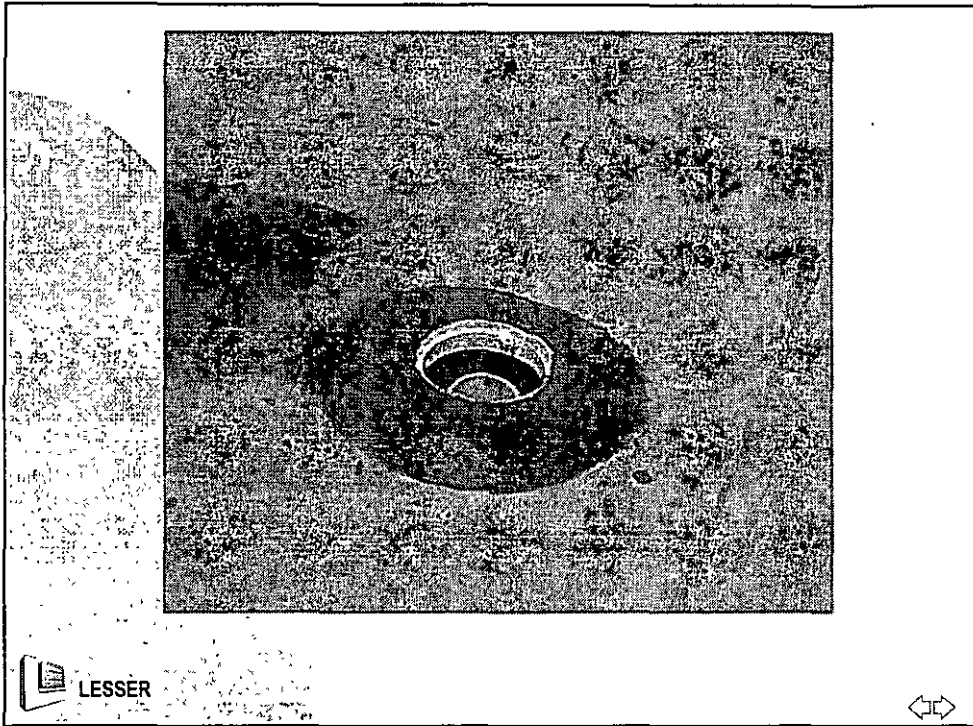
 LESSER, 2004













**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

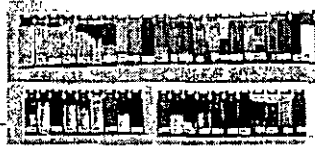


... Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
PRINCIPALES HIDROCARBUROS  
CONTAMINANTES DE SUELOS  
Y ACUIFEROS**

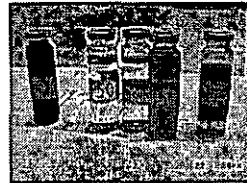
Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería



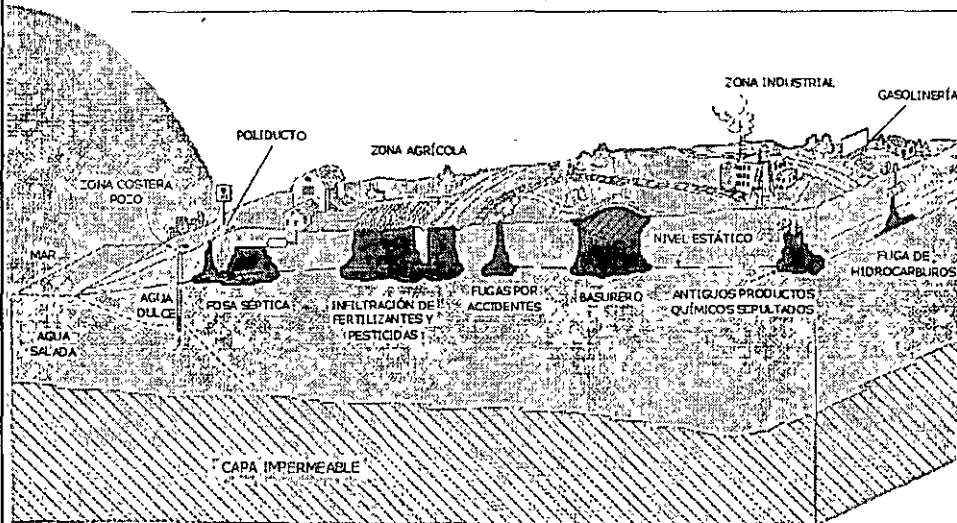
# PRINCIPALES HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUIFEROS:

IDENTIFICACION Y CARACTERISTICAS

- Por:
- Ing. Juan Manuel Lesser
- Dra Susana Saval Bohorquez

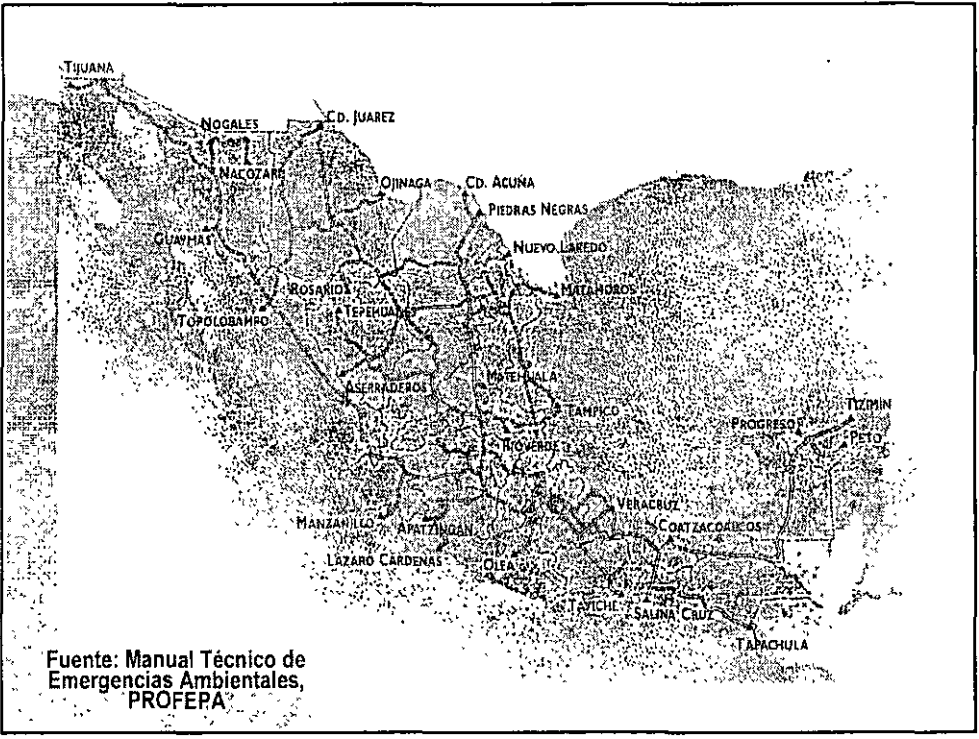


## Fuentes comunes de contaminación



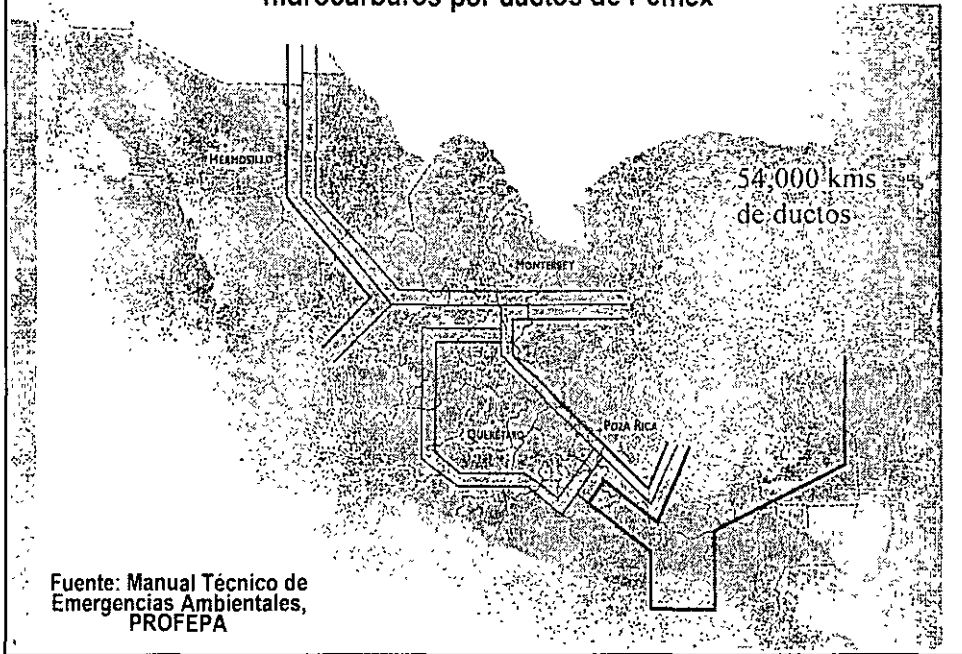
MODIFICADA DE Fetter, 1993.



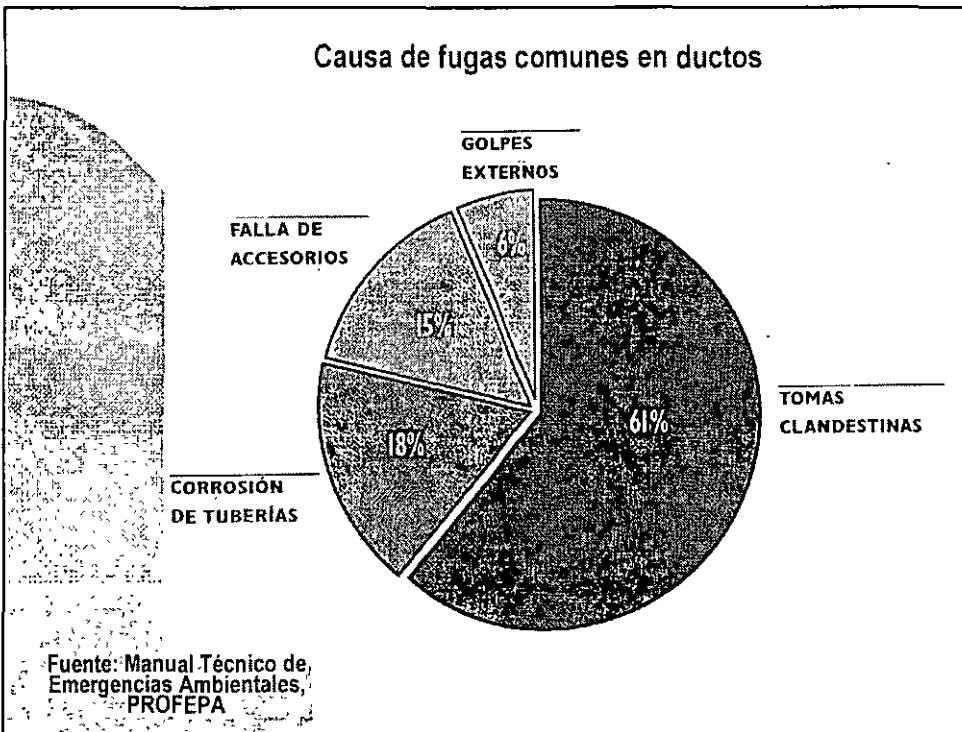


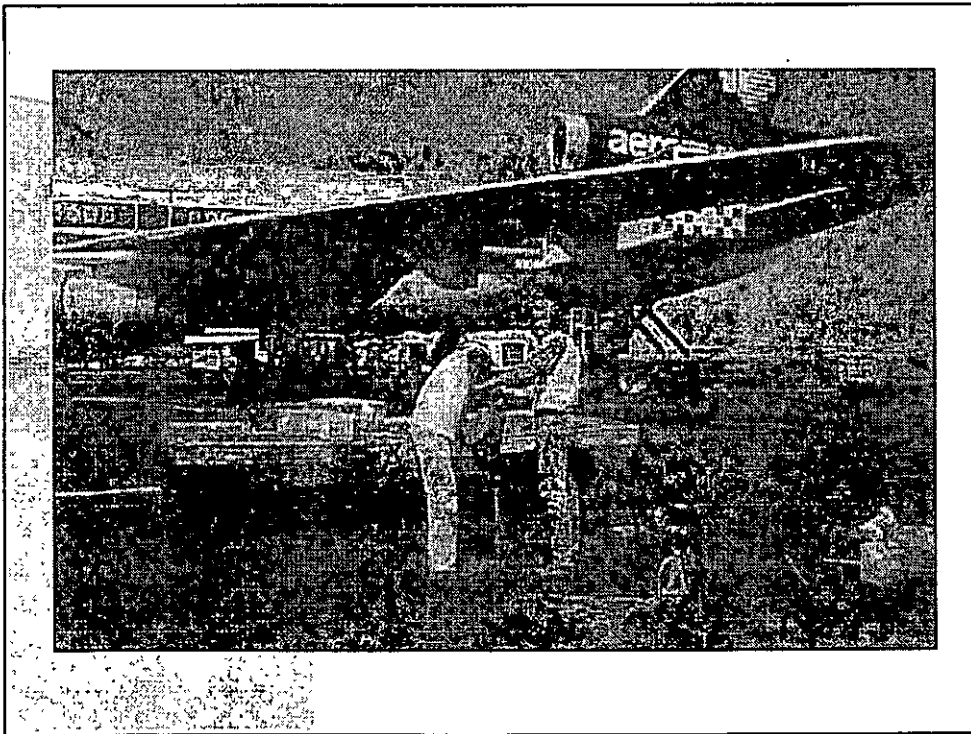


### Principales sistemas de transporte de hidrocarburos por ductos de Pemex



### Causa de fugas comunes en ductos





COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

MAS COMUNES:

Gasolina

Automoviles



LESSER, 2003

COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

MAS COMUNES:

Gasolina

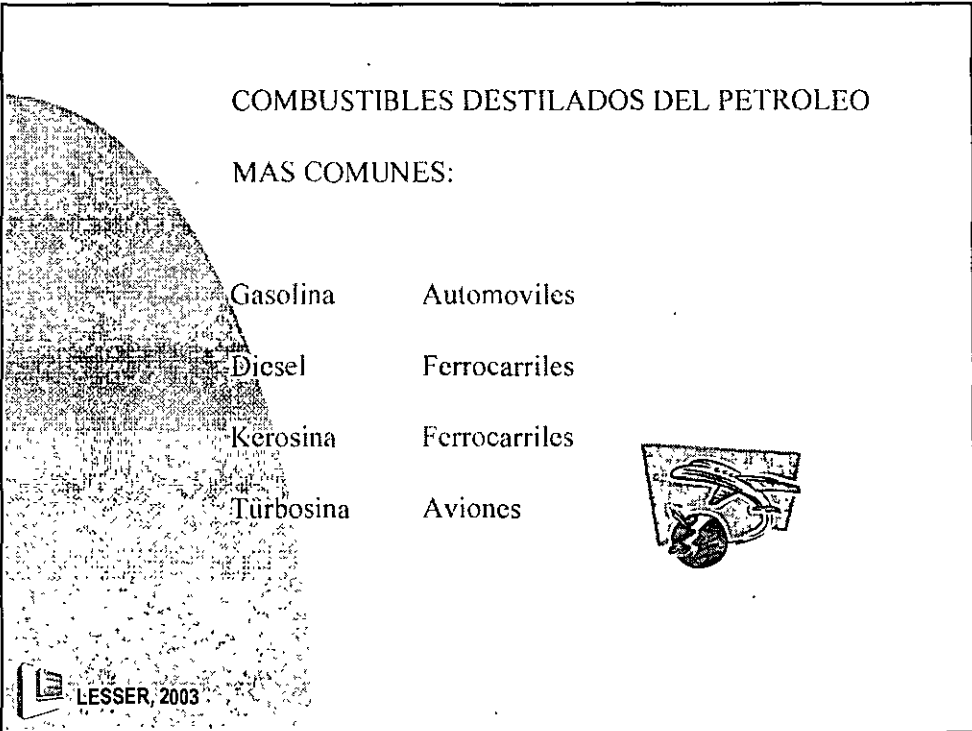
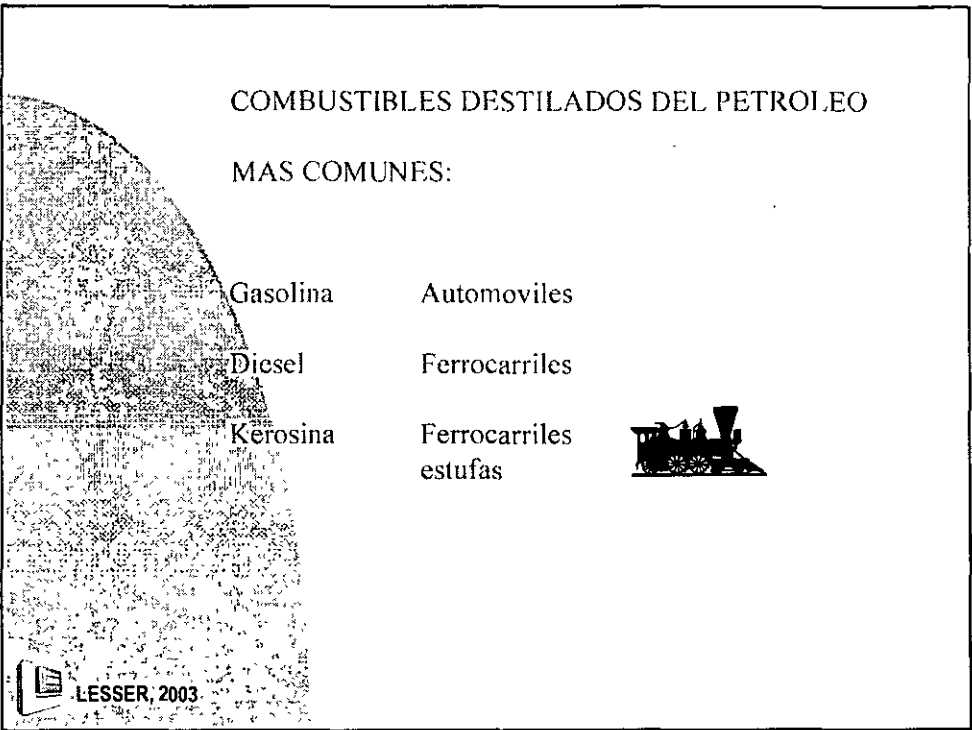
Automoviles

Diesel

Ferrocarriles



LESSER, 2003



## COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

MAS COMUNES:

Gasolina Automoviles

Diesel Ferrocarriles

Kerosina Ferrocarriles

Turbosina Aviones

Combustoleo Industrias

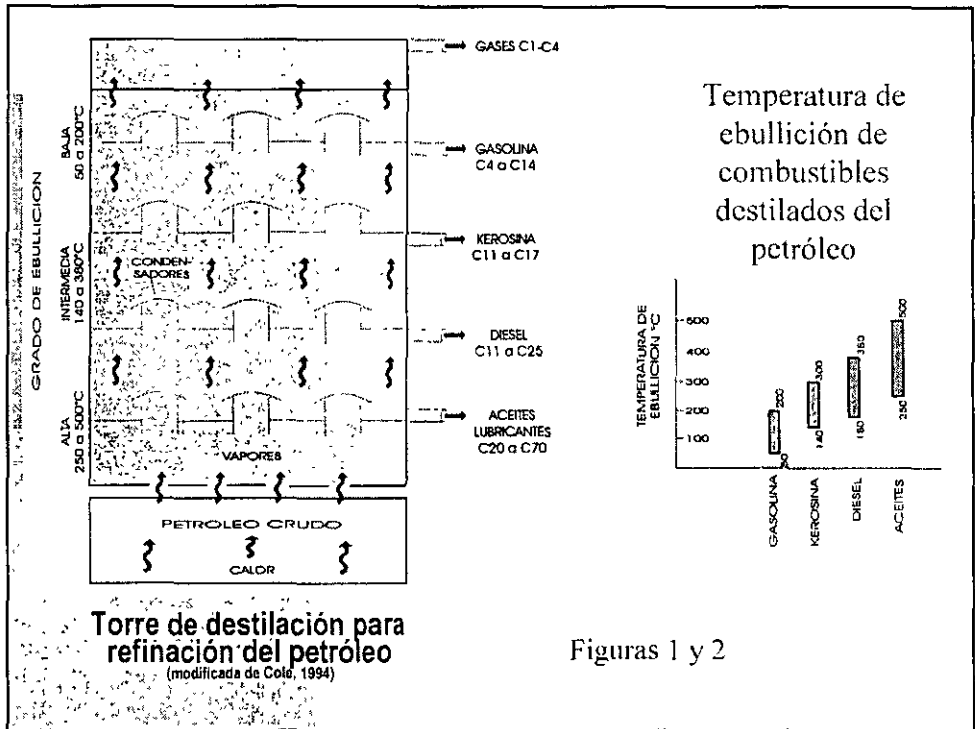


LESSER, 2003

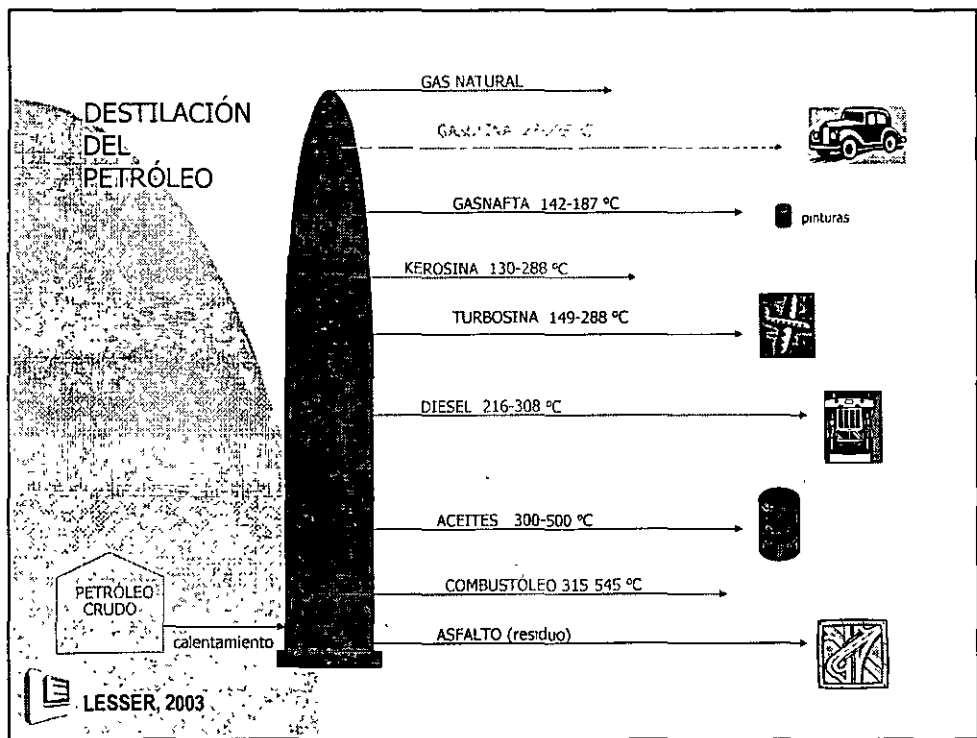
- Destilacion del petroleo



LESSER, 2003

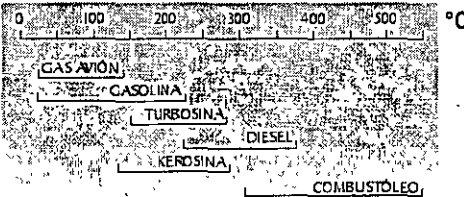


Figuras 1 y 2





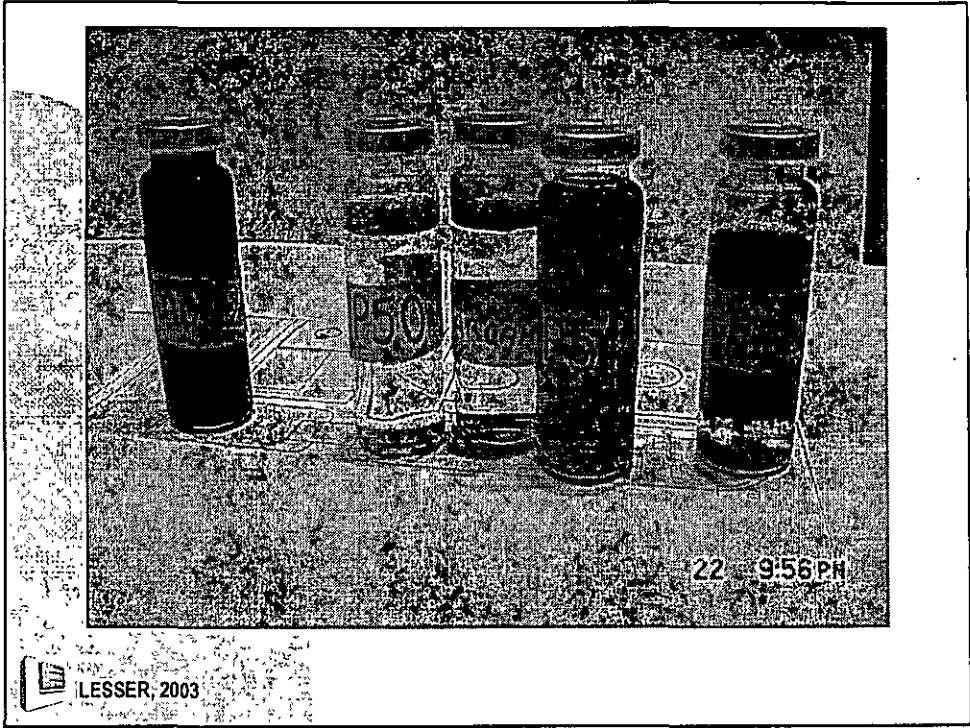
TEMPERATURA DE DESTILACION DE LOS  
HIDROCARBUROS MAS COMUNES



LESSER, 2003



LESSER, 2003





■ Identificación de hidrocarburos mediante cromatografía

LESSLER, 2003





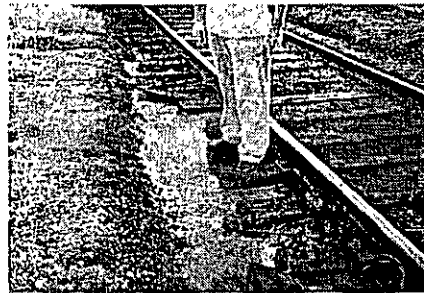
# DIESEL

Hidrocarburos poliaromaticos

Antraceno

Fenantreno

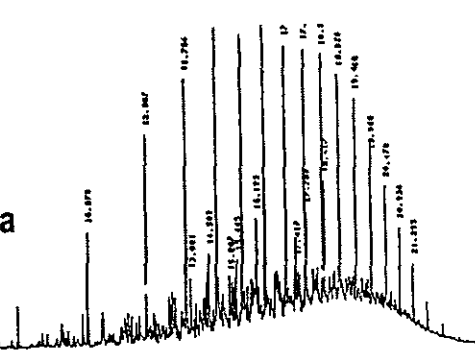
Naftaleno



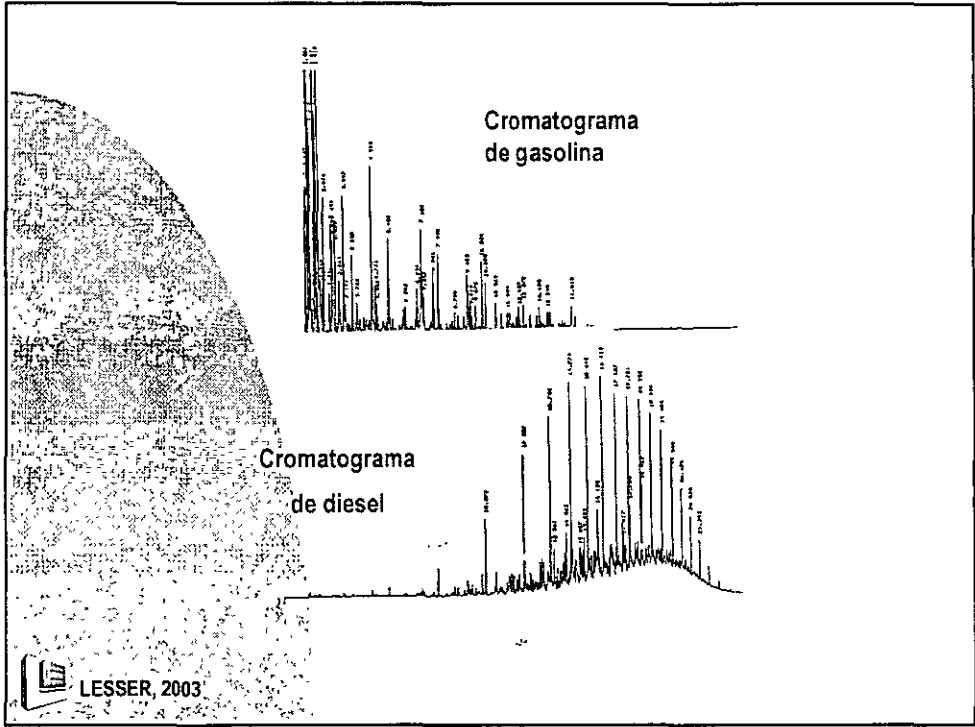
LESSER, 2003

Figura 5

Cromatograma  
de diesel




LESSER, 2003



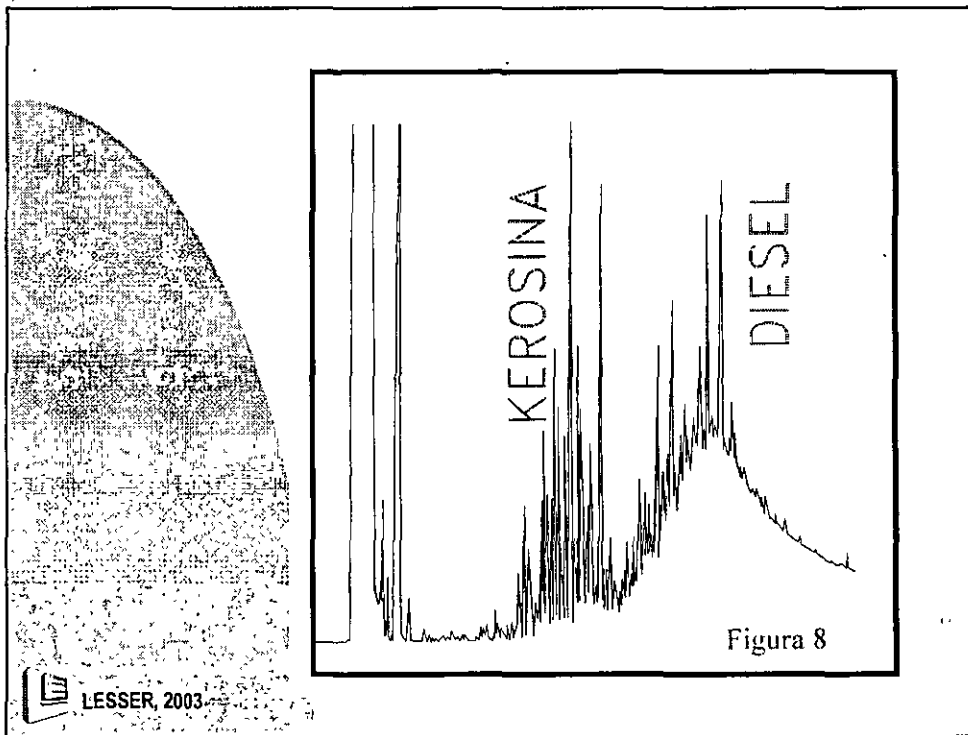
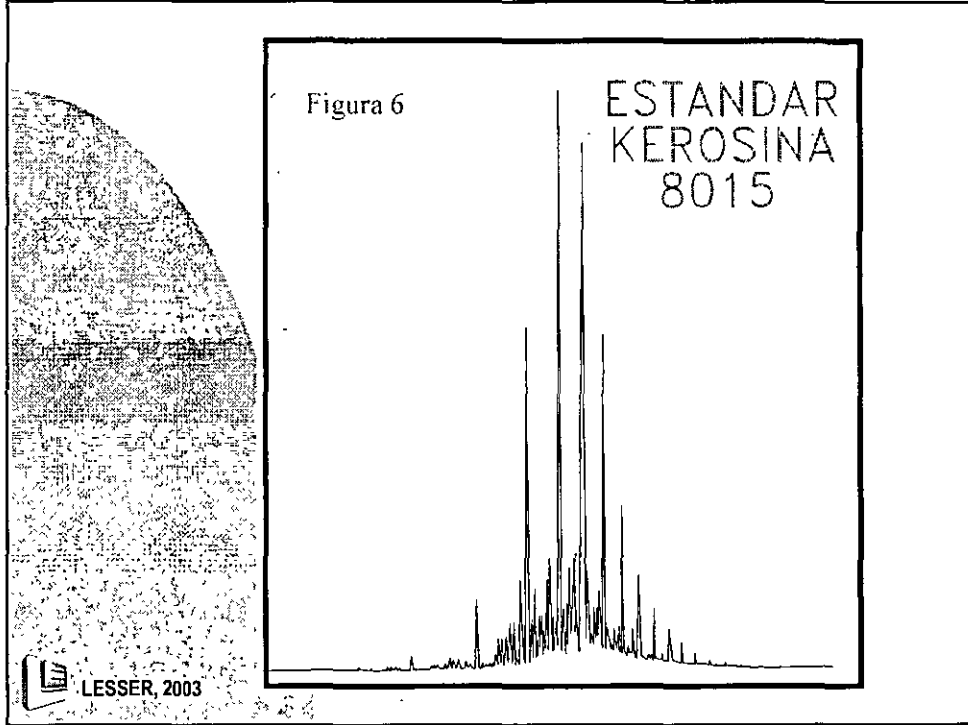
# KEROSINA

Hidrocarburos poliaromaticos

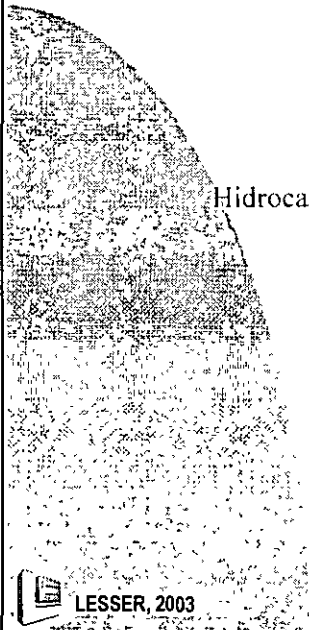
- Antraceno
- Fenantreno
- Naftaleno



LESSER, 2003









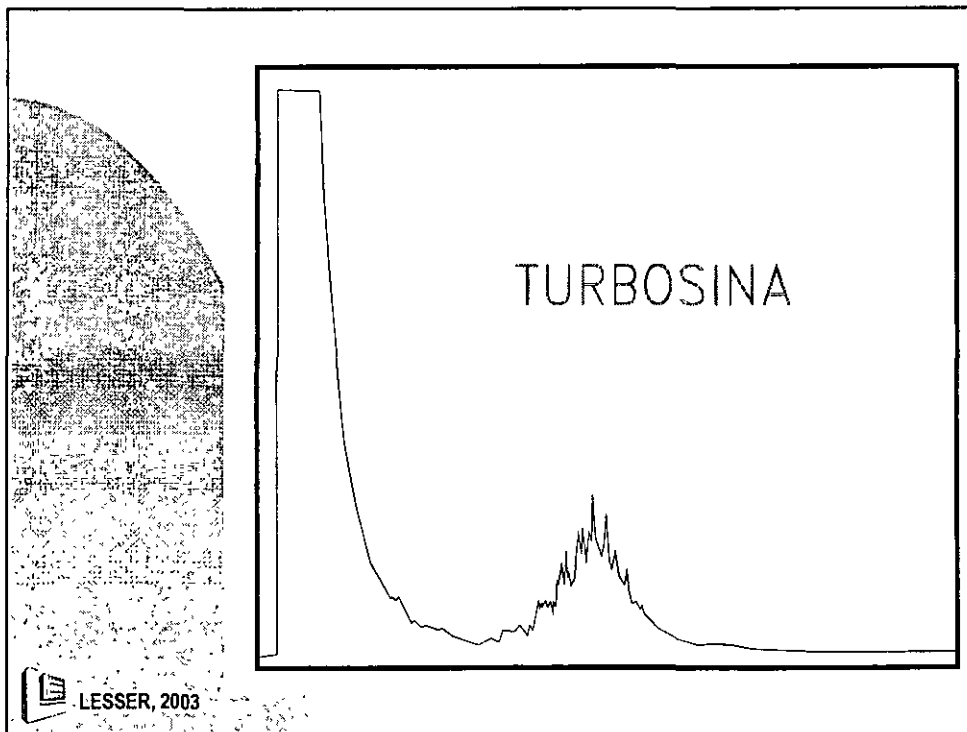
# TURBOSINA

Hidrocarburos poliaromaticos

- Antraceno
- Fenantreno
- Naftaleno



 LESSER, 2003



▣ Estandares  
( Huellas digitales )

LESSER, 2003

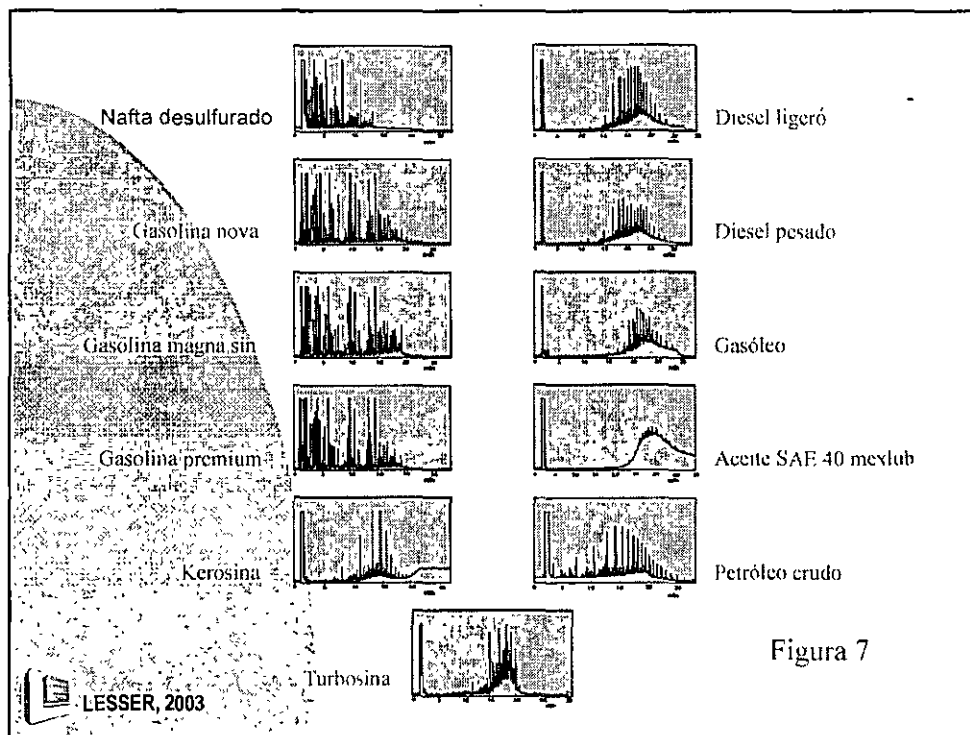


Figura 7

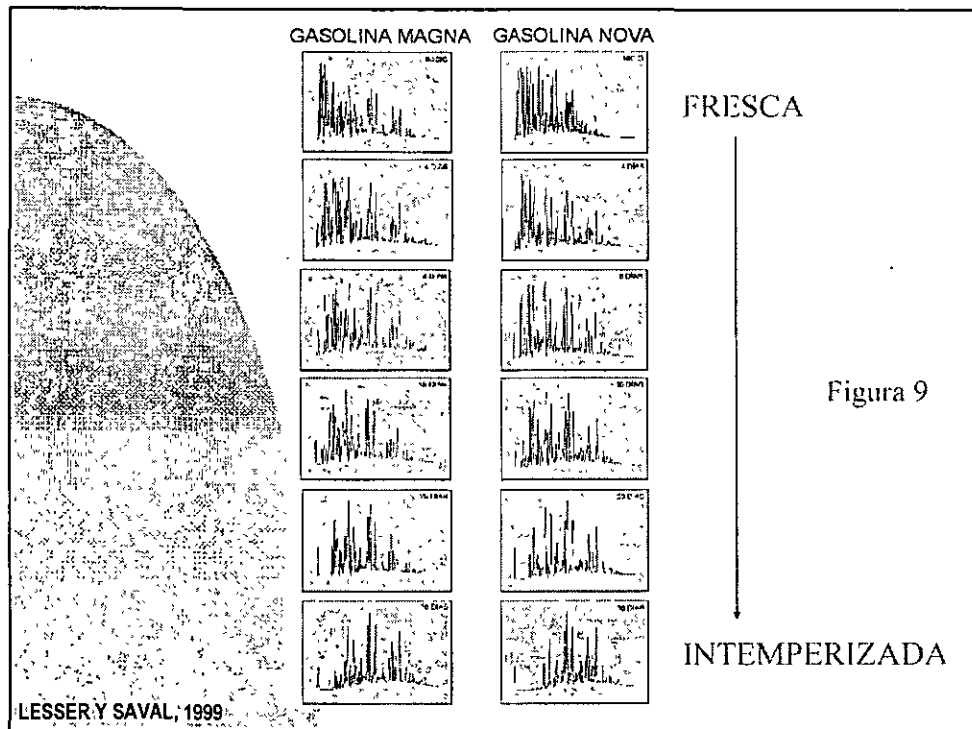
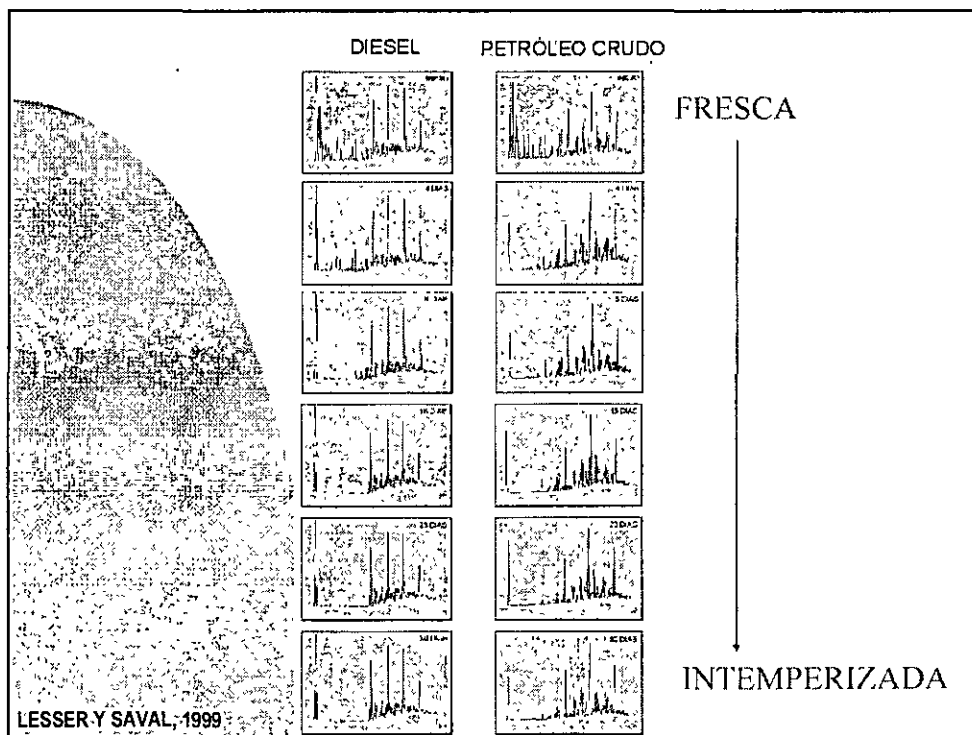
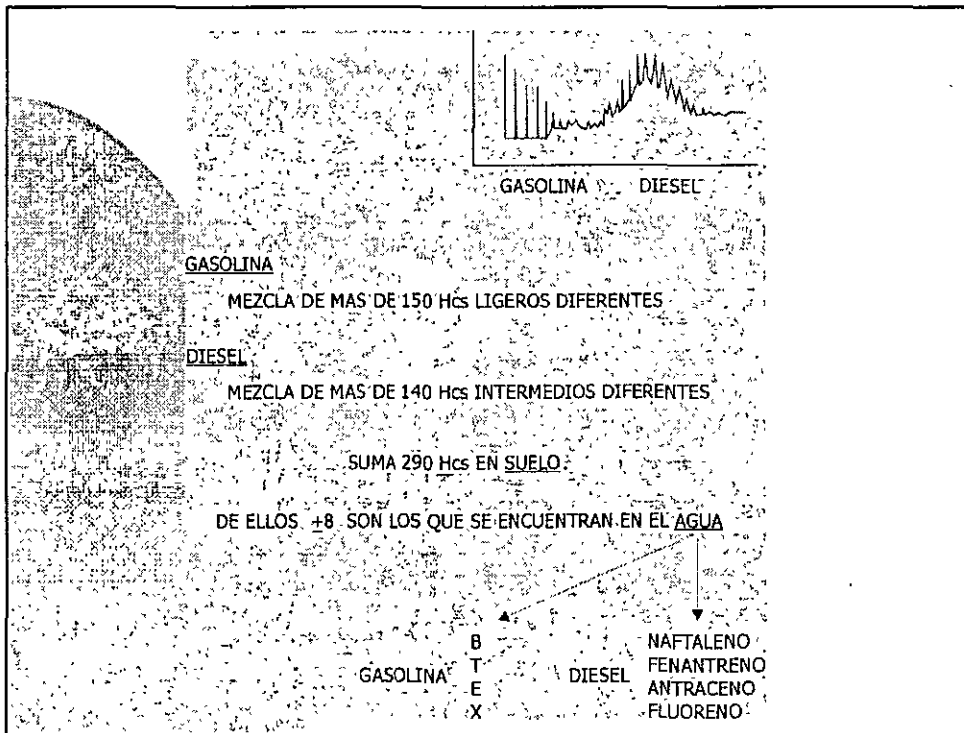


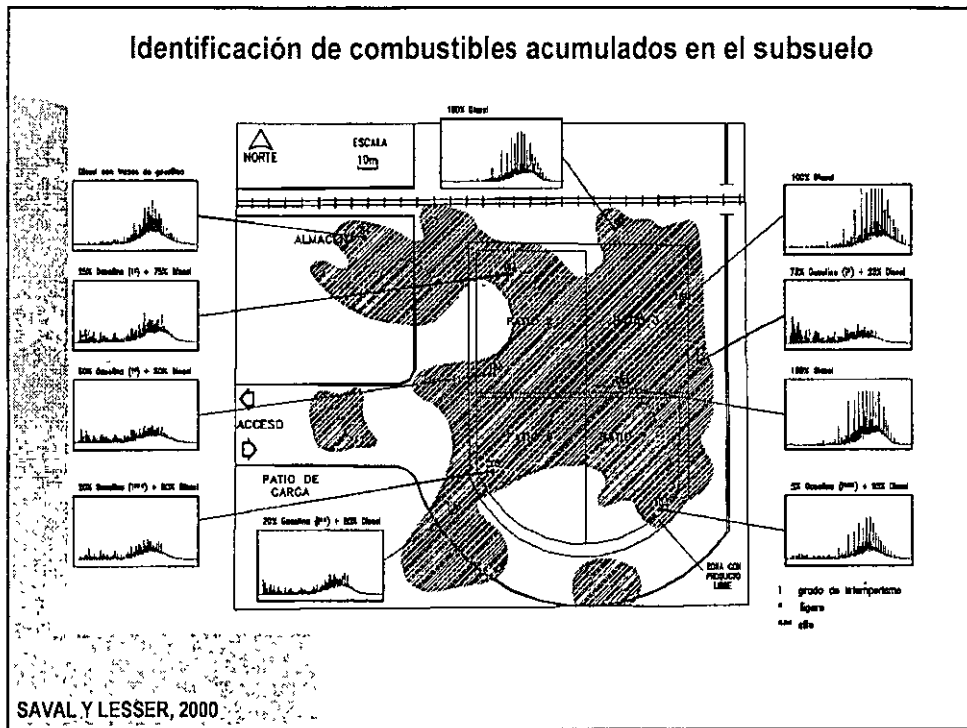
Figura 9



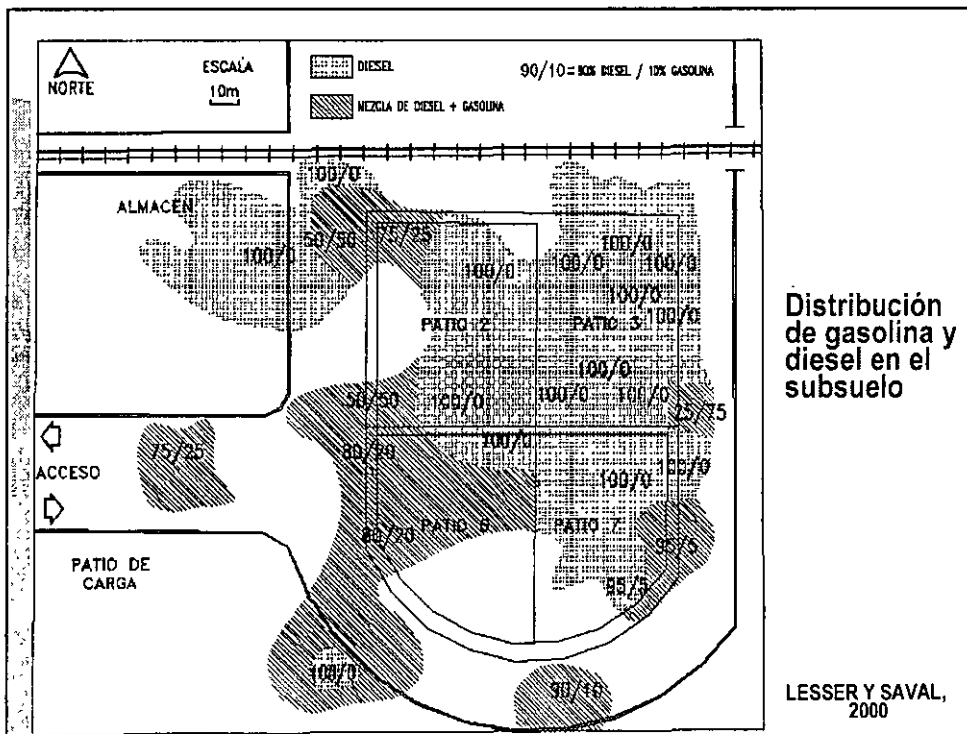
MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA DETERMINACIÓN DE HIDROCARBUROS EN MUESTRAS DE SUELO Y AGUA	
HTP ACEITES COMBUSTOLEO	EPA-418-1
HTP GASOLINA DIESEL	EPA-8015
(HC LIGEROS) MONOAROMÁTICOS BTX, MTBE	EPA-8260
(HC PESADOS) POLIAROMÁTICOS	EPA-8310/8270



### Identificación de combustibles acumulados en el subsuelo

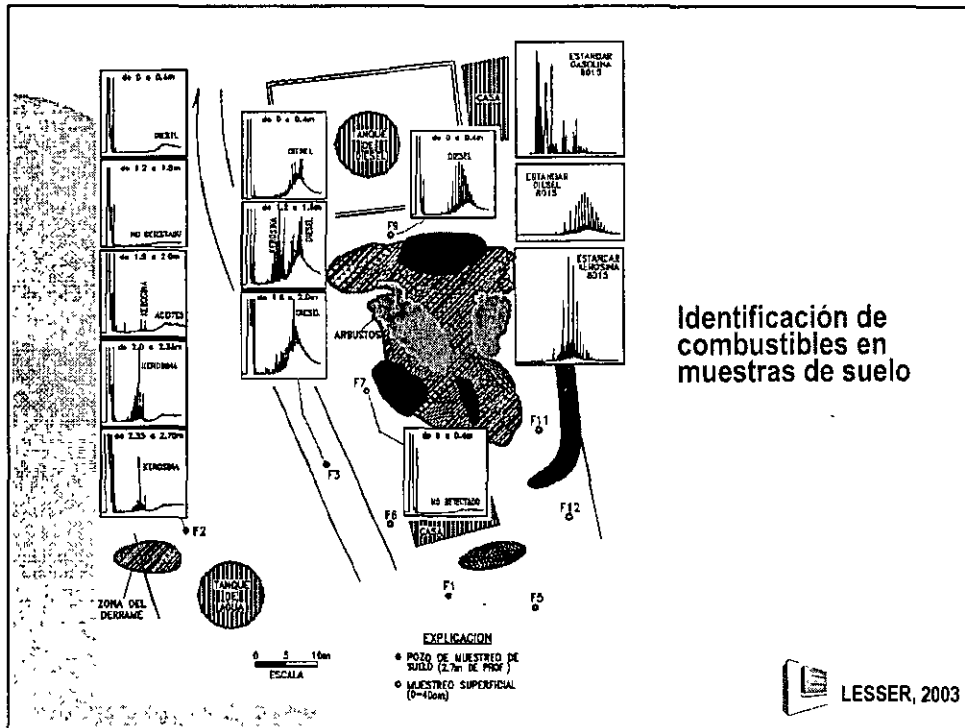


SAVAL Y LESSER, 2000



Distribución de gasolina y diesel en el subsuelo

LESSER Y SAVAL, 2000



### CONCLUSIONES


Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



LESSER, 2003

## CONCLUSIONES

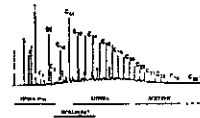
Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



COMPARACION DE UN  
PERFIL CROMATOGRAFICO  
DE UN PRODUCTO FRESCO  
CON UN PRODUCTO INTEMPERIZADO



## CONCLUSIONES

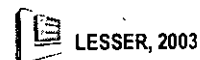
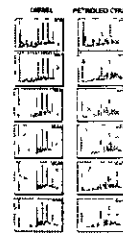
Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



## CONCLUSIONES

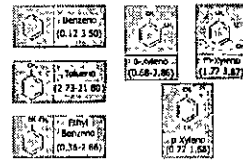
Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasólinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



 LESSER, 2003

## CONCLUSIONES

Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasólinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



 LESSER, 2003





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ciencias de la tierra

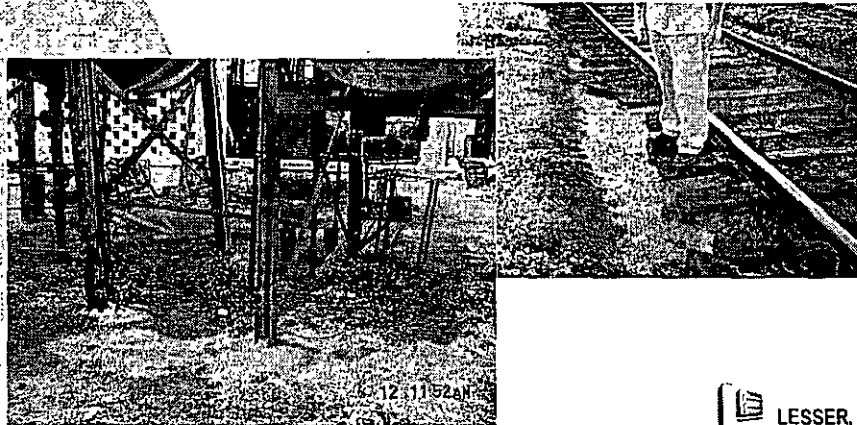
# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS;  
IDENTIFICACIÓN DE PRODUCTO  
LIBRE EN EL SUBSUELO**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería

CONTAMINACION POR HIDROCARBUROS;  
IDENTIFICACION DE PRODUCTO LIBRE  
EN EL SUBSUELO

3



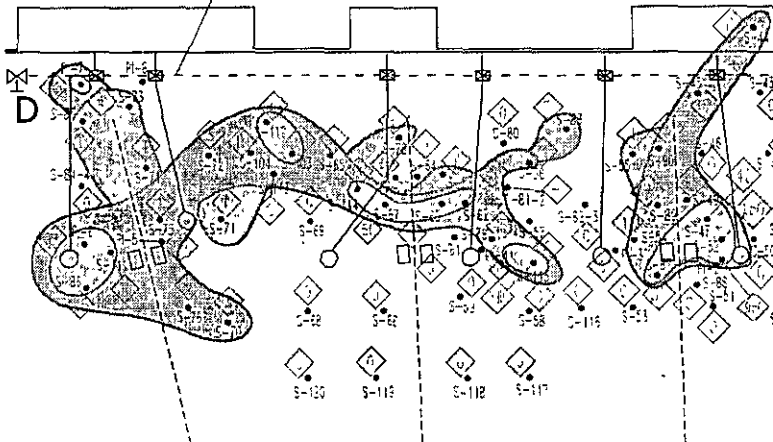
LESSER, 2003



DEEIMITACION DE LA MANCHA DE P

EST: QRO.

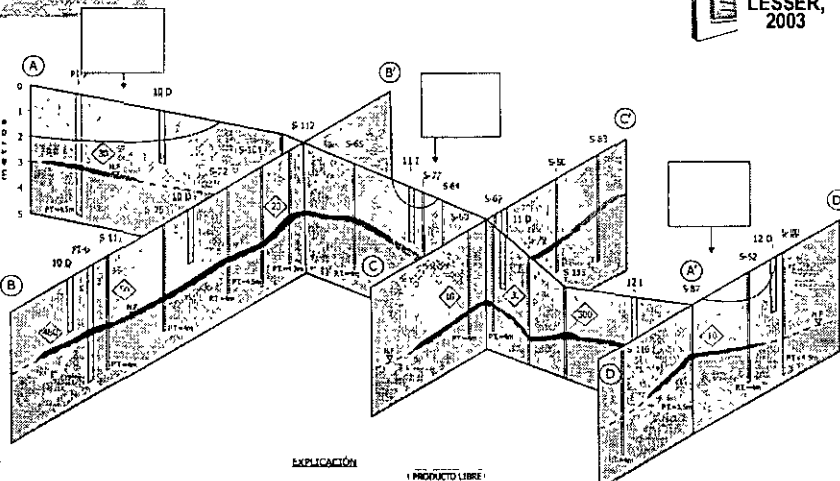
HIDRANTES Y  
DRENAJES

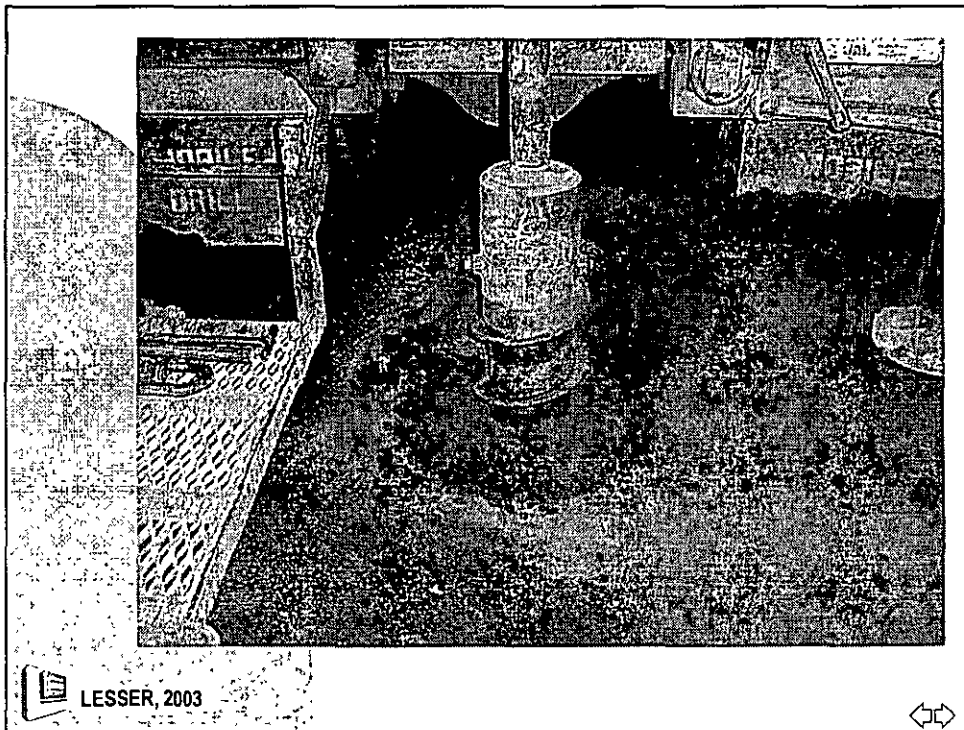


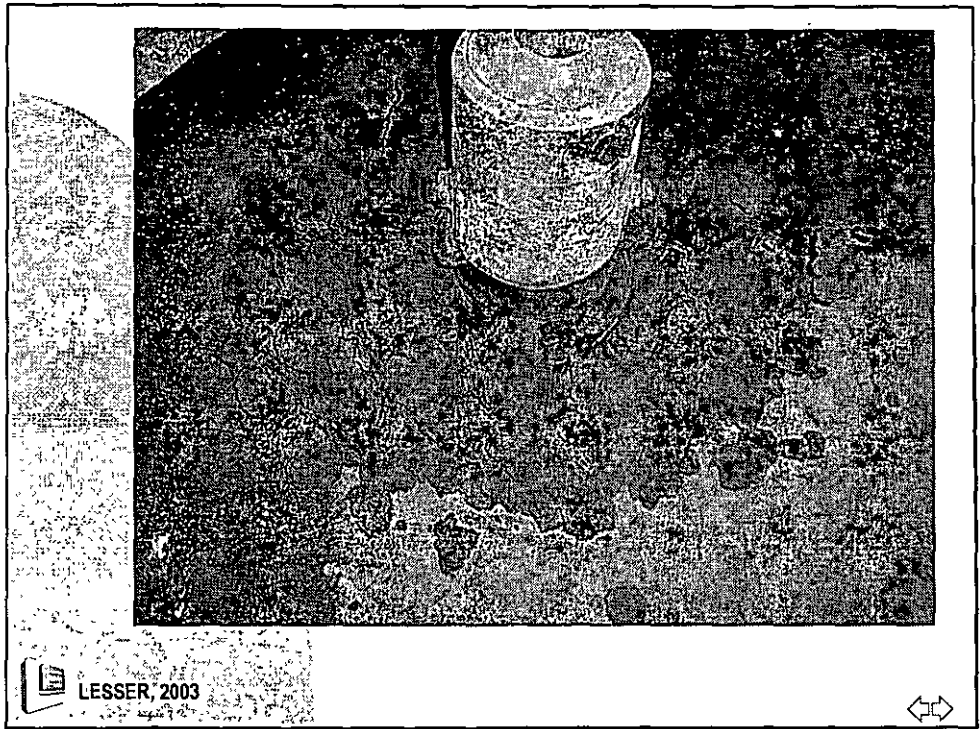
LESSER, 2003

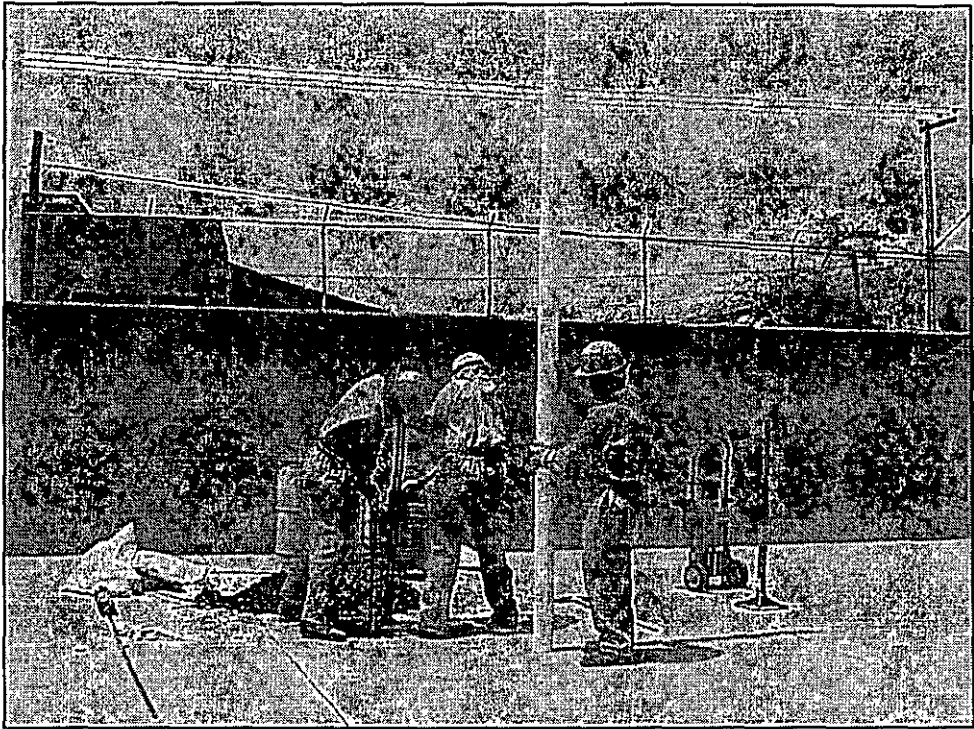
ISOMETRICO MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE  
VOLATILES Y PRODUCTO LIBRE EN EL SUBSUELO

LESSER,  
2003



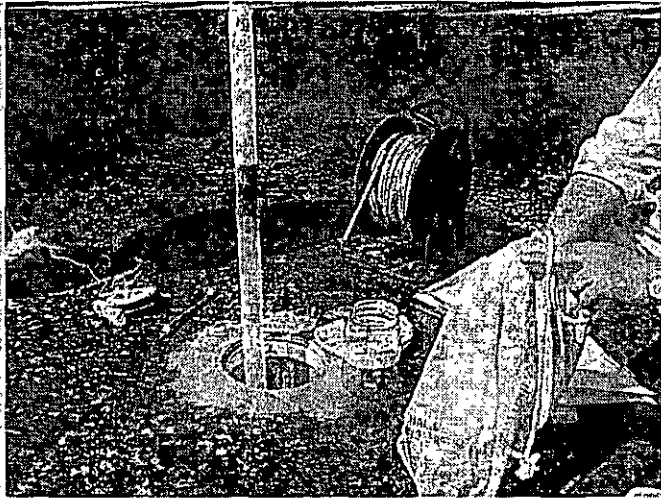








RESULTADOS DE LAS MEDICIONES



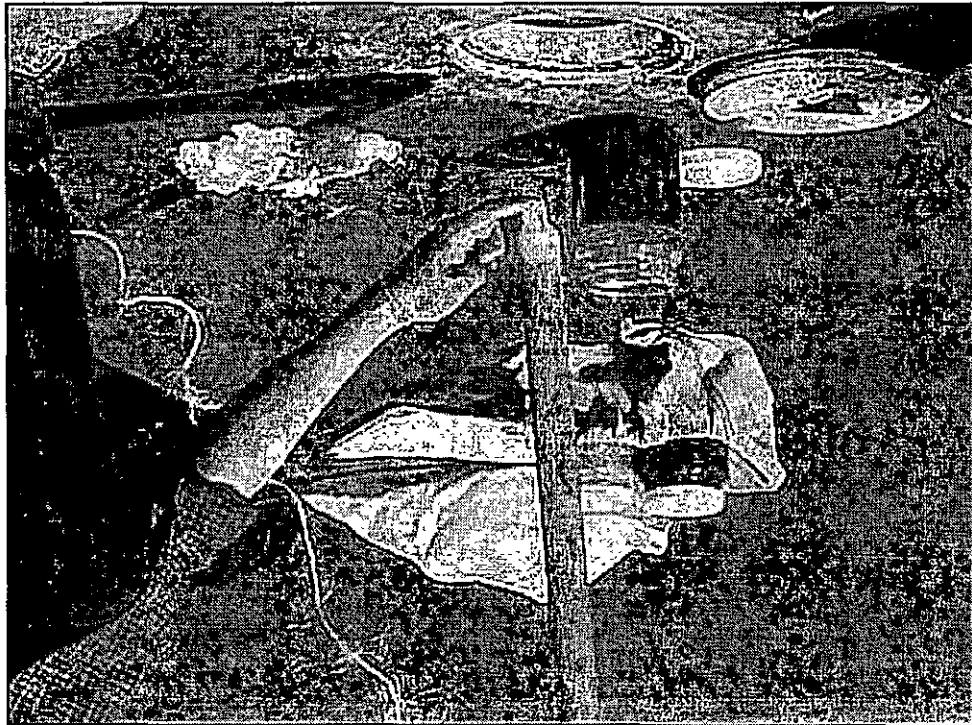
LESSER, 2003



LESSER, 2003



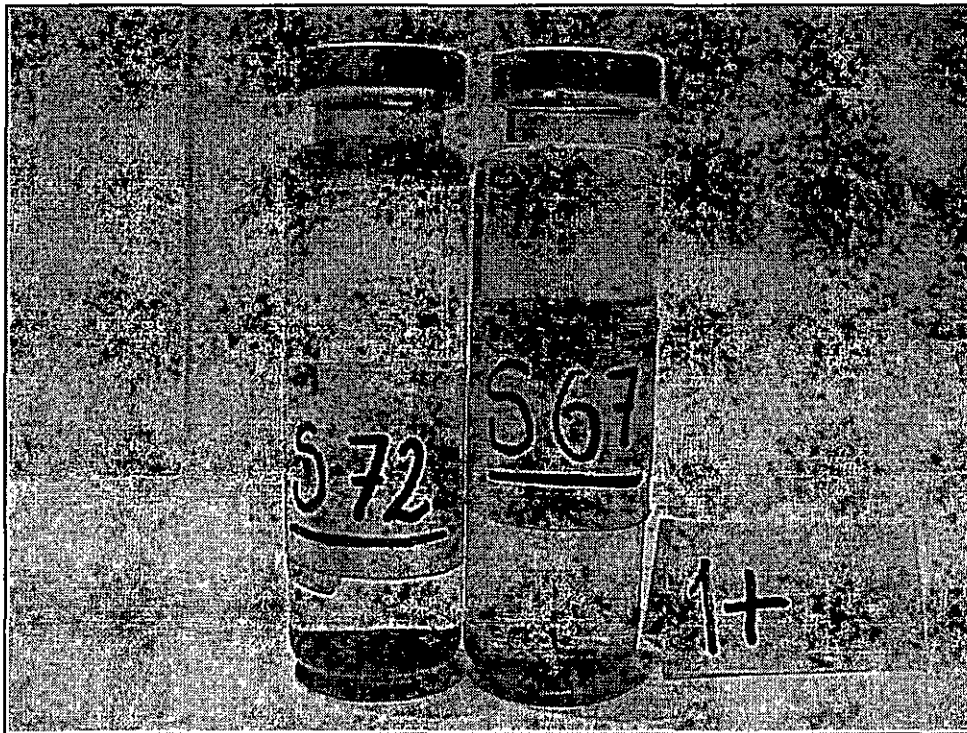
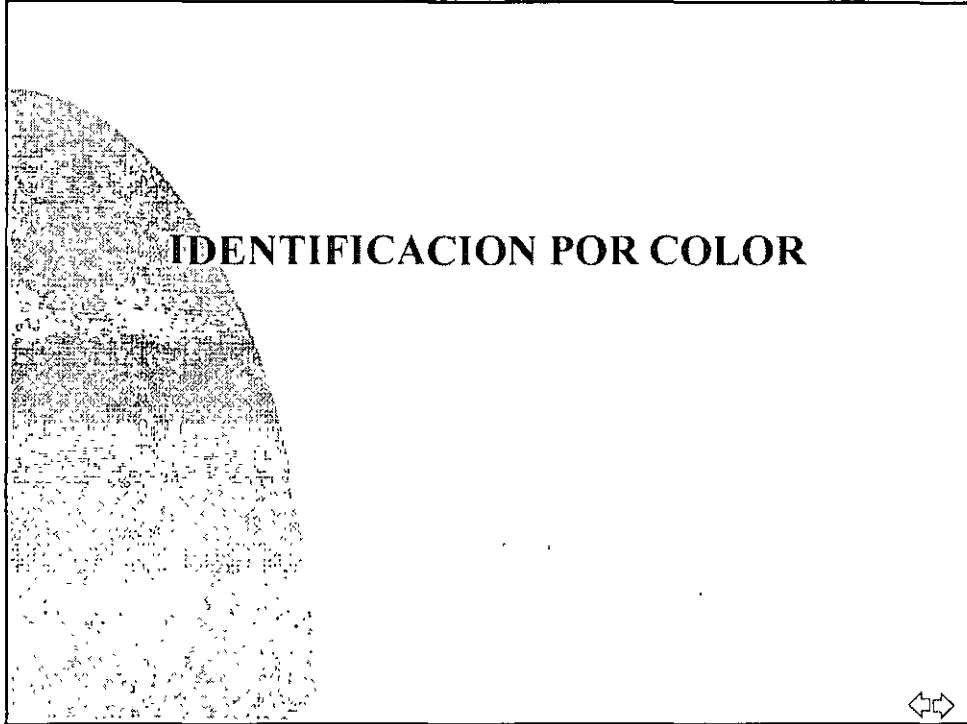




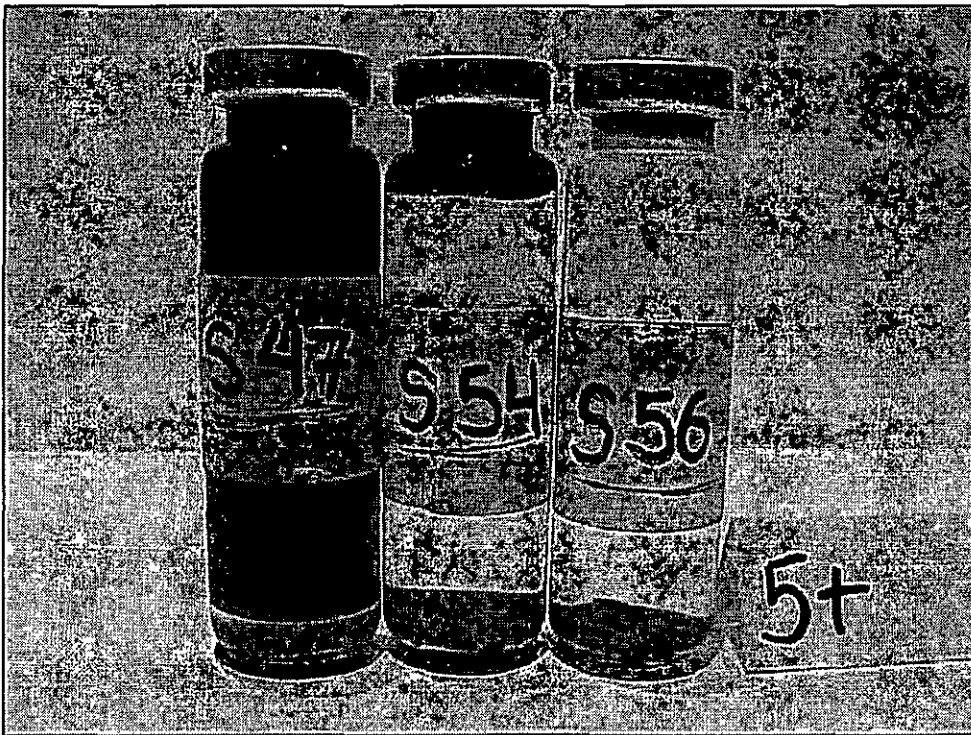








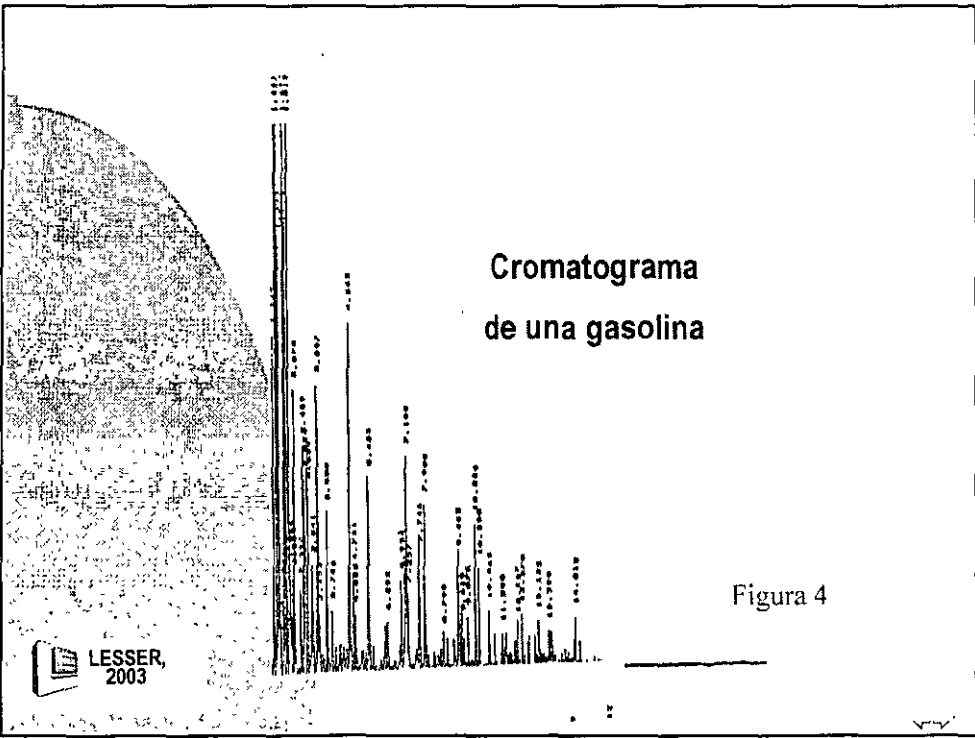

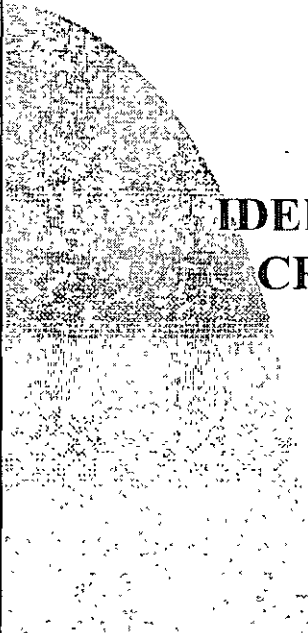


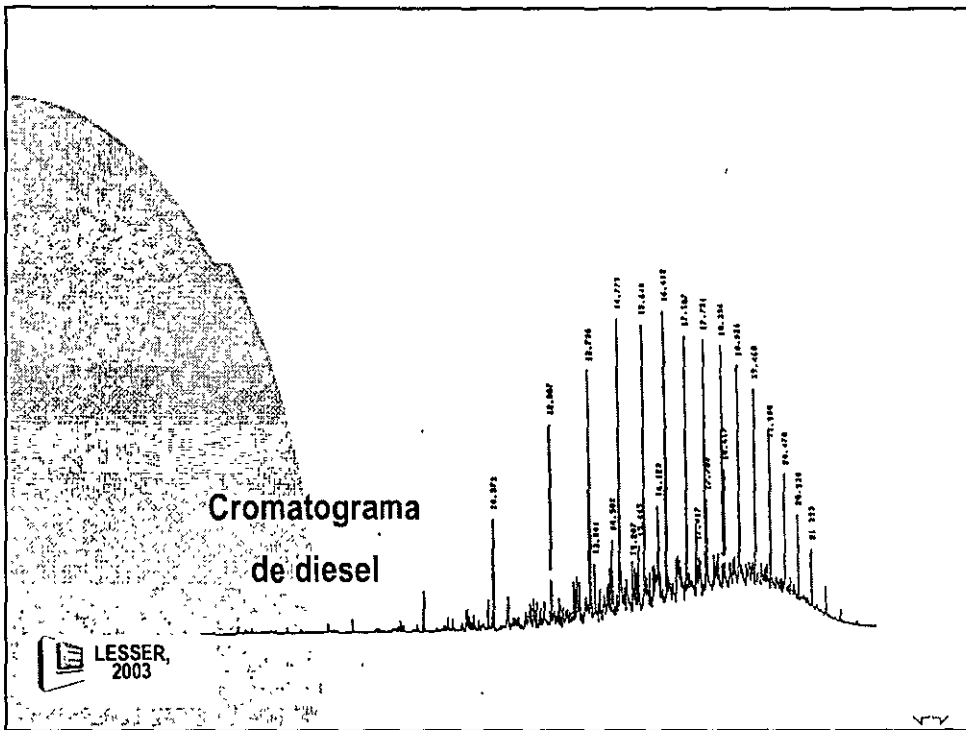


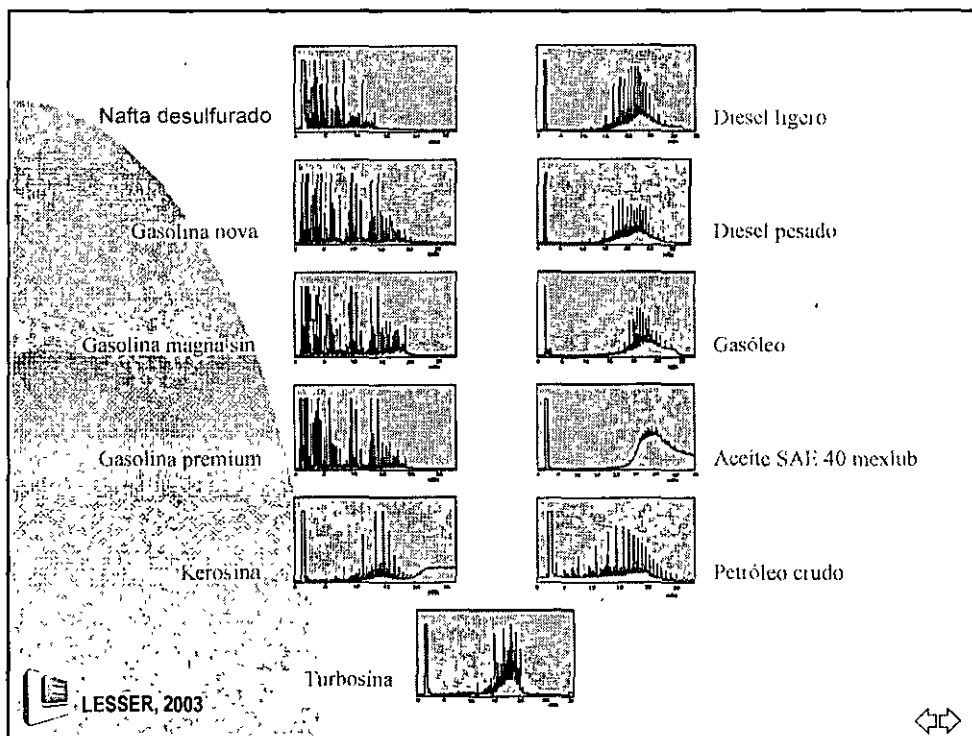
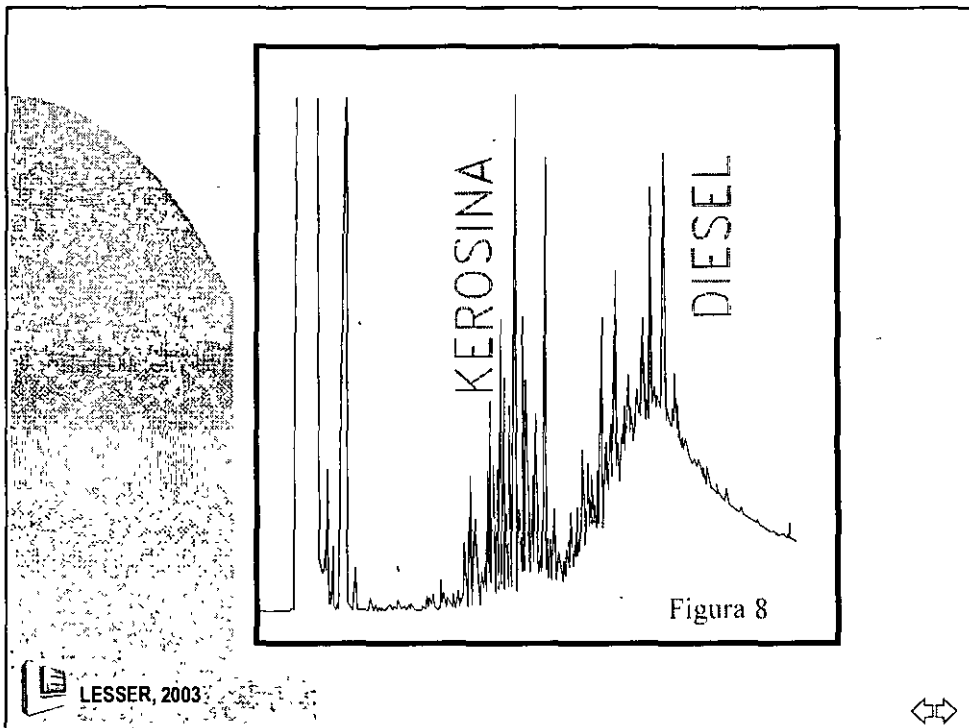




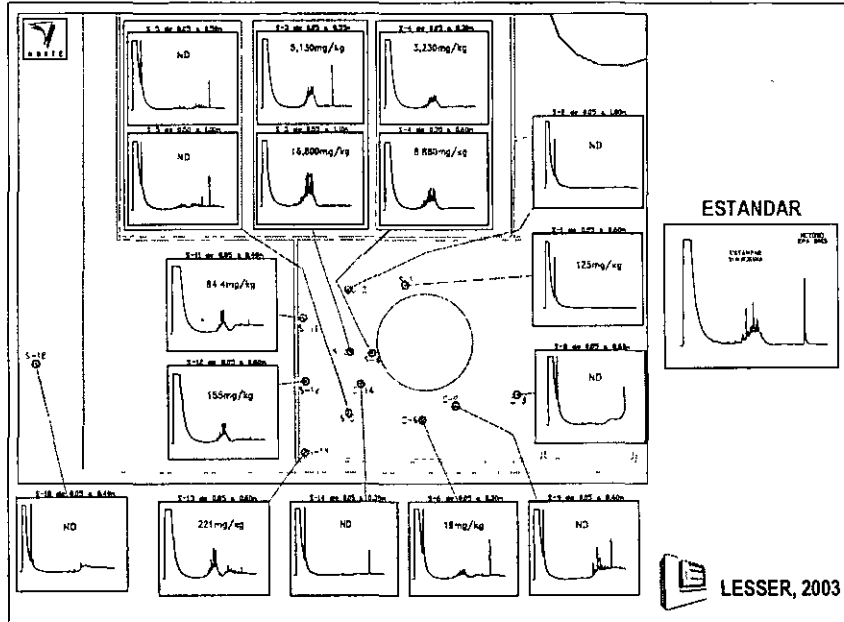
# IDENTIFICACION POR CROMATOGRAFIA



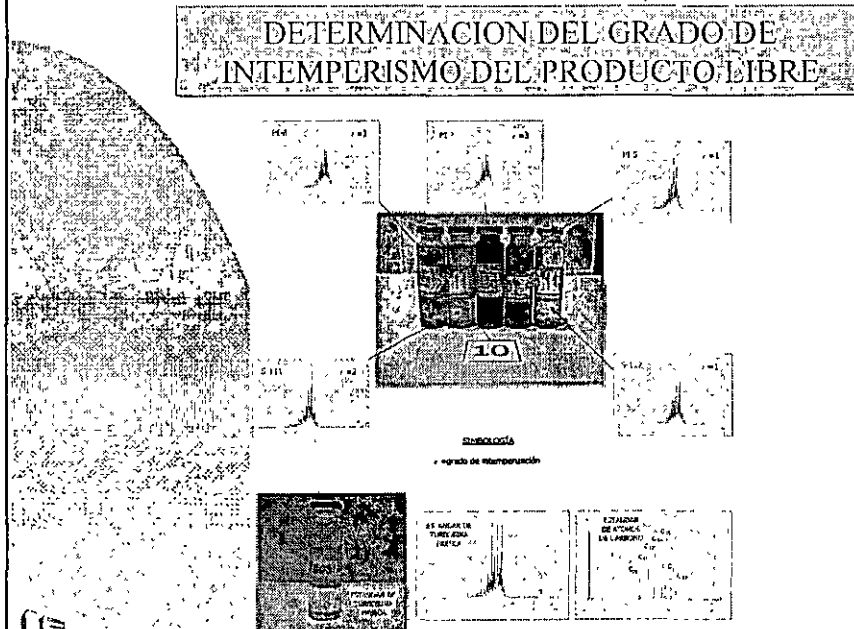


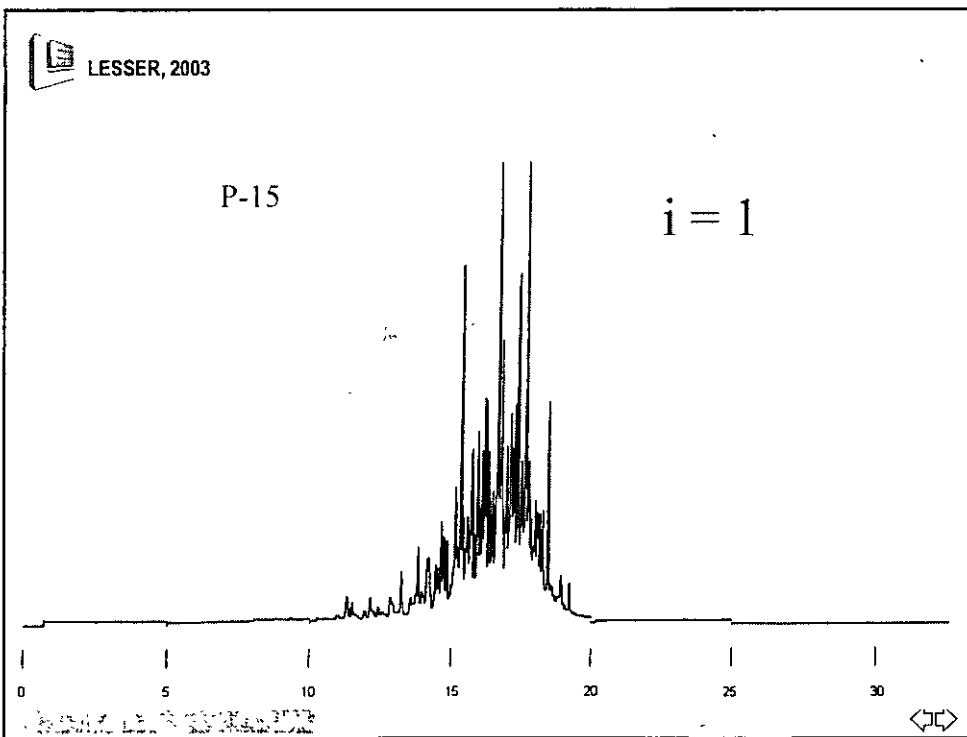
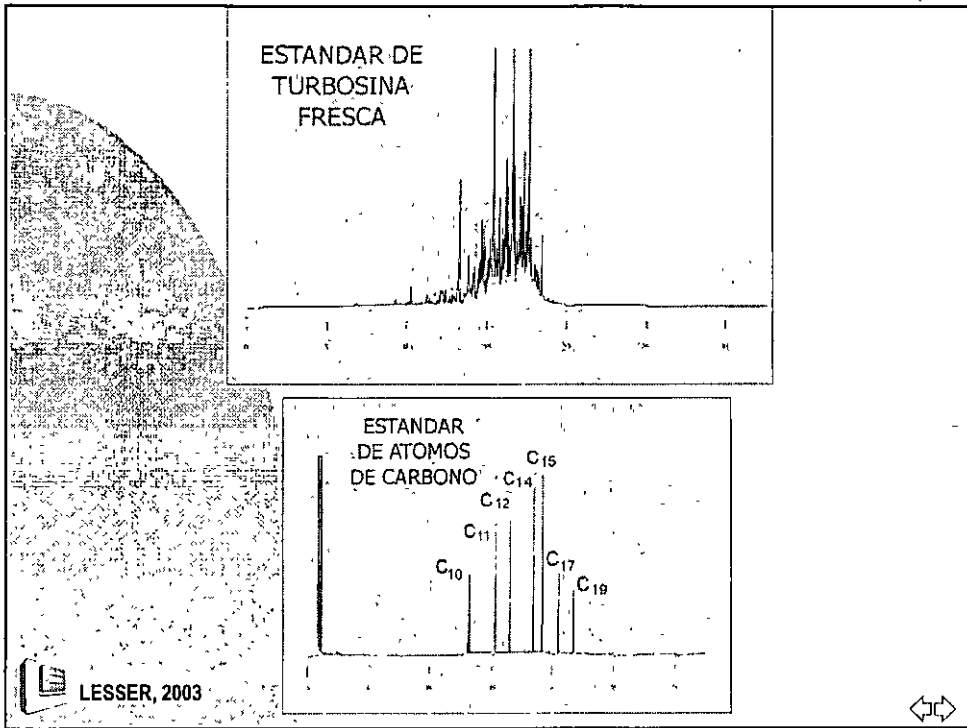


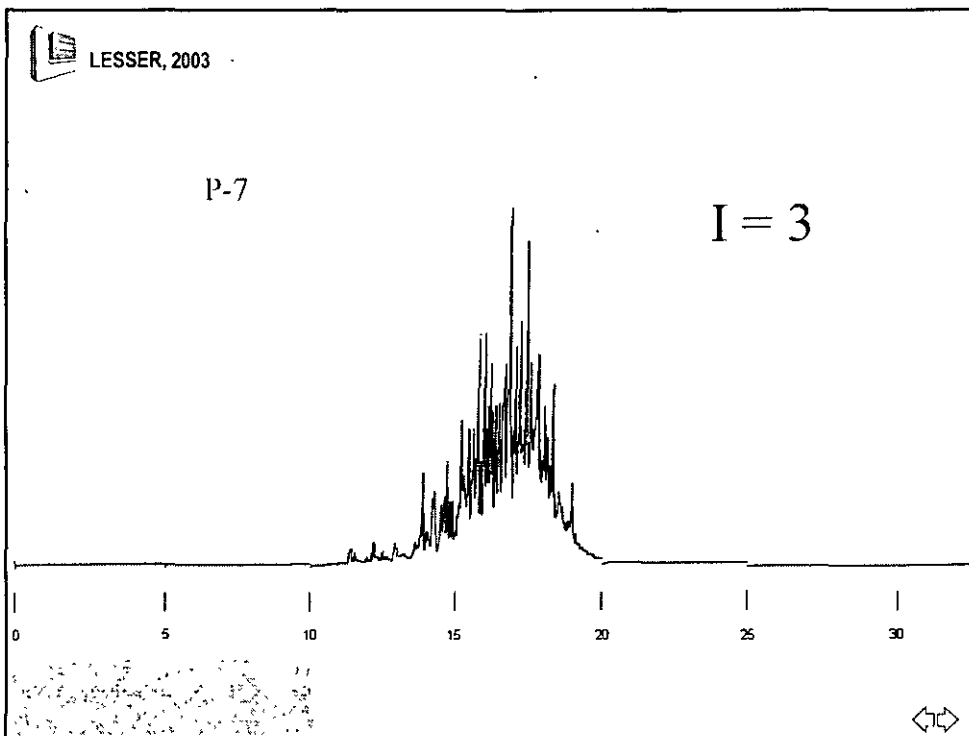
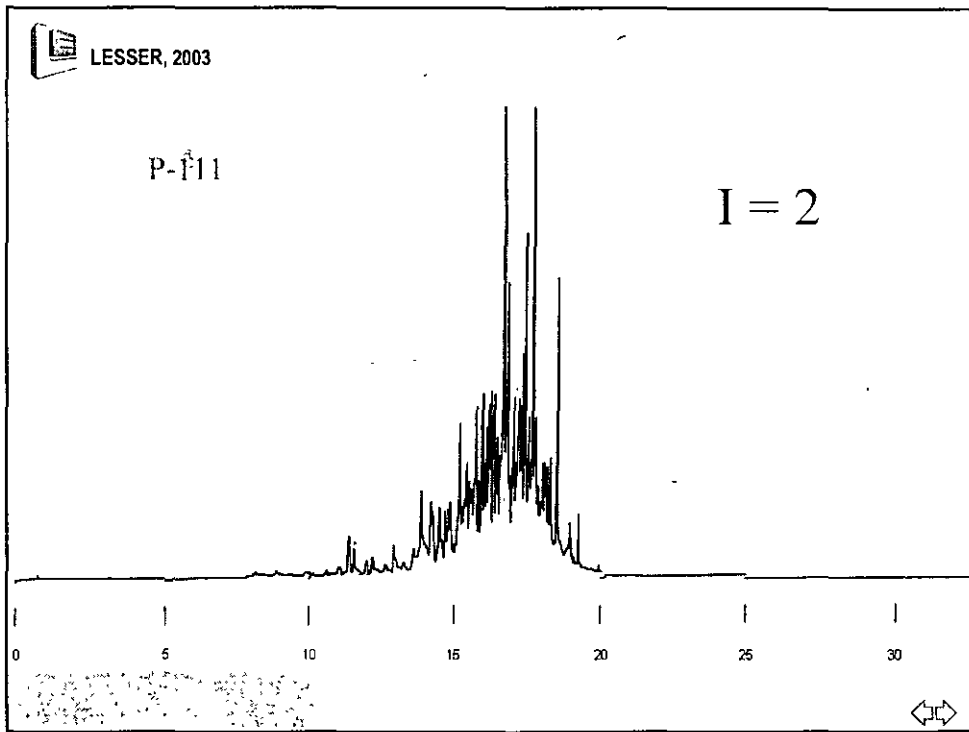
### CROMATOGRAMAS DE TURBOSINA EN SUELO (8015)

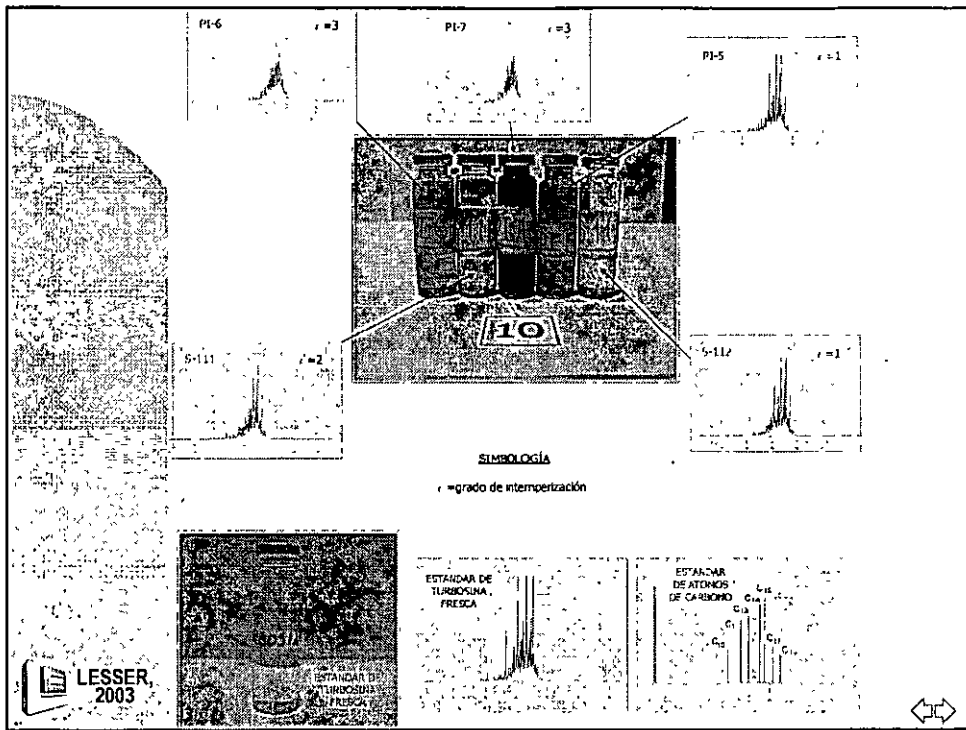


### DETERMINACION DEL GRADO DE INTEMPERISMO DEL PRODUCTO LIBRE









## CONCLUSIONES

El producto libre puede ser clasificado mediante cromatografía.

Se puede deducir su grado de intemperismo.

En este trabajo, la clasificación de producto libre por color y análisis cromatográfico, permitió determinar que:

El color que adquieren las muestras es un indicativo del tiempo que el combustible ha permanecido en el subsuelo, pero no es regla general.

Otro factor que influye en el color, es la facilidad con que la materia orgánica de las arcillas libera compuestos pigmentados.



LESSER, 2003



LESSER, 2003







**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



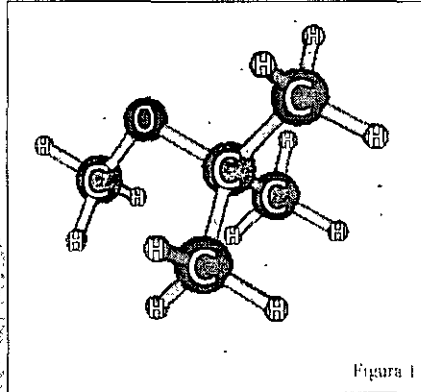
...: Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
M T B E  
(METILTERBUTILETER)**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería

# MTBE (METILTERBUTILETER)



Asociación Geohidrológica Mexicana  
Torreón, Coah.      Noviembre 2001

Por.  
ING. JUAN MANUEL LESSER I.  
DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ  
M. EN C. LUIS ERNESTO LESSER C.

## JUSTIFICACION

- El MTBE forma parte de las gasolinas
- Contamina rapidamente los acuíferos

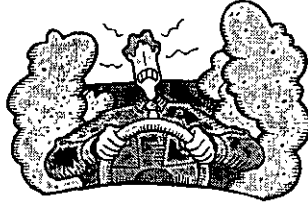


**MTBE**  
( Metilterbutileter)

-ADITIVO UTILIZADO EN LAS NUEVAS  
GASOLINAS PARA EVITAR LA  
CONTAMINACION DEL AIRE

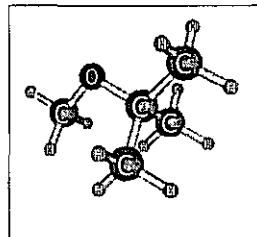
-DISMINUYE LA GENERACION DE  
CO<sub>2</sub> y OZONO

-GASOLINAS MAGNA y PREMIUM



**INICIO DE SU USO COMERCIAL**

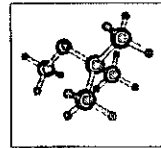
- En E.U. 1979
- En Mexico 1990



## CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

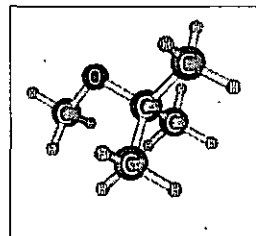
En 1990 empezó a ser notable y alarmante la presencia de MTBE en el agua subterránea de E.U.

Actualmente se da marcha atrás por problemas de contaminación



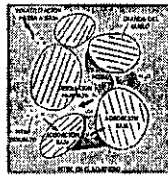
## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-ORIGEN.- Producto industrial, síntesis de metanol e isobutileno



## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-PROPORCION DE MTBE EN LA GASOLINA.- 10%

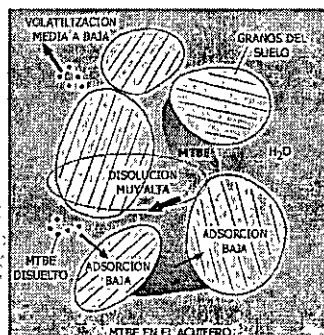


## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-SOLUBILIDAD, en agua entre 48,000 y 51,000mg/l

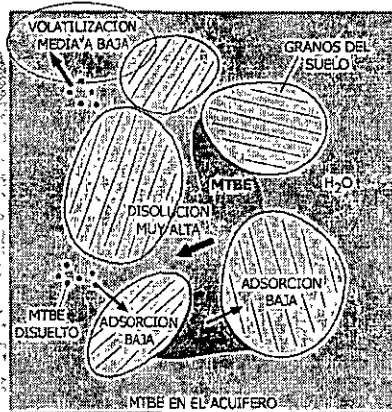
Es 30 veces mas soluble que el benceno

Es 100 veces mas soluble que el tolueno



## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-VOLATILIDAD.- Disuelto en el agua es 10 veces  
menos volatil que el benceno



## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-ADSORCION.- Muy baja capacidad

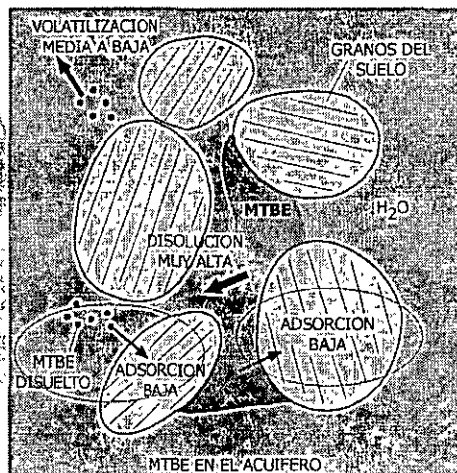
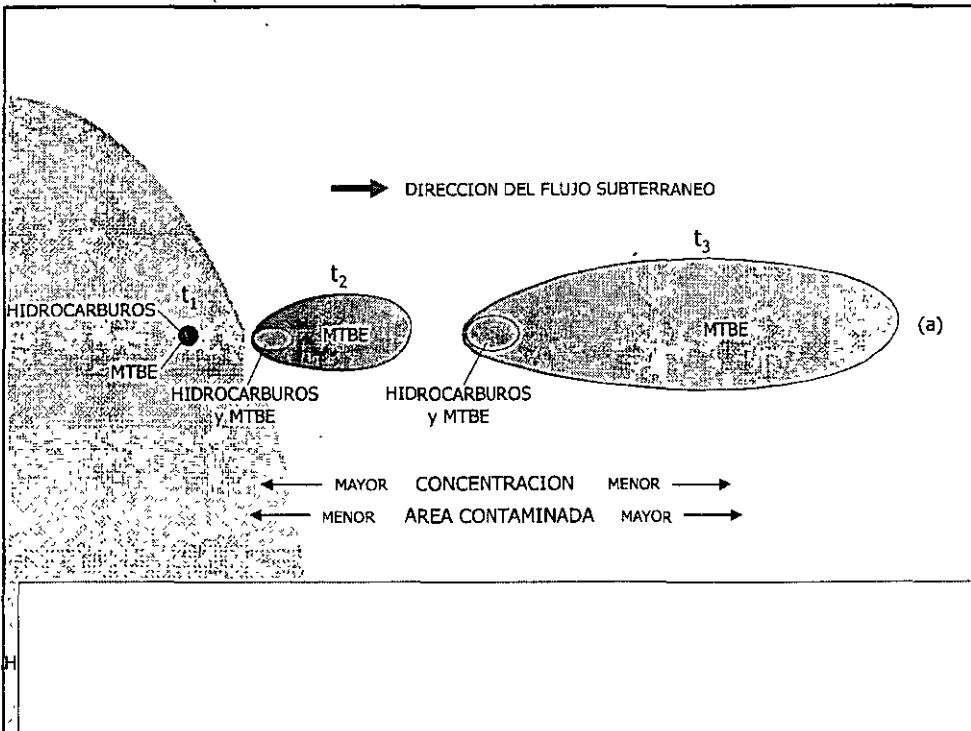
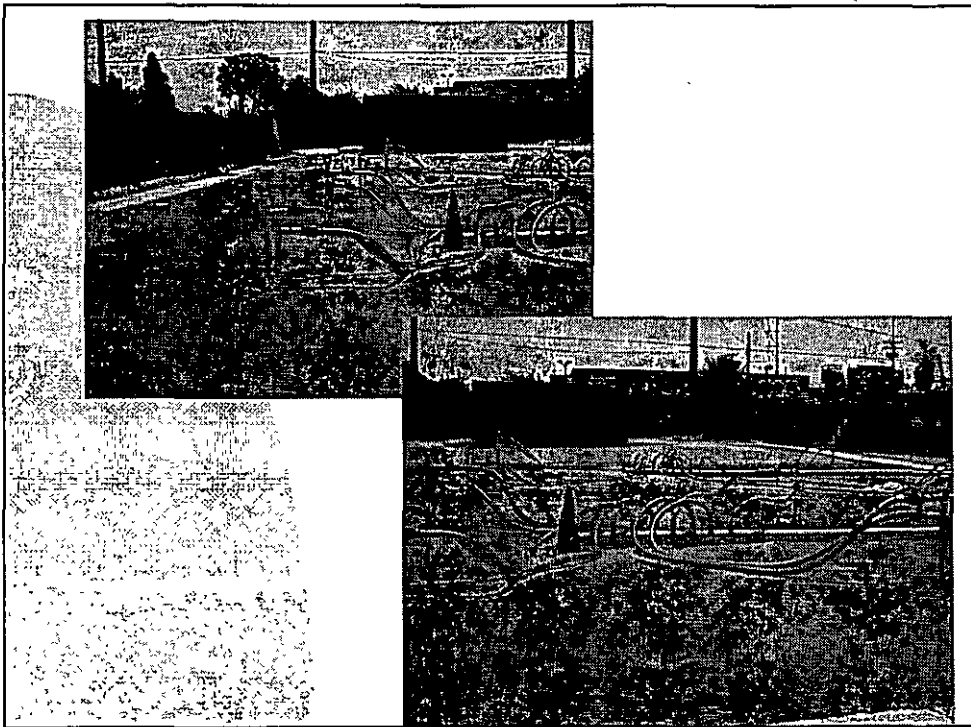
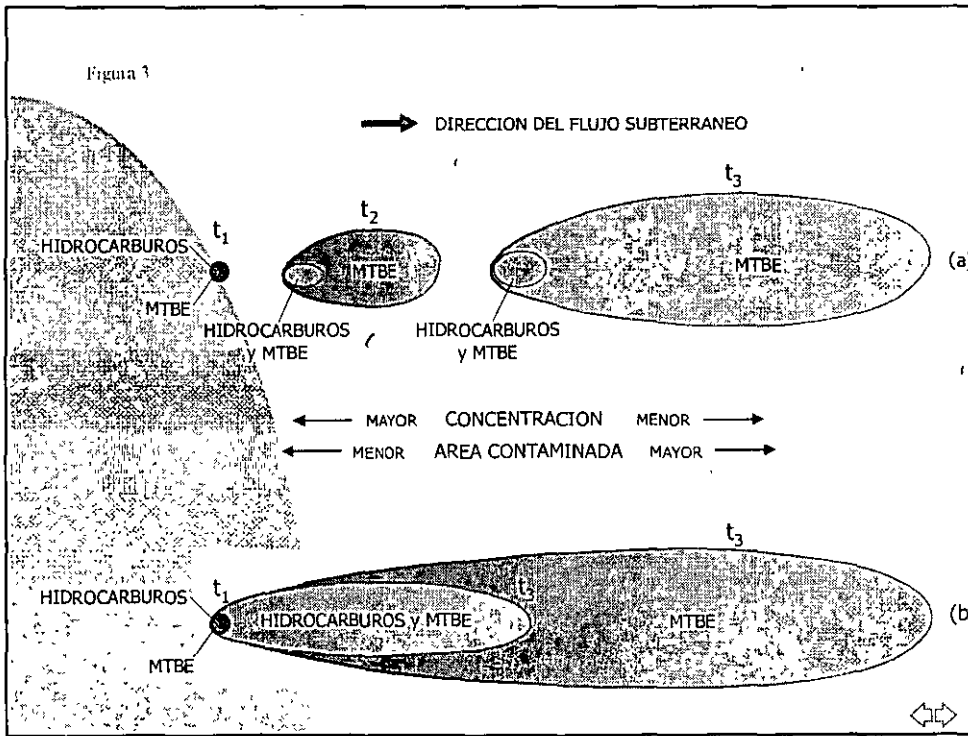
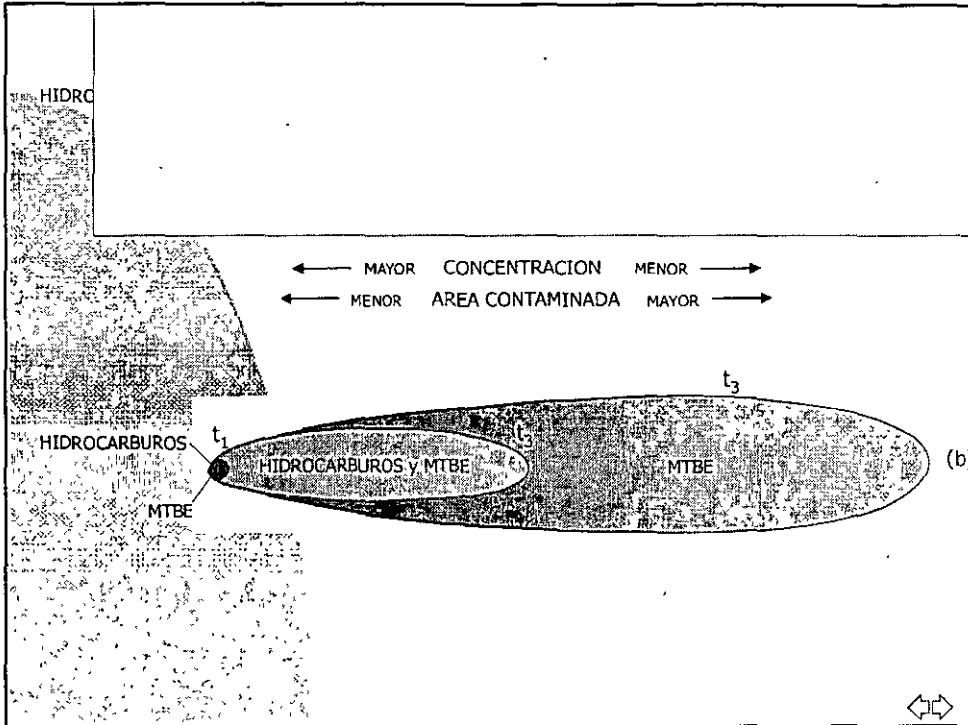


Figura 2

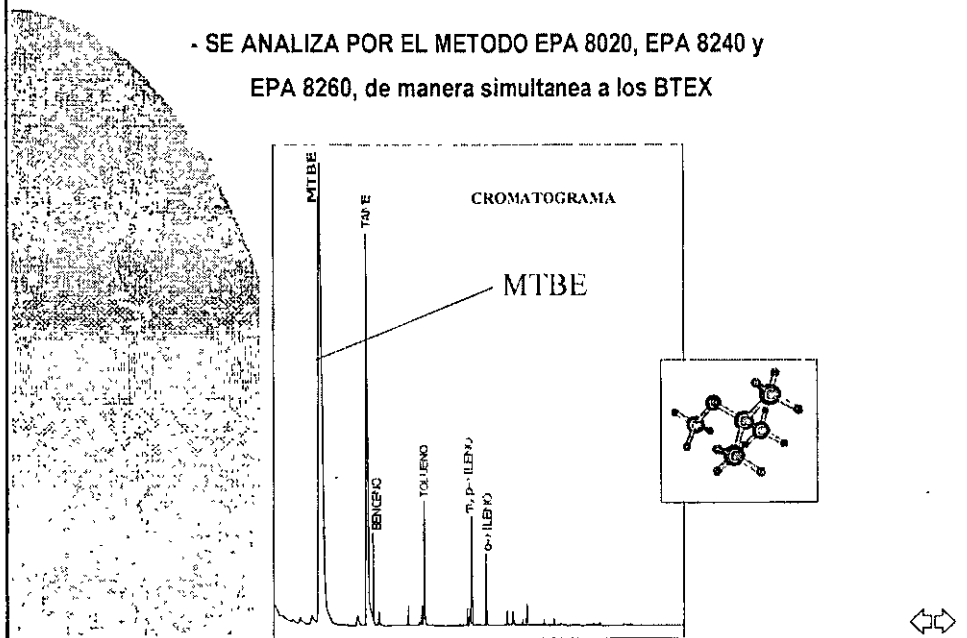






## DETERMINACIONES ANALITICAS

- SE ANALIZA POR EL METODO EPA 8020, EPA 8240 y  
EPA 8260, de manera simultanea a los BTEX

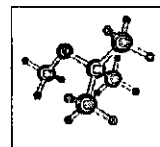


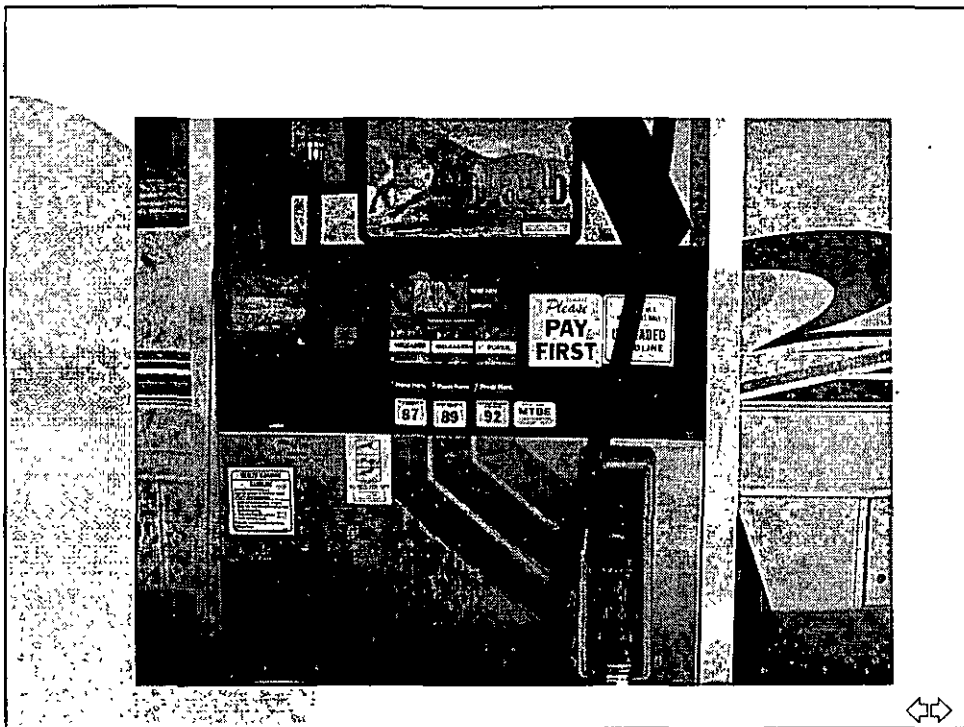
## LIMITES PERMISIBLES DE MTBE EN AGUA

-En 1997 el WSW de California recomendo entre  
0.020 y 0.040 mg/l para reducir el desagradable olor  
y sabor

-En el 2000 el CAAHEA fijo como limite 0.013 mg/l

-En 40 estados de E. U. varia el limite entre  
0.010 y 0.40mg/l





OCTANE RATING  
1/2 METHOD  
92

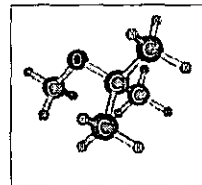
**CONTAINS  
MTBE**

THE STATE OF CALIFORNIA HAS  
DETERMINED THAT THE USE OF THIS  
CHEMICAL PRESENTS A SIGNIFICANT  
RISK TO THE ENVIRONMENT.

EL ESTADO DE CALIFORNIA HA DETERMINADO  
QUE EL USO DE ESTE QUIMICO  
PRESENTA RIESGO AL AMBIENTE

## TOXICIDAD Y RIESGO A LA SALUD DEL MTBE

- PRESENCIA DE OLOR Y SABOR DESAGRADABLES
- NO SE INCLUYE EN LA LISTA DE CANCERIGENOS DE LA USNTP, CP65C o la IARC
- SI SE INCLUYE COMO PROBABLE CANCERIGENO



## TECNICAS DE REMEDIACION

- BIOREMEDIACION.- 10 VECES MENOS EFICIENTE QUE PARA EL BENCENO

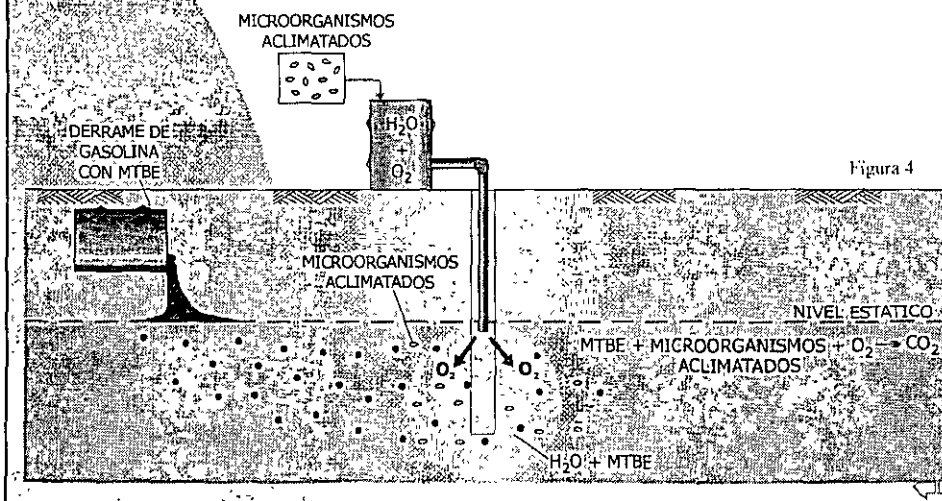


Figura 4



## TECNICAS DE REMEDIACION

- ADSORCION.- EFICIENCIA MEDIA A BAJA
- BARRERAS PERMEABLES DE TRATAMIENTO PASIVO
- PRODUCTOS ADSORBENTES U OXIDANTES.- EFICIENCIA MEDIA

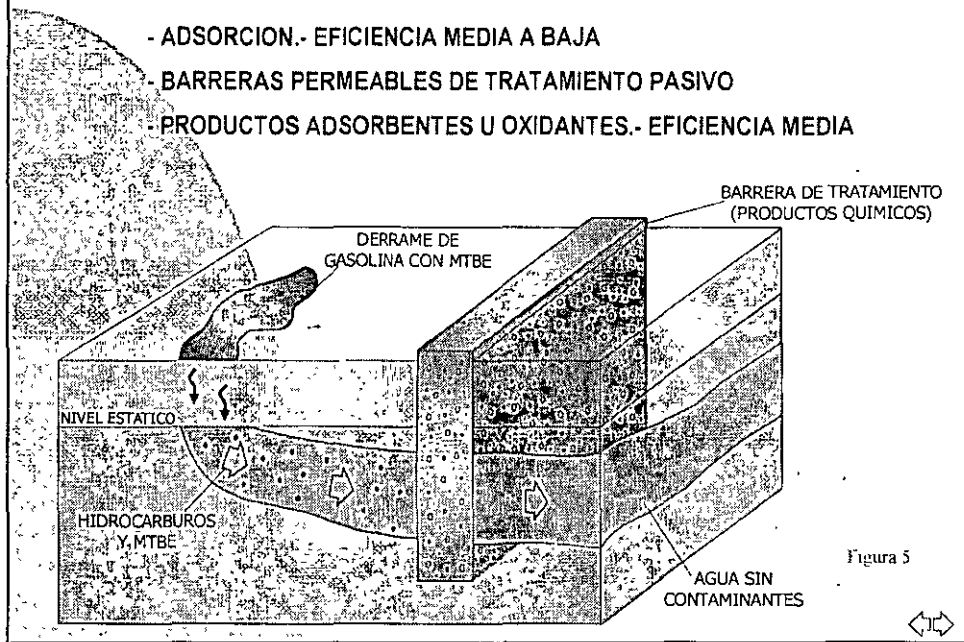


Figura 5



## TECNICAS DE REMEDIACION

- BOMBEO Y TRATAMIENTO EN SUPERFICIE.- EFICIENTE
- AEREACION.- POCO EFICIENTE

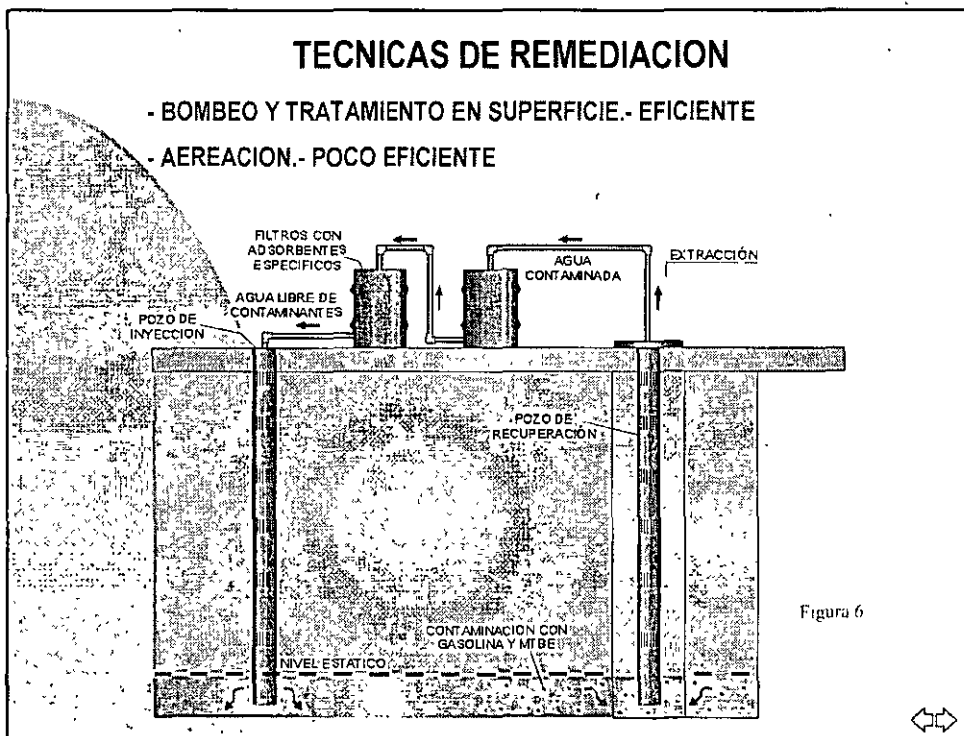
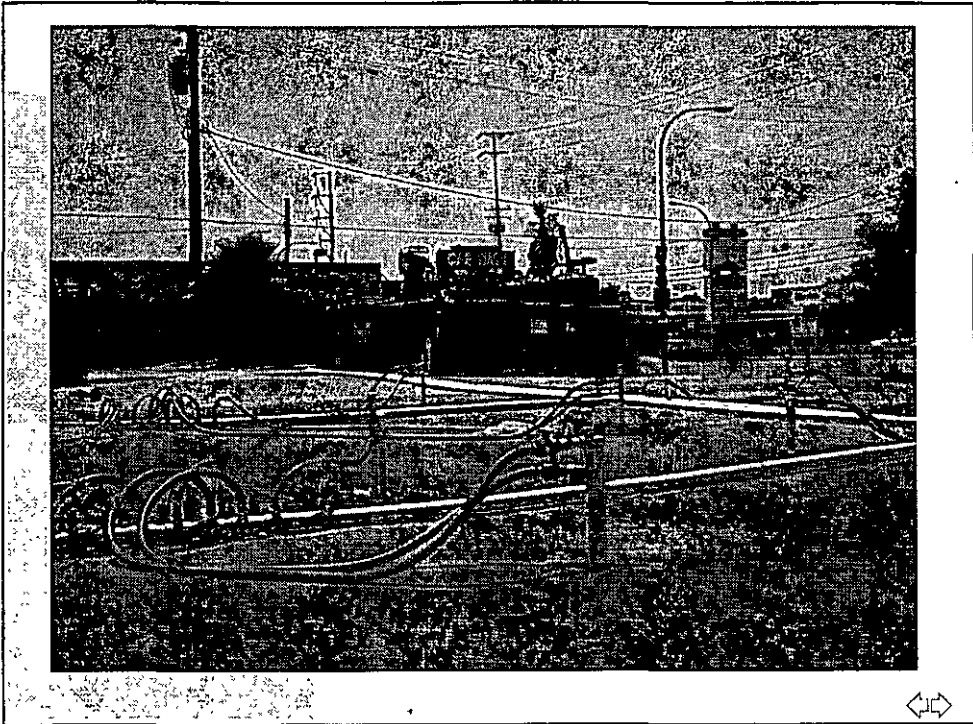


Figura 6



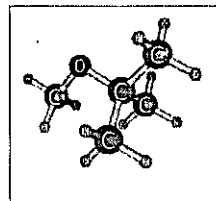


## SITUACION ACTUAL Y PERSPECTIVAS

EN MARZO 2001 USEPA RECOMENDO EVITAR EL USO  
DEL MTBE ( *COHS* )

SE ESTA PLANTEANDO SUSTITUIR EL MTBE POR OTROS  
OXIGENANTES (ETANOL, METANOL)

EN MEXICO, ?





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
CONTAMINANTES ORGANICOS:  
CARACTERÍSTICAS Y  
COMPORTAMIENTO EN EL  
AMBIENTE**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería

# **CONTAMINANTES ORGÁNICOS:**

## **Características y comportamiento en el ambiente**

- Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM

### **IDENTIFICACIÓN DEL ESCENARIO AFECTADO**

#### **SUELO SUPERFICIAL**

- TERRENO NATURAL
- LOSA DE CONCRETO O ASFALTO

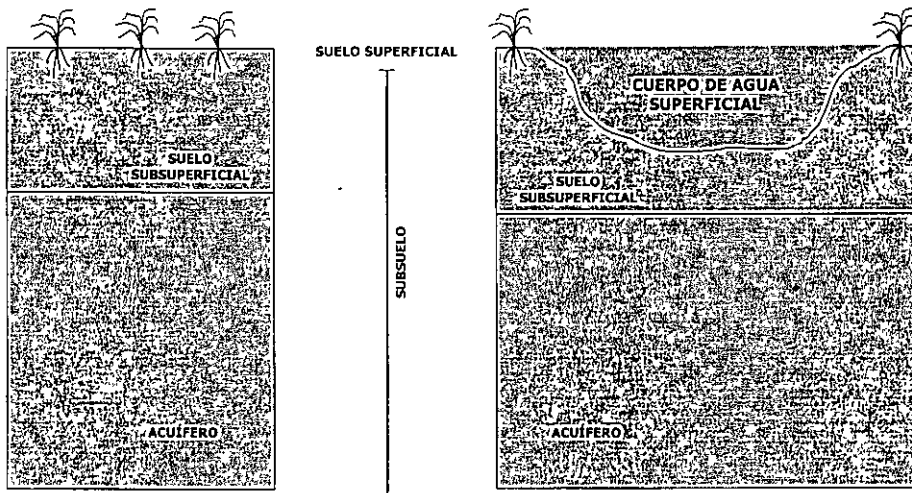
#### **SUBSUELO**

- ZONA VADOSA (no-saturada; suelo subsuperficial)
- ACUITARDO (acuifero no explotable)
- ACUÍFERO (agua de abastecimiento)

#### **CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL**

- PRESAS, LAGOS, RÍOS
- MANGLARES, PANTANOS
- ZONAS COSTERAS, MAR ABIERTO

## DIFERENTES ESCENARIOS DEL AMBIENTE



## HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUÍFEROS

### petróleo crudo

**combustibles destilados:** gasolina, gasnafta, gasolvente, turbosina, kerosina, diesel, gasóleo, combustóleo, aceites

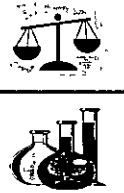
**desechos petroleros:** lodos aceitosos, lodos y recortes de perforación, lastres

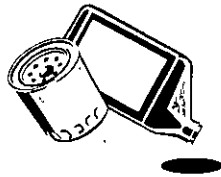
**disolventes:** tolueno, xilenos, arominas



**Características físicas de los contaminantes líquidos que determinan el escenario afectado:**

**Densidad: determina su posición con respecto al agua**

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$




**Viscosidad: determina su migración en el subsuelo**

**CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS INSOLUBLES EN AGUA CON BASE EN SU DENSIDAD (NAPLs: Non-Aqueous Phase Liquids)**

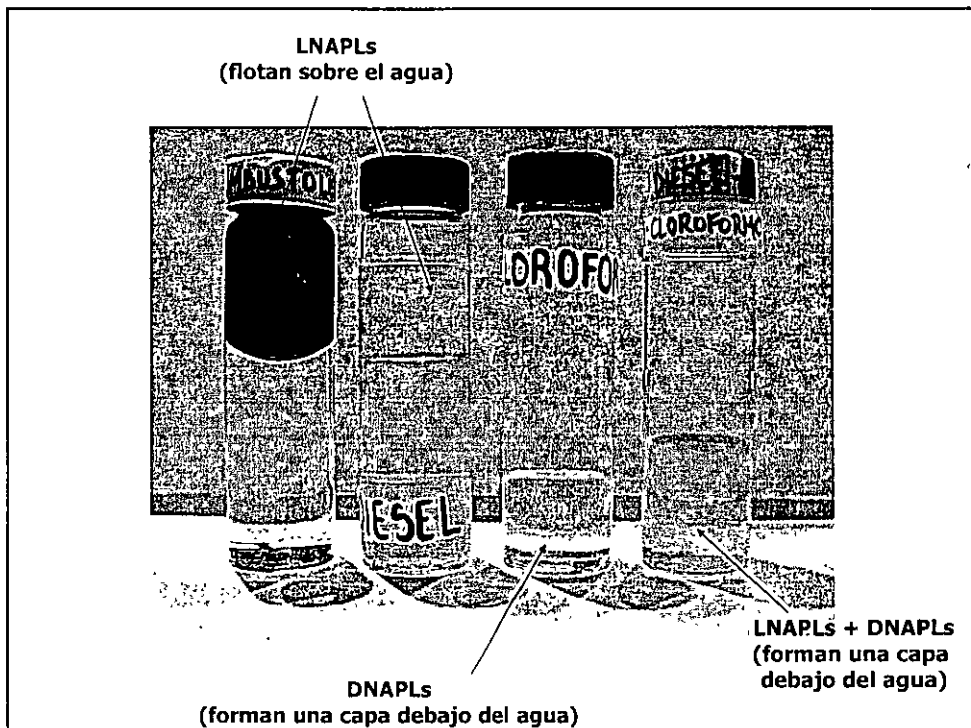
**LNAPLs: Más ligeros que el agua flotan sobre el agua**

petróleo crudo, combustóleo, aceites, diesel, gasolina, benceno, tolueno, xilenos

\*\*\*\*\*

**DNAPLs: Más densos que el agua forman una capa debajo del agua**

tetracloruro de carbono, cloroformo, cloruro de metileno, bifenilos policlorados, percloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE)



**PRODUCTOS VISCOSOS**  
(FRACCIÓN PESADA):

**CRUDO, COMBUSTÓLEO, ACEITES, DESECHOS PETROLEROS**

**PERMANECEN EN EL SUELO SUPERFICIAL**

\*\*\*\*\*

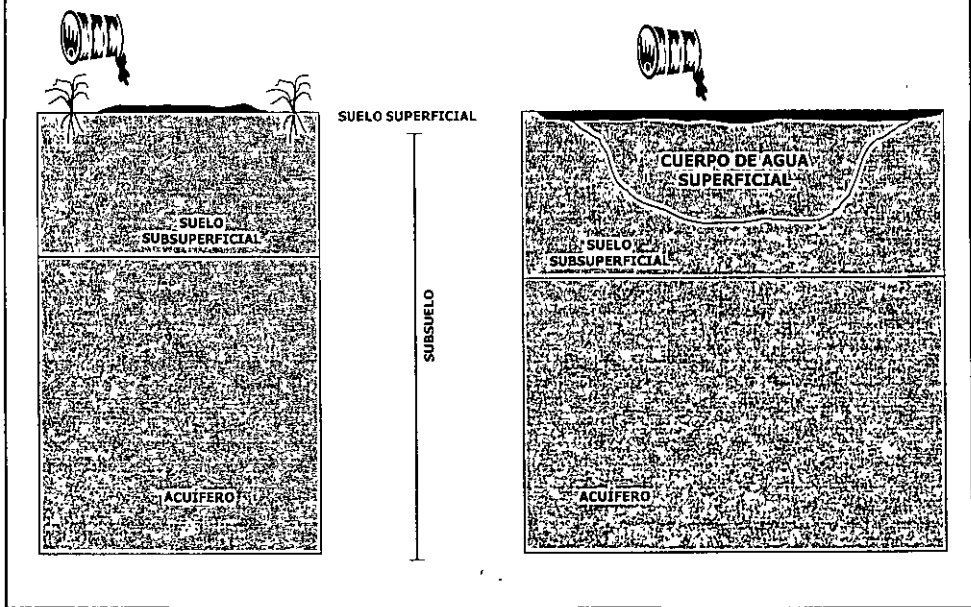
**PRODUCTOS FLUÍDOS**  
(FRACCIONES LIGERA E INTERMEDIA)

**COMBUSTIBLES: GASOLINA, GASAVIÓN, TURBOSINA,  
DIESEL, GASÓLEO**

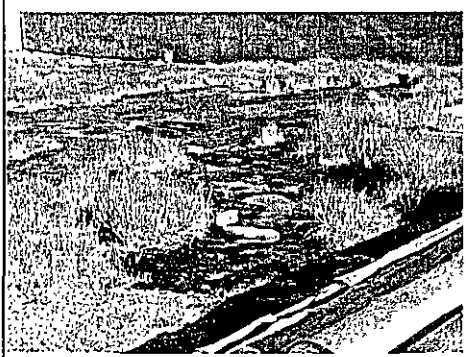
**DISOLVENTES: XILENOS, AROMINAS**

**MIGRAN CON FACILIDAD HACIA EL ACUÍFERO**

**ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE CRUDO, COMBUSTÓLEO,  
ACEITES, DESECHOS PETROLEROS**



**EJEMPLOS DE CONTAMINACIÓN DE SUELO SUPERFICIAL  
POR DERRAME DE PRODUCTOS PESADOS**



**COMBUSTÓLEO**

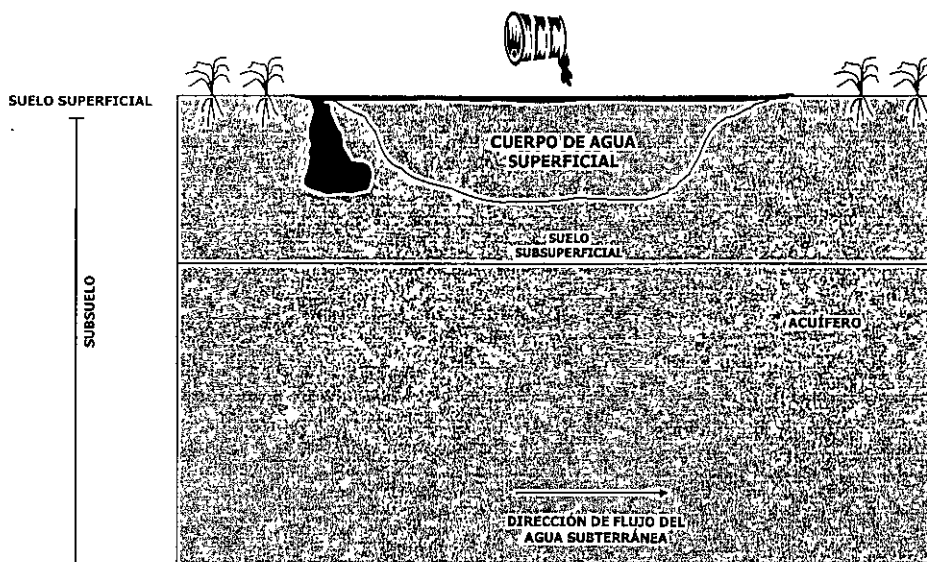
**DESECHOS PETROLEROS**



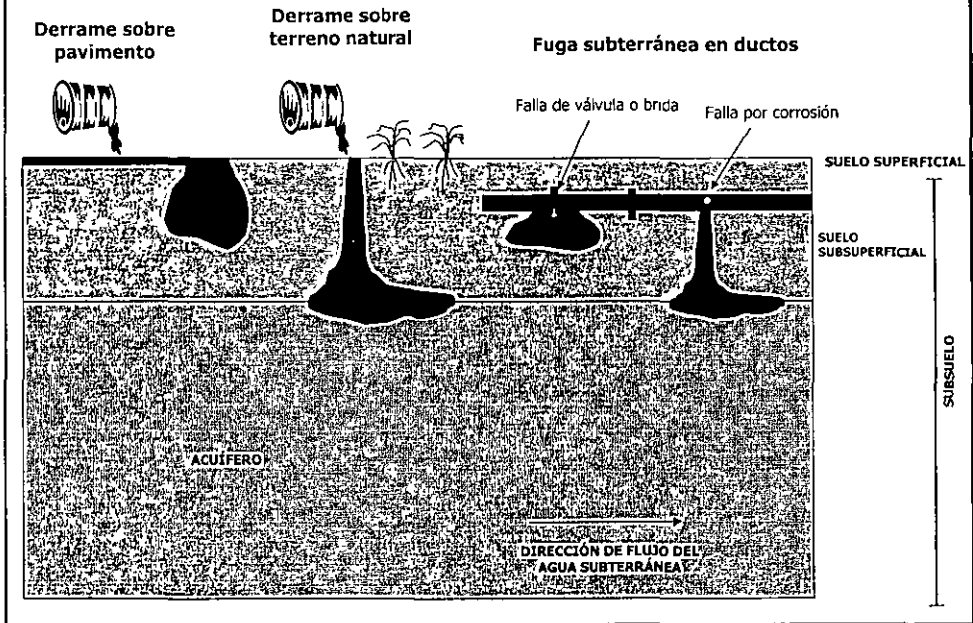
## PRINCIPALES EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS COMO CONTAMINANTES DEL SUELO SUPERFICIAL

- pérdida de varias características físicas y químicas
  - adsorción a las partículas del suelo
- pérdida de la fertilidad (suelos de uso agrícola)
  - falta de oxigenación
- muerte de la microflora y microfauna nativas
  - pérdida de su vocación natural

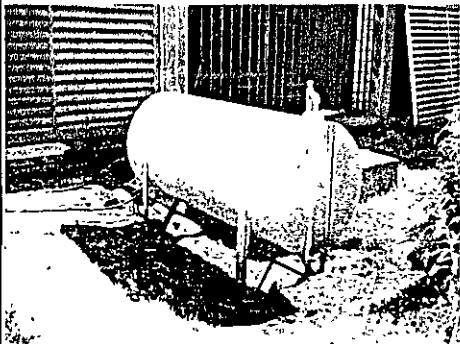
## ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE COMBUSTIBLES DESTILADOS EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES



### ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE COMBUSTIBLES DESTILADOS EN SUELO



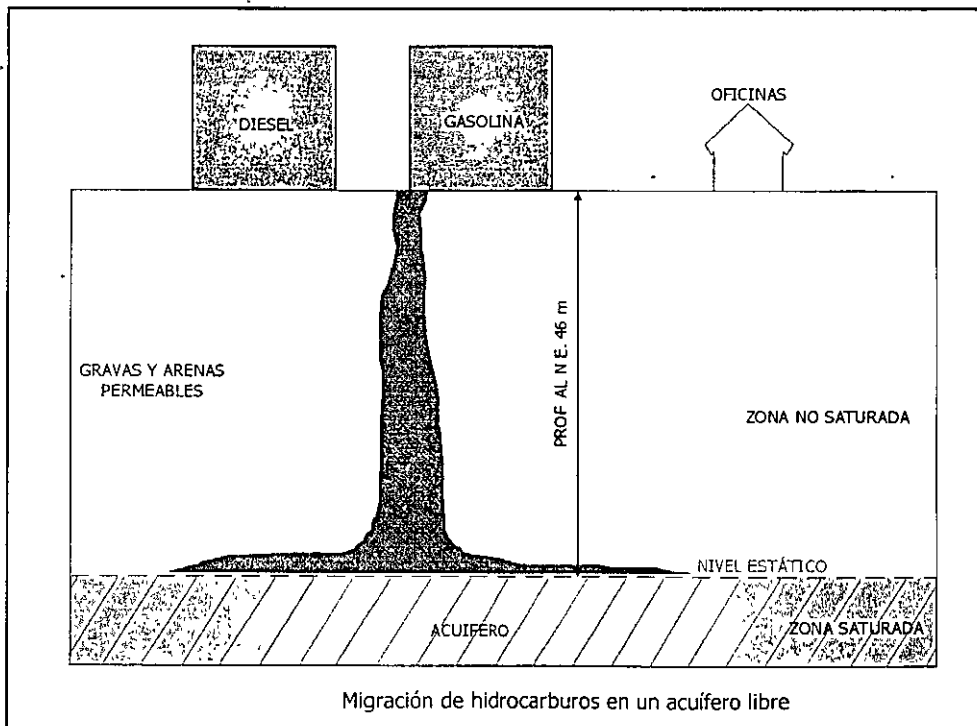
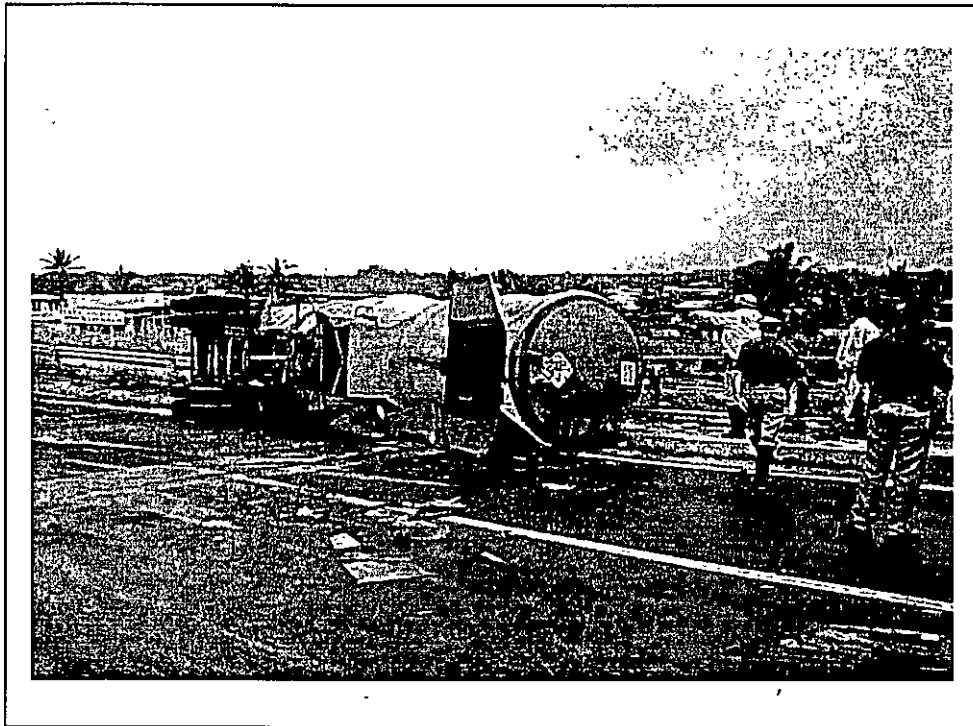
### EJEMPLOS DE CONTAMINACIÓN DE SUELO Y SUBSUELO POR DERRAME DE PRODUCTOS FLUIDOS

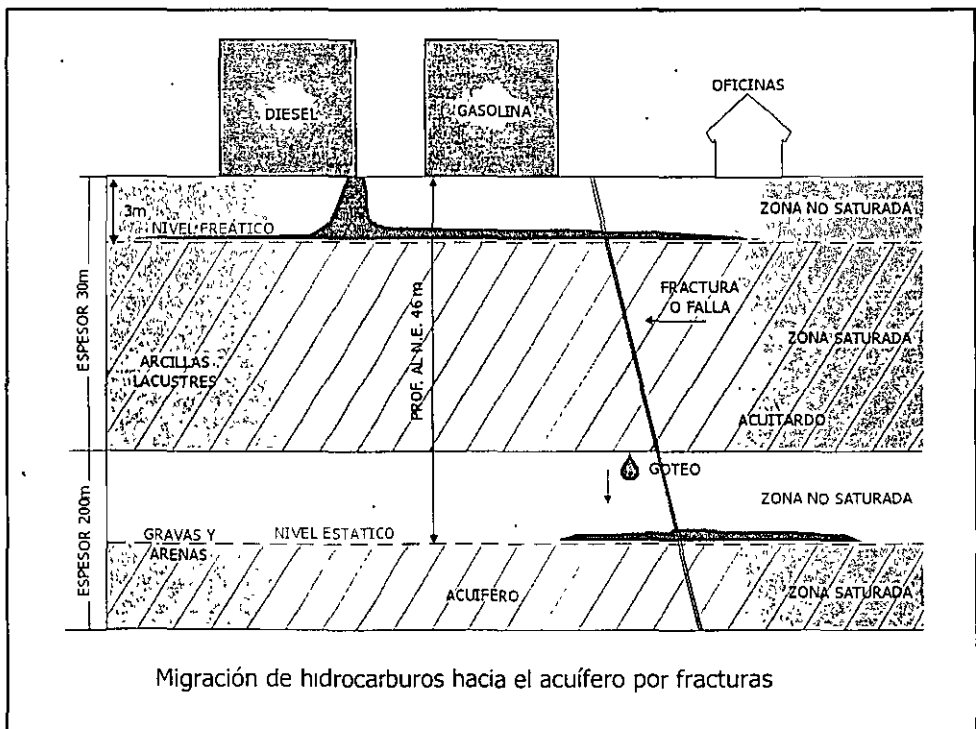
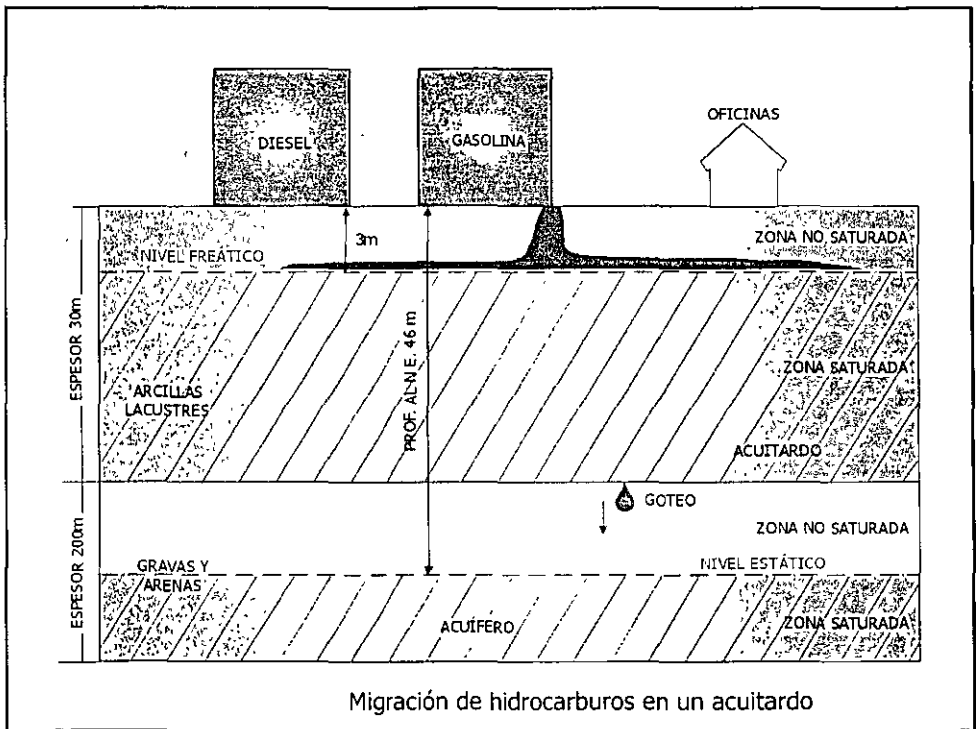


DIESEL EN SUELO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL



TURBOSINA EN EL SUBSUELO







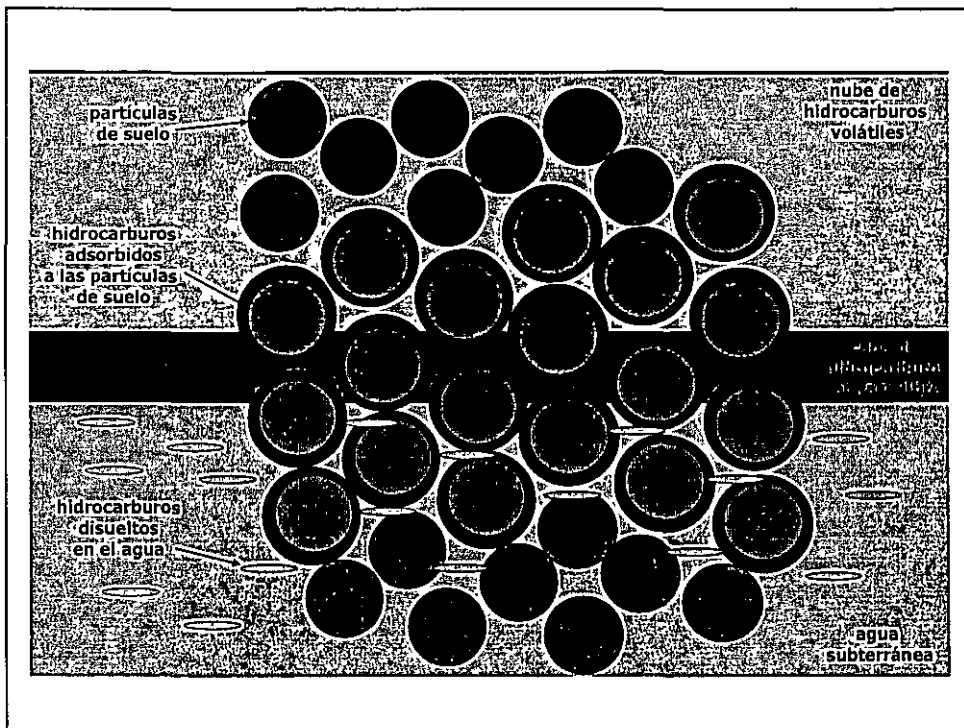
**FALLAS**

**FORMAS EN QUE SE PUEDEN ENCONTRAR LOS  
HIDROCARBUROS AL ENTRAR  
EN CONTACTO CON EL SUBSUELO**

---

- **adsorbidos a las partículas del suelo**  
**en fase gaseosa**
  - **disueltos en agua**  
**(intersticial y agua subterránea)**
  - **en fase libre flotando sobre el agua subterránea**
-





## CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL GEOLÓGICO

**CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (carbono orgánico)**  
ARCILLAS > LIMOS > ARENAS

**CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA**  
ARCILLAS > LIMOS > ARENAS

**CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE HIDROCARBUROS**  
ARCILLAS > LIMOS > ARENAS

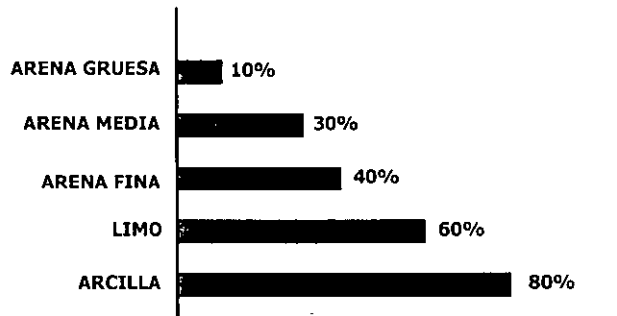
### CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS

TIPO DE SUELO	CARBONO ORGÁNICO (%)
Arcilla	70 - 90
Limo	8 - 28
Arena	< 1 - 28

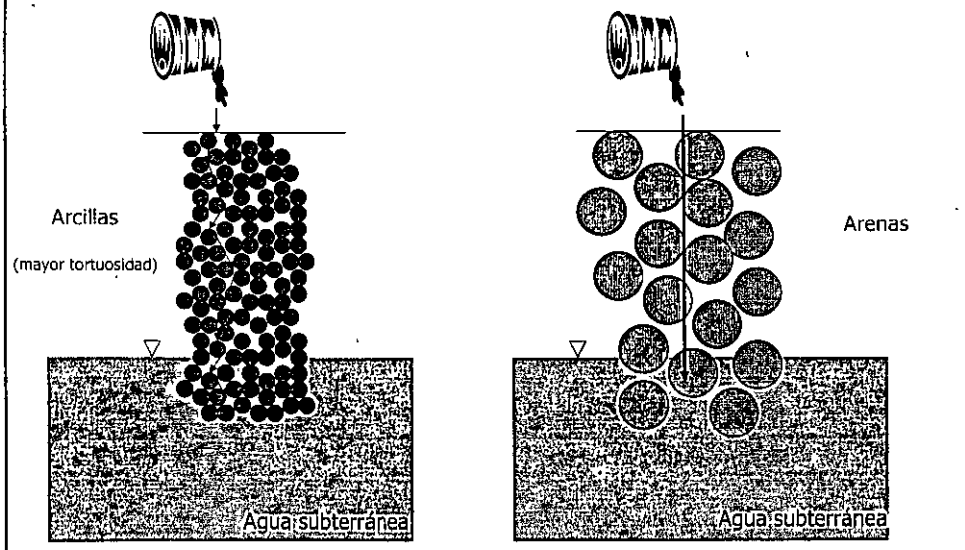
### CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES MATERIALES GEOLÓGICOS

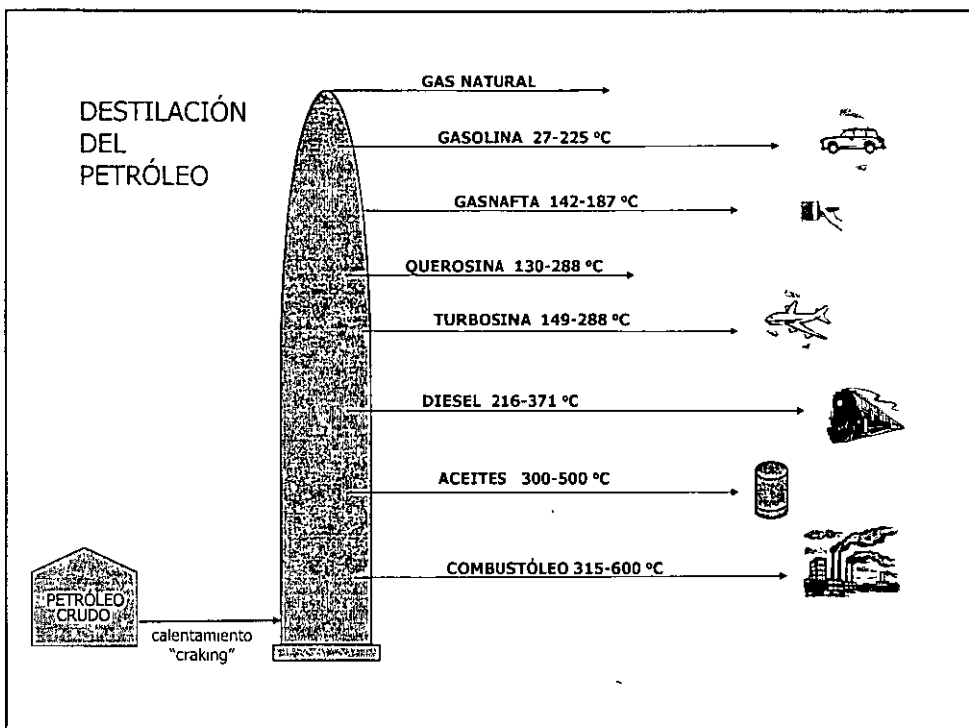
MATERIAL	TAMAÑO DE PARTÍCULA mm	POROSIDAD %	PERMEABILIDAD m/seg
Arcilla	< 0.002	45-55	$10^{-10}$
Limo	0.002 - 0.02	40-50	$10^{-8}$
Arena fina	0.02 - 0.2	30-35	$10^{-6}$
Arena media	0.2 - 2.0	35-40	$10^{-4}$
Grava	> 10	30-40	$10^{-2}$
Grava con arena	mezcla	20-35	$10^{-3}$
Caliza	roca	1-10	$10^{-1}$

## CAPACIDAD DE ADSORCIÓN O RETENCIÓN DE FLUIDOS



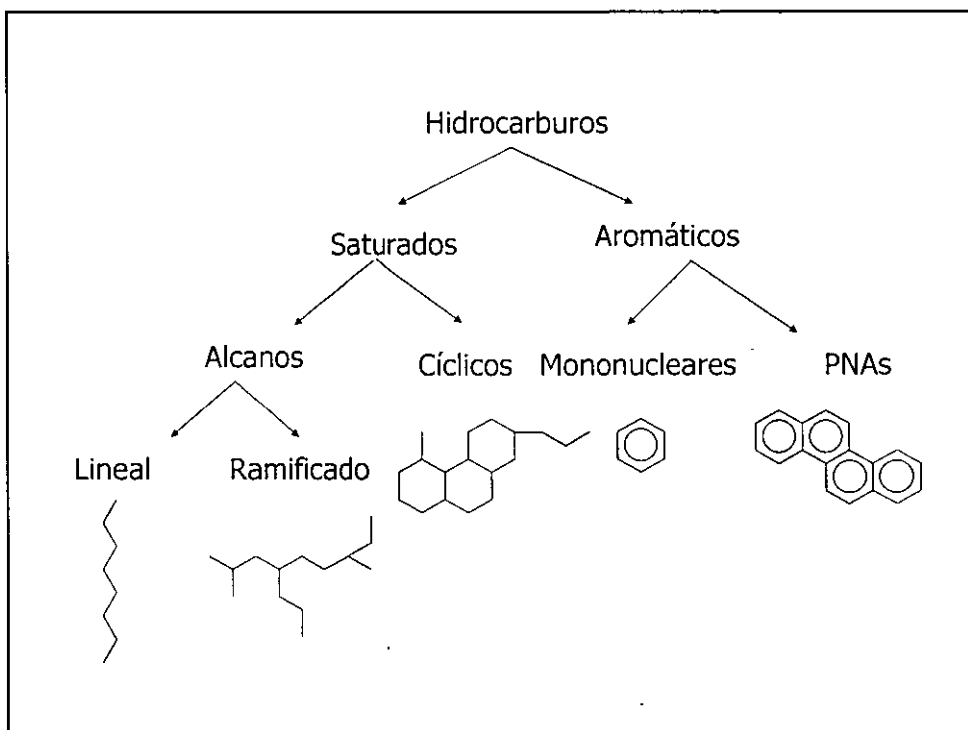
## INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO SOBRE EL TRANSPORTE Y DESTINO DE LOS HIDROCARBUROS EN EL SUBSUELO





**ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIBLES DESTILADOS**

COMBUSTIBLE	TEMPERATURA DE DESTILACIÓN (°C)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA (centistoks)	DENSIDAD g/m <sup>3</sup> (20°C)
GASOLINA	27-225	0.5-0.65	0.680-0.760
GASAVIÓN	27-135	-	0.739
GASOLVENTE	77-138	-	0.761
GASNAFTA	142-187	-	0.768
QUEROSINA	130-288	-	0.800
TURBOSINA	149-288	-	0.810
GASÓLEO	216-308	-	0.848
DIESEL	216-371	2.2-2.4	0.850
ACEITES	300-500	65.0-194.0	0.860-0.950
COMBUSTÓLEO	315-600	-	0.960



### ALGUNAS PROPIEDADES DE HIDROCARBUROS PUROS

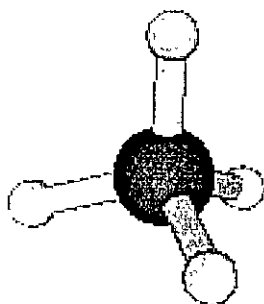
Nombre del hidrocarburo	Fórmula condensada	Punto de ebullición °C	Gravedad específica g/cm <sup>3</sup>
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	36.1	0.626
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	68.9	0.660
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	98.4	0.684
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	125.6	0.703
Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	150.8	0.718
Decano	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	174.1	0.730

HOJA 1 DE 2

### ALGUNAS PROPIEDADES DE HIDROCARBUROS PUROS

Nombre del hidrocarburo	Fórmula condensada	Punto de ebullición °C	Gravedad específica g/cm <sup>3</sup>
Pentadecano	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	270.0	0.769
Octadecano	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	316.1	0.777
Eicoseno	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	343.0	0.778
Triacotano	C <sub>30</sub> H <sub>62</sub>	449.7	0.775
Tetracontano	C <sub>40</sub> H <sub>82</sub>	–	–
Pentacontano	C <sub>50</sub> H <sub>102</sub>	–	0.794

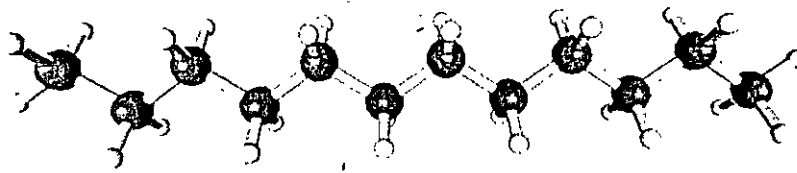
HOJA 2 DE 2



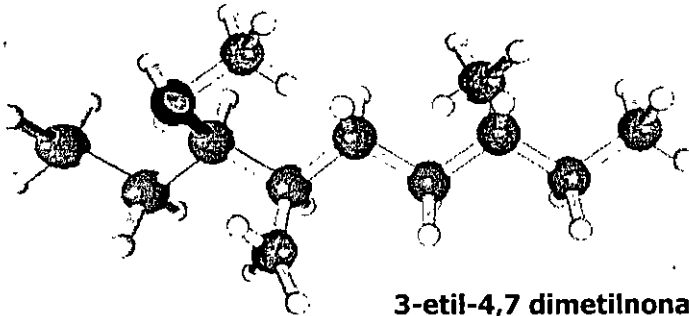
**metano**

ESTRUCTURA TÍPICA DEL  
CARBONO CON ENLACES  
SENCILLOS:  
**ALCANOS**  
**(Parafinas)**

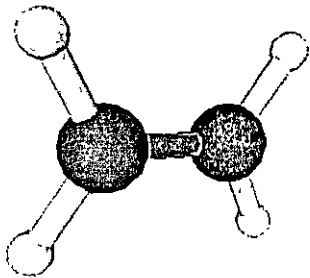
EJEMPLOS DE n-ALCANOS



dodecano

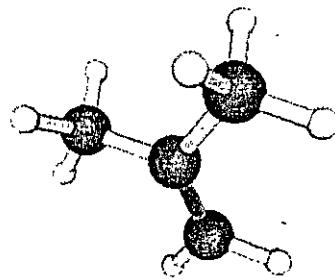


3-etil-4,7 dimetilnonano

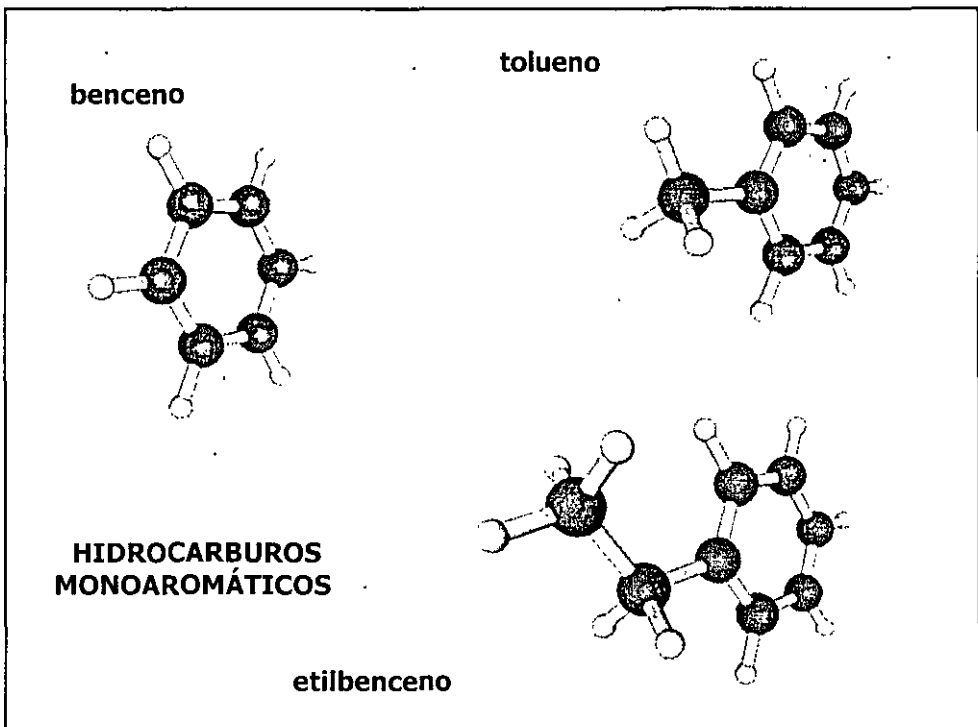
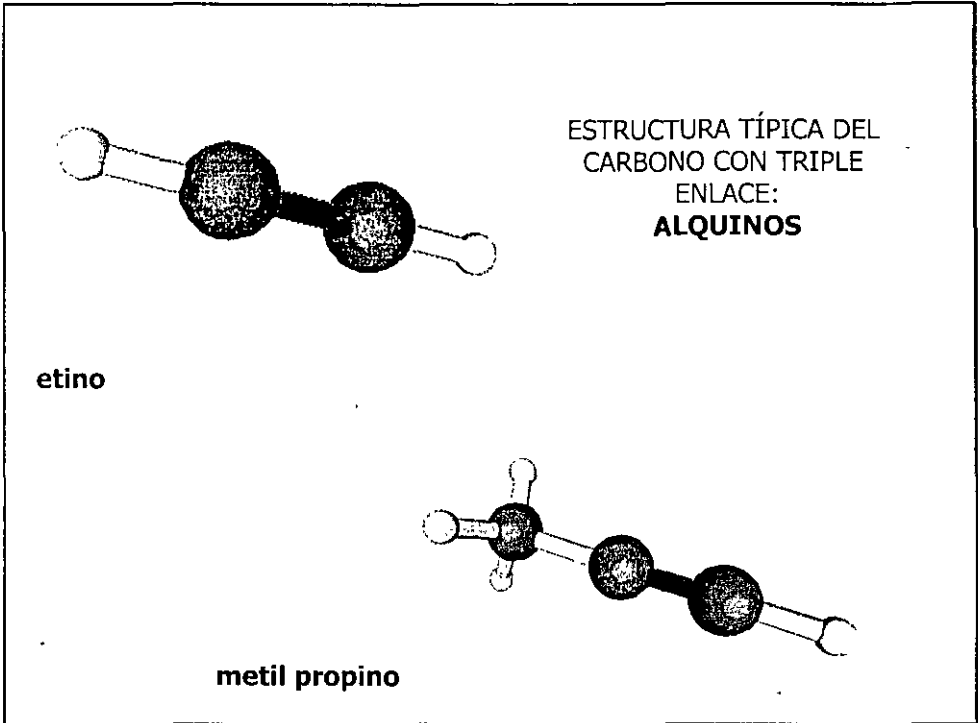


eteno

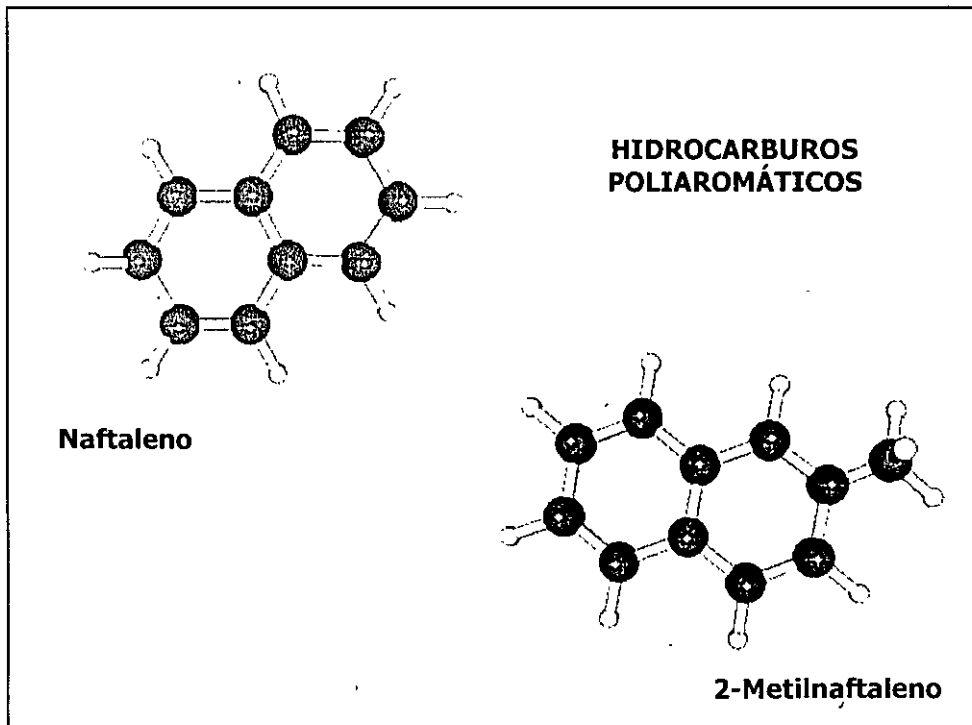
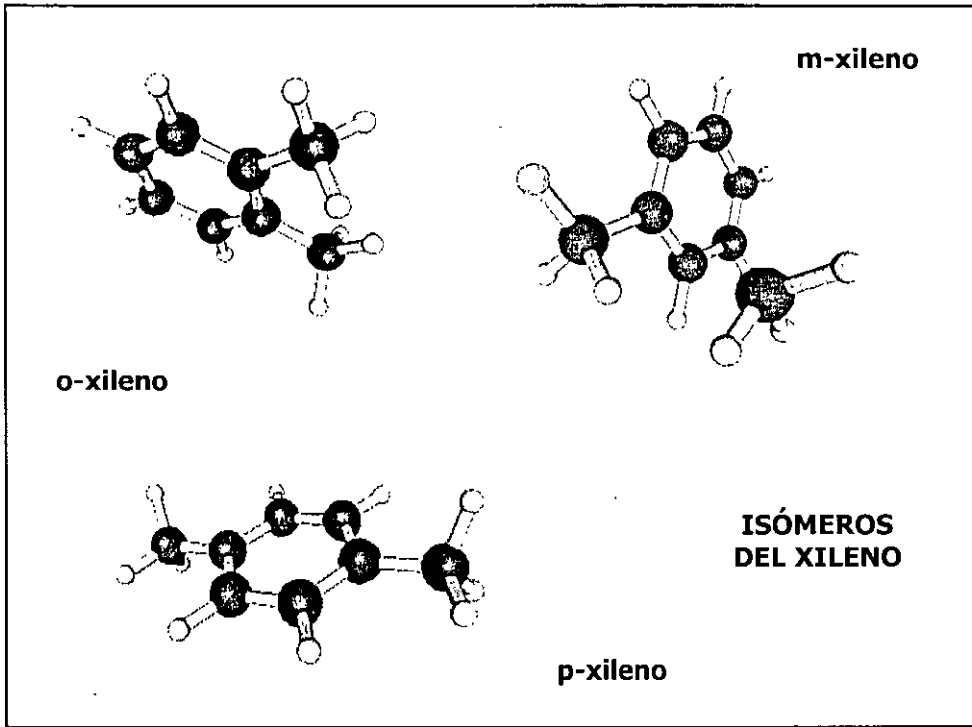
ESTRUCTURA TÍPICA DEL  
CARBONO CON DOBLE  
ENLACE:  
**ALQUENOS**  
(Olefinas)

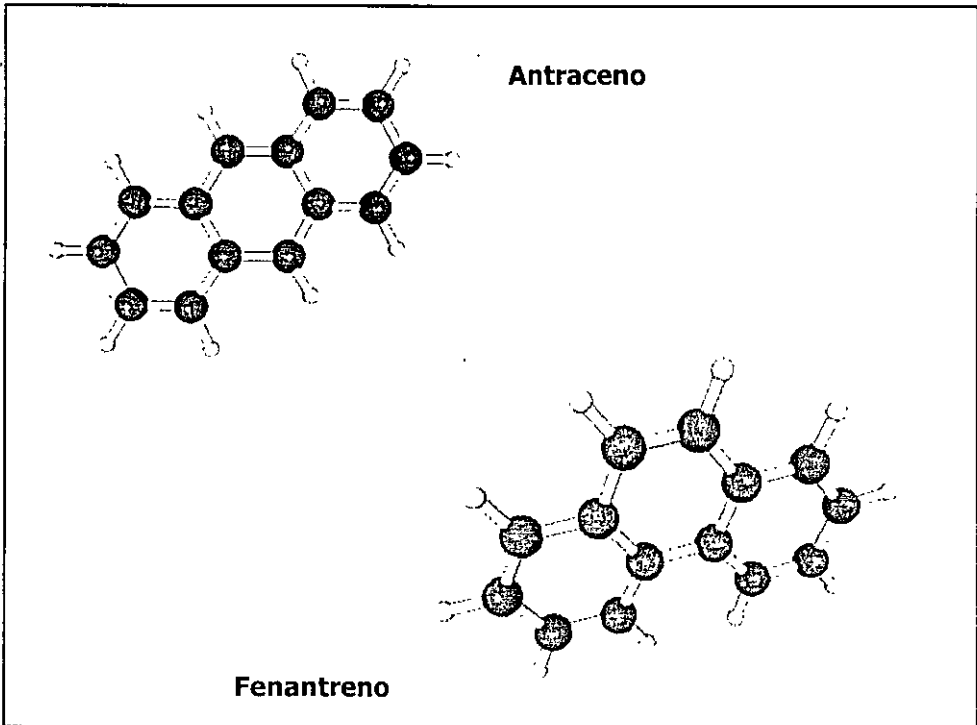
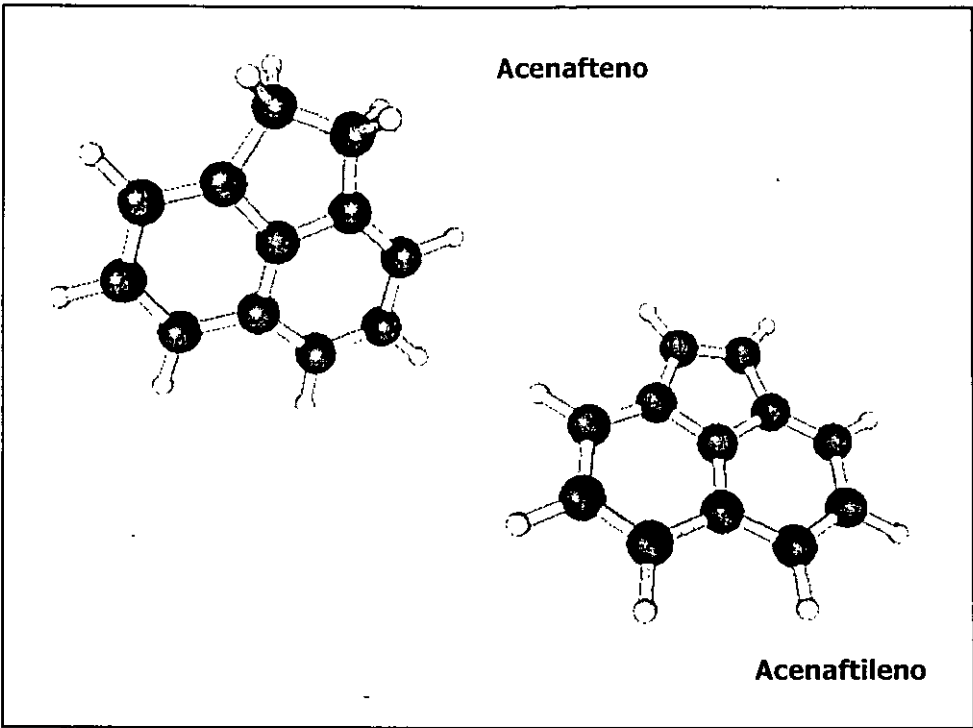


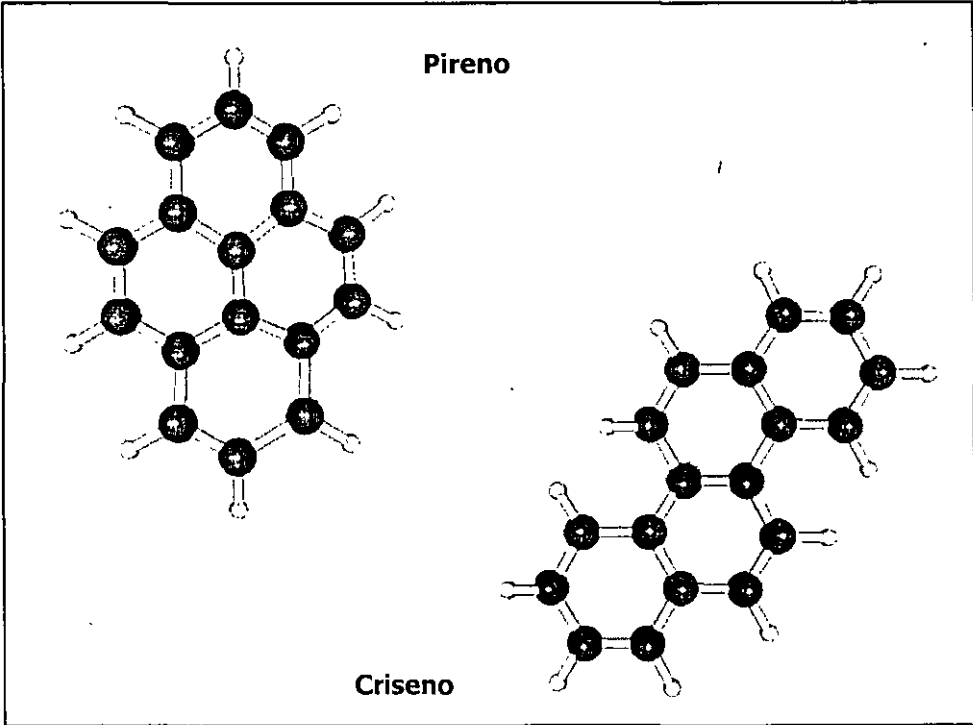
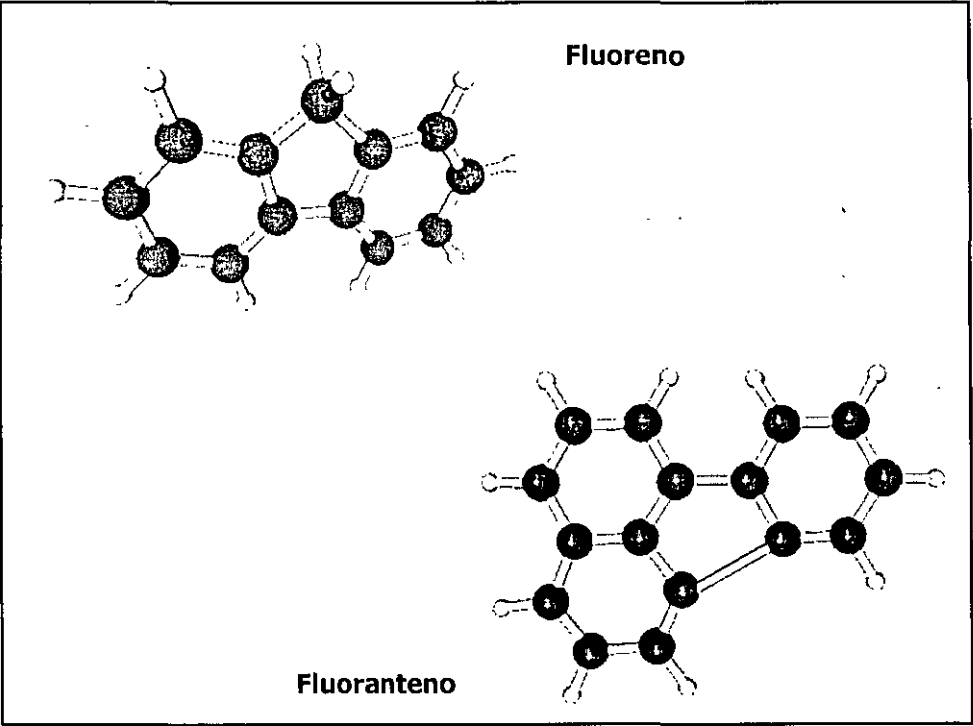
metil propeno

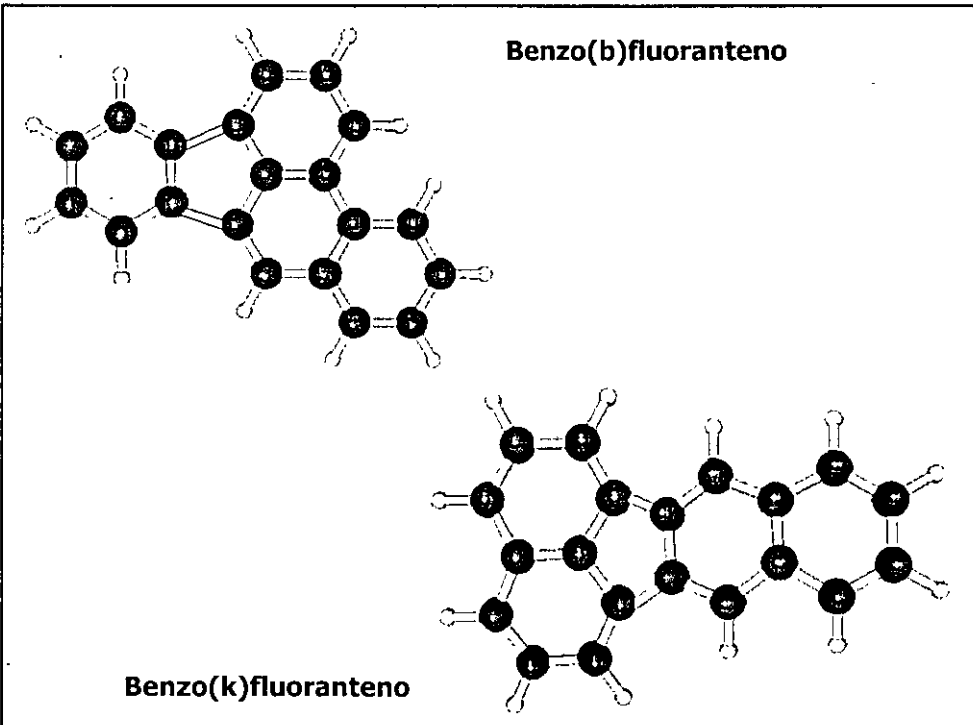
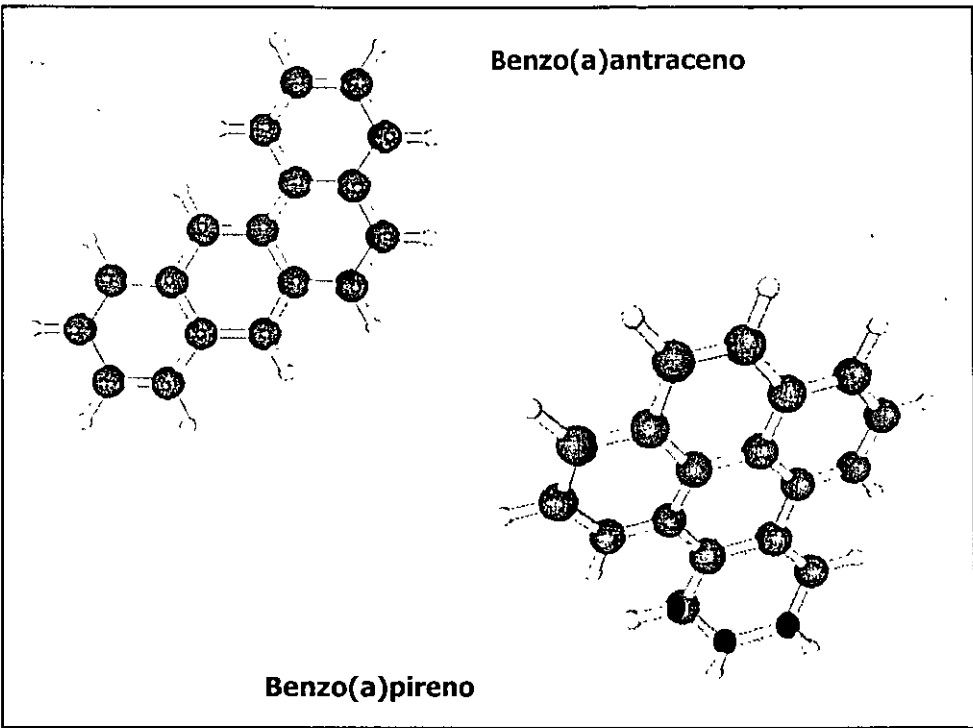


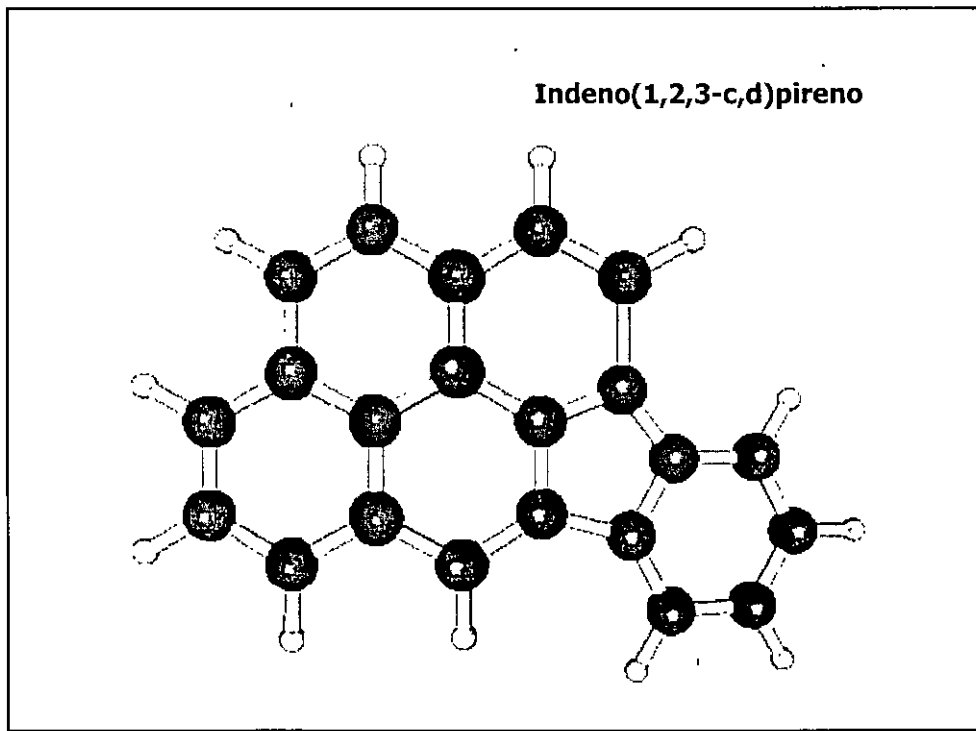
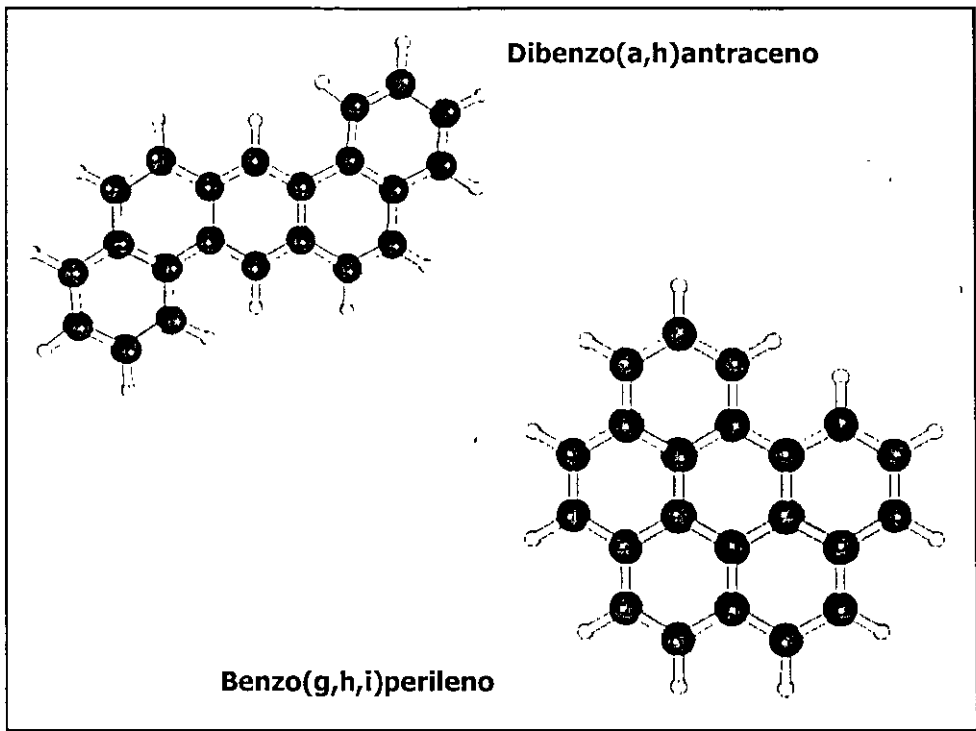












**PESOS MOLECULARES DE LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES**

COMPUESTO (mg/kg del producto )	FÓRMULA CONDENSADA	PESO MOLECULAR
NAFTALENO	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.2
2-METILNAFTALENO	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	142.2
ACENAFTENO	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154.2
ACENAFTILENO	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	152.2
FLUORENO	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	166.2
FENANTRENO	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.2
ANTRACENO	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.2
FLUORANTENO	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.3
PIRENO	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.3
CRISENO	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.3
BENZO(A)ANTRACENO	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.3
BENZO(B)FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3
BENZO(K)FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3
BENZO(A)PIRENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3
DIBENZO(A,H)ANTRACENO	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278.4
BENZO(G,H,I)PERILENO	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.3
INDENO(1,2,3,CD)PIRENO	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.3

**COMPOSICIÓN DE LAS GASOLINAS**

TIPO DE HIDROCARBURO	NÚMERO DE ÁTOMOS DE CARBONO	Porcentaje (en peso)
Alcanos de cadena lineal	C <sub>3</sub> - C <sub>12</sub>	10.80 - 24.29
Alcanos ramificados	C <sub>4</sub> - C <sub>10</sub>	17.91 - 54.66
Cicloalcanos	C <sub>5</sub> - C <sub>8</sub>	0.92 - 2.49
Alquenos de cadena lineal	C <sub>4</sub> - C <sub>7</sub>	2.33 - 3.54
Alquenos ramificados	C <sub>5</sub> - C <sub>7</sub>	3.28 - 4.03
Cicloalquenos	C <sub>5</sub> - C <sub>6</sub>	0.18 - 0.26
Aromáticos mononucleares	C <sub>6</sub> - C <sub>10</sub>	10.82 - 55.22
Aromáticos polinucleares	C <sub>10</sub> - C <sub>21</sub>	0.28 - 3.29

### COMPOSICIÓN DEL DIESEL

Átomos de Carbono	Alcanos (% v/v)	Cicloalcanos (% v/v)	Aromáticos (% v/v)
C <sub>10</sub>	0.9	0.6	0.4
C <sub>11</sub>	2.3	1.7	1.0
C <sub>12</sub>	3.8	2.8	1.6
C <sub>13</sub>	6.4	4.8	2.8
C <sub>14</sub>	8.8	6.6	3.8
C <sub>15</sub>	7.4	5.5	3.2
C <sub>16</sub>	5.8	4.4	2.5
C <sub>17</sub>	5.5	4.1	2.4
C <sub>18</sub>	4.3	3.2	1.8
C <sub>19</sub>	0.7	0.6	0.3
<b>Totales</b>	<b>45.9</b>	<b>34.3</b>	<b>19.8</b>

### COMPARACIÓN DEL CONTENIDO DE BTEX EN GASOLINAS

HIDROCARBUROS en %	ESTUDIOS MÉXICO (1)	LITERATURA USA (2)
Benceno	2.96	0.12 – 3.50
Tolueno	8.49	2.73 – 21.80
Etilbenceno	1.56	0.36 – 2.86
o-Xileno	2.06	0.68 – 2.86
m+p-Xileno	5.24	2.54 – 5.45
<b>Xilenos totales</b>	<b>7.30</b>	<b>3.22 – 8.31</b>

- (1) Estudio realizado por S. Savai a partir de combustibles frescos, 2002  
 (2) Reportado por Riser-Roberts, 1993

**CONTENIDO DE ALGUNOS HIDROCARBUROS  
EN GASOLINA Y TURBOSINA**

<b>HIDROCARBURO en %</b>	<b>GASOLINA</b>	<b>TURBOSINA</b>
<b>benceno</b>	<b>0.12 – 3.50</b>	<b>0.3 – 0.5</b>
<b>tolueno</b>	<b>2.73 – 21.80</b>	<b>0.7 – 1.33</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>0.36 – 2.86</b>	<b>0.37</b>
<b>o-xileno</b>	<b>0.68 – 2.86</b>	<b>1.01</b>
<b>m-xileno</b>	<b>1.77 – 3.87</b>	<b>0.96</b>
<b>p-xileno</b>	<b>0.77 – 1.58</b>	<b>0.35</b>
<b>naftaleno</b>	<b>0.09 – 0.49</b>	<b>0.2 – 0.5</b>

**CONCENTRACIONES DE BTEX MÁXIMAS  
A ENCONTRAR EN SUELOS CONTAMINADOS CON GASOLINA  
(derrame reciente, gasolina fresca, único combustible presente)**

<b>Concentración de gasolina mg/kg</b>	<b>Concentración máxima de benceno mg/kg</b>	<b>Concentración máxima de tolueno mg/kg</b>	<b>Concentración máxima de etilbenceno mg/kg</b>	<b>Concentración máxima de xileno (<i>o, m, p</i>) mg/kg</b>
<b>100</b>	<b>3.5</b>	<b>21.8</b>	<b>2.9</b>	<b>8.31</b>
<b>200</b>	<b>7.0</b>	<b>43.6</b>	<b>5.7</b>	<b>16.6</b>
<b>500</b>	<b>17.5</b>	<b>109.0</b>	<b>14.3</b>	<b>41.6</b>
<b>1000</b>	<b>35.0</b>	<b>218.0</b>	<b>28.6</b>	<b>83.1</b>
<b>2000</b>	<b>70.0</b>	<b>436.0</b>	<b>57.2</b>	<b>166.2</b>
<b>5000</b>	<b>175.0</b>	<b>1090.0</b>	<b>143.0</b>	<b>415.5</b>



**CONCENTRACIONES DE BTEX MÁXIMAS  
A ENCONTRAR EN SUELOS CONTAMINADOS CON TURBOSINA**  
(derrame reciente, turbosina fresca, único combustible presente)

Concentración de turbosina mg/kg	Concentración máxima de benceno mg/kg	Concentración máxima de tolueno mg/kg	Concentración máxima de etilbenceno mg/kg	Concentración máxima de xilenos (o, m, p) mg/kg
100	0.5	1.3	0.4	2.3
200	1.0	2.7	0.7	4.6
500	2.5	6.5	2.0	11.5
1000	5.0	13.0	3.7	23.2
2000	10.0	27.0	7.0	46.0
5000	25.0	65.0	20.0	115.0

**ADITIVOS DE LAS GASOLINAS**

Nombre	Formula condensada	Punto de ebullición (°C)	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Tetraetilo de plomo	C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> Pb	200	1.659
Metilterbutiléter MTBE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	55.2	0.741
Teramilmetiléter TAME	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	85	0.764

## **DNAPLs CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUÍFEROS**

---

**hidrocarburos clorados:** percloroetileno,  
tricloroetileno, dicloroetileno, cloruro de vinilo

**disolventes:** cloroformo, tetracloruro de carbono,  
cloruro de metileno, pentaclorofenol

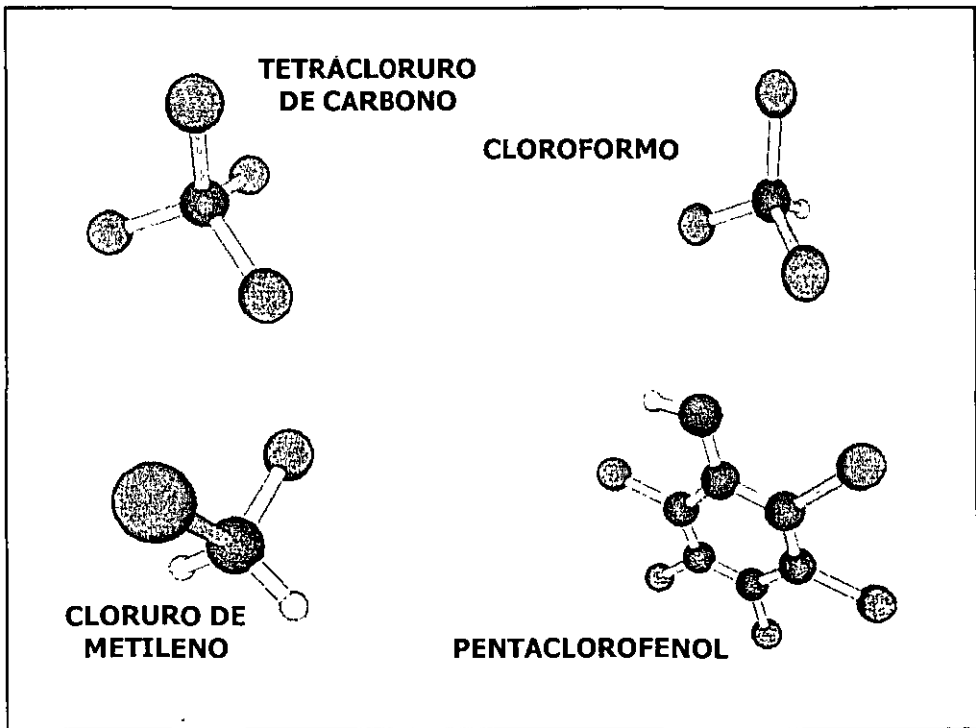
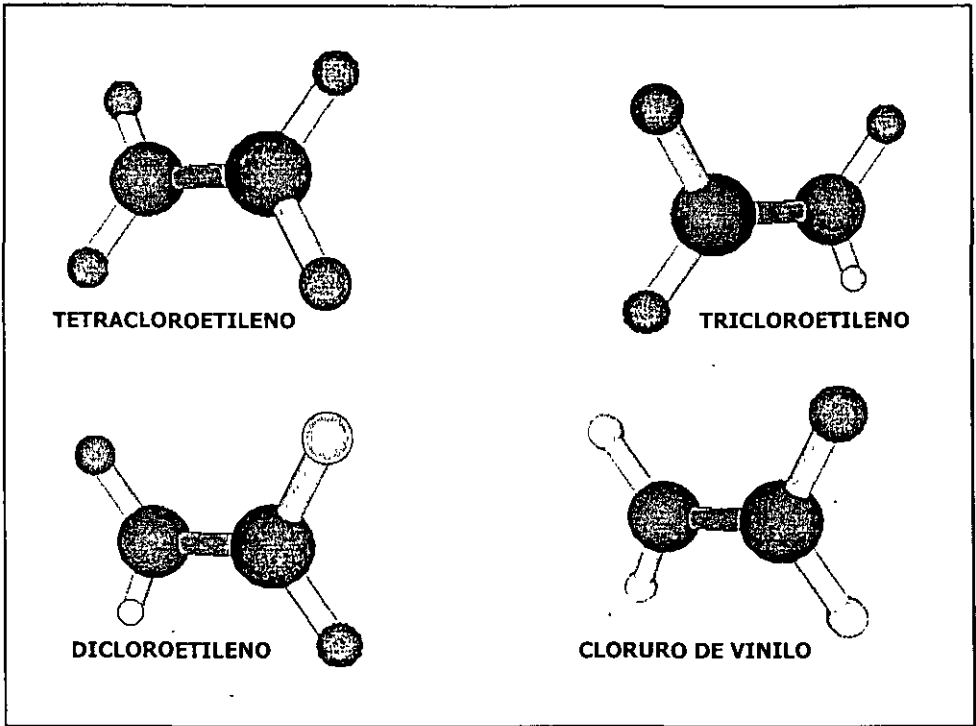
---

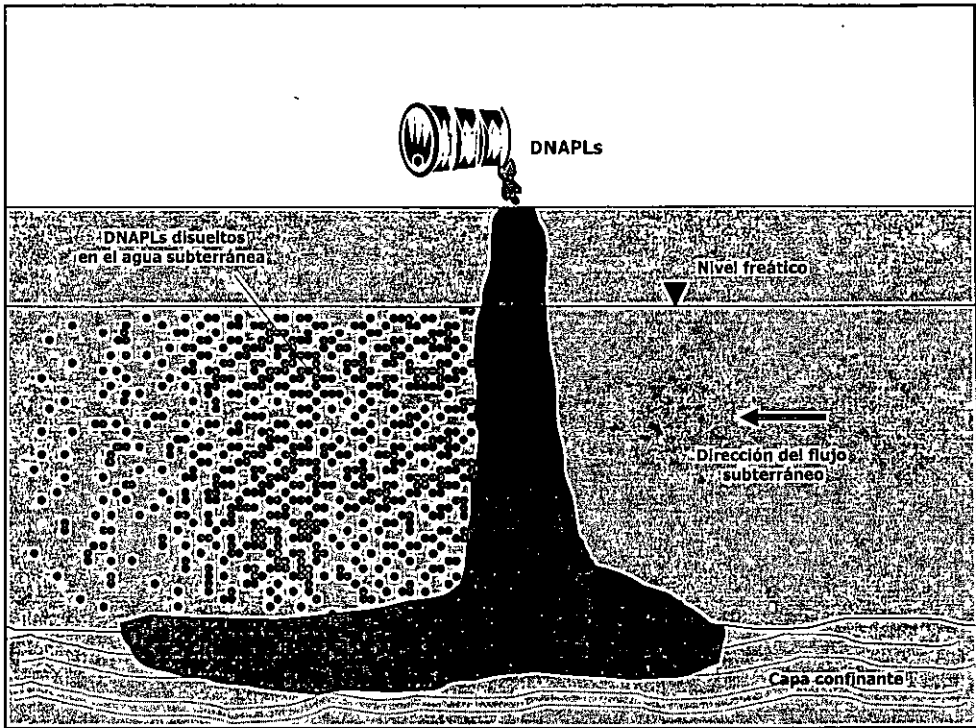
## **DISOLVENTES CLORADOS**

**Uso:** desgrasantes en la industria eléctrica,  
electrónica, metalmecánica  
algunos de ellos, disolventes para  
la extracción en análisis de muestras  
en laboratorios de pruebas

**Muy volátiles a temperatura ambiente**

**Métodos analíticos: EPA 8260 y 8270**





**OTROS CONTAMINANTES ORGÁNICOS CLORADOS  
CONTAMINANTES DE SUELOS**

- BIFENILOS POLICLORADOS
  - PLAGUICIDAS
  - CLOROFENOLES

## **BIFENILOS POLICLORADOS**

**Nombres comerciales más comunes:**

<b>Aroclor</b>	<b>Kaneclor</b>	<b>Askarel</b>
<b>Clorinol</b>	<b>Asbestol</b>	<b>Diaclor</b>
<b>Eucarel</b>	<b>Kanechlor</b>	<b>Inclor</b>

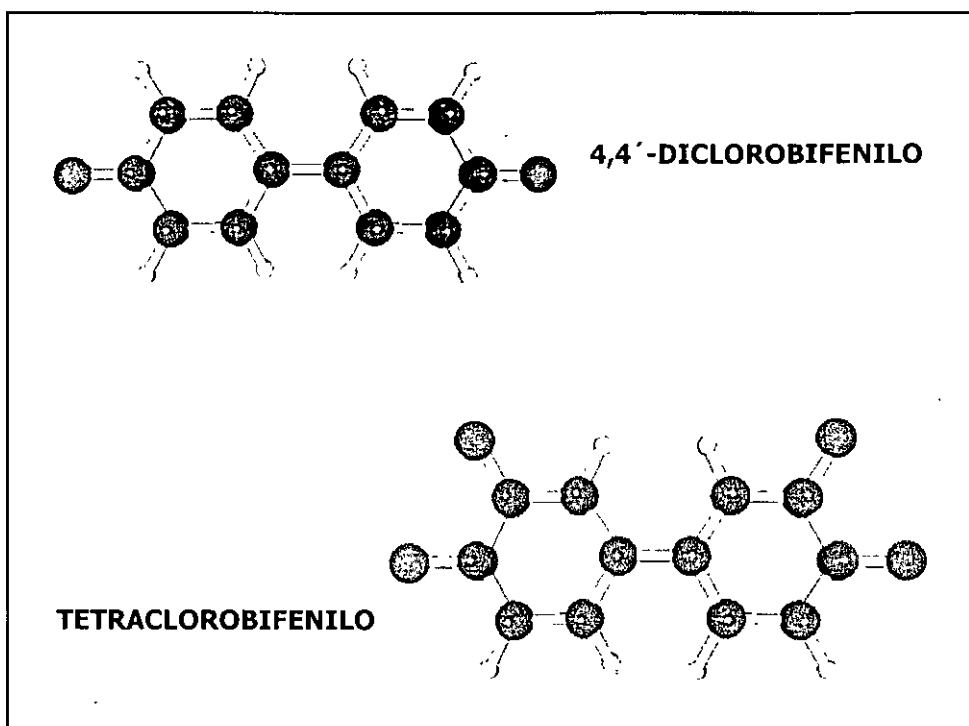
## **BIFENILOS POLICLORADOS**

**Grado de cloración del producto:**

**1242, 1248, 1254, 1260 y 1262**

**porcentaje en peso de átomos  
de cloro en la molécula**

**Aroclor 1242: mezcla de 60 congéneres  
de monoclorobifenilo, diclorobifenilo y  
triclorobifenilo**



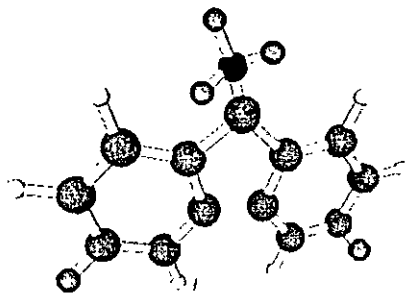
## **PLAGUICIDAS ORGANOCOLORADOS**

Origen: agricultura, desechos de fabricación

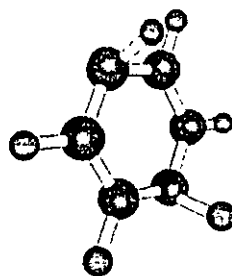
Polvos insolubles. Se utilizan surfactantes para facilitar su dispersión en la agricultura

Efectos a la salud: la mayoría cancerígenos USEPA A

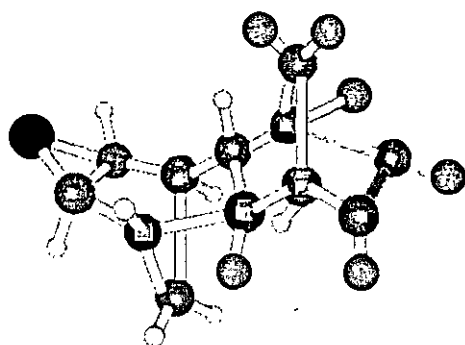
Método analítico EPA 8081



**DDT**

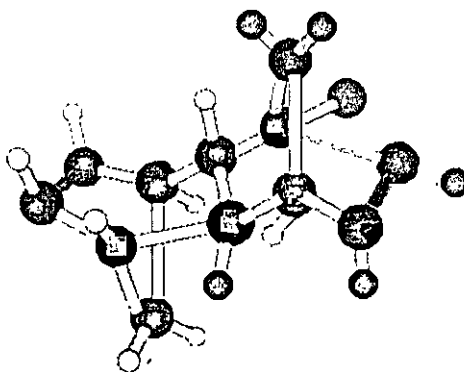


**HEXAChLOROBeNCeNO**



**ALDRIN**

**DIeLDRIIn**



## **CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS**

**SOLUBILIDAD**

**CONSTANTE DE LA  
LEY DE HENRY**

**COEFICIENTE DE  
DISTRIBUCIÓN  
OCTANOL/AGUA**

**PRESIÓN DE VAPOR**

**COEFICIENTE DE  
SORCIÓN**

**COEFICIENTE DE  
DISPERSIÓN**

### **SOLUBILIDAD DE ALGUNOS HIDROCARBUROS LIGEROS PUROS EN AGUA**

<b>Compuesto</b>	<b>Solubilidad (mg/l)</b>
Benceno	1 750
Tolueno	526
o-Xileno	175
Etilbenceno	169
m-Xileno	158
n-hexano	18

HOJA 1 DE 3



### SOLUBILIDAD DE ALGUNOS HIDROCARBUROS PUROS EN AGUA

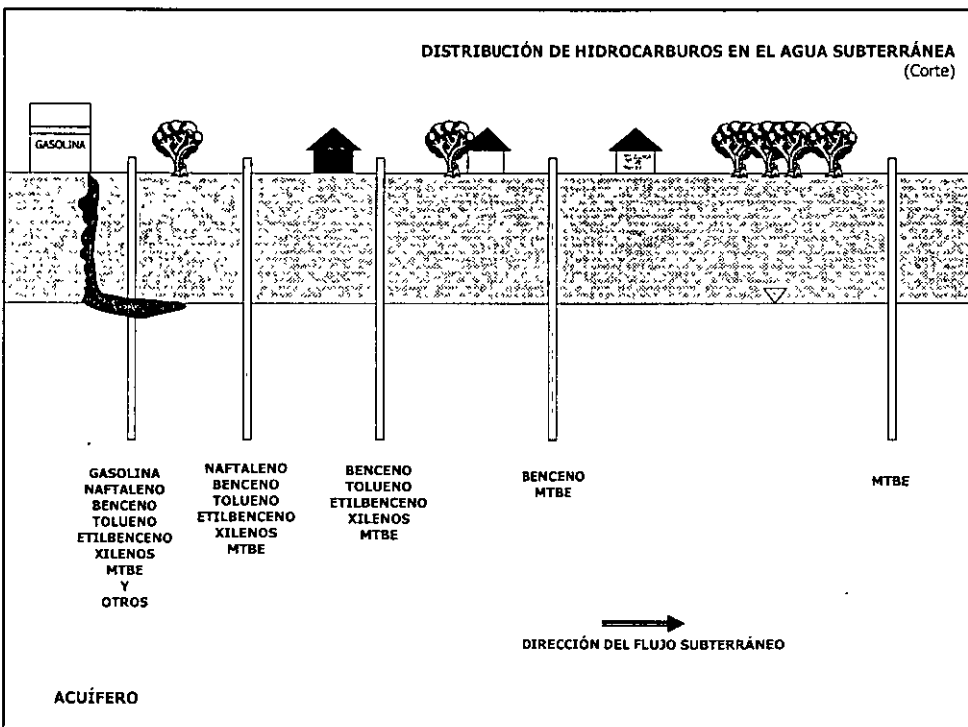
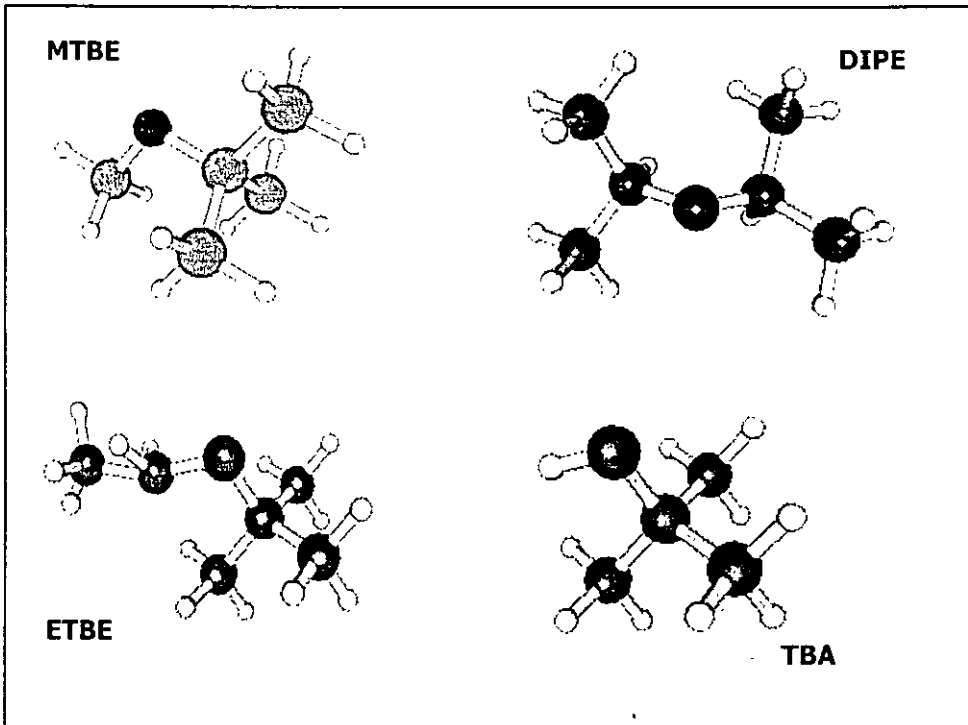
Compuesto Solubilidad (mg/l)

Naftaleno	31.00
Acenafteno	3.93
Acenaftileno	3.93
Indenol (1,2,3,c,d)pireno	2.07
Fluoreno	1.69
Fenantreno	1.00
Benzo(k)fluoranteno	0.430
Fluoranteno	0.206
Pireno	0.135
Antraceno	0.045
Benzo(b)fluoranteno	0.014
Benzo(a)antraceno	0.0067
Criseno	0.0016
Benzo(a)pireno	0.0012
Benzo(g,h,i)perienlo	0.0007
Dibenzo(a,h)antraceno	0.0005

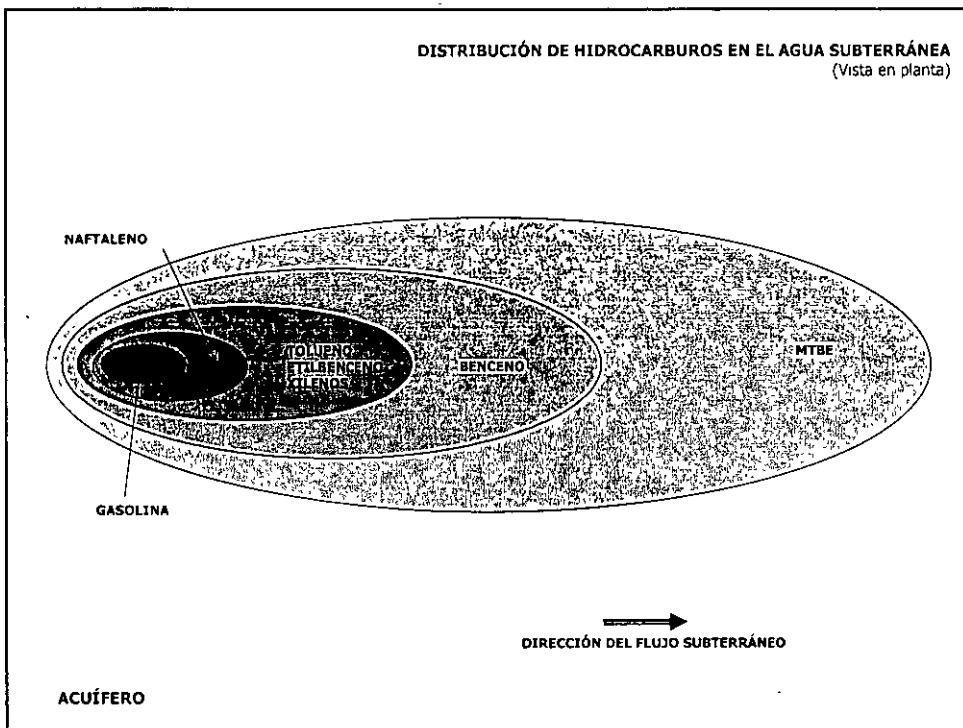
HOJA 2 DE 3

### ADITIVOS DE LAS GASOLINAS

Nombre	Formula condensada	Solubilidad mg/L	Punto de ebullición (°C)	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Tetraetilo de plomo	C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> Pb	0.21	200.0	1.659
Metiliterbutiléter MTBE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	50,000	55.2	0.741
Teramilmetiléter TAME	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	2,640	85.0	0.764
Etilterbutiléter ETBE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	1.2	71.0	0.752
Diisopropiléter DIPE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	8,800	68.5	0.724
Alcohol terbutílico TBA	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-	82.2	0.786



**DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA**  
(Vista en planta)



COMPUESTO	SOLUBILIDAD EN AGUA (mg/l)
Aldrin	0.0784
Dieldrin	0.195
1,2-Diclorobenceno	149.55
Hexaclorobenceno	0.006
Fenol	82,800.00
2-Clorofenol	22,000.00
Pentaclorofenol	14.00
Metiletilcetona	320,000.00
Tetracloroetileno	200.00

## COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN OCTANOL/AGUA

$$K_{O/W}$$

### AFINIDAD DE UNA SUSTANCIA POR UNA FASE ORGÁNICA

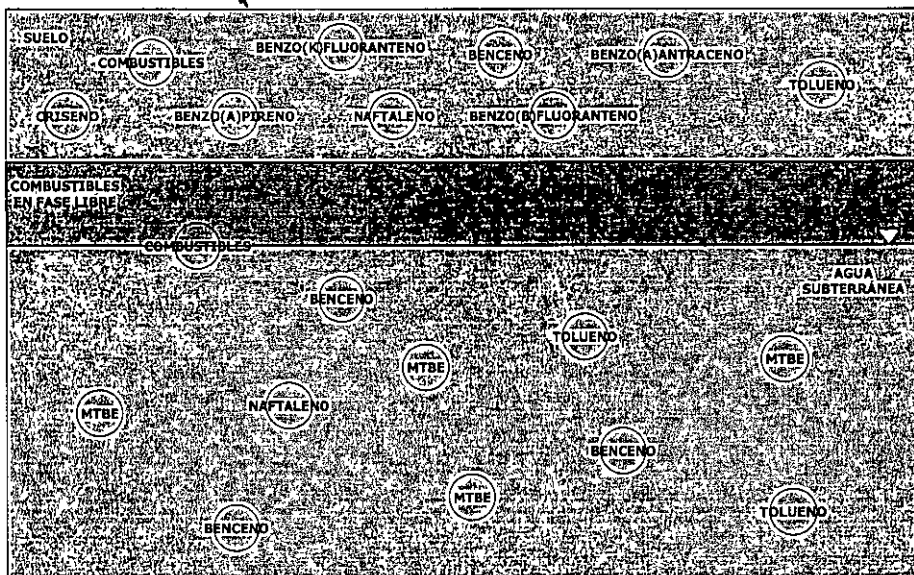
**cifras altas = preferencia por la fase  
orgánica**

COMPUESTO	COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN OCTANOL/AGUA (log $K_{O/W}$ adim)
benceno	1.77
tolueno	2.13
etilbenceno	2.56
p-xileno	2.38
MTBE	1.08
naftaleno	3.30
fenantreno	4.15
benzo(a)pireno	6.01
benzo(b)fluoranteno	5.74
benzo(g,h,i)perileno	6.20

DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELO Y SUBSUELO



MEZCLA DE COMBUSTIBLES



COMPUESTO	COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN OCTANOL/AGUA (log $K_{O/W}$ adim)
Aldrin	8.50
Dieldrin	5.48
1,2-Diclorobenceno	3.38
Hexaclorobenceno	5.50
Fenol	1.45
2-Clorofenol	2.15
Pentaclorofenol	2.96
Diclorometano	1.15
Tetracloroetileno	2.88

**COEFICIENTE DE SORCIÓN  
( $k_{oc}$ )**

**PREFERENCIA DE UNA SUSTANCIA PARA  
ADSORBERSE EN EL SUELO**

**cifras altas = preferencia por el suelo**

<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE SORCIÓN cm<sup>3</sup>/g</b>
benceno	59
tolueno	180
etilbenceno	360
xilenos	240
MTBE	12
naftaleno	2,000
fenantreno	23,000
benzo(a)pireno	1'000,000
benzo(b)fluoranteno	1'200,000
benzo(g,h,i)perileno	7'800,000

<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE SORCIÓN cm<sup>3</sup>/g</b>
<b>Cloruro de metileno</b>	<b>12</b>
<b>Cloruro de vinilo</b>	<b>19</b>
<b>Clorobenceno</b>	<b>22</b>
<b>Fenol</b>	<b>29</b>
<b>Cloroformo</b>	<b>40</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	<b>160</b>
<b>Tricloroetileno</b>	<b>170</b>
<b>Tetracloruro de carbono</b>	<b>170</b>

## **CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY**

**CAPACIDAD DE UNA SUSTANCIA  
PARA VOLATILIZARSE**

**cifras altas = mayor volatilidad**

<b>COMPUESTO</b>	<b>CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY adim</b>
<b>benceno</b>	<b>0.228</b>
<b>tolueno</b>	<b>0.272</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>0.323</b>
<b>p-xileno</b>	<b>0.290</b>
<b>MTBE</b>	<b>0.0204</b>
<b>naftaleno</b>	<b>0.0198</b>
<b>fenantreno</b>	<b>0.0016</b>
<b>benzo(a)pireno</b>	<b>0.0000463</b>
<b>benzo(b)fluoranteno</b>	<b>0.00455</b>
<b>benzo(g,h,i)perileno</b>	<b>0.0000109</b>

<b>COMPUESTO</b>	<b>CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY adim</b>
<b>Aldrin</b>	<b>0.0206</b>
<b>Dieldrin</b>	<b>0.0012</b>
<b>1,2-Diclorobenceno</b>	<b>0.080</b>
<b>Hexaclorobenceno</b>	<b>0.0618</b>
<b>Fenol</b>	<b>0.000016</b>
<b>2-Clorofenol</b>	<b>0.016</b>
<b>Pentaclorofenol</b>	<b>0.0000825</b>
<b>Tetracloruro de carbono</b>	<b>1.237</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	<b>0.7588</b>



## **PRESIÓN DE VAPOR**

**PRESIÓN QUE EJERCEN LAS MOLÉCULAS  
QUE SE DESPRENDEN EN FORMA DE  
VAPOR CUANDO PRETENDEN  
ABANDONAR EL MEDIO EN QUE SE  
ENCUESTRAN**

<b>COMPUESTO</b>	<b>PRESIÓN DE VAPOR mm Hg</b>
<b>benceno</b>	<b>95.2</b>
<b>tolueno</b>	<b>30.0</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>10.0</b>
<b>m-xileno</b>	<b>7.0</b>
<b>MTBE</b>	<b>249.0</b>
<b>naftaleno</b>	<b>0.23</b>
<b>fenantreno</b>	<b>0.00021</b>
<b>benzo(a)pireno</b>	<b>0.000568</b>
<b>benzo(b)fluoranteno</b>	<b>0.000000667</b>
<b>benzo(g,h,i)perileno</b>	<b>0.000000001</b>

<b>COMPUESTO</b>	<b>PRESIÓN DE VAPOR mm Hg</b>
<b>Aldrin</b>	<b>0.0000167</b>
<b>Dieldrin</b>	<b>0.000000996</b>
<b>1,2-Diclorobenceno</b>	<b>1.50</b>
<b>Hexaclorobenceno</b>	<b>0.0000123</b>
<b>Fenol</b>	<b>0.341</b>
<b>2-Clorofenol</b>	<b>1.40</b>
<b>Pentaclorofenol</b>	<b>0.000017</b>
<b>Tetracloruro de carbono</b>	<b>113.00</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	<b>19.00</b>

## **COEFICIENTE DE DISPERSIÓN**

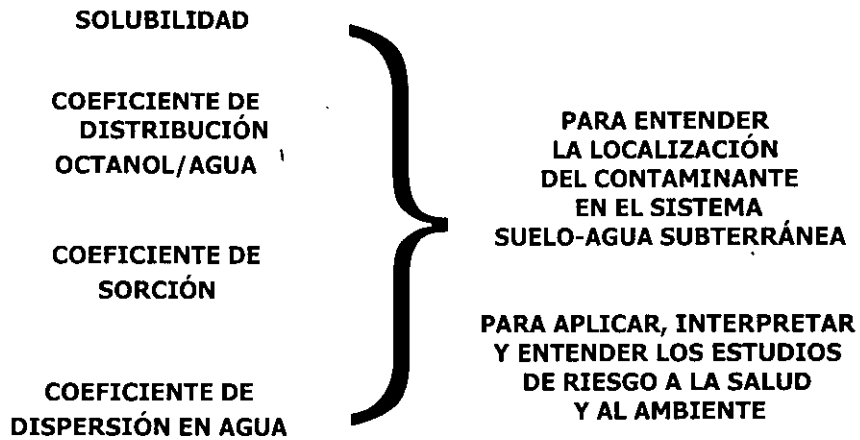
**FACILIDAD CON LA QUE UNA SUSTANCIA  
PUEDE DISTRIBUIRSE EN EL AIRE  
O EN EL AGUA**

**cifras altas corresponden a una  
mayor movilidad**

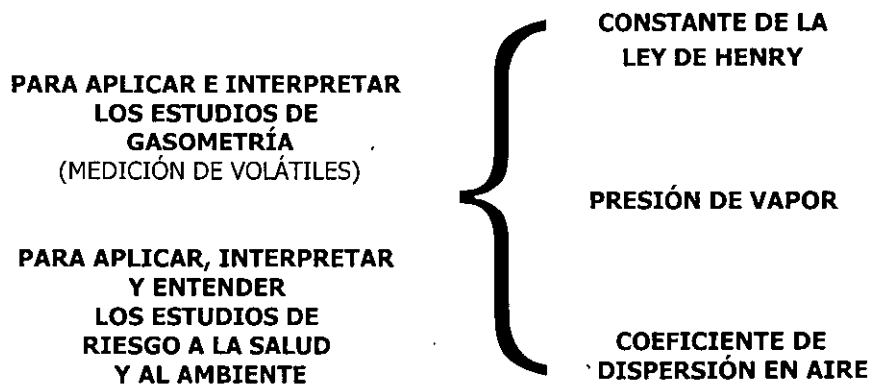
COMPUESTO	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AGUA cm <sup>2</sup> /s	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AIRE cm <sup>2</sup> /s
benceno	0.0000098	0.088
tolueno	0.0000094	0.085
etilbenceno	0.0000078	0.075
m-xileno	0.0000085	0.072
MTBE	0.0000940	0.079
naftaleno	0.0000075	0.059
fenantreno	0.0000074	0.033
benzo(a)pireno	0.0000090	0.043
benzo(b)fluoranteno	0.0000055	0.023
benzo(g,h,i)perileno	0.0000056	0.049

COMPUESTO	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AGUA cm <sup>2</sup> /s	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AIRE cm <sup>2</sup> /s
Aldrin	0.0000048	0.013
Dieldrin	0.0000047	0.012
1,2-Diclorobenceno	0.0000079	0.069
Hexaclorobenceno	0.0000059	0.054
Fenol	0.0000091	0.082
2-Clorofenol	0.0000095	0.050
Pentaclorofenol	0.0000061	0.056
Tetracloruro de carbono	0.0000088	0.078
Tetracloroetileno	0.0000082	0.072

**UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE COMPUESTOS  
ORGÁNICOS**



**UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE COMPUESTOS  
ORGÁNICOS**



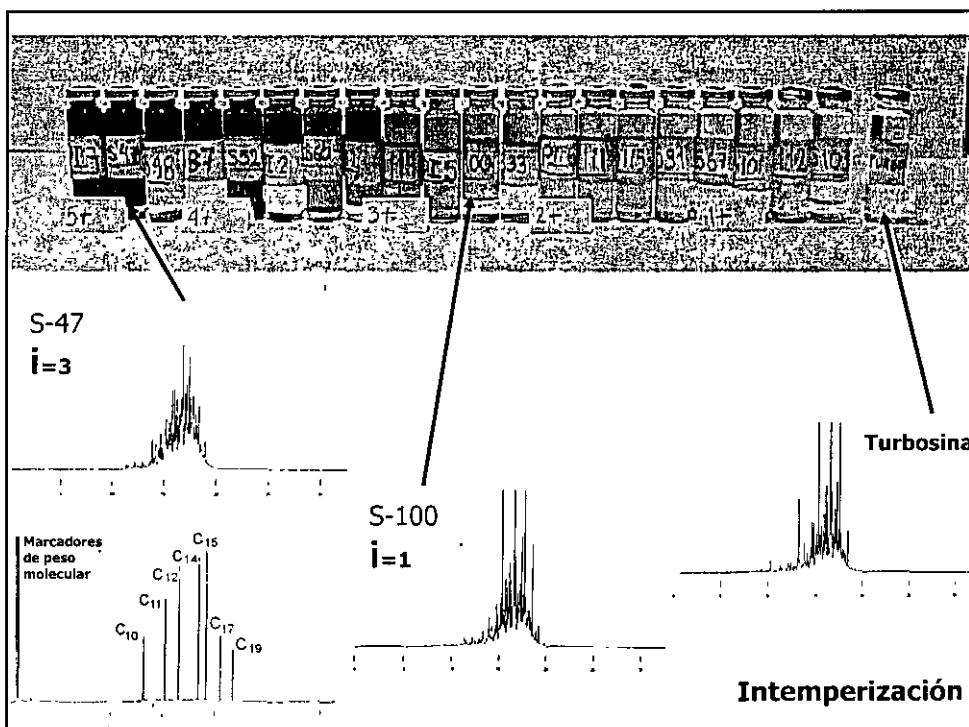
## INTEMPERIZACIÓN

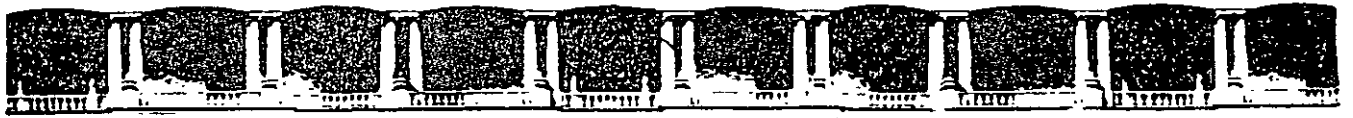
Modificación de las características originales de un contaminante por efecto del tiempo, de las características del suelo y de las condiciones climatológicas del lugar.

- √ pérdida de componentes volátiles (BTEX)
- √ endurecimiento del material en el suelo, en forma de "costras" o "piedras"
- √ cambio de coloración del producto libre
- √ aumento en la viscosidad de producto libre
- √ formación de compuestos complejos por reacciones químicas y fotoquímicas



## Intemperización





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
OTRAS TÉCNICAS DE REMEDIACION  
PARA SUELOS CONTAMINADOS  
CON HIDROCARBUROS**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería

# OTRAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM

## TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN MÁS UTILIZADAS EN MÉXICO

Remediación de suelo superficial <i>in situ</i>	Remediación de suelo fuera del sitio	Remediación de suelo profundo y agua subterránea <i>in situ</i>
oxidación química biorremediación encapsulamiento solidificación y estabilización extracción de vapores atenuación natural	confinamiento incineración oxidación química biorremediación lavado (flushing) encapsulamiento estabilización	aislamiento y contención bombeo y tratamiento  tratamiento de aguas subterráneas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• venteo</li> <li>• adsorción en carbón activado</li> </ul>



**OXIDACIÓN QUÍMICA  
CON PERMANGANATO DE POTASIO O SODIO**

**CONTAMINANTES ORGÁNICOS +  $\text{KMnO}_4$**



**$\text{CO}_2 + \text{MnO}_2 + \text{K}^+ + \text{H}_2\text{O} + \dots$**

**Ejemplos de aplicación: hidrocarburos, disolventes clorados**



**Aspecto del permanganato de potasio**

### REQUERIMIENTOS DE OXIDANTE

Sustancia	Formula condensada	g $\text{MnO}_4^-$ / g sustancia	g $\text{MnO}_2$ / g sust. oxidada
Naftaleno	$\text{C}_{10}\text{H}_8$	14.8	10.8
Fenantreno	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	14.7	10.7
Pireno	$\text{C}_{10}\text{H}_{10}$	14.5	10.6
Tricloroetileno	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{H}$	1.81	1.32
Fenol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	11.8	8.62



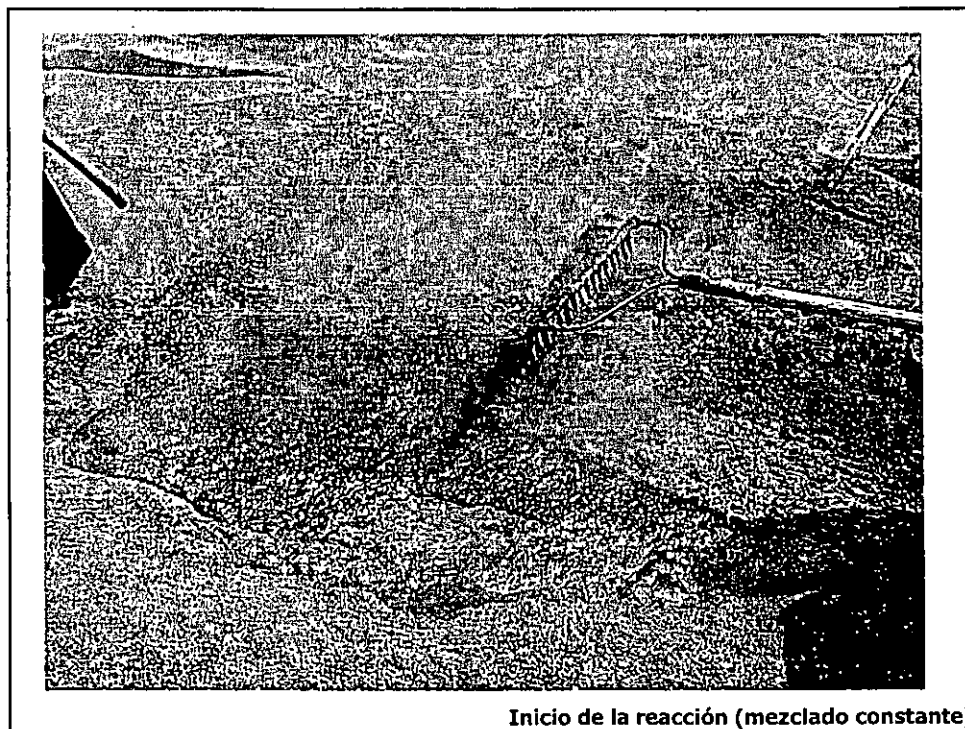
Oxidación química a escala real

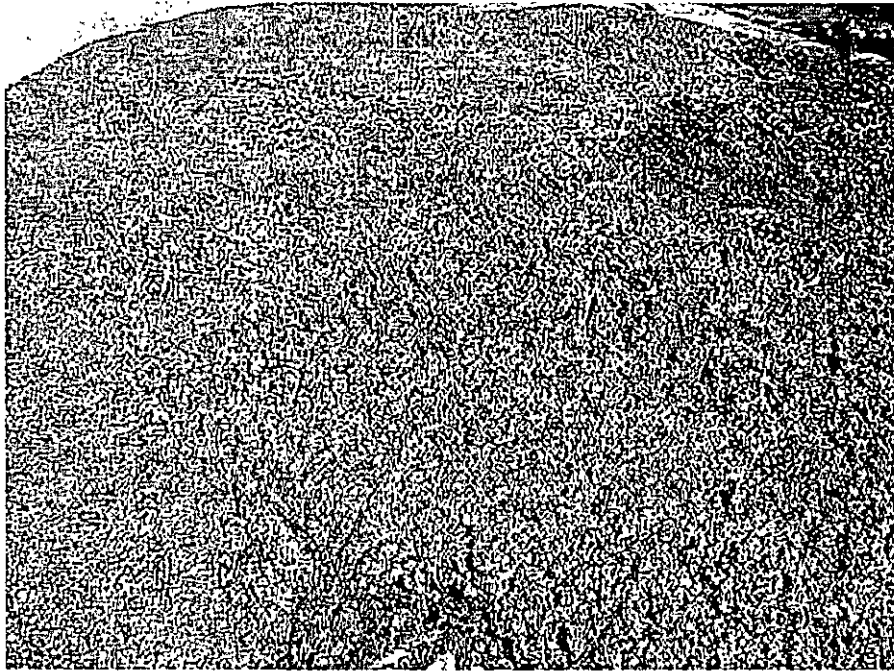


Reacción en proceso (repose)

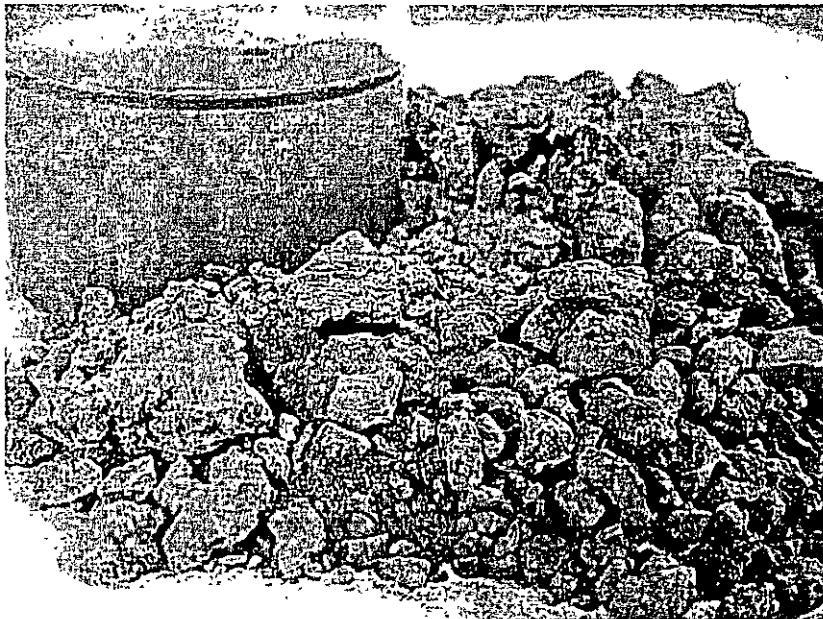


Aspecto del suelo al final de la reacción





Aspecto posterior a la reacción



Aspecto del posible lixiviado y el suelo seco

**OXIDACIÓN QUÍMICA CON  
PERÓXIDO DE HIDRÓGENO**  
(30 / 50%)

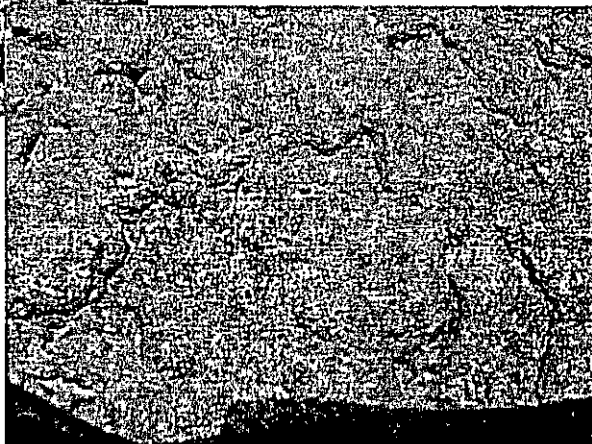
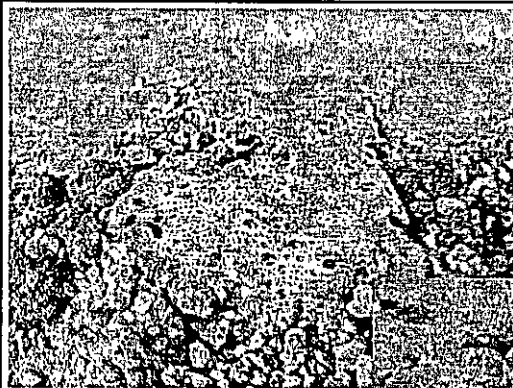
**CONTAMINANTES ORGÁNICOS + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**



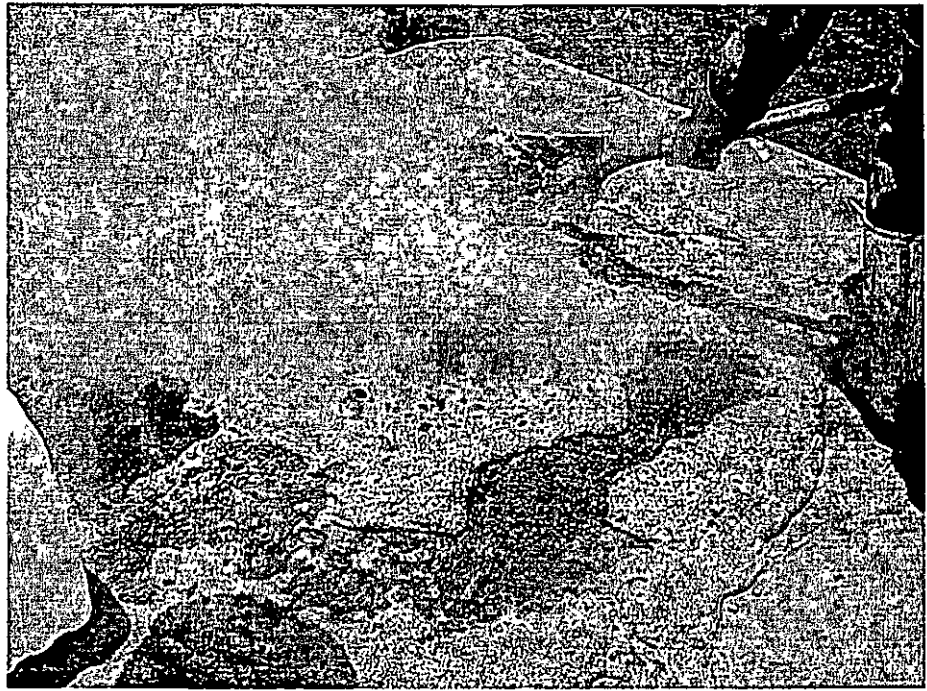
medio ácido, fierro

**CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + ....**

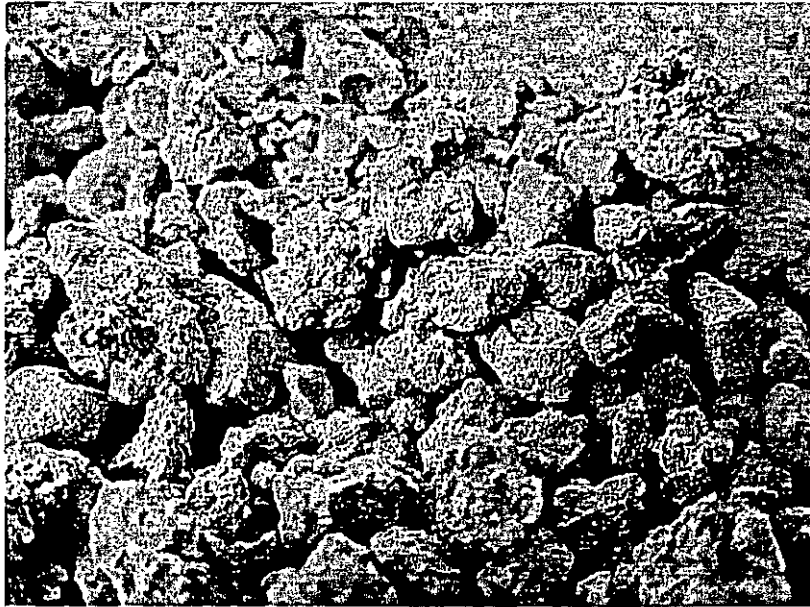
**Ejemplos de aplicación: hidrocarburos, disolventes clorados**



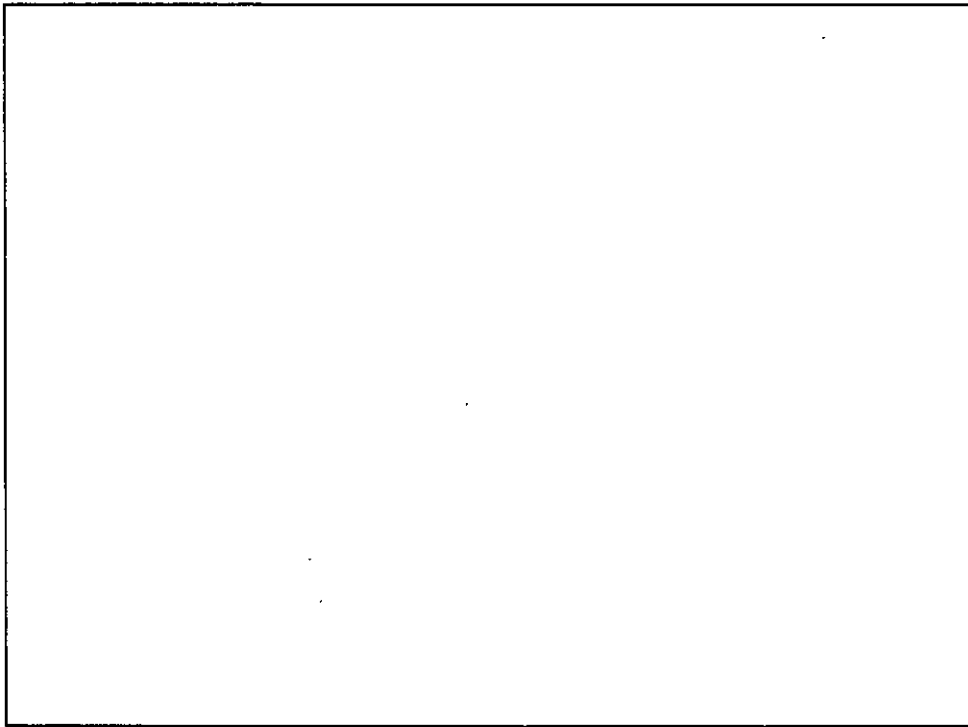
Efervescencia  
Desprendimiento de CO<sub>2</sub>



**Inicio de la reacción (mezclado constante)**



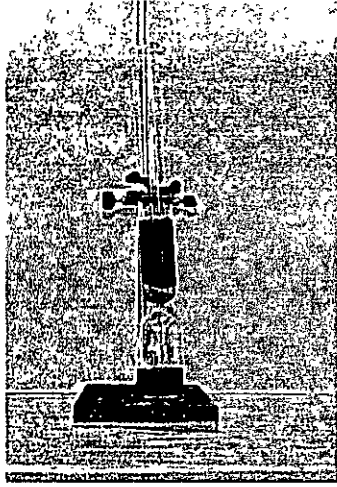
**Aspecto del suelo al final de la reacción**



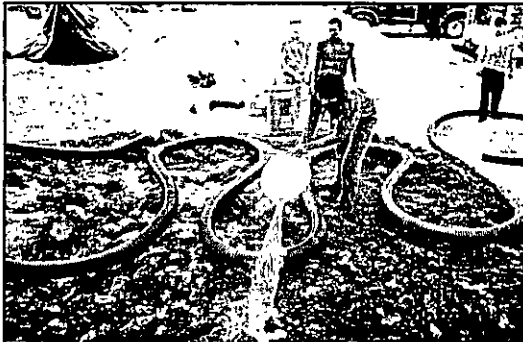
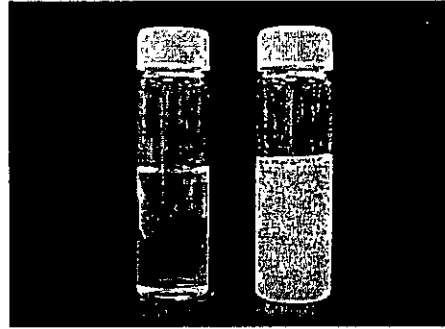
**LAVADO DE SUELOS  
(FLUSHING)**

**Aplicación de agentes tensoactivos  
para modificar la tensión  
superficial y movilizar  
contaminantes**

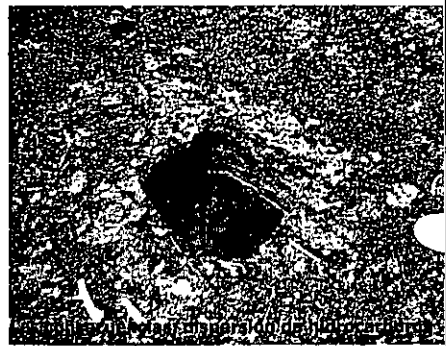


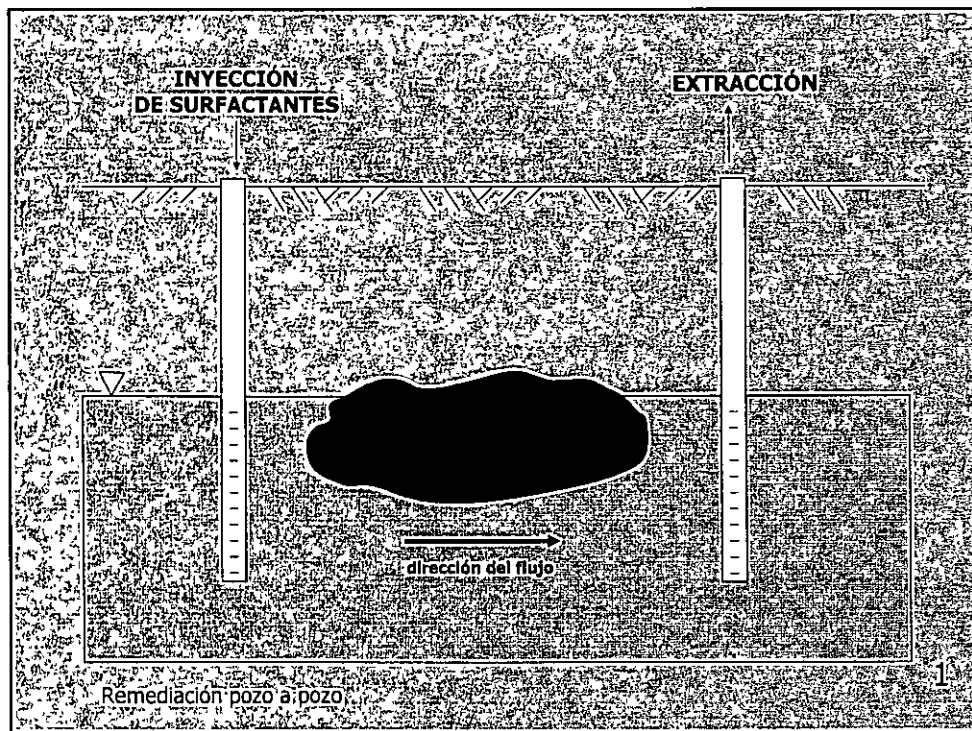
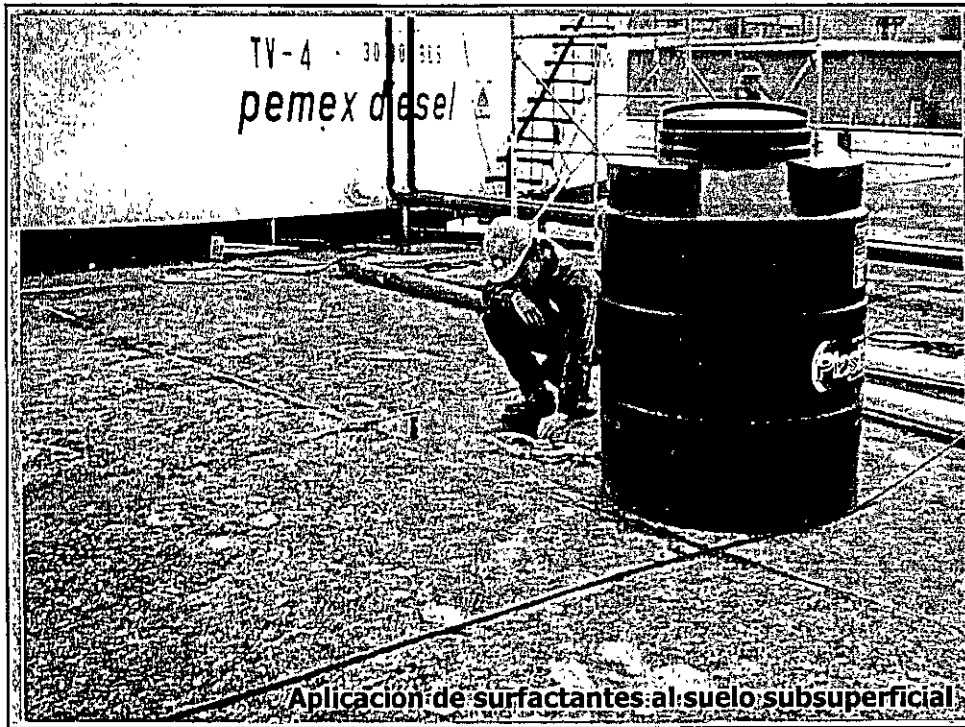


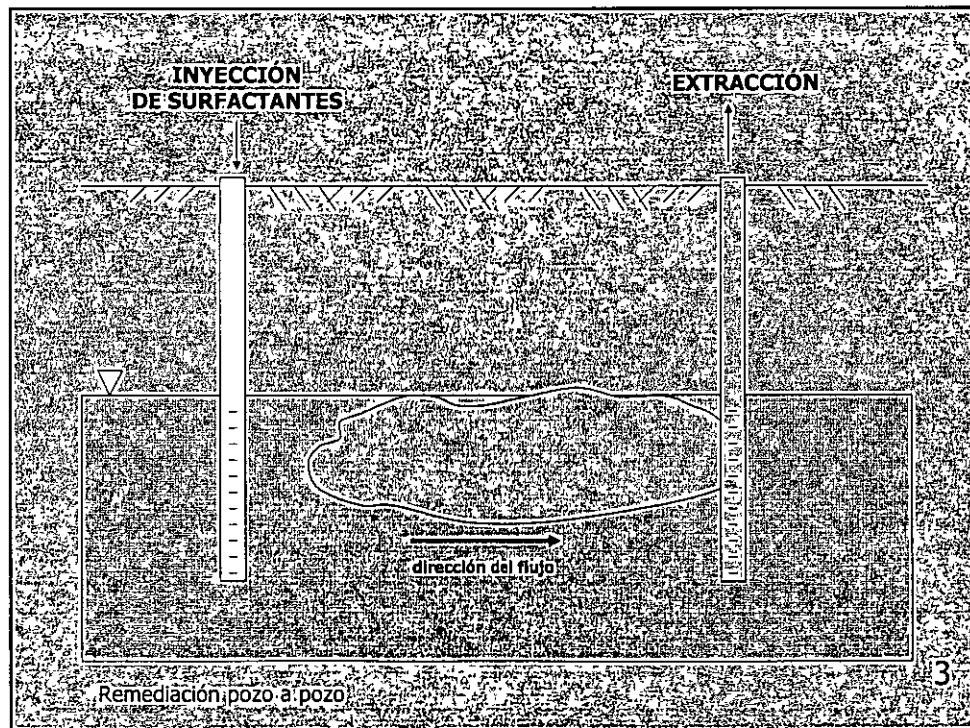
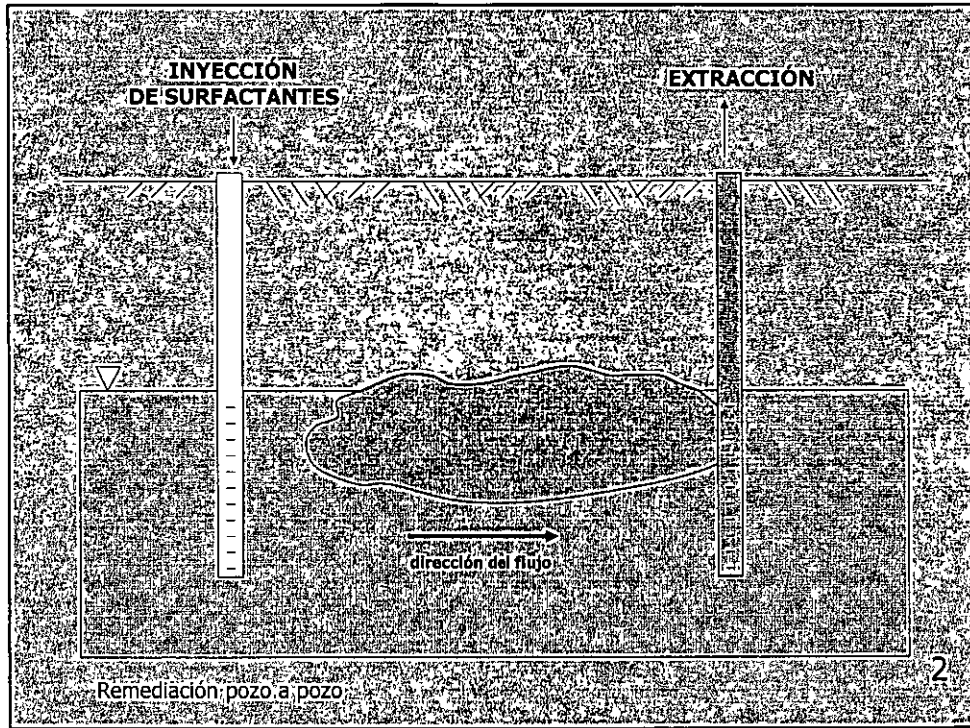
**Acción de los  
agentes tensoactivos  
sobre los  
hidrocarburos**

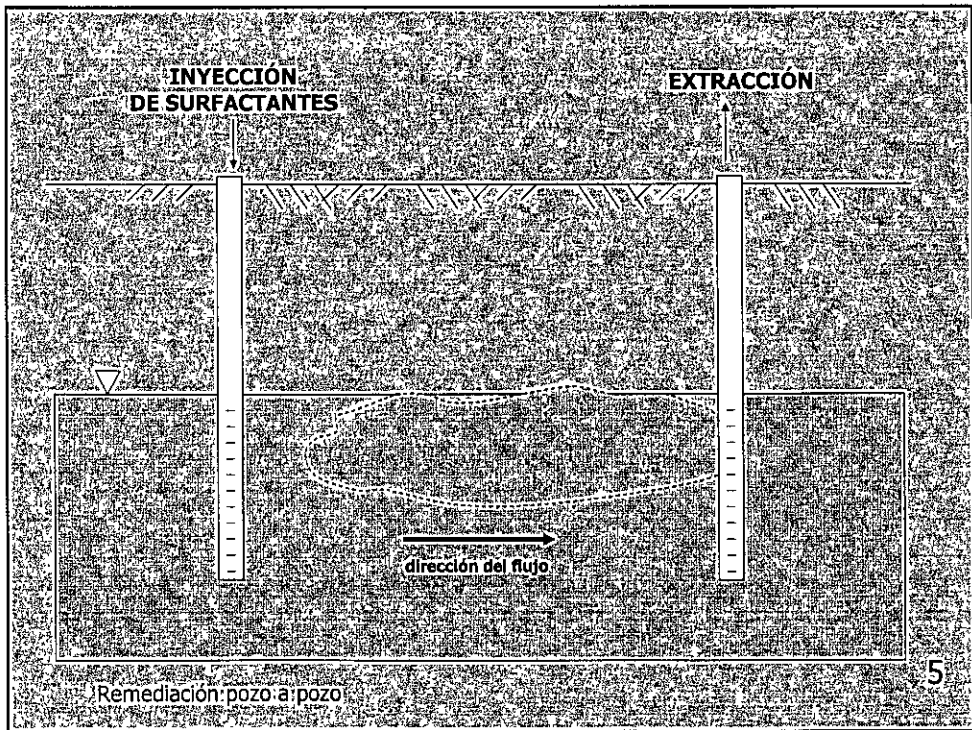
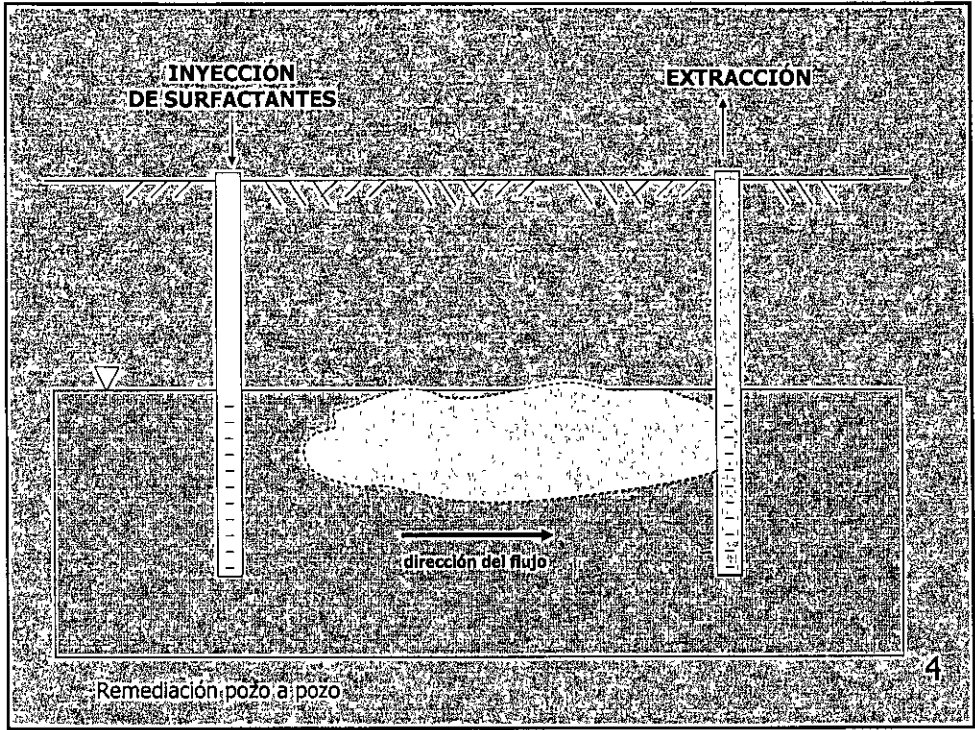


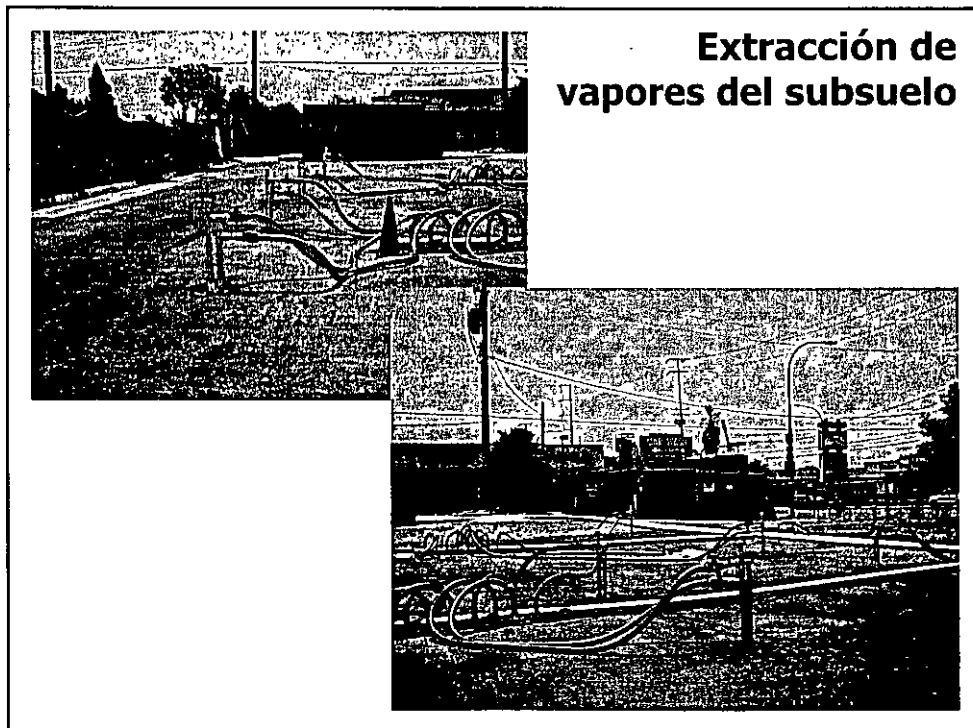
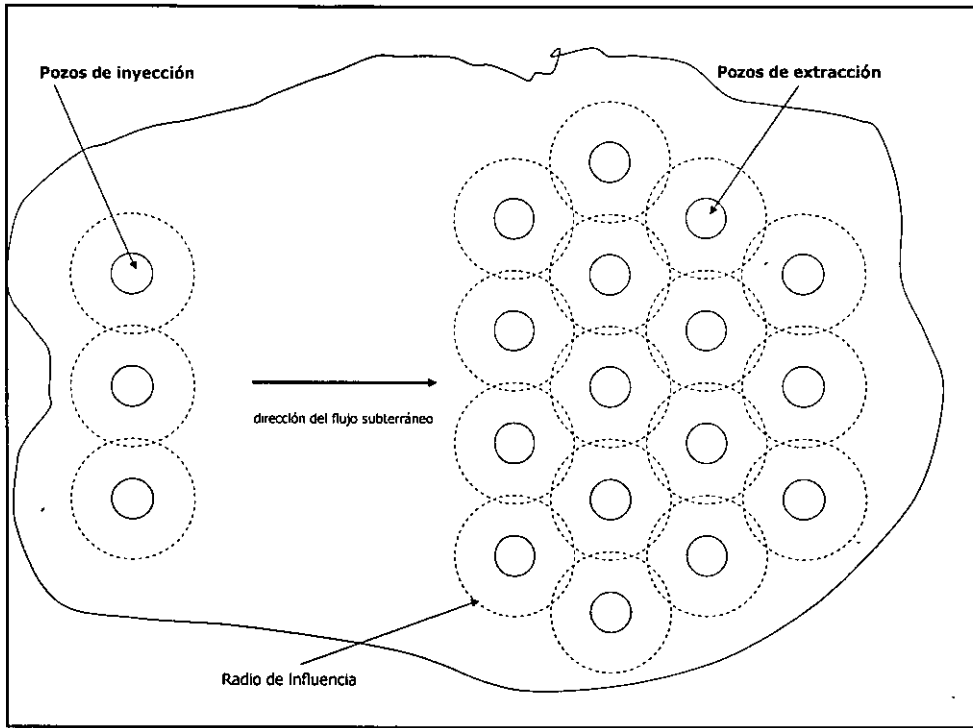
**APLICACIÓN  
DE SURFACTANTES**

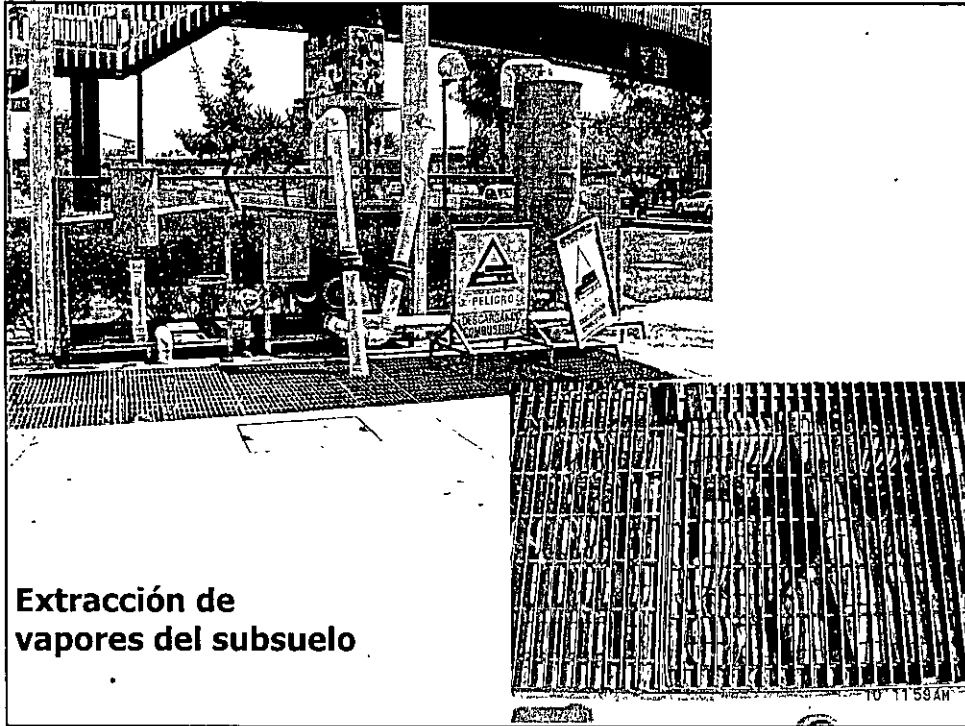


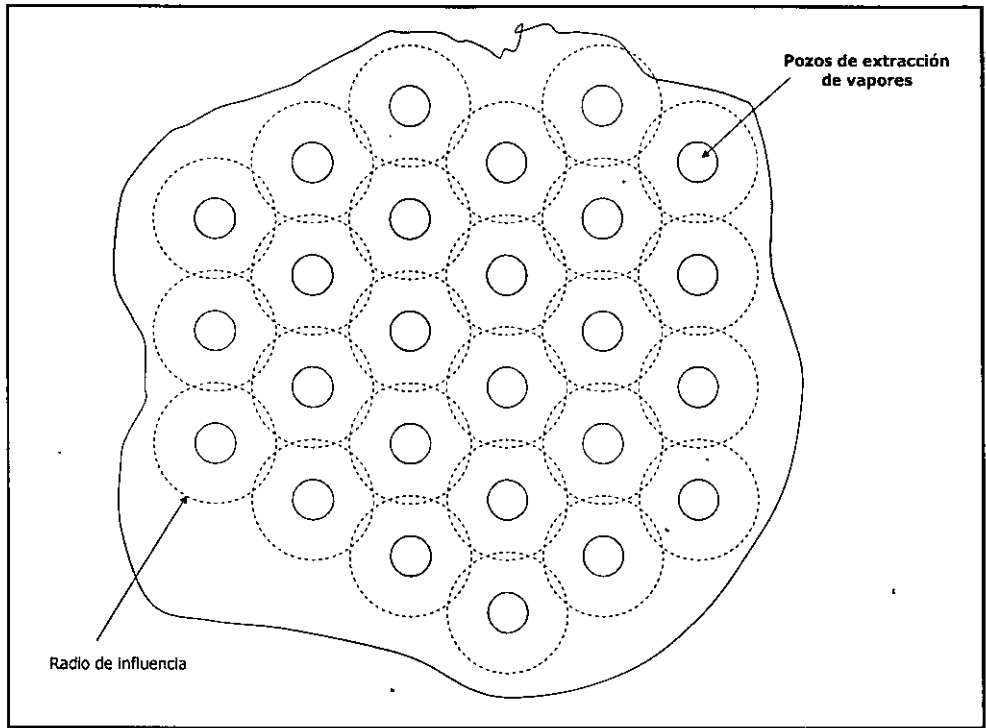










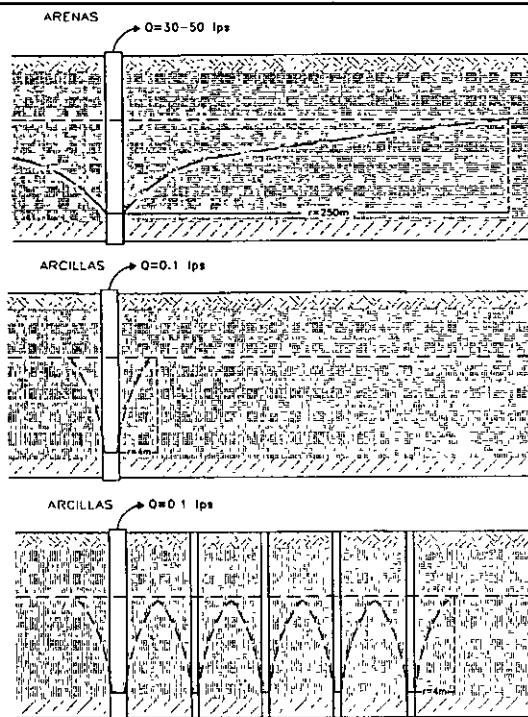


<b>PERMEABILIDAD</b>	
ARCILLA	$10^{-10}$ m/seg
LIMO	$10^{-8}$ m/seg
ARENA FINA	$10^{-6}$ m/seg
ARENA MEDIA	$10^{-4}$ m/seg
ARENA GRUESA	$10^{-2}$ m/seg
	K →

<b>MOVIMIENTO DE FLUIDOS EN EL SUBSUELO</b>	
ARCILLA	LENTO     RAPIDO
LIMO	
ARENA FINA	
ARENA MEDIA	
ARENA GRUESA	

## RADIO DE INFLUENCIA DE POZOS

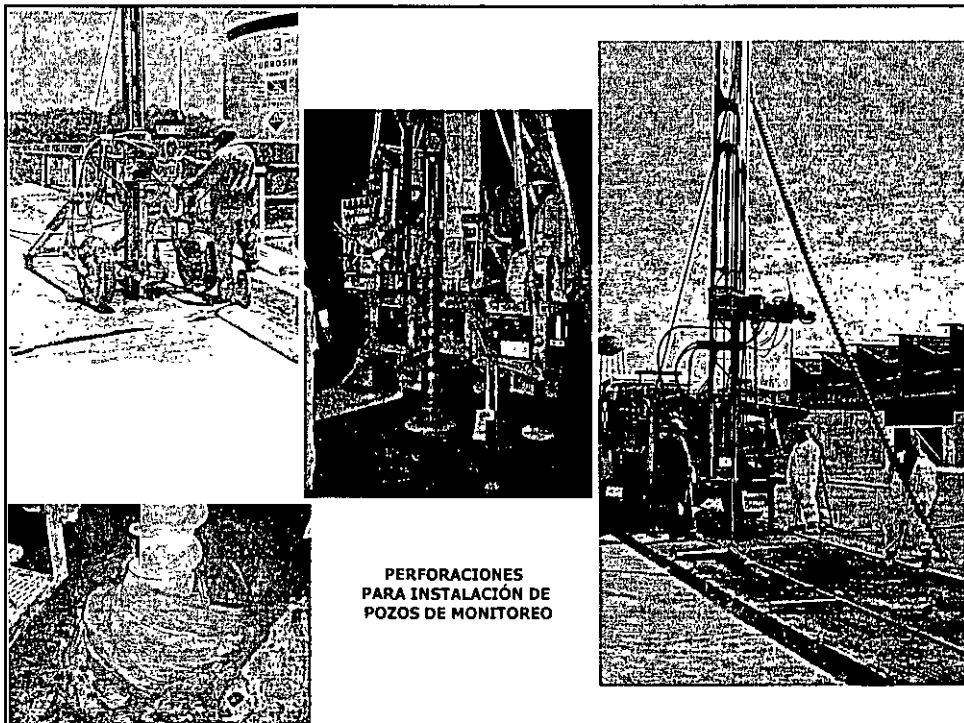
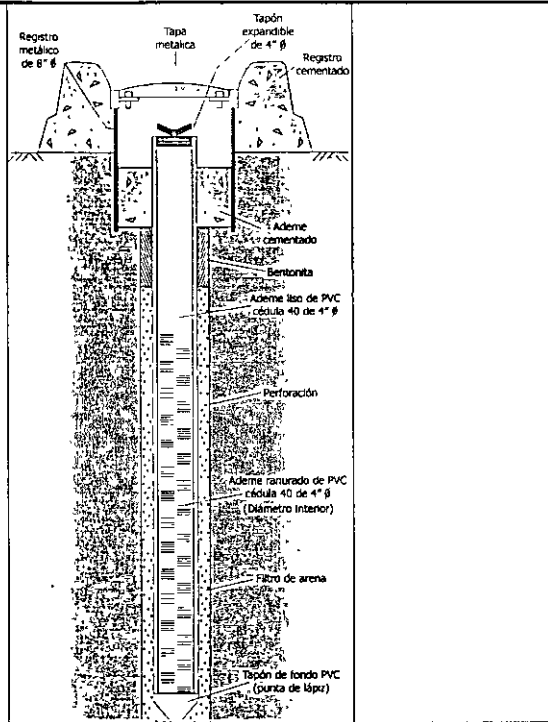


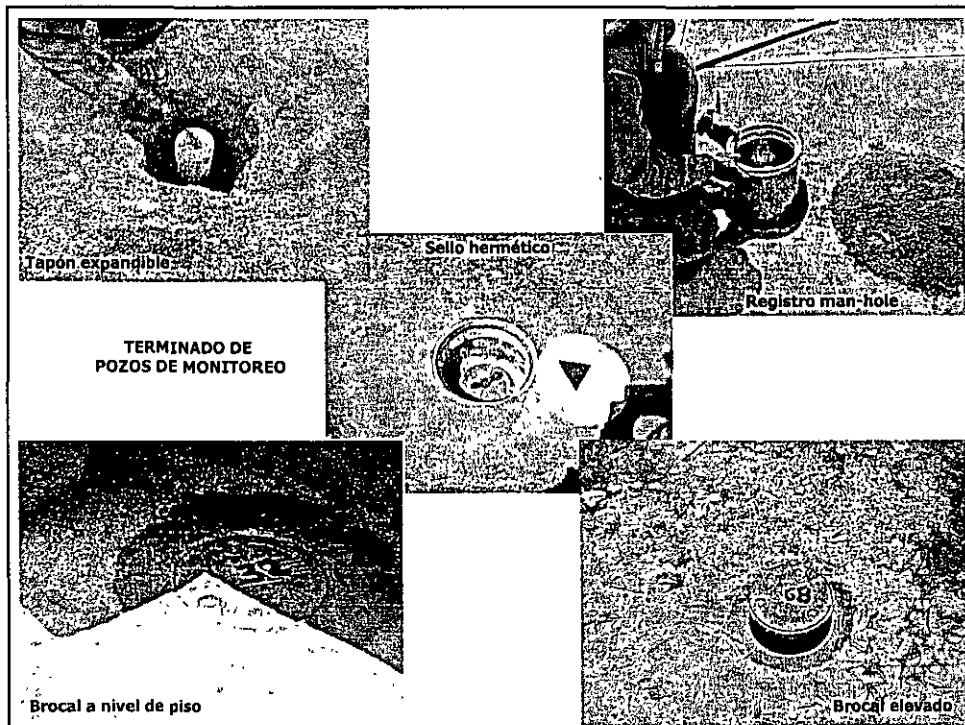
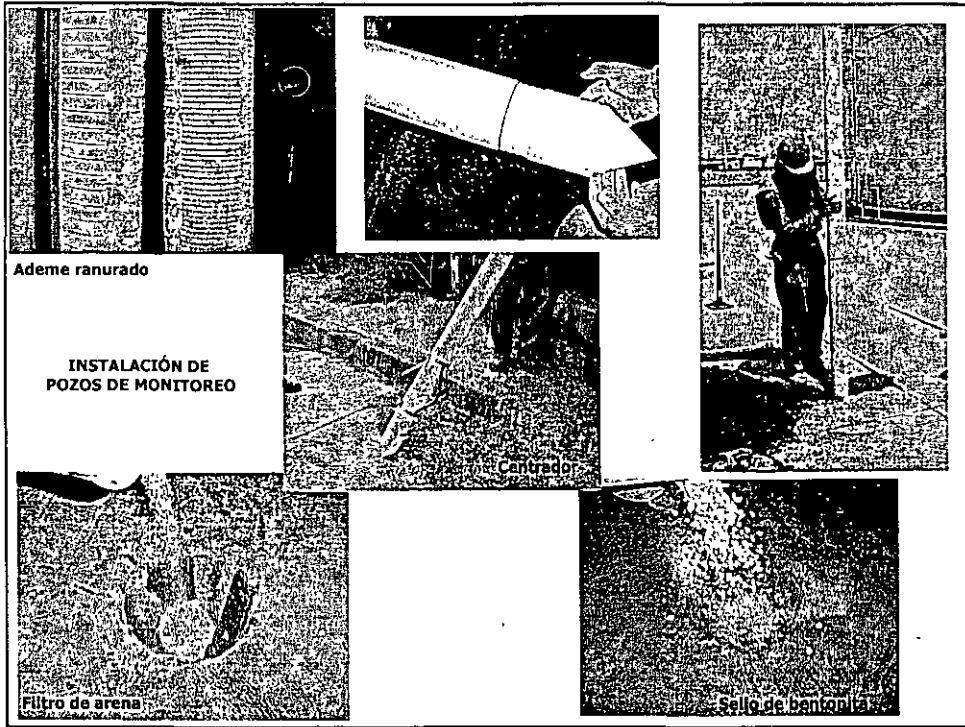
## TÉCNICAS UTILIZADAS (Agua subterránea)

- Extracción de producto libre  
(pozos / galerías)
- Extracción de agua y tratamiento por venteo
  - Filtración
  - Coagulación / Floculación
  - Ozonización
- Paredes permeables

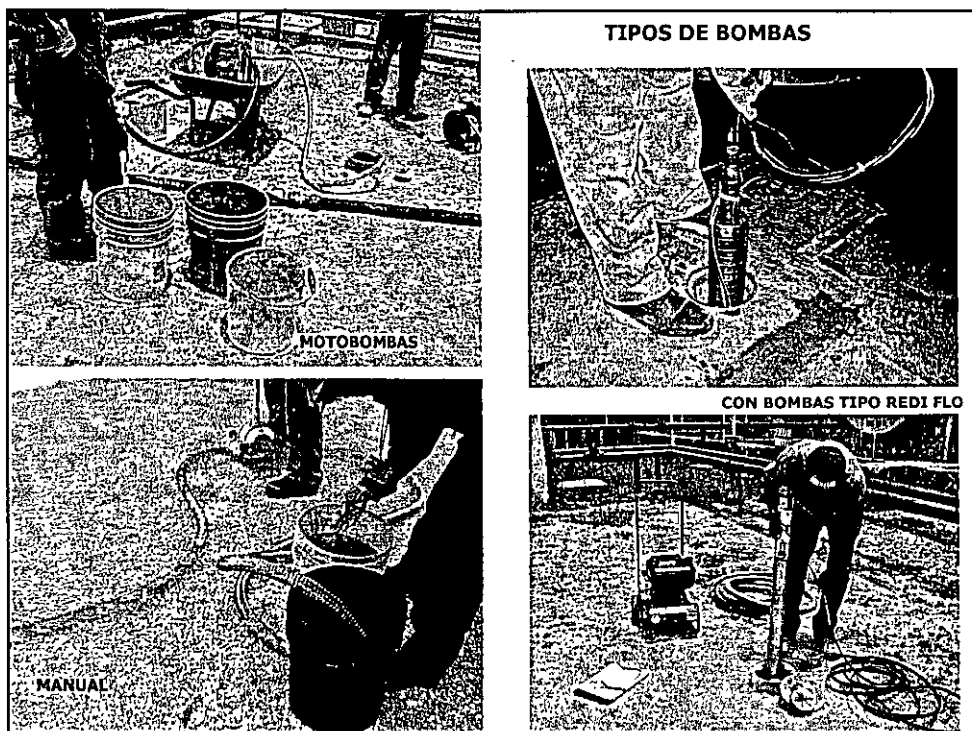


**Diseño de terminación  
de pozos de monitoreo  
y/o extracción de producto libre**









## REMEDIACIÓN ACTIVA

---

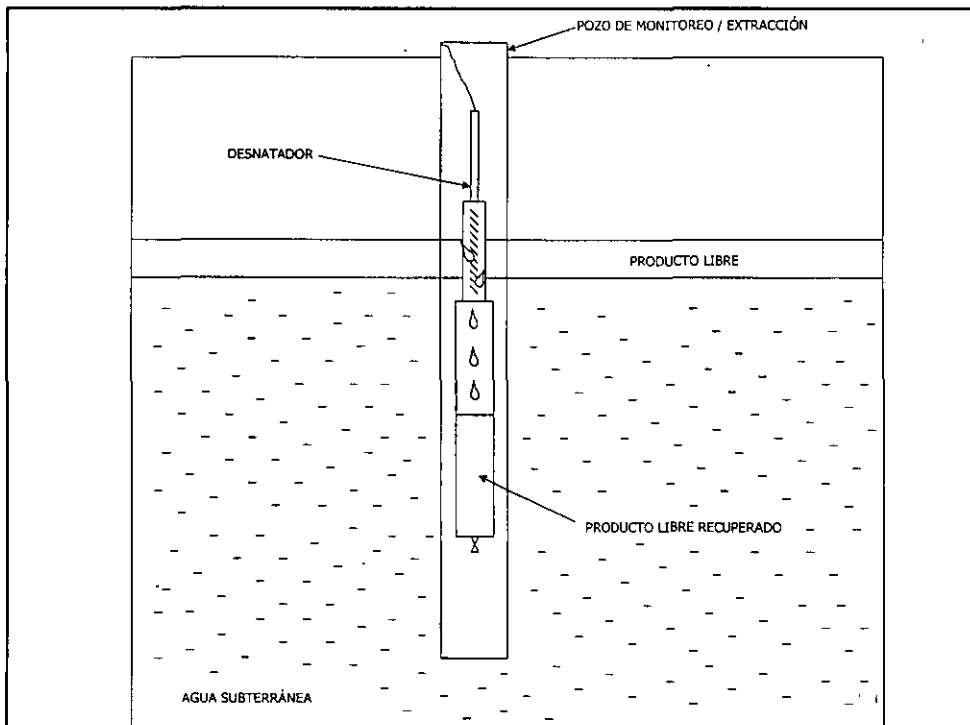
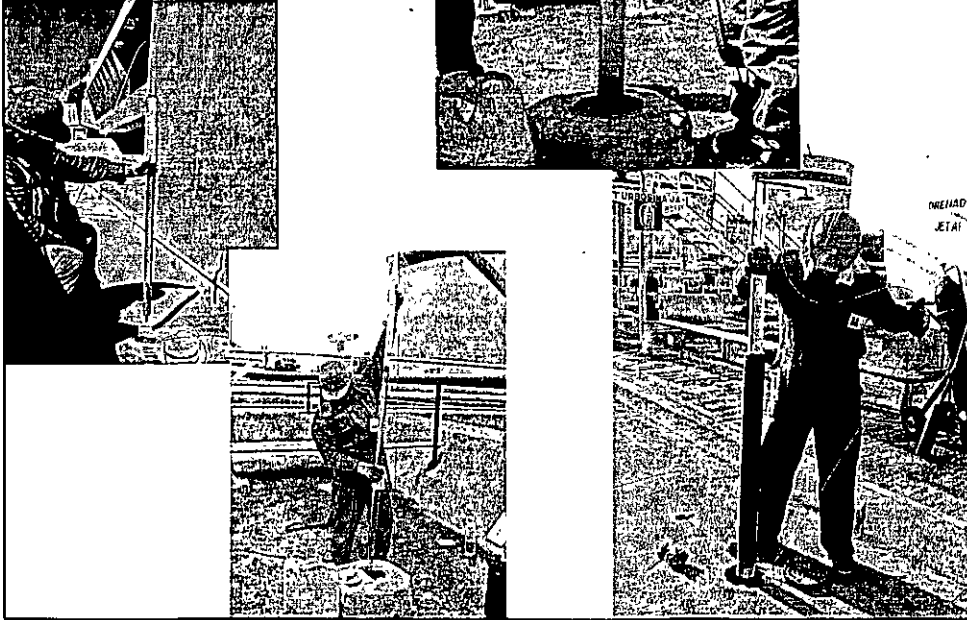
### VENTAJAS

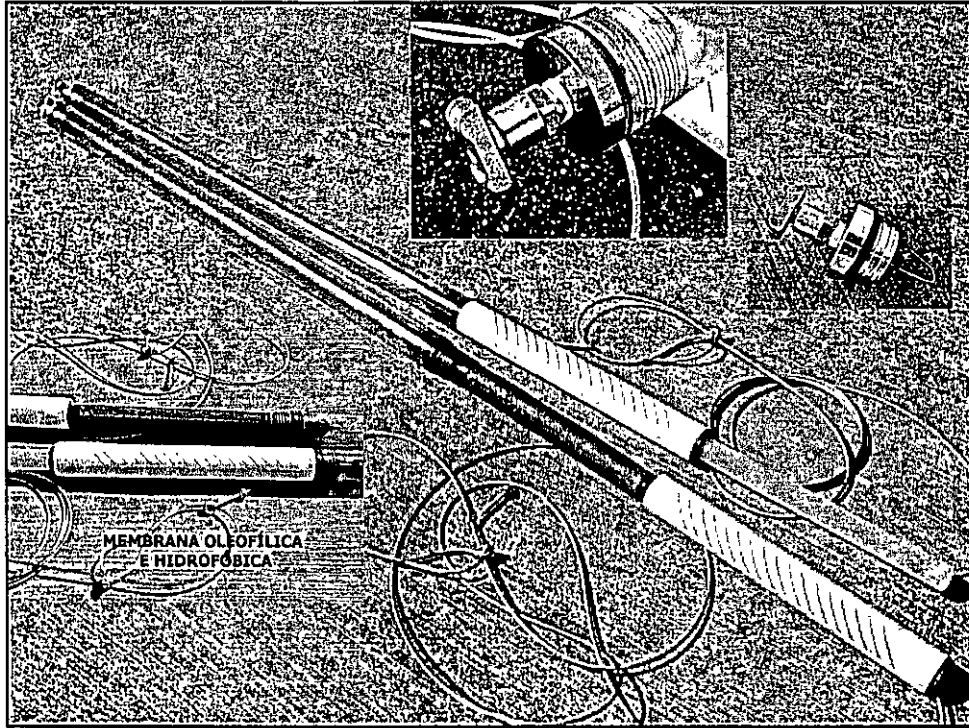
- ✓ Rápida extracción (tiempos cortos)
- ✓ Muy útil cuando existen espesores importantes

### DESVENTAJAS

- ✓ Alto costo, mucha labor
- ✓ Dificultades administrativas para el seguimiento
  - ✓ Rápido agotamiento de los pozos
- ✓ Extracción inminente de grandes volúmenes de agua
- ✓ Reinyección del agua al subsuelo previo tratamiento
- ✓ Lento goteo del combustible adsorbido en el suelo, hacia el acuífero

**REMEDIACIÓN PASIVA:  
CON AYUDA DE DESNATADORES  
(SKIMMERS)**





## REMEDIACIÓN PASIVA

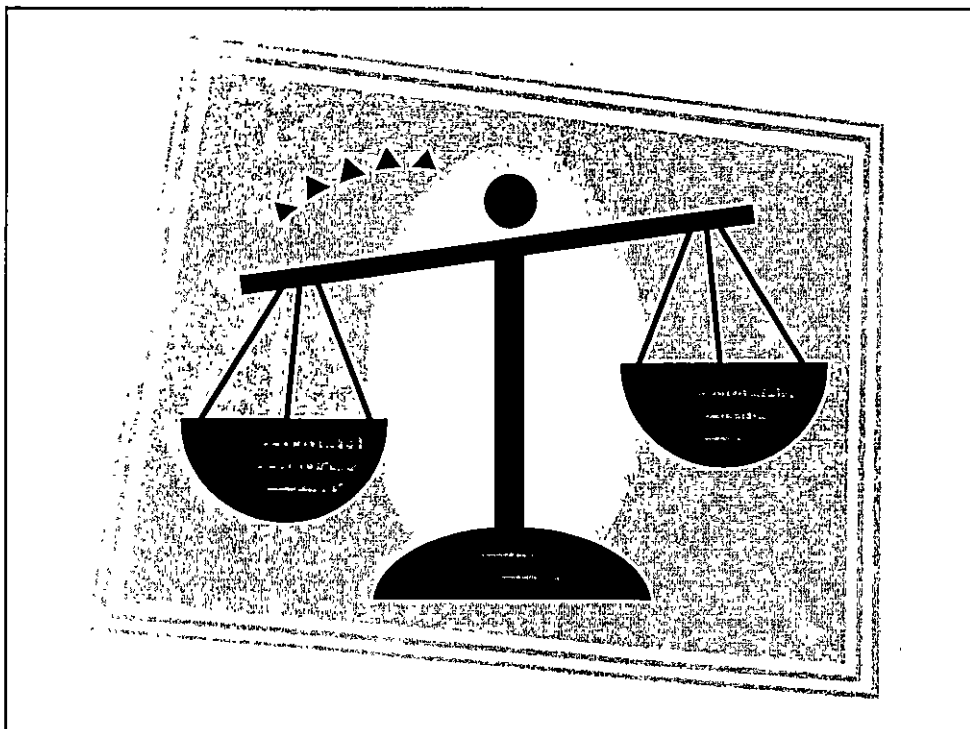
---

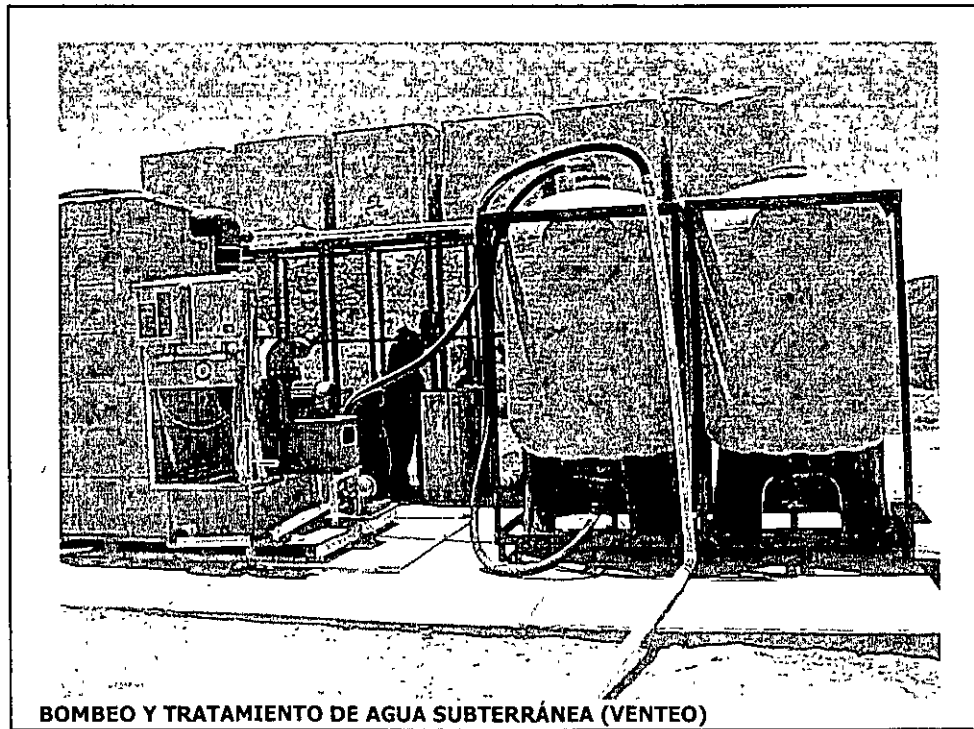
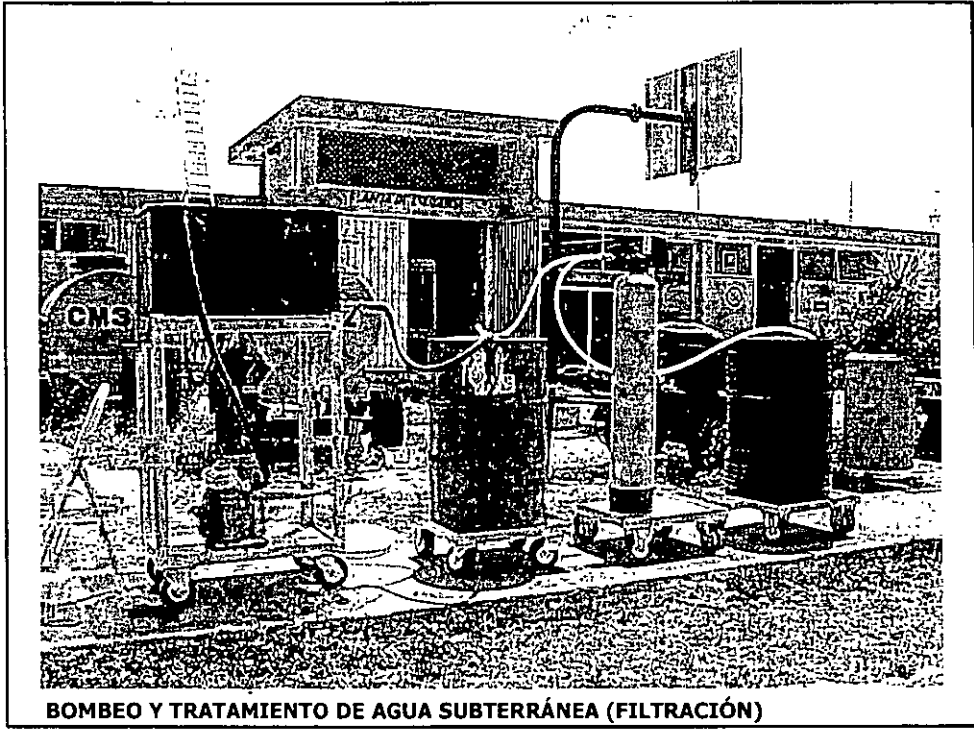
### VENTAJAS

- ✓ Bajo costo
- ✓ Mínimo espacio requerido para la labor
- ✓ Lo puede realizar personal de la propia institución
- ✓ Recuperación únicamente de producto libre, no de agua subterránea
- ✓ Acumulación del producto libre en función de las condiciones naturales
- ✓ Solución segura

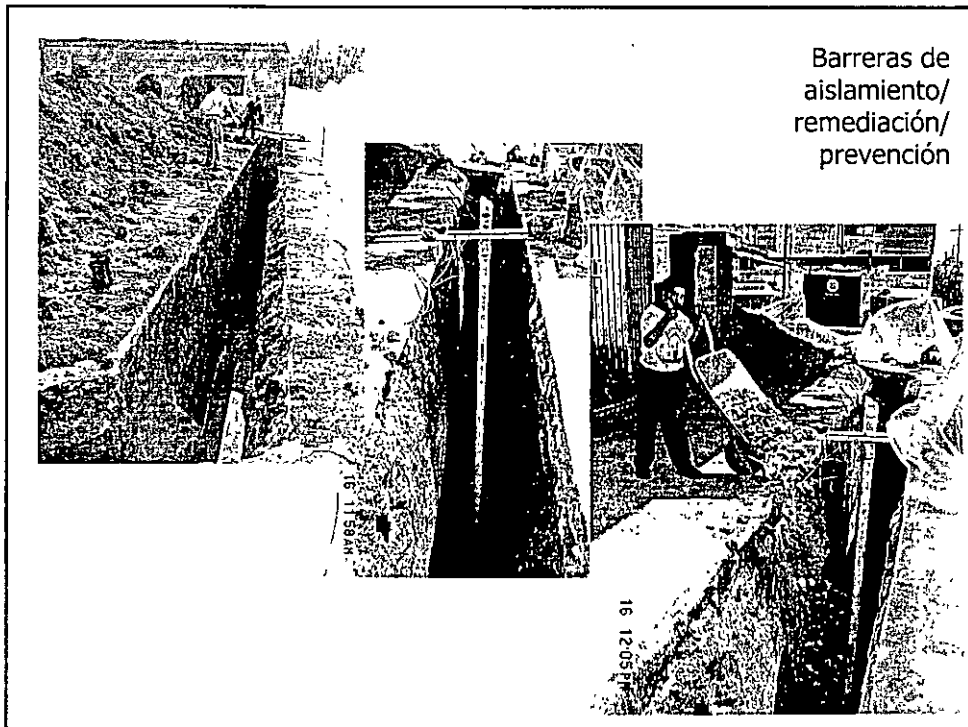
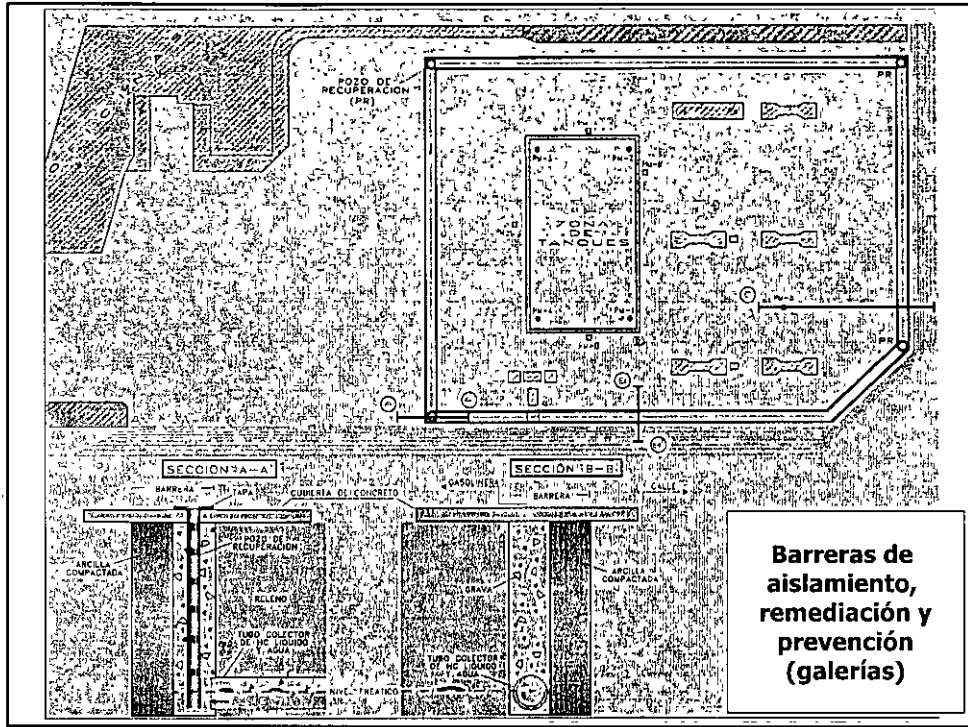
### DESVENTAJAS

- ✓ Largos tiempos

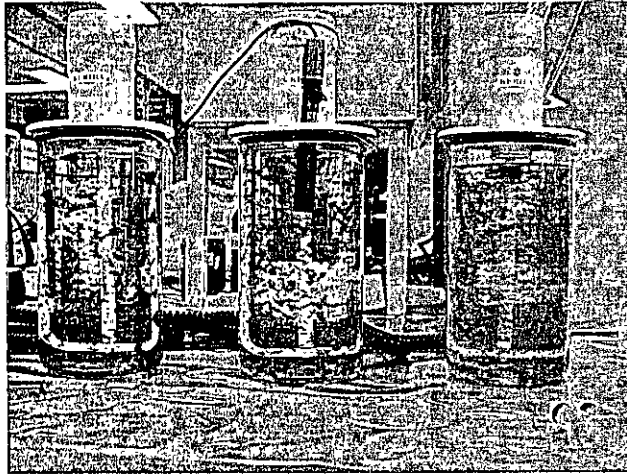




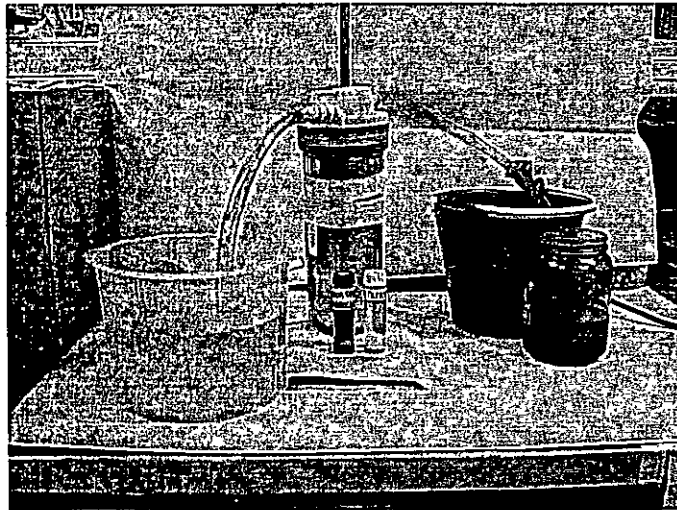


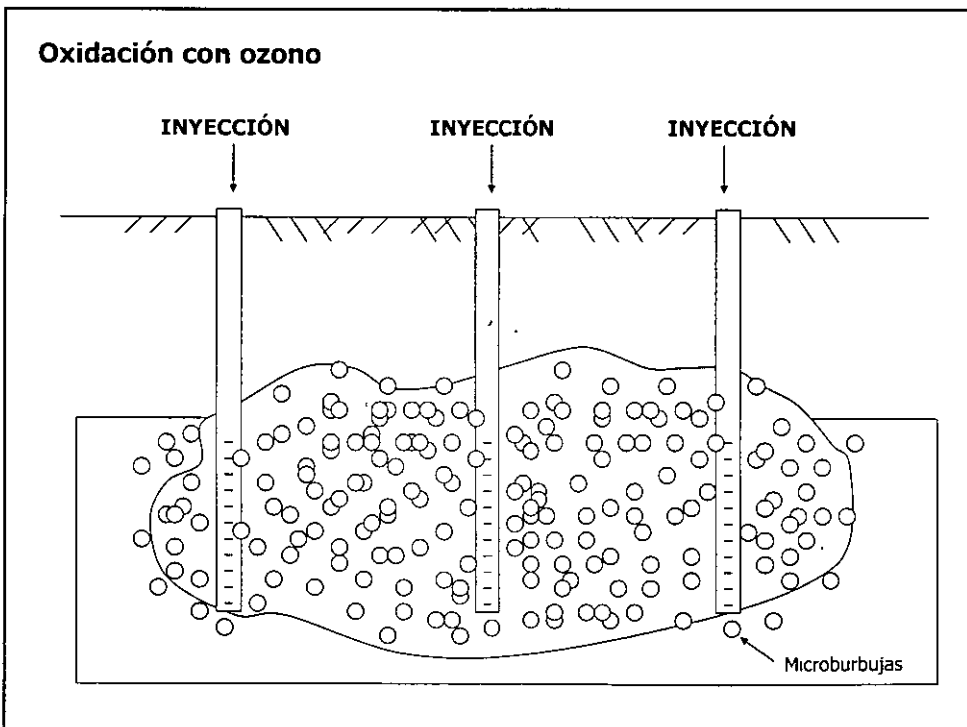
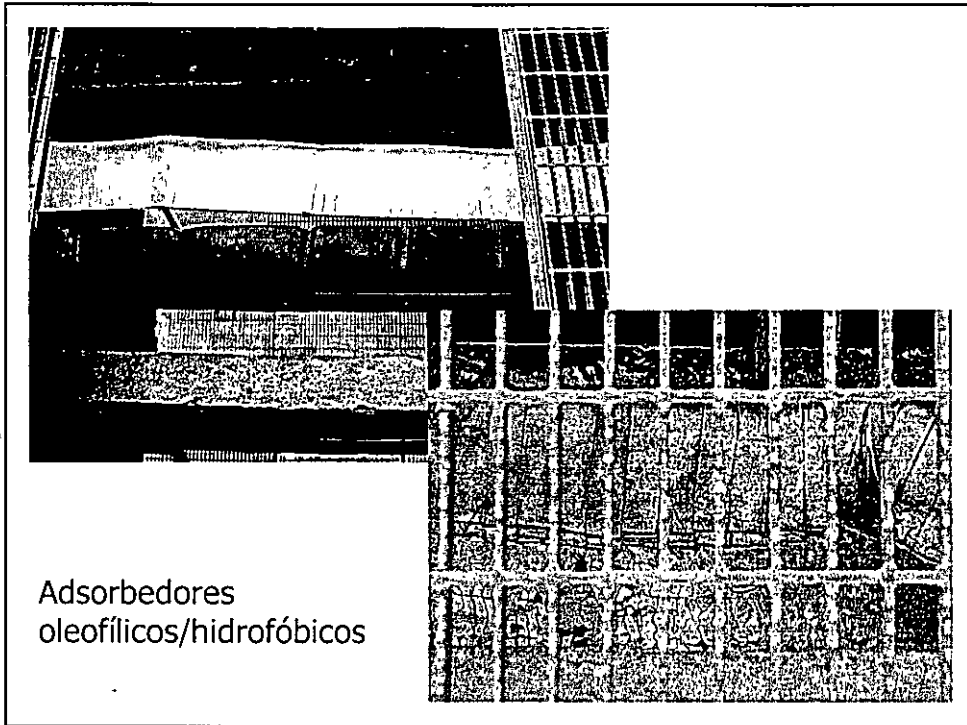


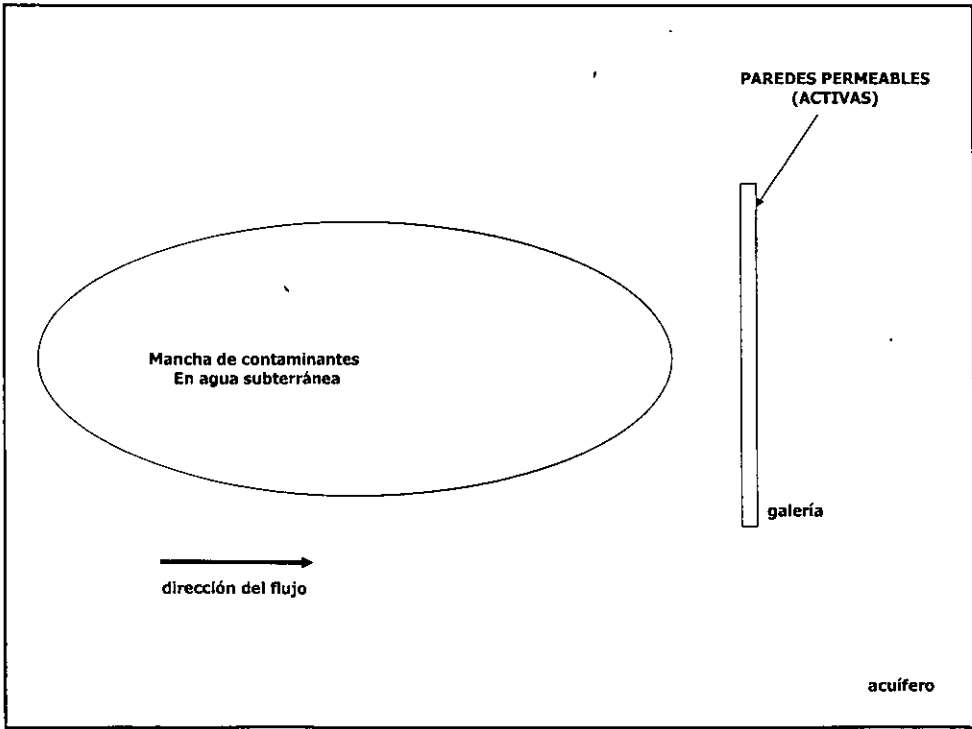
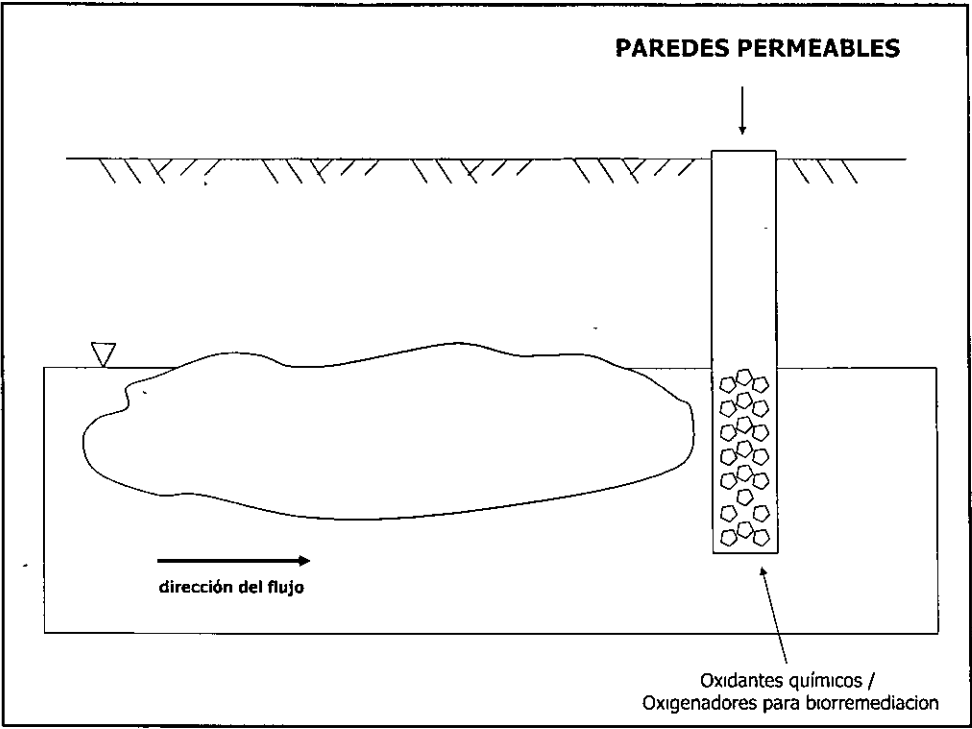
## Coagulación - floculación

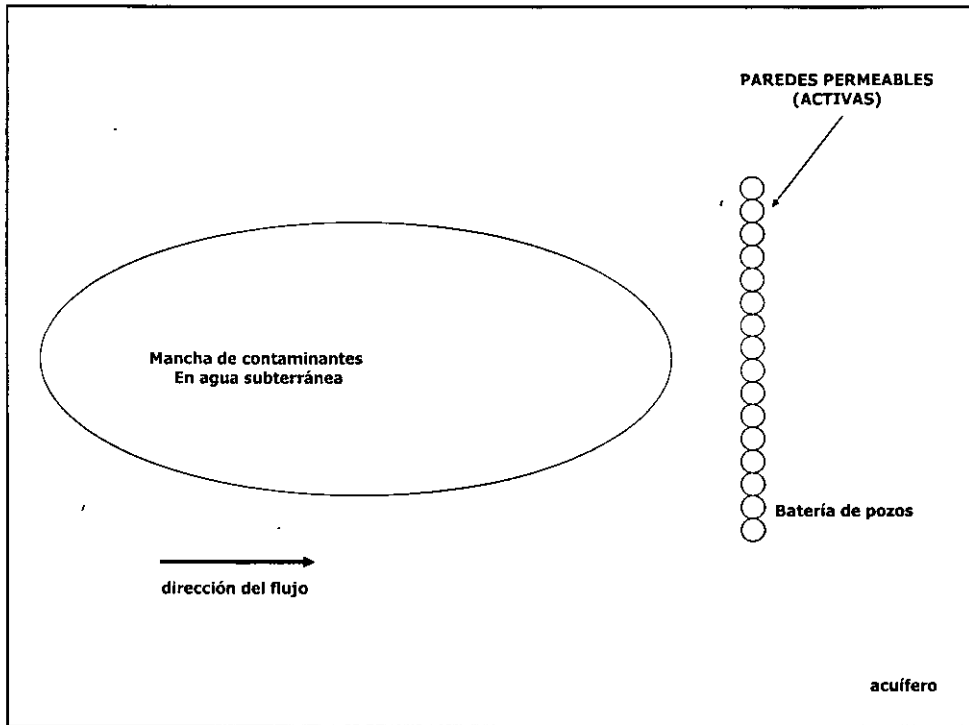


## Filtros oleofílicos/hidrofóbicos









### POSIBLES USOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA SANEADA

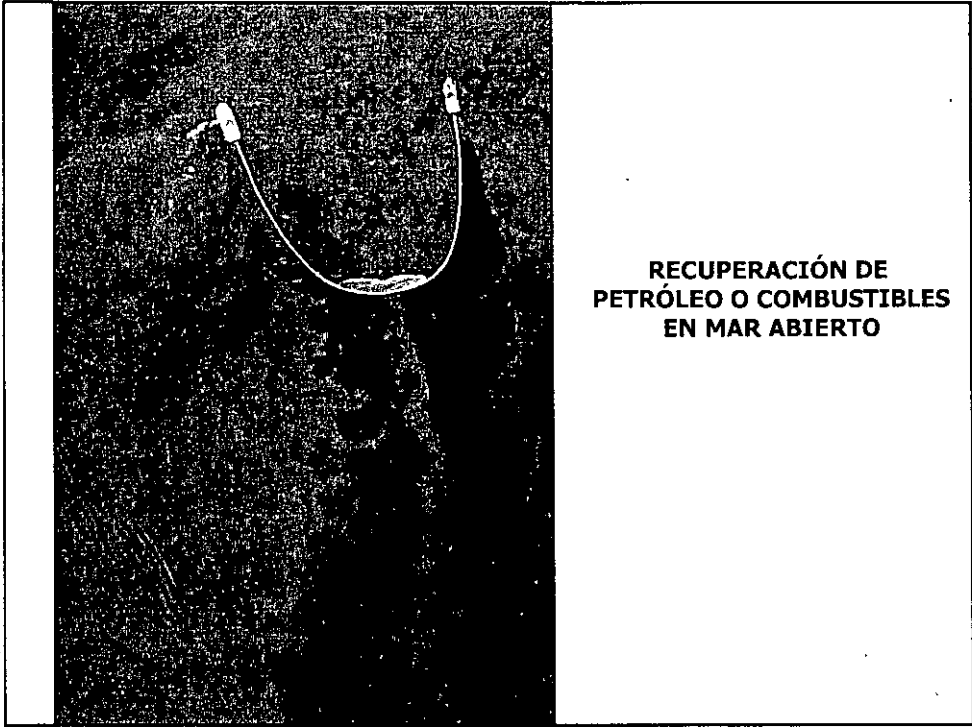
Reinyección al acuífero para mantener la estabilidad del terreno

Riego ornamental

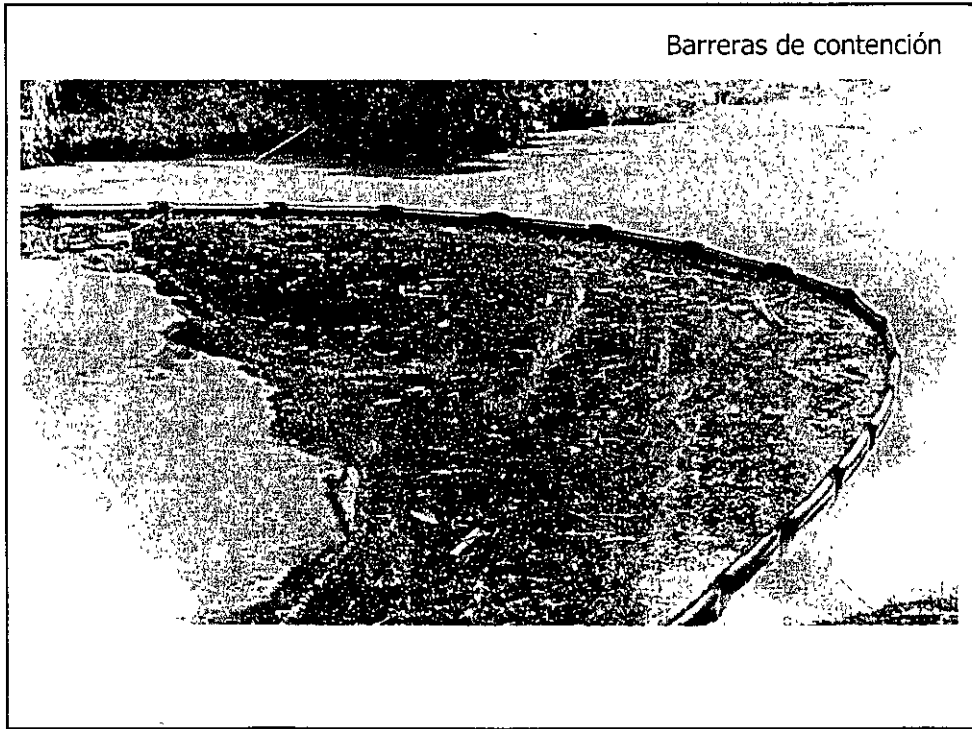
Uso urbano no-potable

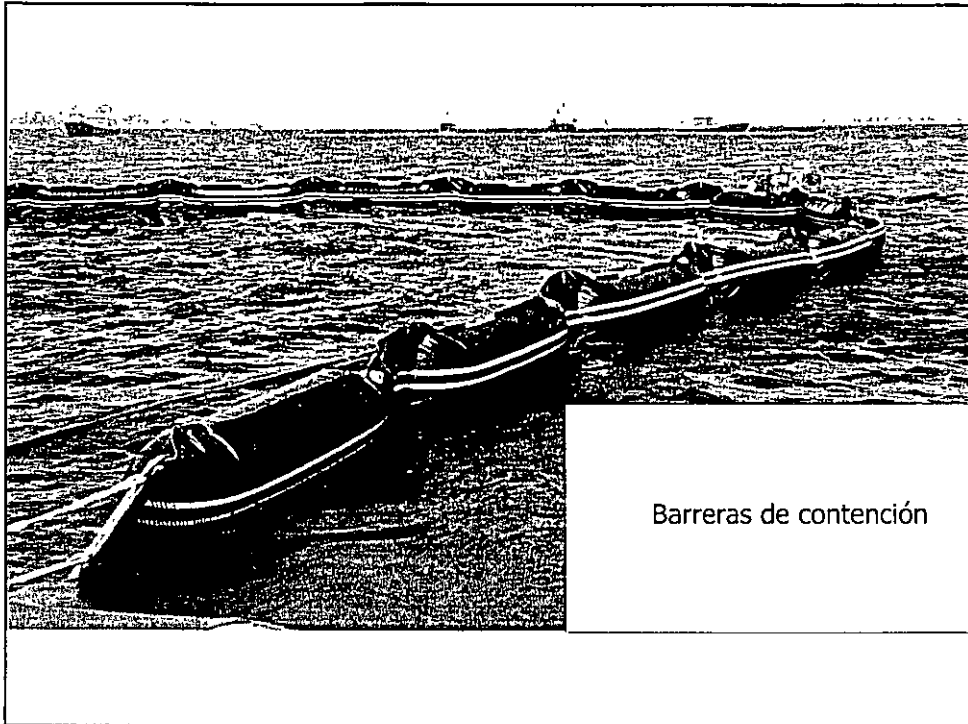
Uso industrial o comercial

Nota importante: verificar ausencia de trihalometanos después de la cloración



**RECUPERACIÓN DE  
PETRÓLEO O COMBUSTIBLES  
EN MAR ABIERTO**

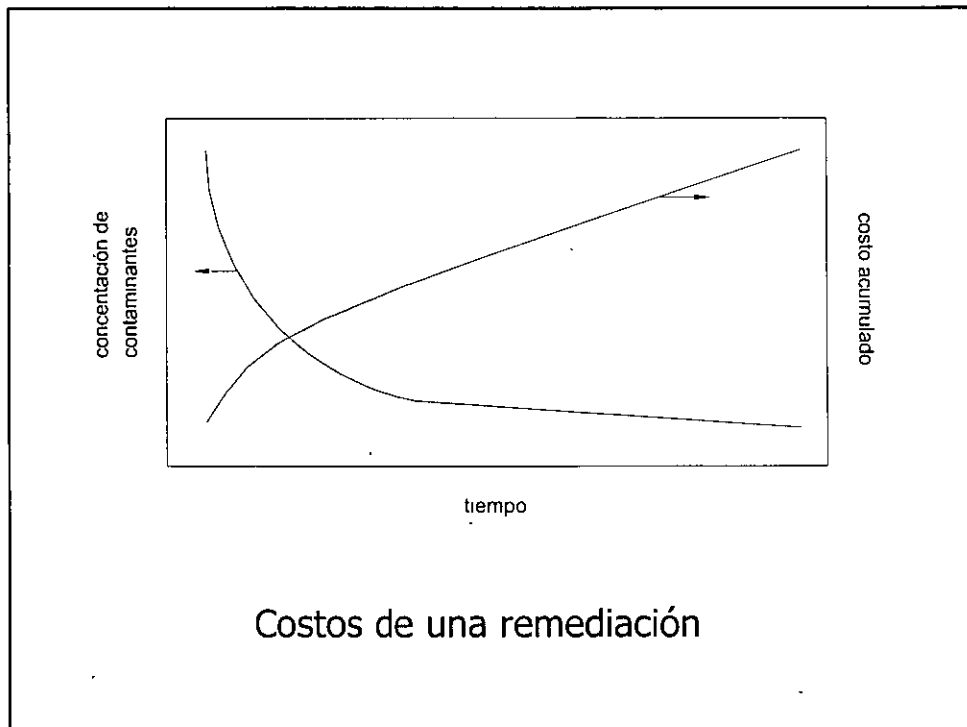




Barreras de contención

### COSTOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

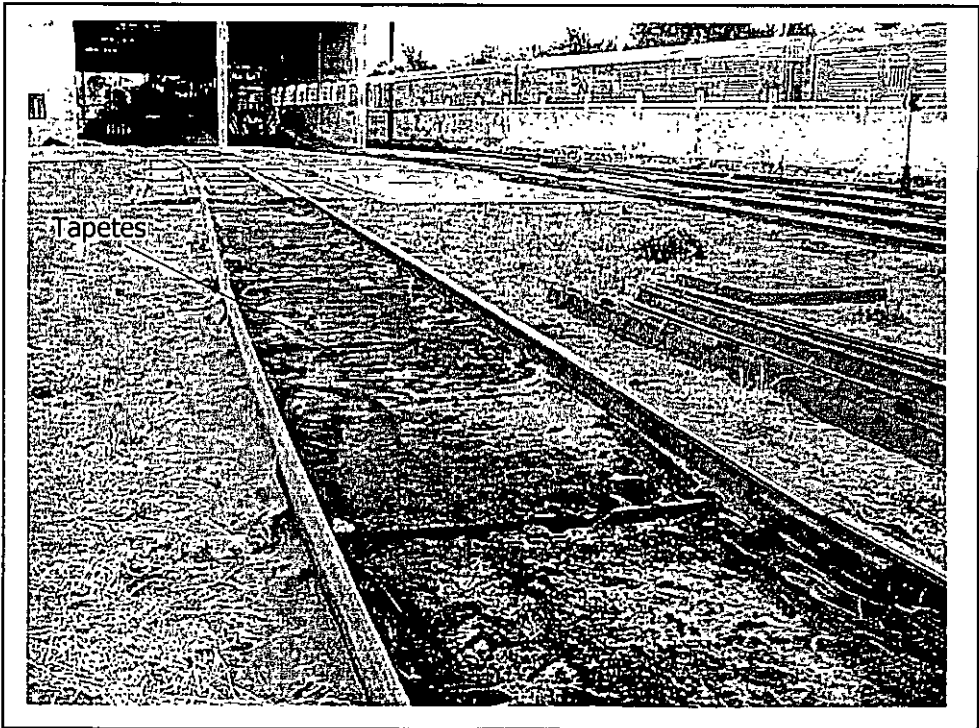
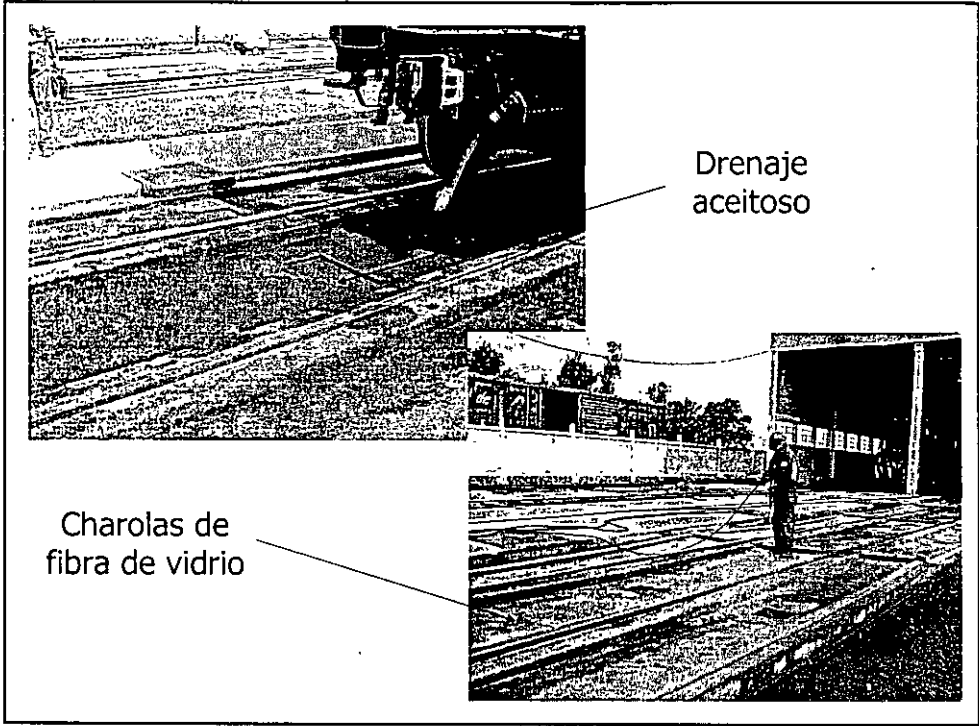
Técnica de remediación	\$ M.N. / m <sup>3</sup> suelo
Oxidación química	200 - 700
Biorremediación	50 - 600
Confinamiento	500 - 800
Lavado	600 - 900
Incineración	1 000 - 1 200
Estabilización	400 - 700

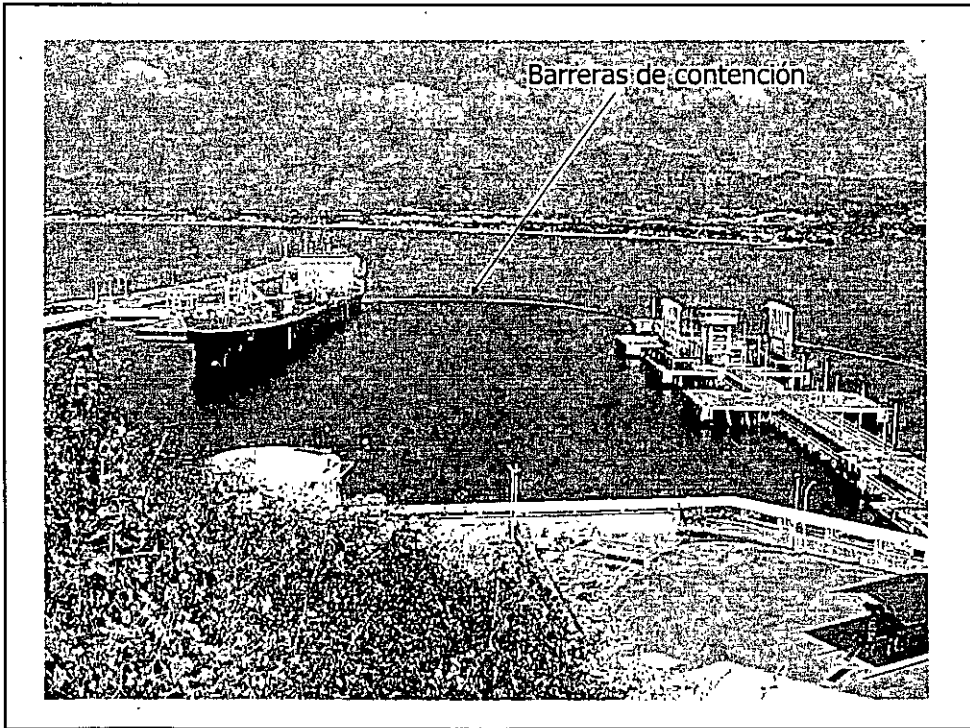
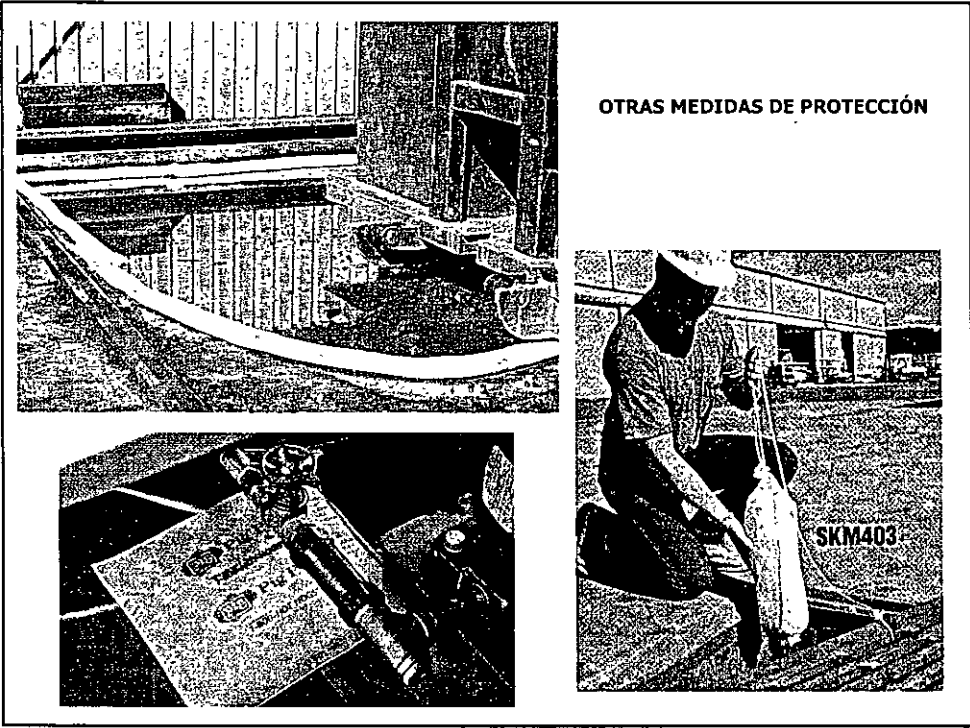


## **PREVENCIÓN**

**Medidas para reducir  
situaciones peligrosas  
y por ende,  
daños a la salud  
y al ambiente en general**







Monitoreo preventivo



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



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



...: Ciencias de la tierra

# **CURSOS ABIERTOS**

**TEMA:  
BIORREMEDIACIÓN**

Coordinador: Juan Manuel Lesser Illades  
Del 5 al 9 de Septiembre de 2005  
Palacio de Minería

# **BIORREMEDIACIÓN**

**Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

# **BIORREMEDIACIÓN**

**Técnicas para el saneamiento  
de suelos y cuerpos de agua  
contaminados  
mediante el uso de  
microorganismos vivos o sus enzimas que  
sean capaces de transformar o degradar  
contaminantes a compuestos inocuos**

## **CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN**

---

- √ **económicas: más baratas que otras tecnologías**
- √ **efectivas: los contaminantes son realmente transformados y muchos de ellos son mineralizados**
- √ **versátiles: el proceso se adapta a las condiciones del sitio según sus requerimientos**
- √ **seguras: amables con el ambiente**

## **En biorremediación pueden ocurrir reacciones de:**

- √ **Biodegradación**
- √ **Biotransformación**
- √ **Bioacumulación**

## **BIODEGRADACIÓN**

**CONTAMINANTES + MICROORGANISMOS + NUTRIENTES**



condiciones favorables  
(pH, oxígeno, humedad)

**BIÓXIDO DE CARBONO**

**MINERALIZACIÓN**

## **BIOTRANSFORMACIÓN**

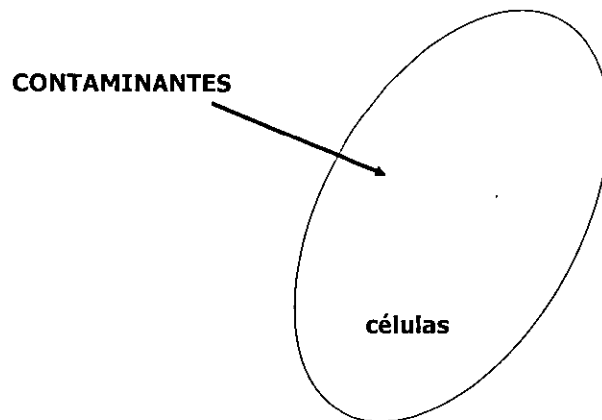
**CONTAMINANTES + MICROORGANISMOS + NUTRIENTES**



condiciones favorables  
(pH, oxígeno, humedad)

**COMPUESTOS QUÍMICAMENTE DIFERENTES**

## BIOACUMULACIÓN



LA BIORREMEDIACIÓN FUNCIONA PARA  
COMPUESTOS ORGÁNICOS  
BIODEGRADABLES O BIOTRANSFORMABLES  
PRESENTES EN SUELOS Y CUERPOS DE AGUA

NO FUNCIONA PARA  
COMPUESTOS RECALCITRANTES  
porque son no-biodegradables

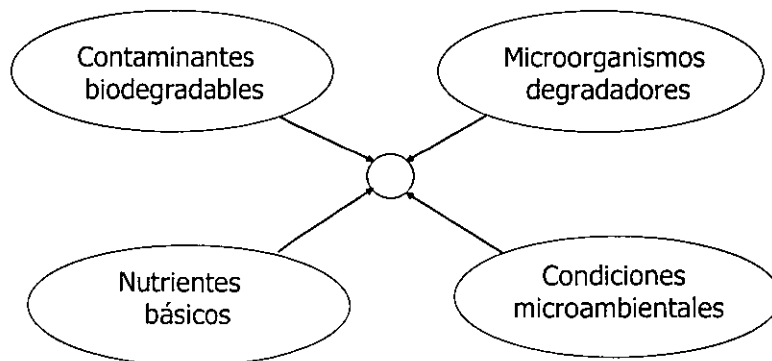


## CARACTERÍSTICAS MICROBIANAS DEL SUELO

---

- **Baja población microbiana cuantificable en el laboratorio (10<sup>6</sup> a 10<sup>7</sup> bacterias heterótrofas/g de suelo)**
  - **Microorganismos adheridos a la matriz del suelo**
  - **Microorganismos adaptados a una gran variedad de compuestos principalmente de tipo orgánico que satisfacen sus requerimientos nutricionales**
  - **Microorganismos adaptables a condiciones microambientales extremas**
- 

Para que ocurra la biorremediación se requiere ....



MICROORGANISMOS INVOLUCRADOS  
EN LA BIODEGRADACIÓN O BIOTRANSFORMACIÓN  
DE CONTAMINANTES AMBIENTALES

- **BACTERIAS**
  - HONGOS
  - LEVADURAS
- ACTINOMICETOS
  - ALGAS

**ATRIBUTOS DE LAS BACTERIAS**

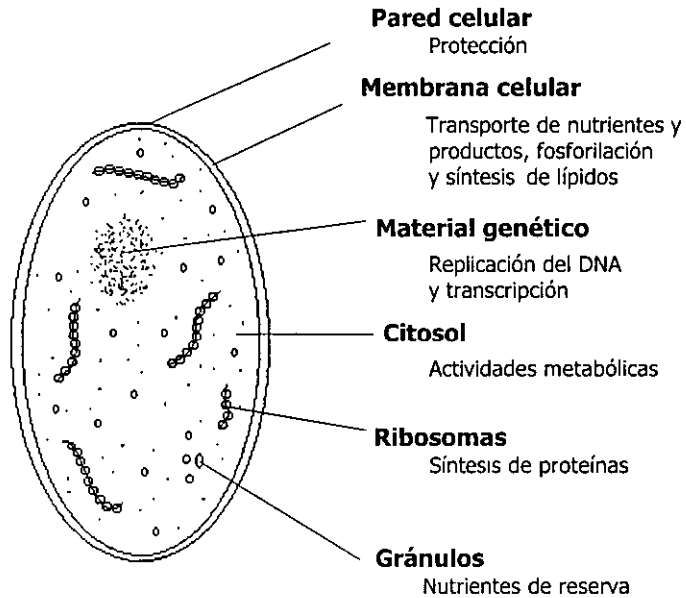
---

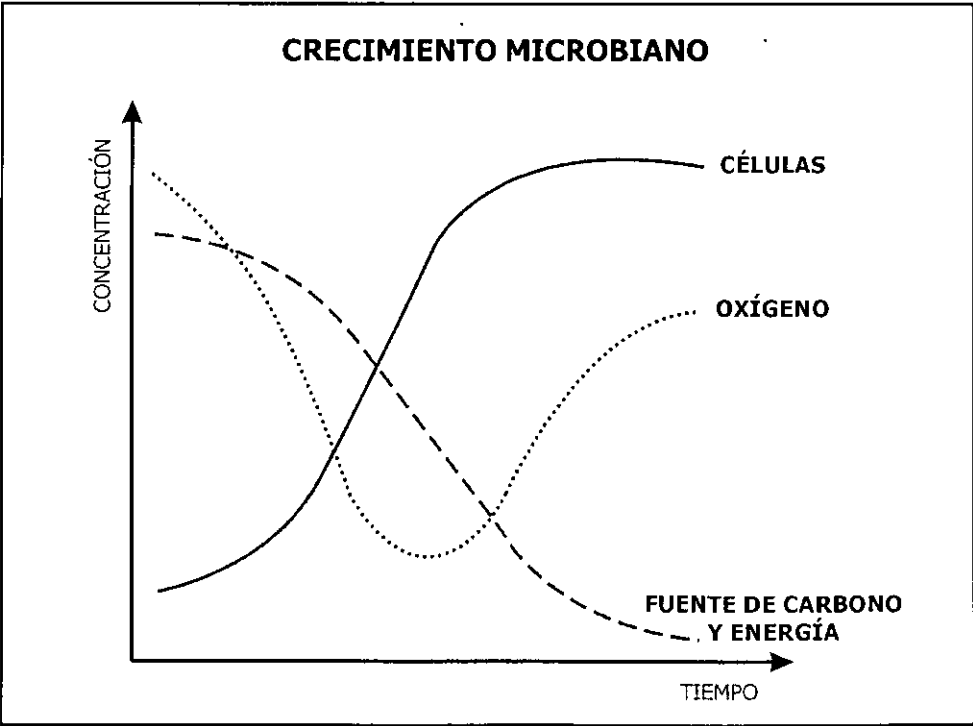
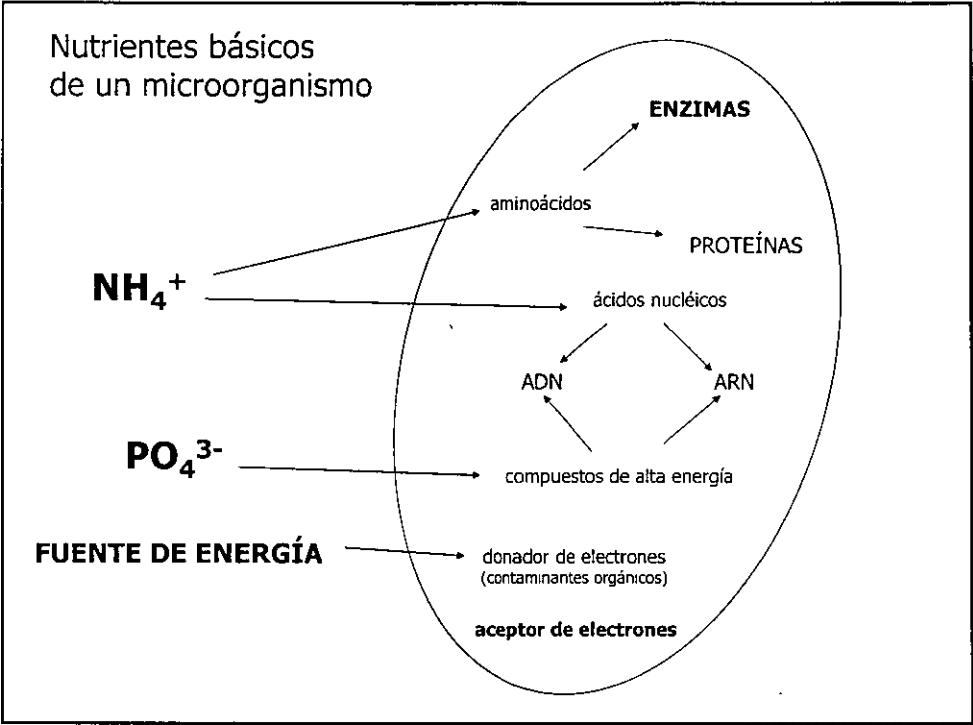
- **fueron los primeros organismos pobladores del planeta**
  - **tienen una velocidad de crecimiento mayor que la de otros microorganismos**
  - **tienen la más amplia versatilidad bioquímica**
    - alta frecuencia de mutación
    - transferencia de material genético (mediante plásmidos, transposones)
-

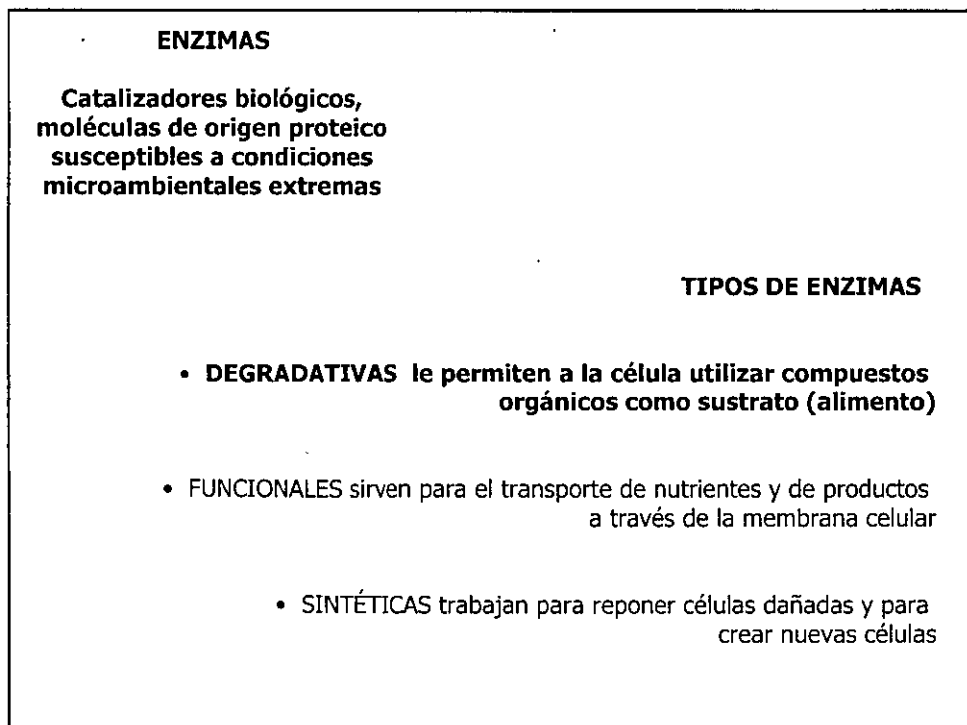
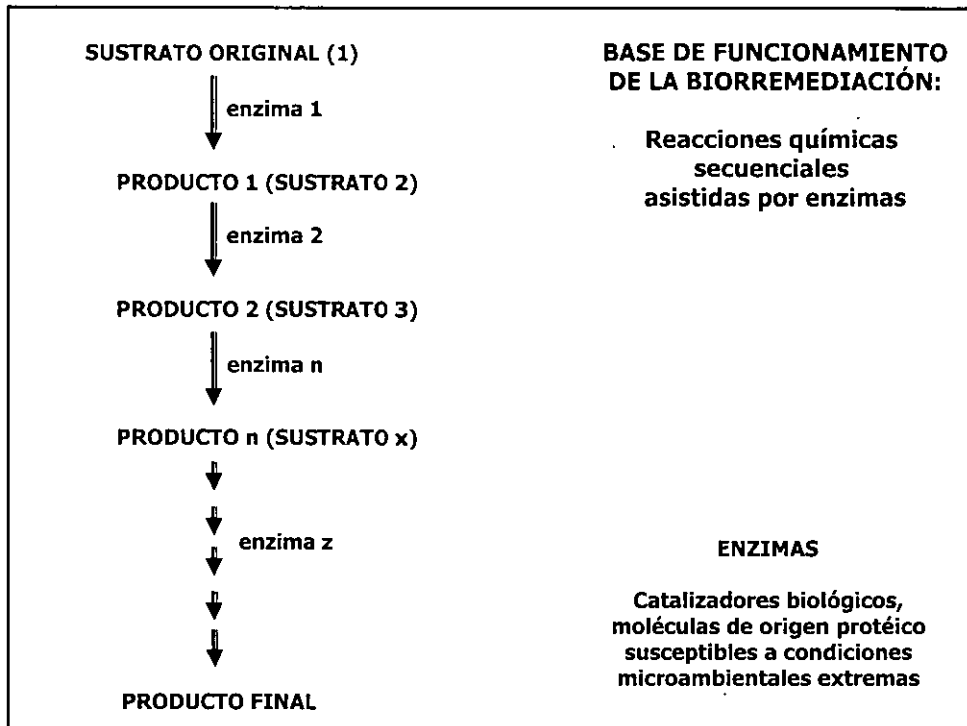
## INTERVALOS DE pH PARA EL CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS

	mínimo	óptimo	máximo
bacterias	3	7	10
levaduras	2	5	8
hongos	1	5	8

### ESTRUCTURA DE UNA BACTERIA







## EFFECTORES DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN EL SUELO

√ pH

√ temperatura

√ presencia de inhibidores

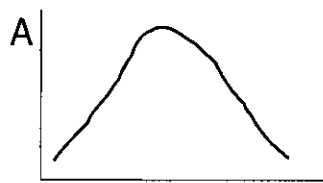
√ contenido de agua disponible

√ disponibilidad de aceptores finales de electrones

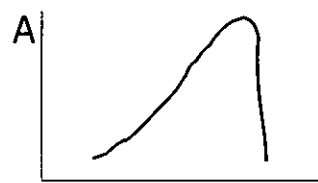
√ biodegradabilidad de los contaminantes

√ biodisponibilidad de los contaminantes

## RESPUESTA SOBRE LA ACTIVIDAD MICROBIANA (microbiana ~ enzimática ~ metabólica)



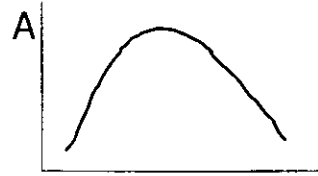
pH



Temperatura



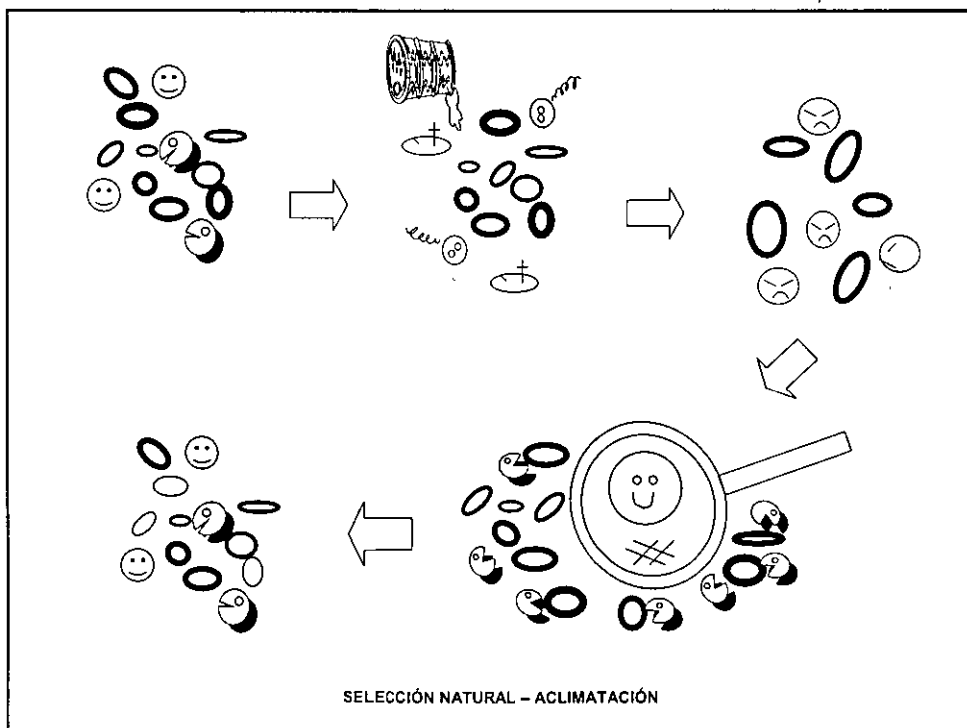
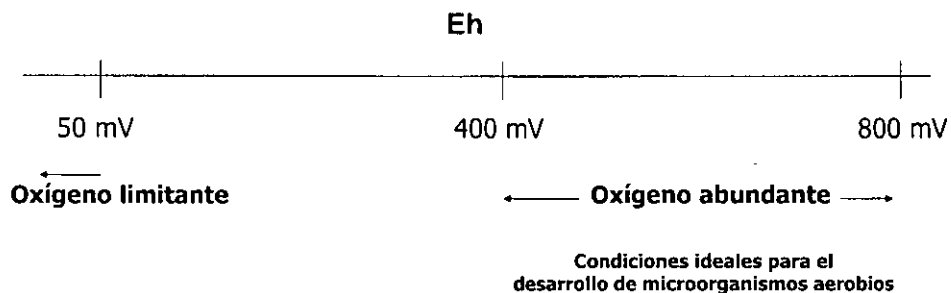
Inhibidores

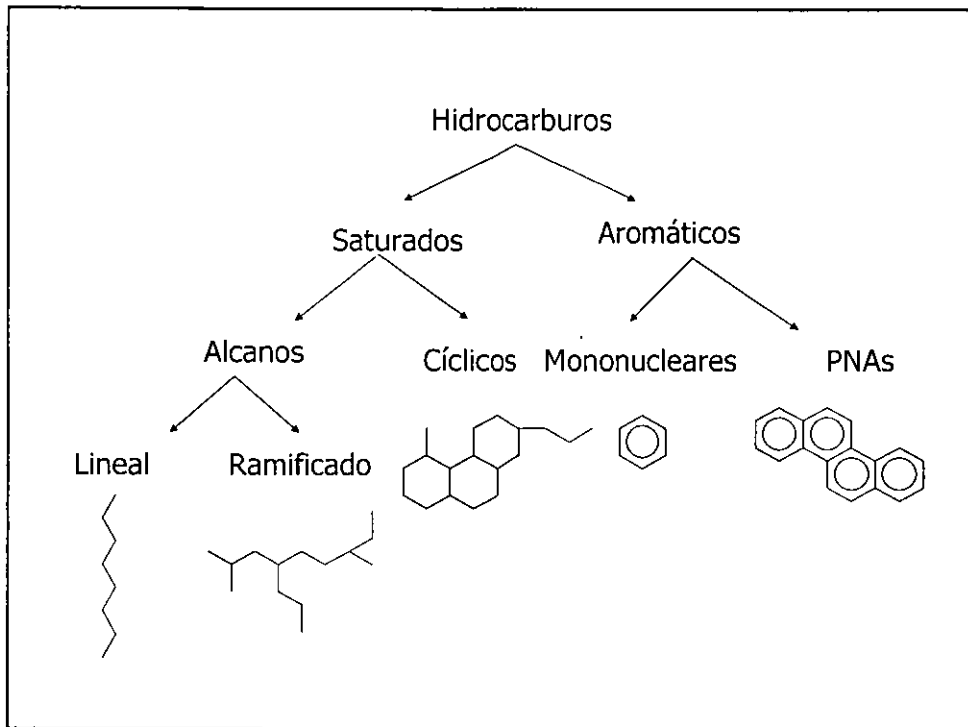


Agua disponible

## DISPONIBILIDAD DE OXÍGENO COMO ACEPTOR FINAL DE ELECTRONES

Potencial de oxido-reducción

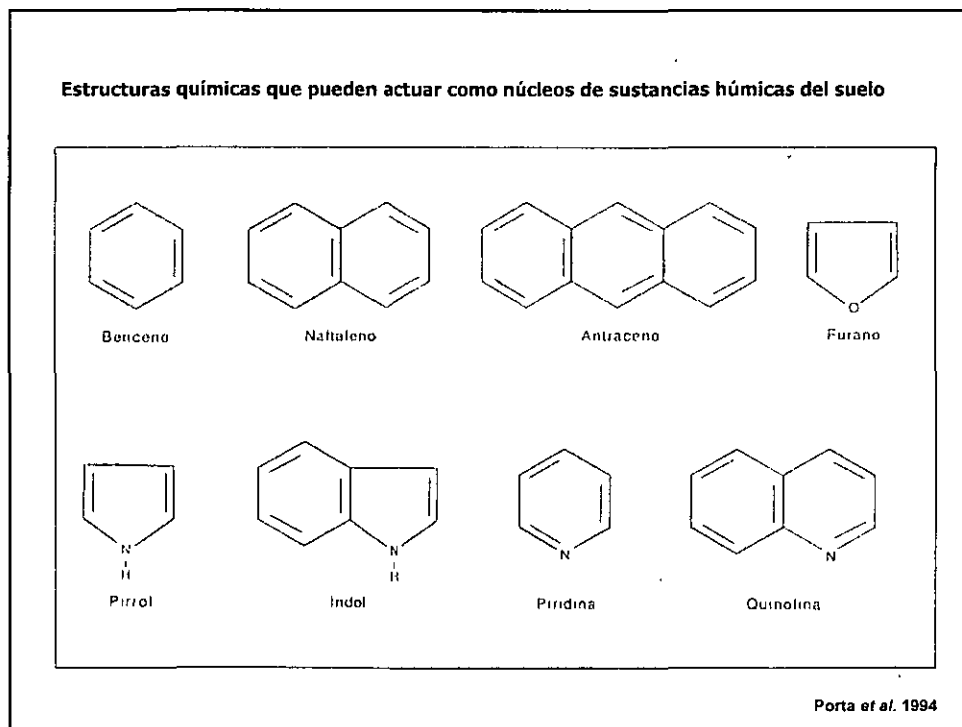
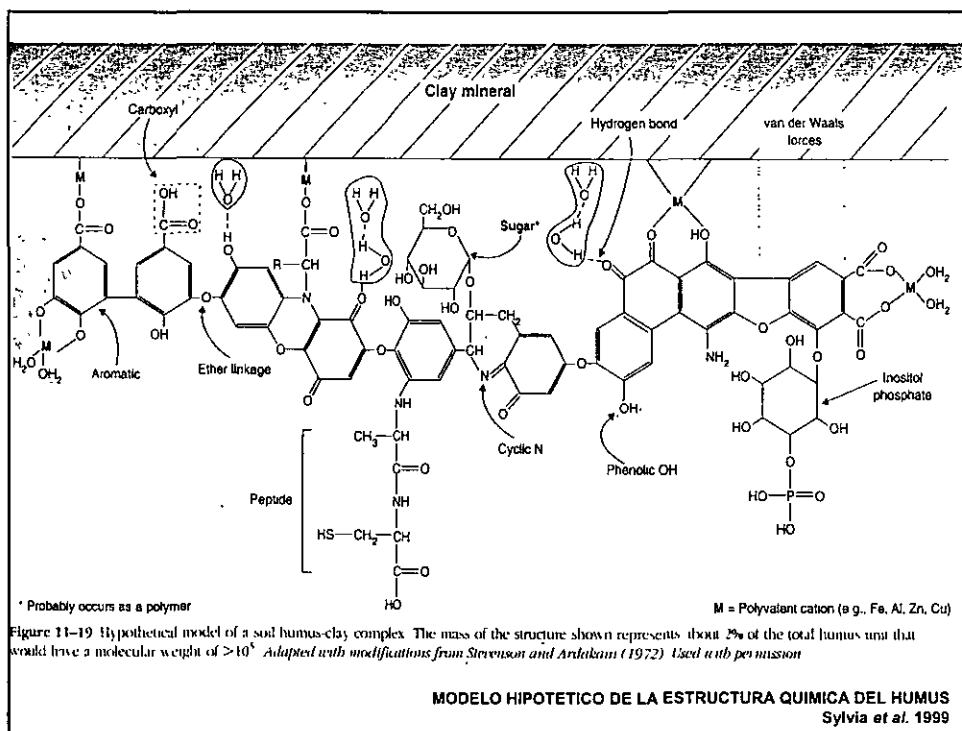




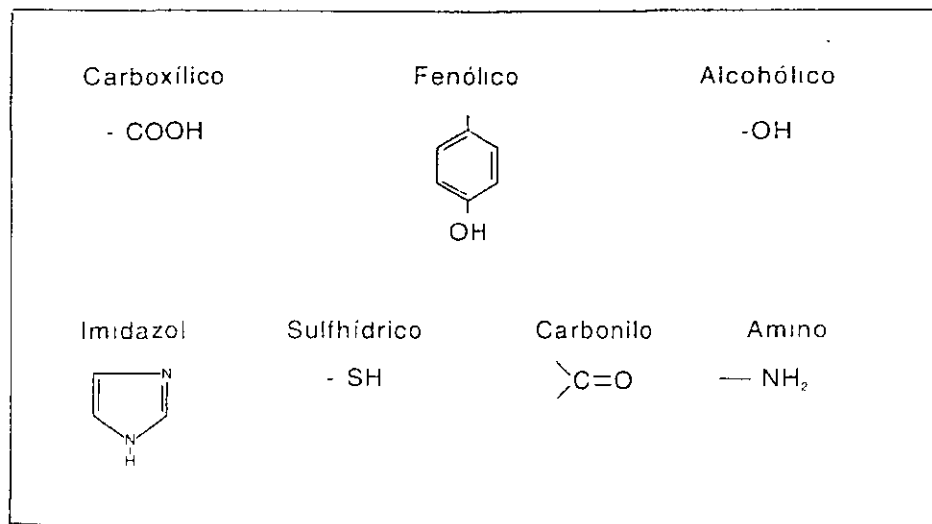
**Estructuras químicas similares a los hidrocarburos existen en la naturaleza, algunos forman parte del propio suelo otros son componentes de especies vegetales.**

**Por ello, muchos se pueden degradar incluso sin la acción del hombre.**



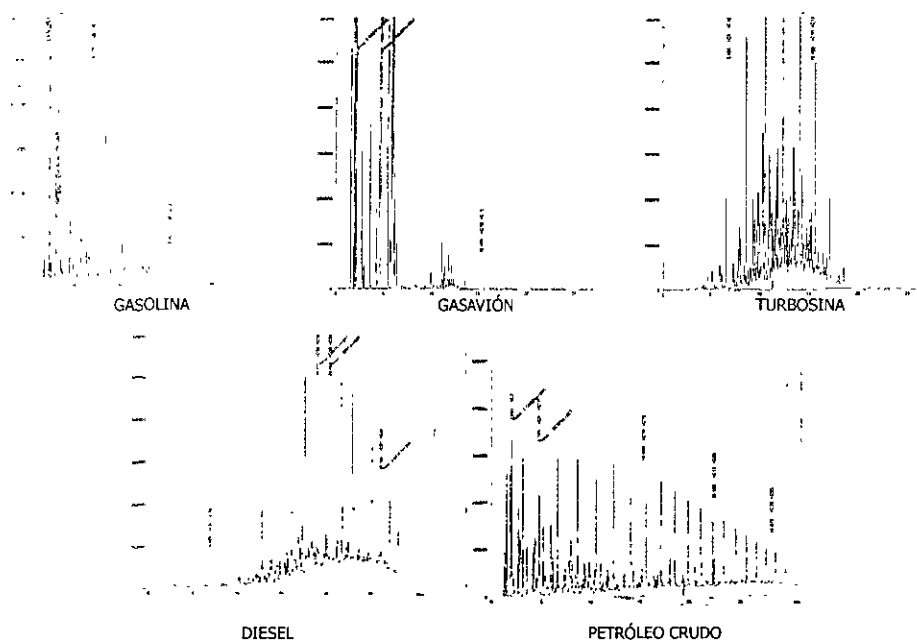


Los principales grupos radicales externos son:

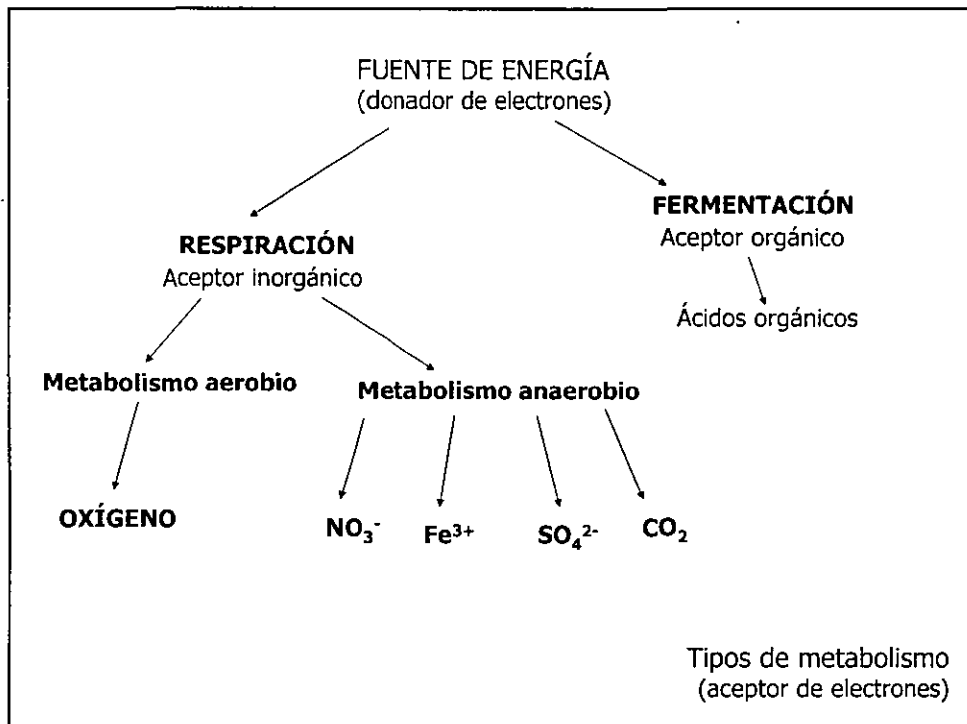


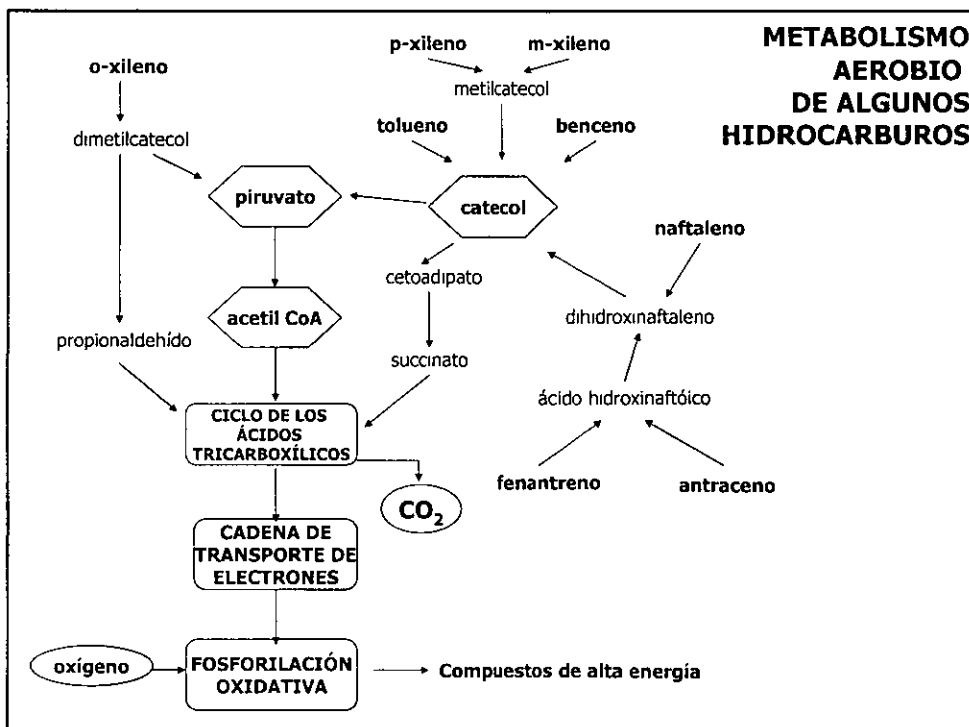
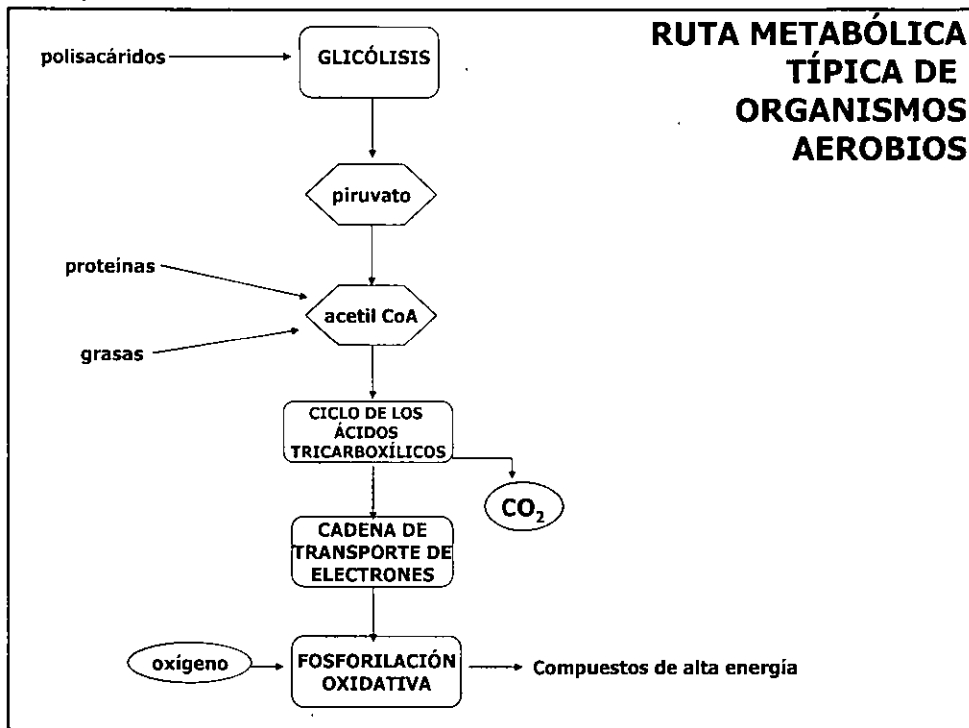
Porta et al. 1994

**Perfiles cromatográficos obtenidos por el método EPA 8015 B**

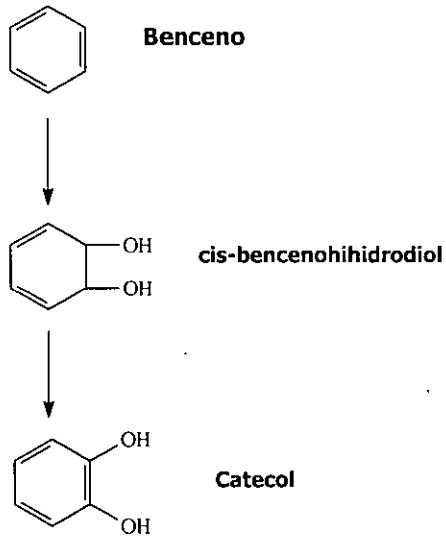


## Rutas de biodegradación de hidrocarburos

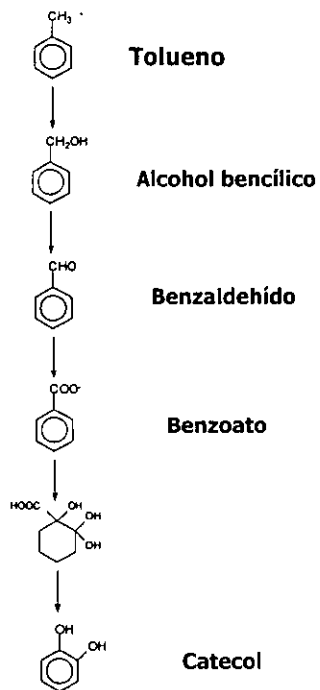




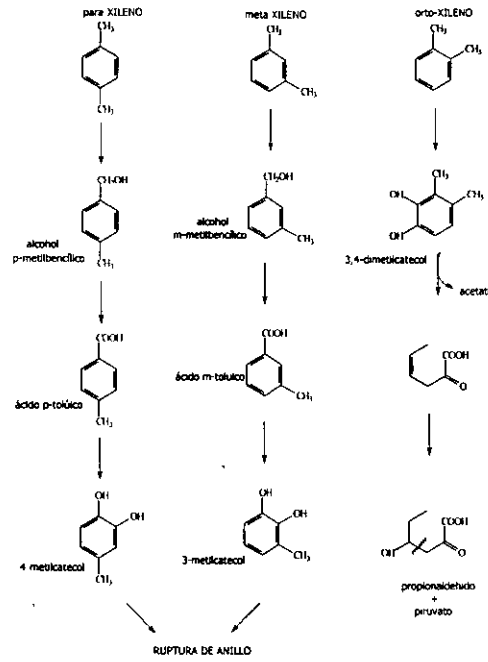
## REACCIONES INICIALES EN LA BIODEGRADACIÓN DE BENCENO



## REACCIONES INICIALES EN LA BIODEGRADACIÓN DE TOLUENO



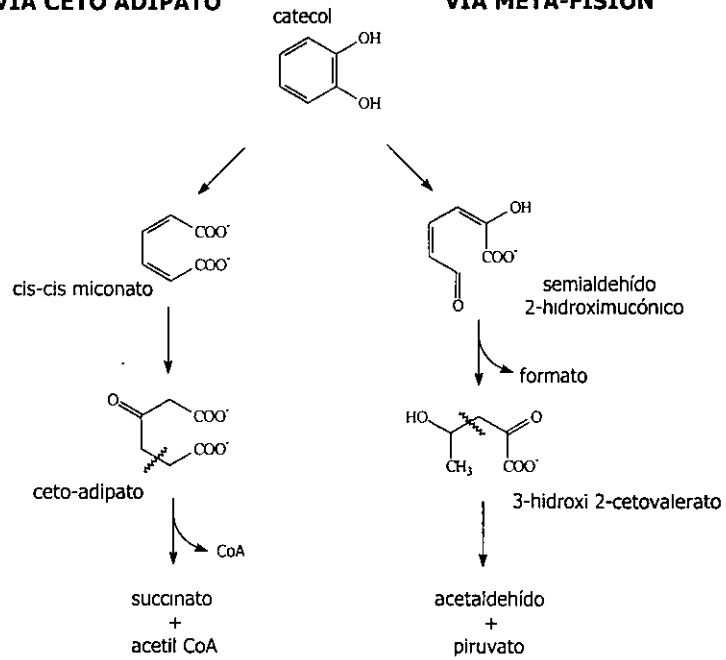
**REACCIONES INICIALES EN LA BIODEGRADACIÓN DE *para*-, *meta*- y *orto*-XILENO**



Hoja 1 de 2

**VÍA CETO ADIPATO**

**VÍA META-FISIÓN**



Hoja 2 de 2

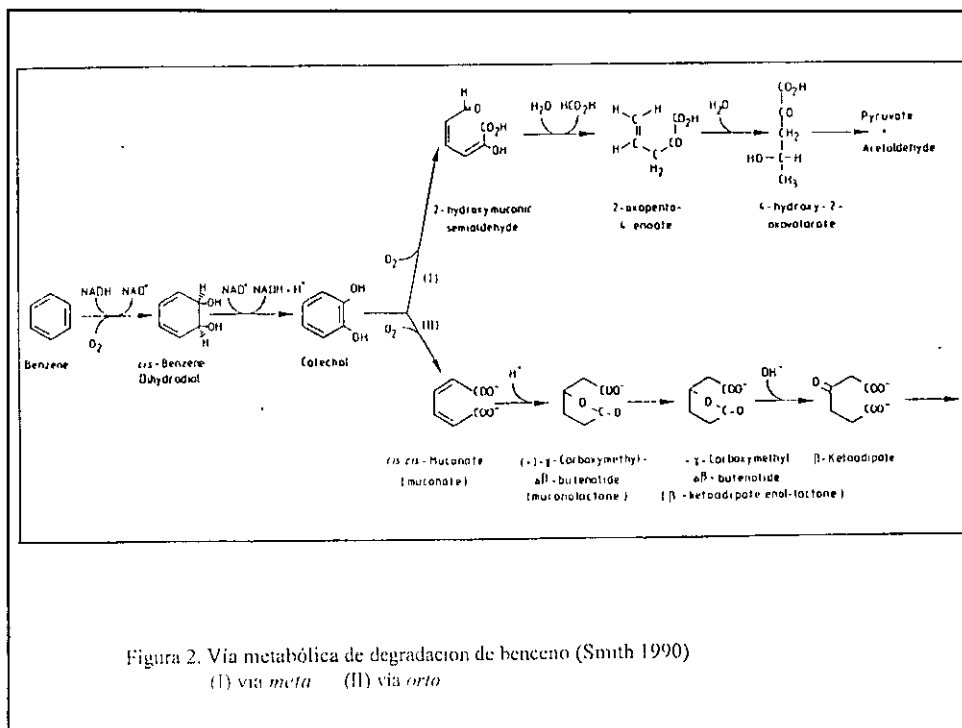


Figura 2. Via metabólica de degradación de benceno (Smith 1990)  
 (I) via *meta* (II) via *orto*

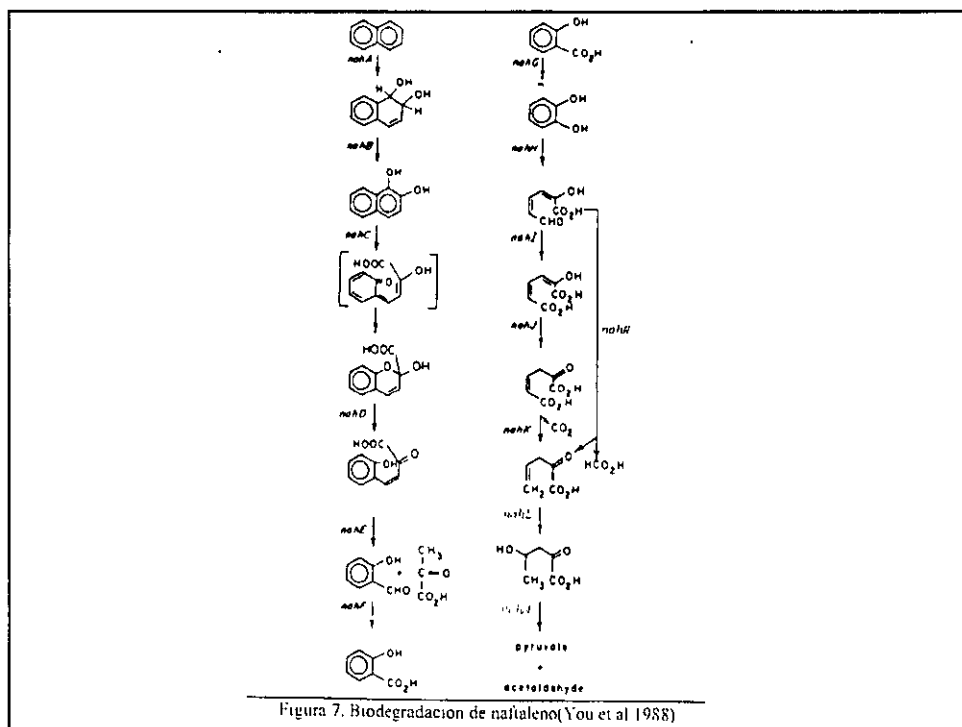
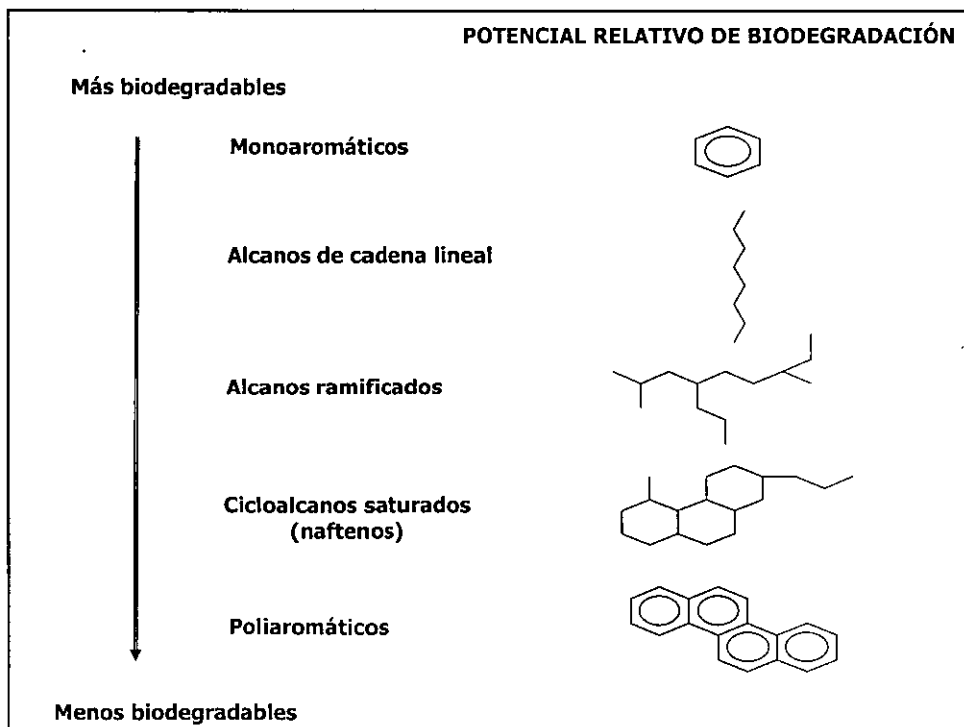
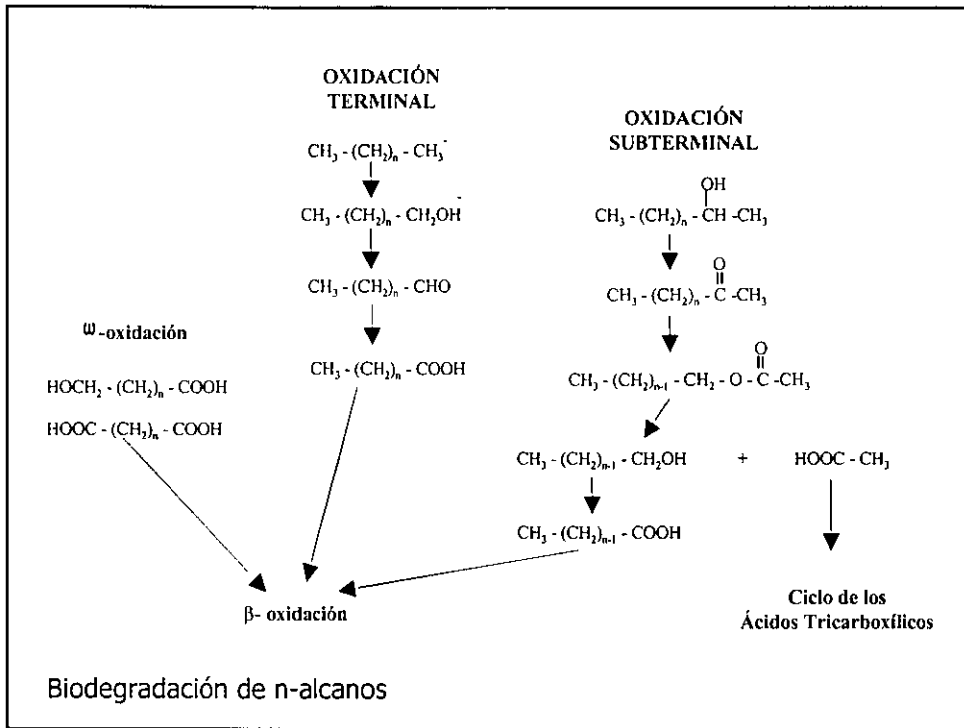


Figura 7. Biodegradación de naftaleno (You et al 1988)







# **Desarrollo de un proyecto de biorremediación**

## **DESARROLLO DE UN PROYECTO DE BIORREMEDIACIÓN**

---

### **CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

- √ entorno
- √ geohidrología
- √ química de contaminantes
- √ fisicoquímica del suelo y subsuelo
- √ microbiología del suelo y subsuelo



### **ESTUDIOS DE BIOTRATABILIDAD EN EL LABORATORIO**



### **ESCALAMIENTO AL CAMPO**

---

## **CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO**

---

**macroambiente que rodea a la zona contaminada:**

- √ temperatura
  - √ forma de acceso
  - √ actividades típicas del lugar
  - √ manejo del proceso a escala real
- 

## **CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA**

---

**la zona contaminada conforma un biorreactor:**

- √ volumen (superficie y profundidad)
  - √ forma
  - √ heterogeneidad
  - √ dirección preferencial del flujo
-

## **CARACTERIZACIÓN DE CONTAMINANTES**

---

**características del “alimento” para los microorganismos:**

- √ tipo
- √ diversidad
- √ concentración
- √ posibles inhibidores de la actividad microbiana

## **CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA**

---

**características del microambiente del suelo o subsuelo**

- √ pH
- √ nutrientes naturales
- √ interacción con los contaminantes
- √ tipo de matriz

## CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

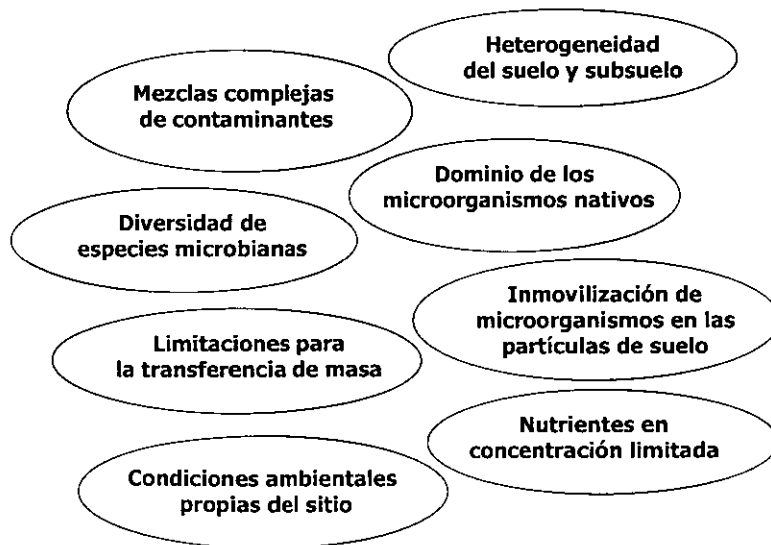
---

presencia y características de los microorganismos vivos nativos del suelo o subsuelo:

- √ heterótrofos (utilizan materia orgánica)
- √ tolerantes (soportan presencia del contaminante)
- √ degradadores (aprovechan el contaminante)
- √ contienen genes catabólicos (*xylE*, *ndoB*, *alkB*)

puede aplicarse también a Inóculos y preparaciones comerciales

En un sitio contaminado se tienen ....



## TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN

### BIOESTIMULACIÓN

Fertilización

### BIOAUMENTACIÓN / BIOINCREMENTO

Preparaciones comerciales

Producción de inóculos

### BIOVENTEO

Suministro de oxígeno

### ATENUACIÓN NATURAL

## BIOESTIMULACIÓN

---

- ✓ Adición de fertilizantes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ )

nitrógeno total: 2000 mg/kg

fosfatos: 12 mg/kg

Suelo rico - muy rico

o relación C : N- $\text{NH}_4^+$  : P-  $\text{PO}_4^{3-}$

100 : 10 : 1

- ✓ Humedad constante: 25 – 50 %  
(en función del tipo de suelo)

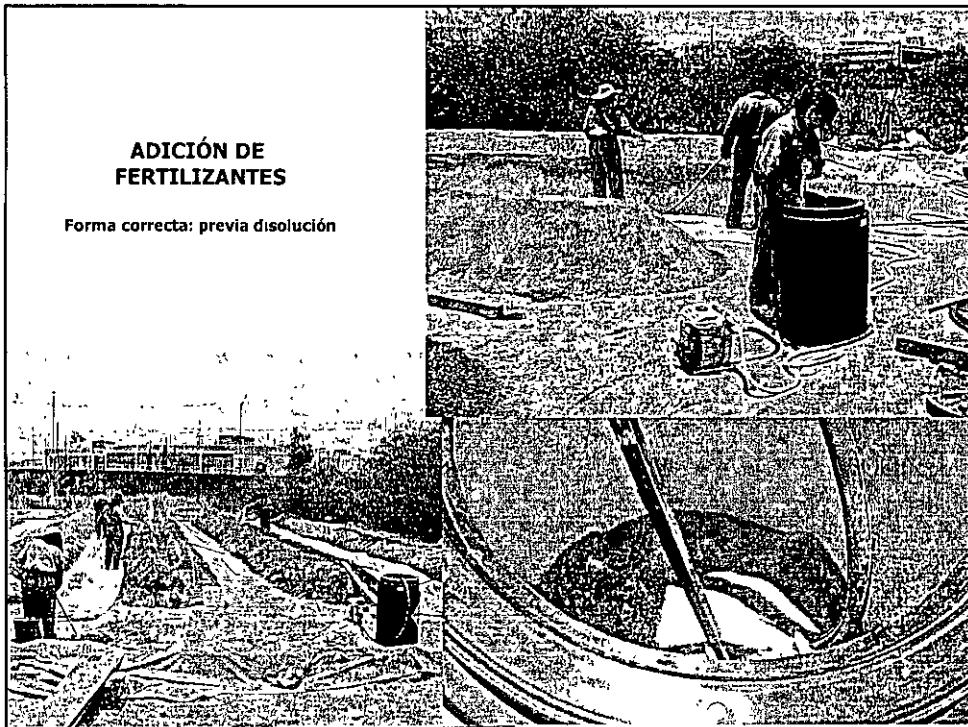
**DENOMINACIÓN DE SUELOS SEGÚN SU CONTENIDO DE NUTRIENTES**

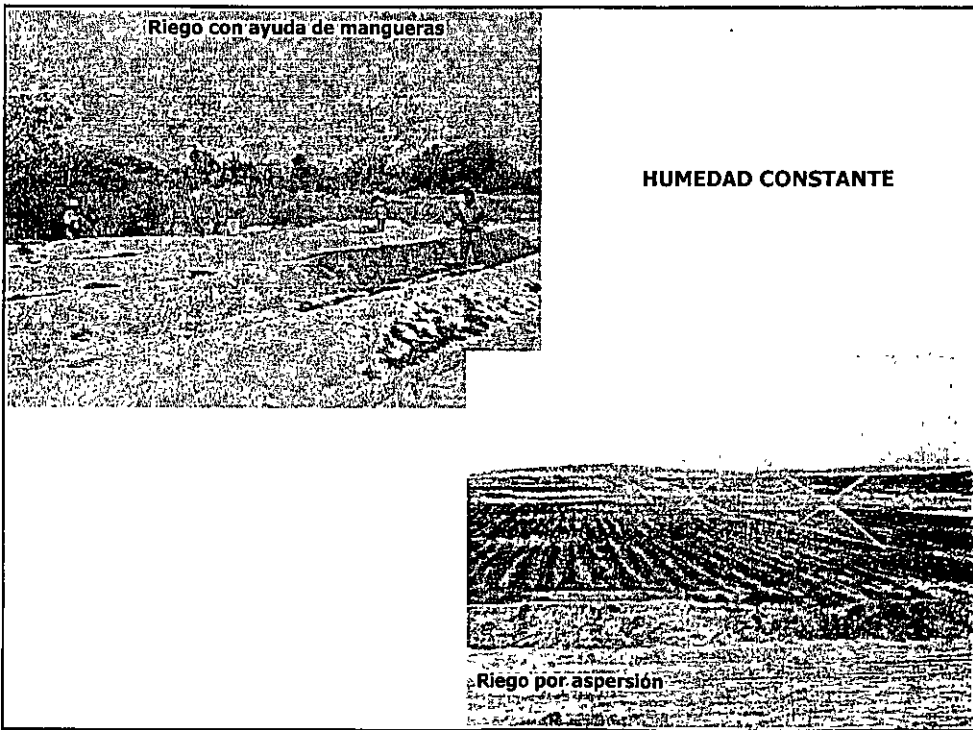
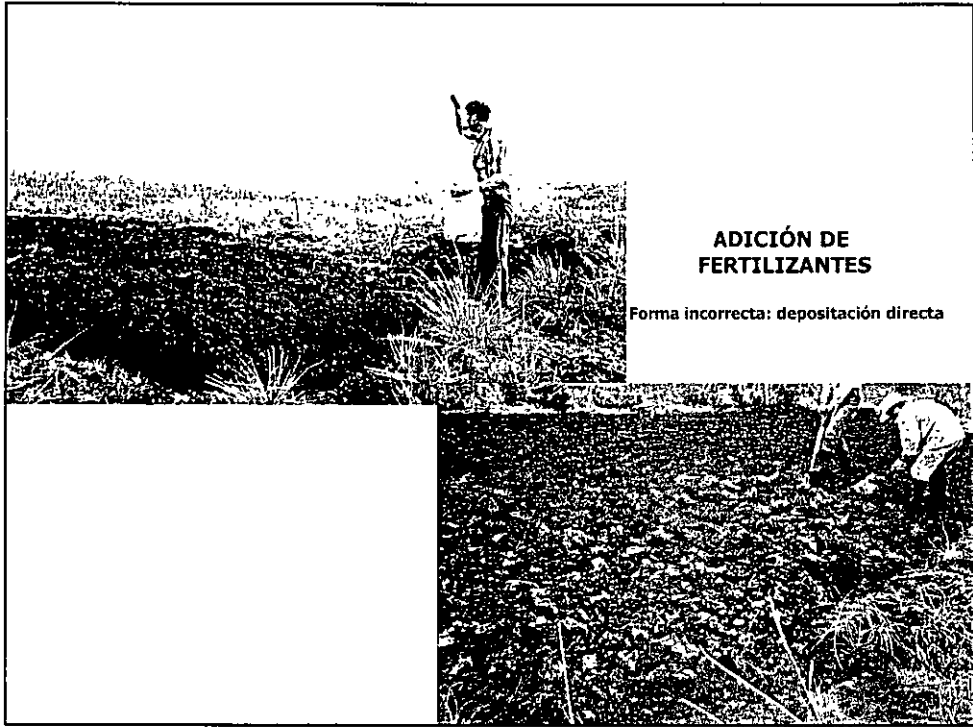
NITRÓGENO %	NITRÓGENO mg/kg	FOSFATOS mg/kg	MATERIA ORGÁNICA %	DENOMINACIÓN DEL SUELO
< 0.032	< 320		0 - 0.2	Extremadamente pobre
0.032 - 0.063	320 - 630	< 4.0	0.8 - 2.0	Pobre
0.064 - 0.095	640 - 950		2.0 - 4.0	Regular
0.096 - 0.126	960 - 1,260	4.0 - 6.9	4.0 - 8.0	Medianamente rico
<b>0.127 - 0.158</b>	<b>1,270 - 1,580</b>	<b>7.0 - 12.5</b>	<b>8.0 - 15.0</b>	<b>Rico</b>
<b>0.159 - 0.221</b>	<b>1,590 - 2,210</b>		<b>15.0 - 30.0</b>	<b>Muy rico</b>
<b>&gt; 0.221</b>	<b>&gt; 2,210</b>	<b>&gt; 12.5</b>	<b>&gt; 30.0</b>	<b>Extremadamente rico</b>

Adaptado de: Tavera, 1985; Aguilera, 1989; Vázquez, 1993.

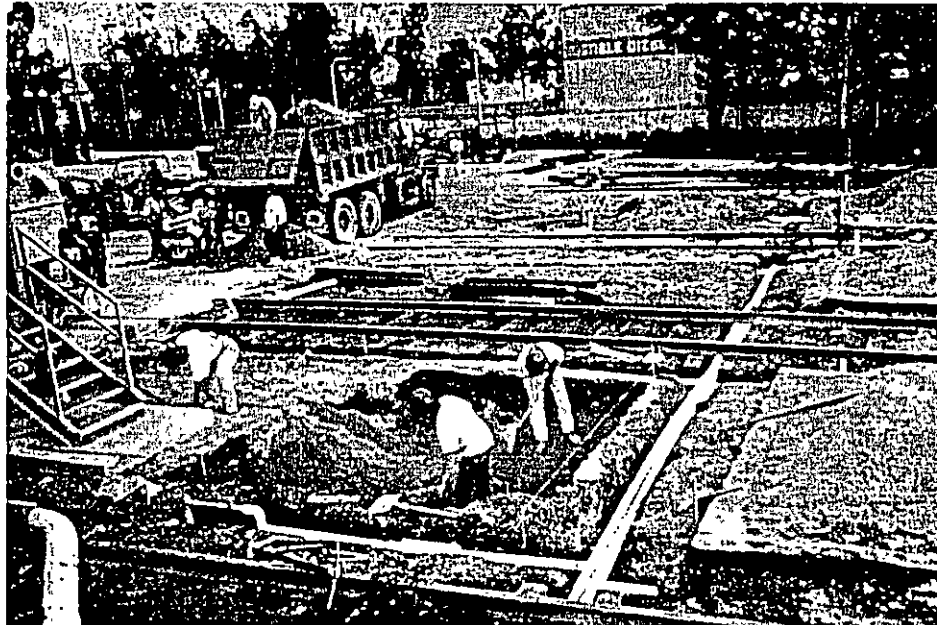
**ADICIÓN DE  
FERTILIZANTES**

Forma correcta: previa disolución









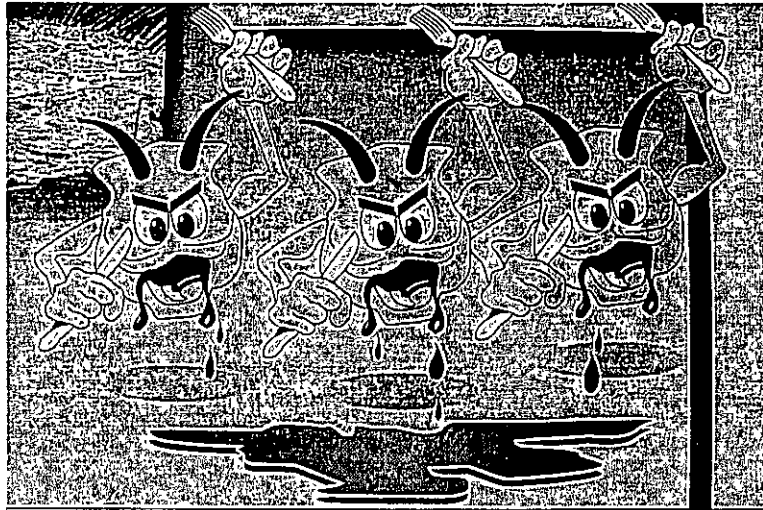
INSTALACIÓN DE TUBERÍA PARA BIOVENTEO

### PRODUCTOS COMERCIALES

---

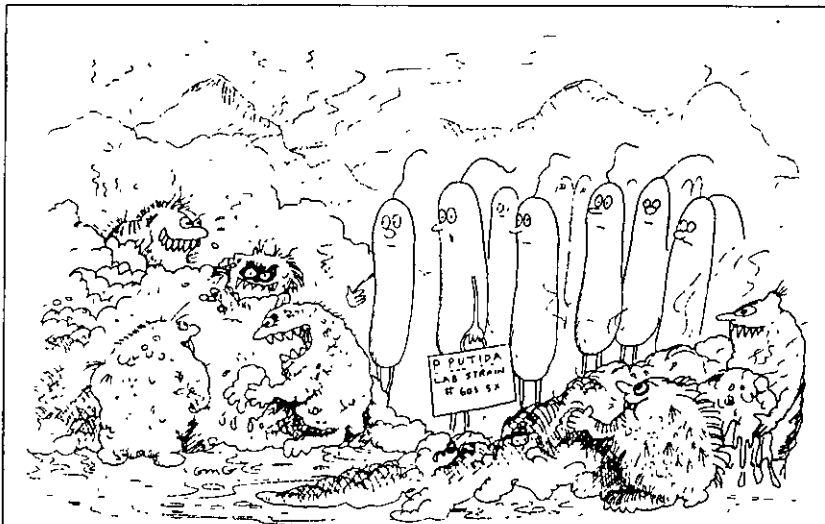
- **concentrados bacterianos**
  - **musgos impregnados de bacterias**
  - **concentrados enzimáticos**
  - **fertilizantes**
  
  - **agentes tensoactivos (surfactantes)**
  
  - **"oxigenadores"**
-





***SUPER BUGS***

Un extraño no siempre es bienvenido ...

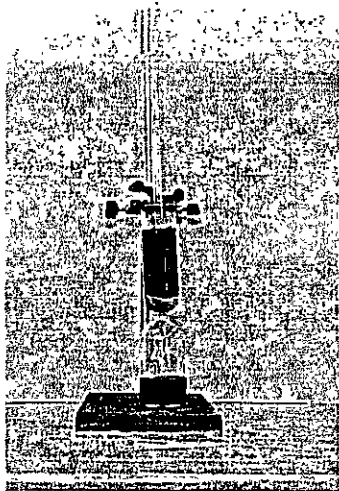
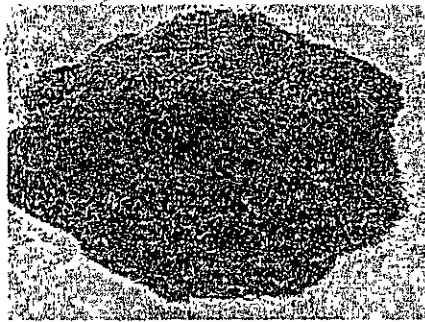


"Oh dear! I didn't realize 'in the field' would be like this!  
We should have stayed in the laboratory."

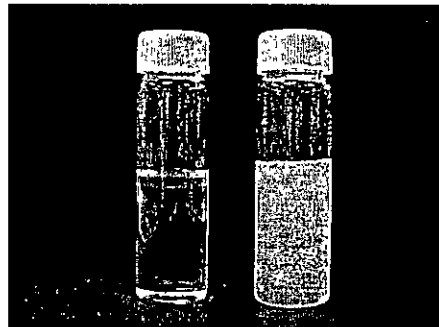
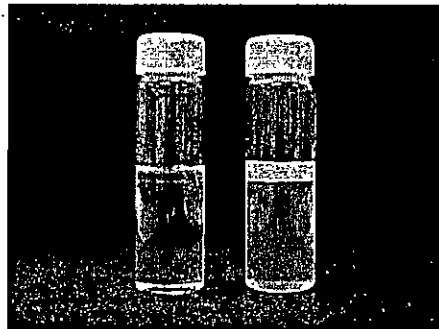
Source: Liu and Sufita, 1993. TIBTECH 11, August: 344-352

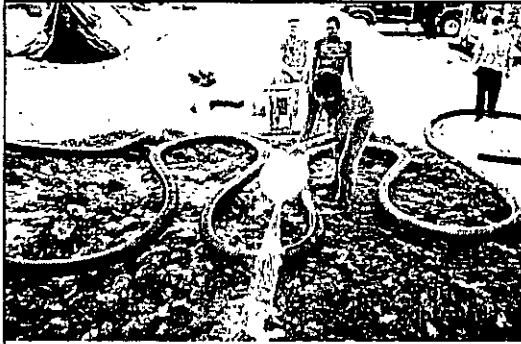


"Musgos absorbentes"

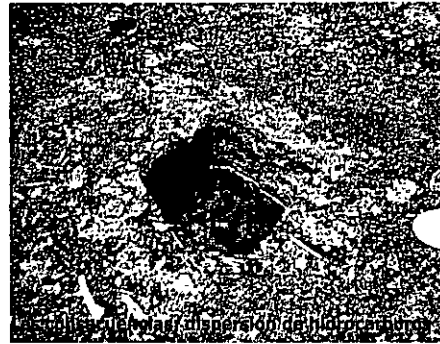
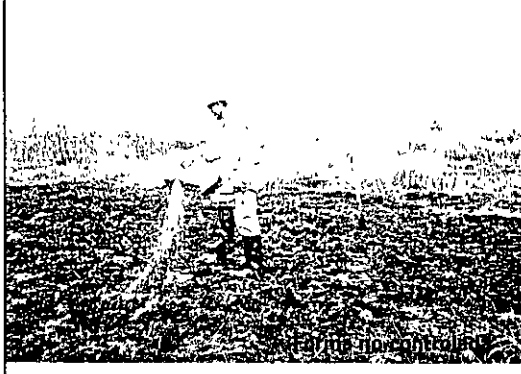


**Acción de los  
agentes tensoactivos  
sobre los  
hidrocarburos**





**APLICACIÓN  
DE SURFACTANTES**

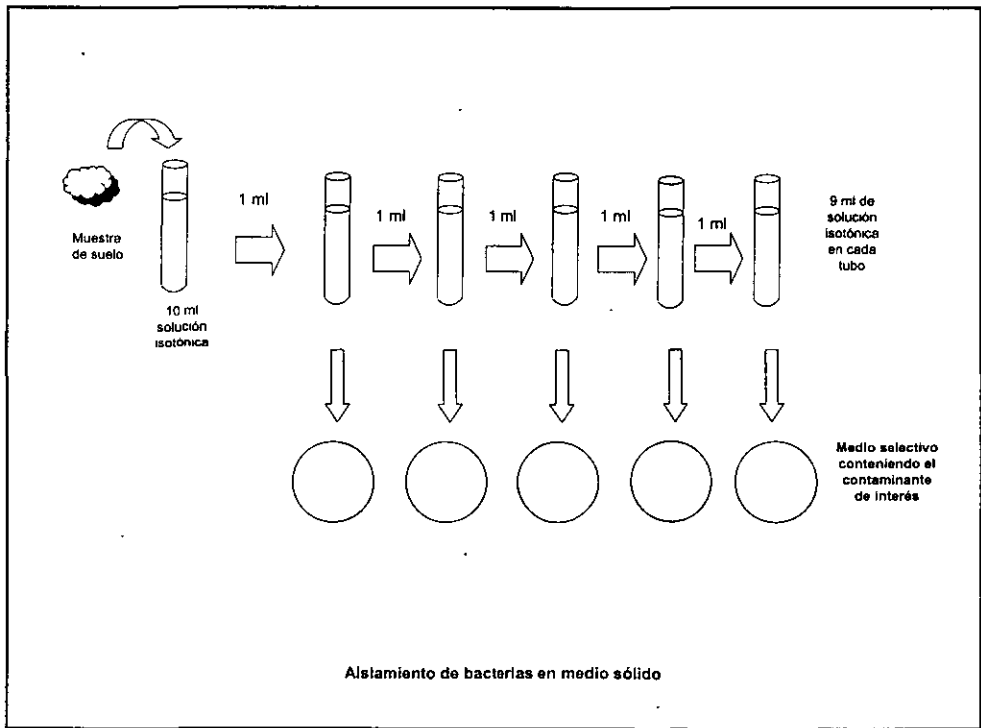


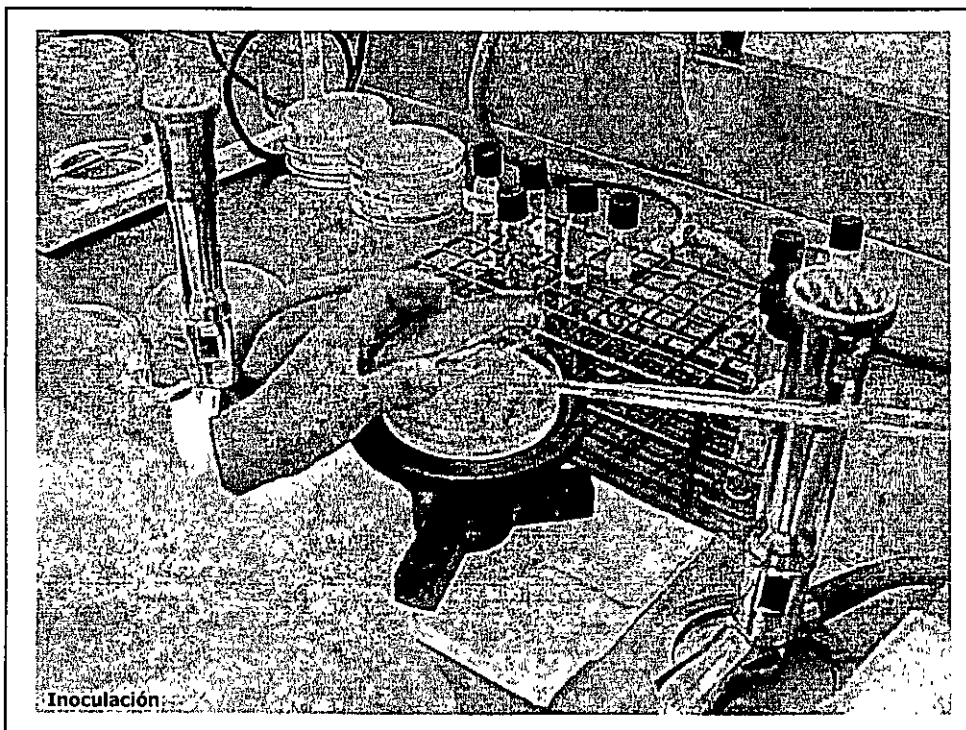
## **PRODUCCIÓN DE INÓCULOS**

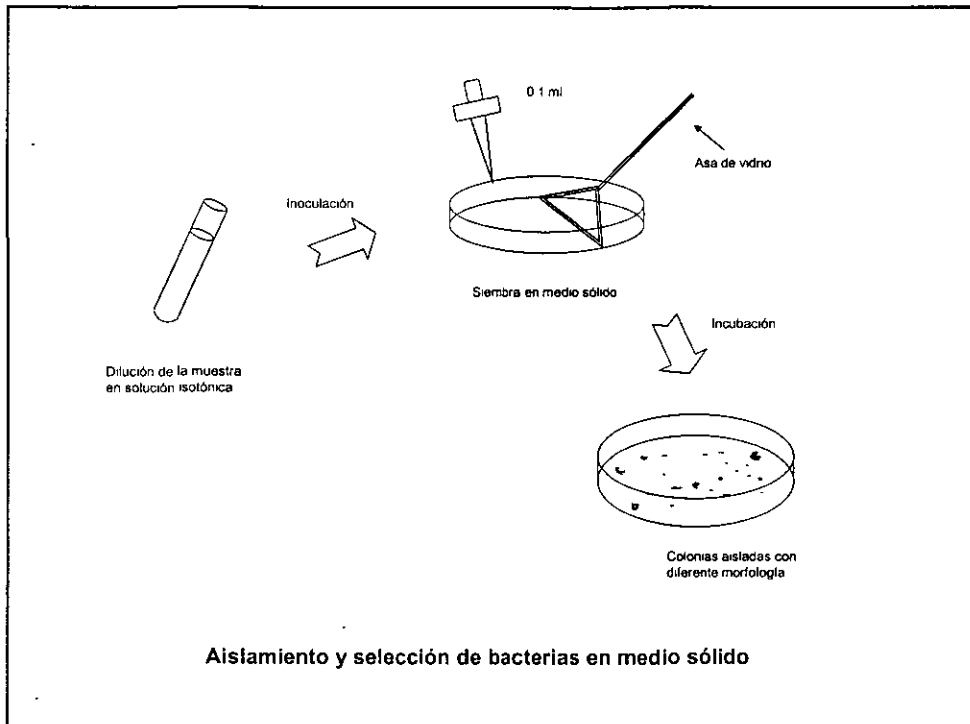
- 1. Aislamiento de bacterias degradadoras**
- 2. Enriquecimiento del cultivo**
- 3. Identificación de cepas (no indispensable)**
- 4. Escalamiento del cultivo**

**Fuente inicial de aislamiento de bacterias degradadoras:  
un suelo contaminado de un pasivo ambiental**

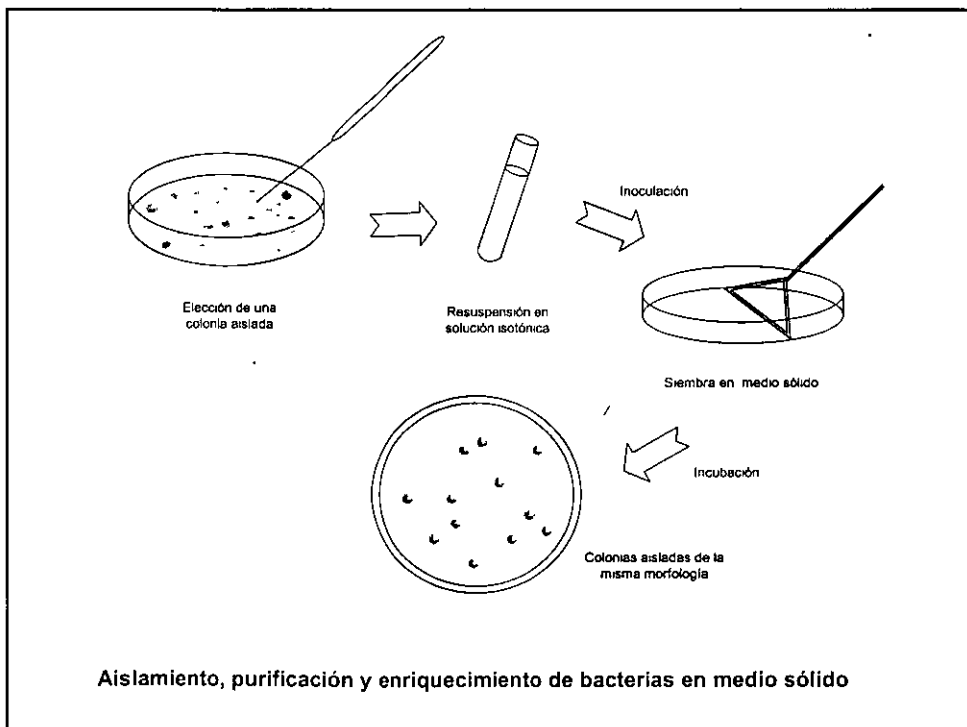
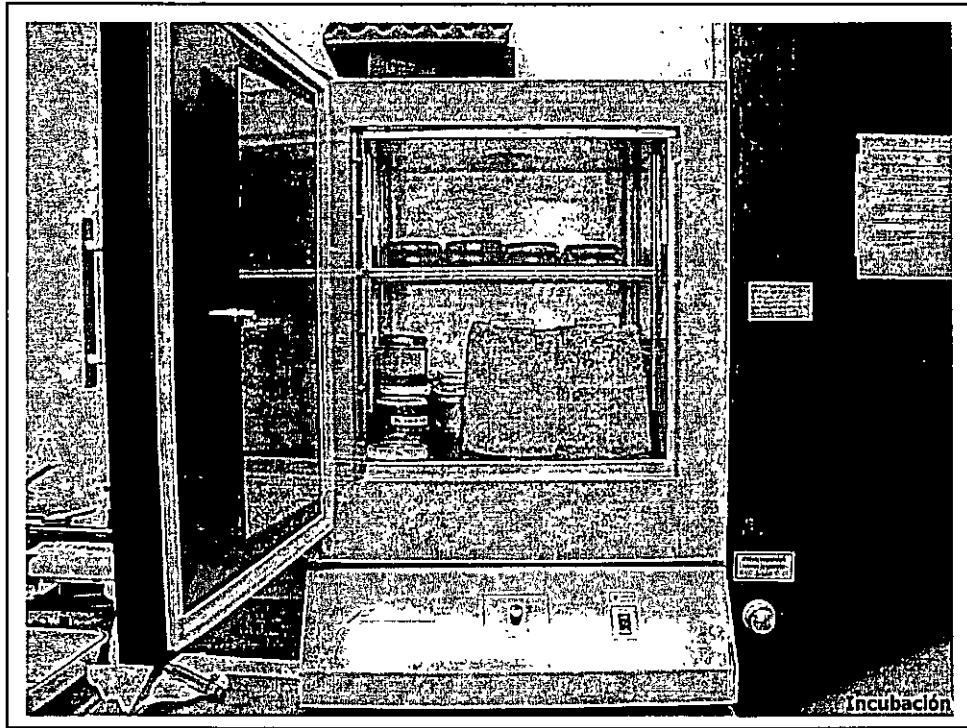
Parámetro	Concentración
pH	8.38
materia orgánica	18.54 (%)
fosfatos	0.33 (mg/kg)
nitrógeno total	457.71 (mg/kg)
nitrógeno amoniacal	372.06 (mg/kg)
bacterias degradadoras de diesel industrial	$3.49 \times 10^5$ (ufc/g de suelo)

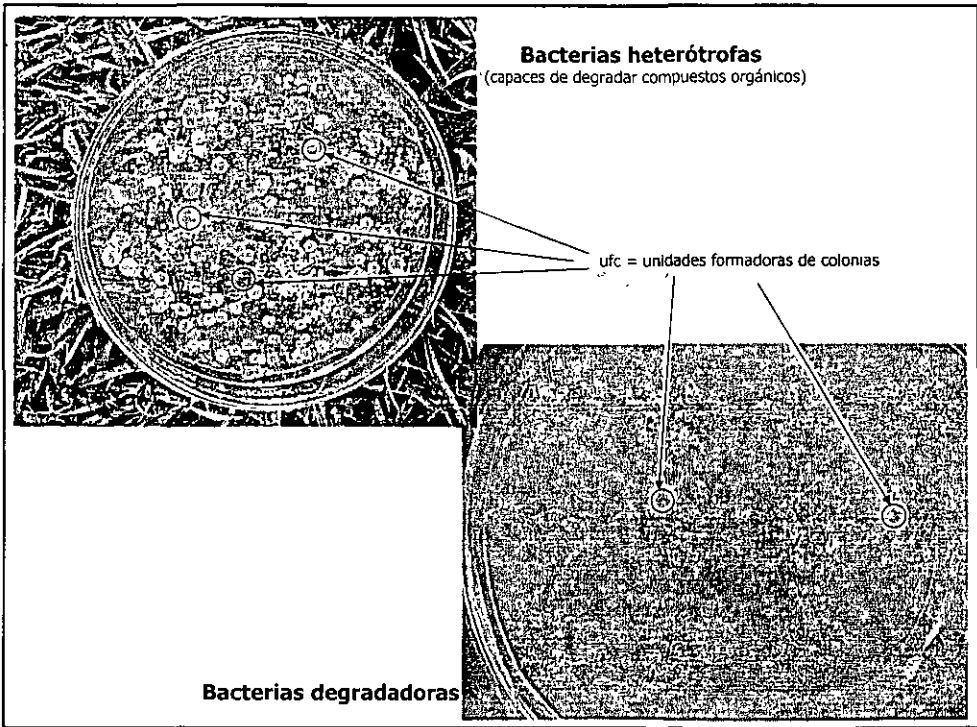
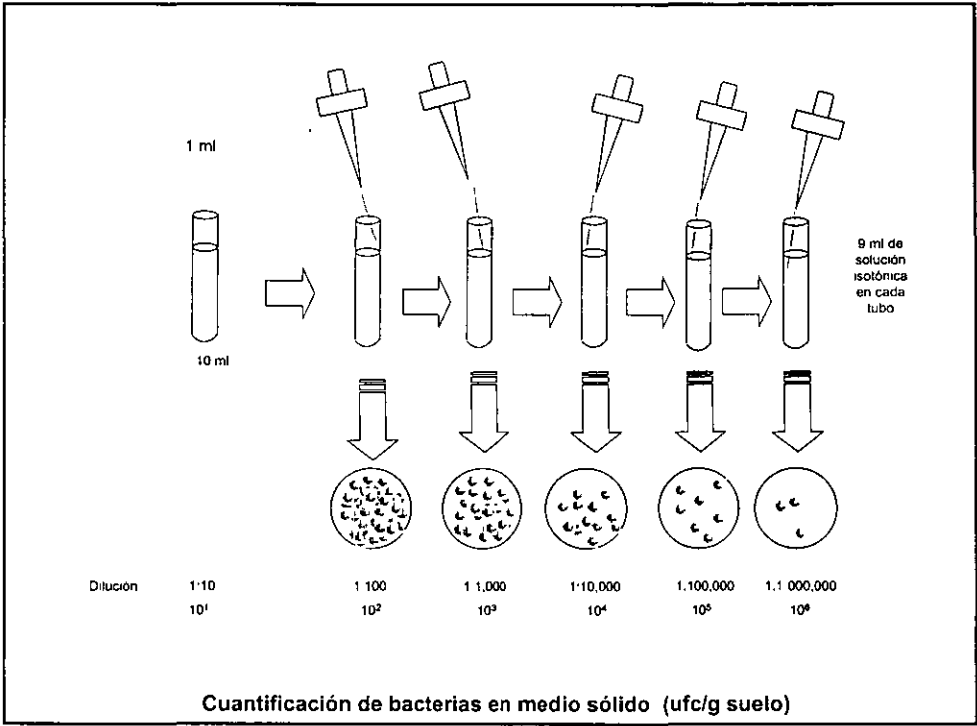








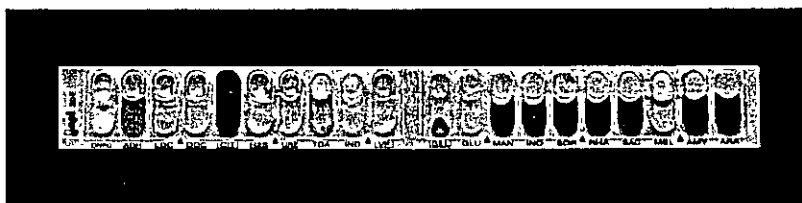




IDENTIFICACIÓN  
DE CEPAS  
MICROBIANAS

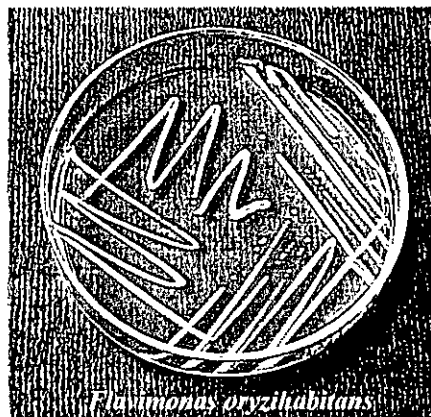


*Pseudomonas fluorescens/putida*

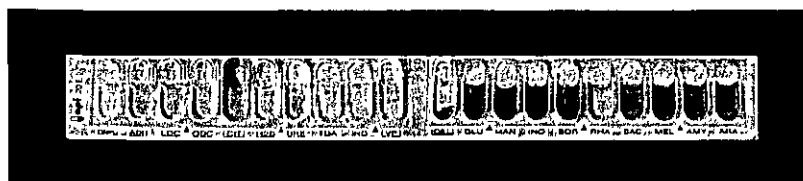


Pruebas bioquímicas API

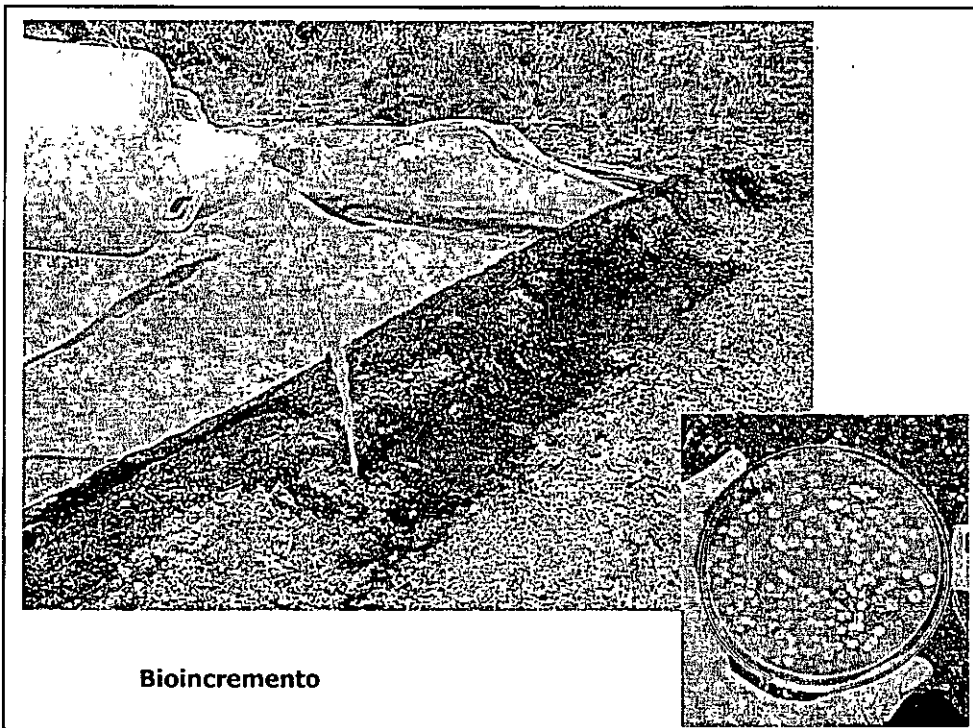
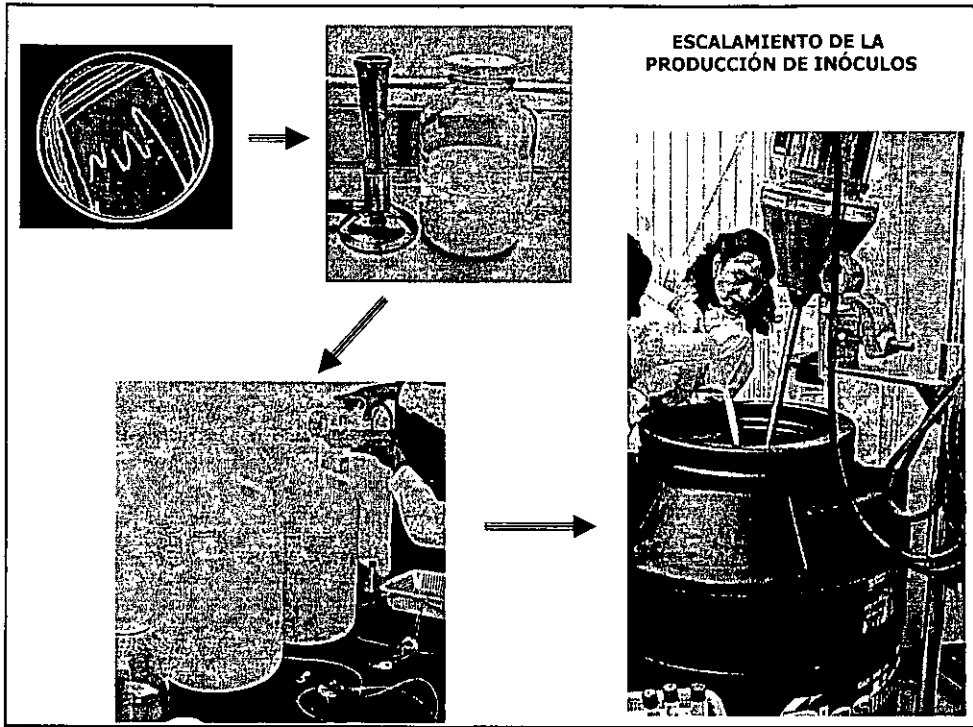
IDENTIFICACIÓN  
DE CEPAS



*Flavimonas oryzihabitans*



Pruebas bioquímicas API



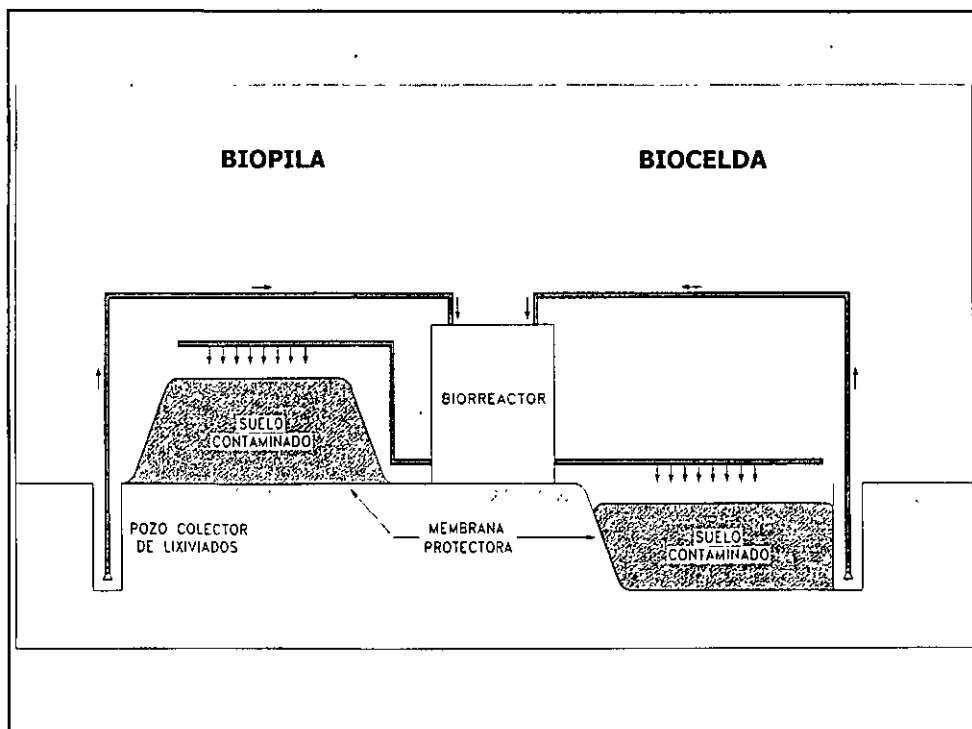
## TIPOS DE BIORREACTORES

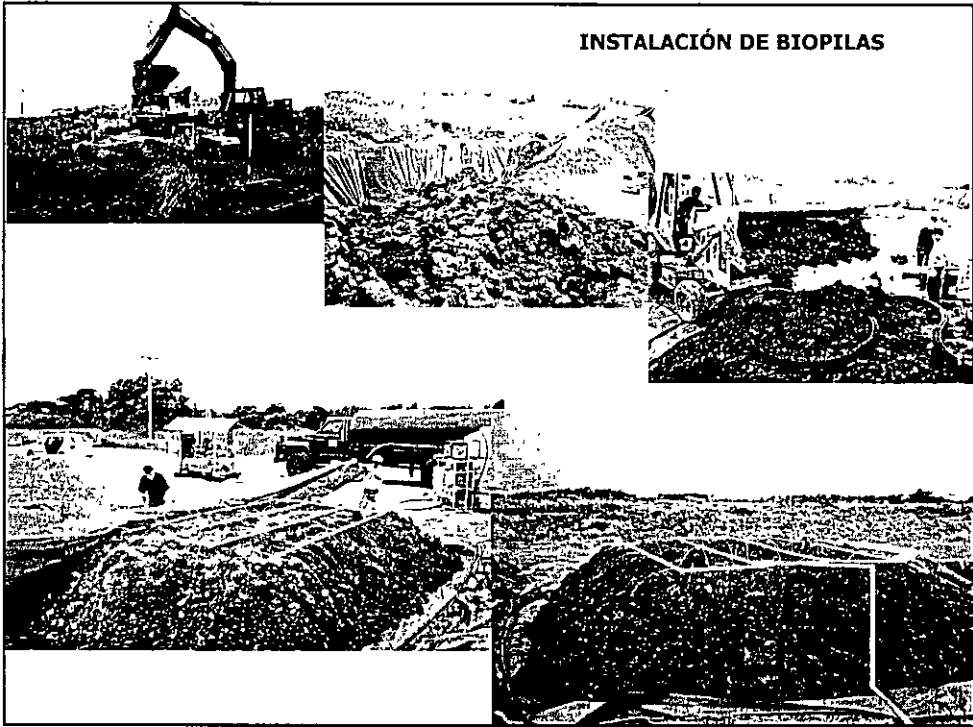
BIOPILAS

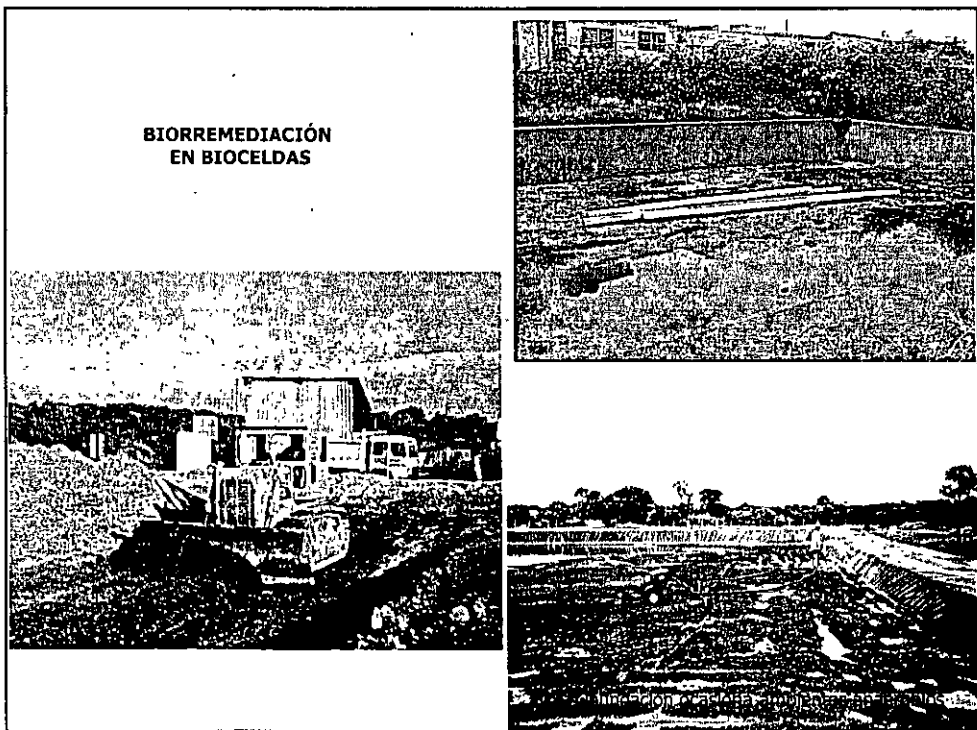
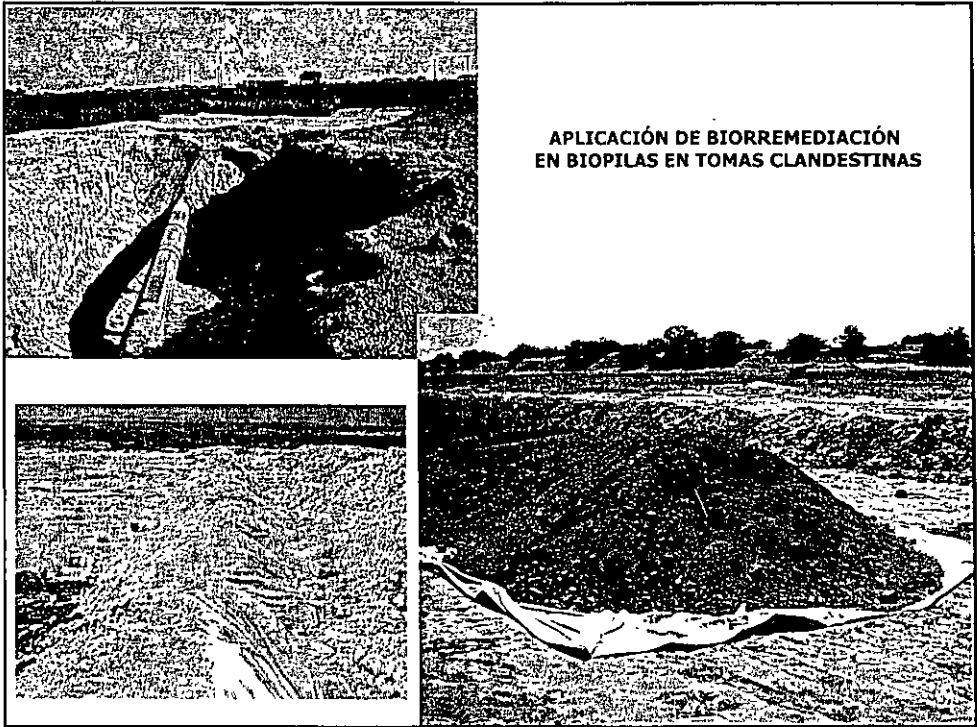
BIOCELDAS

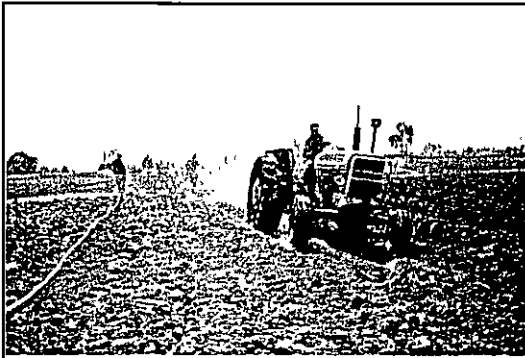
BIOCULTIVO  
(Land-farming)

AGITADOS  
Y  
AEREADOS

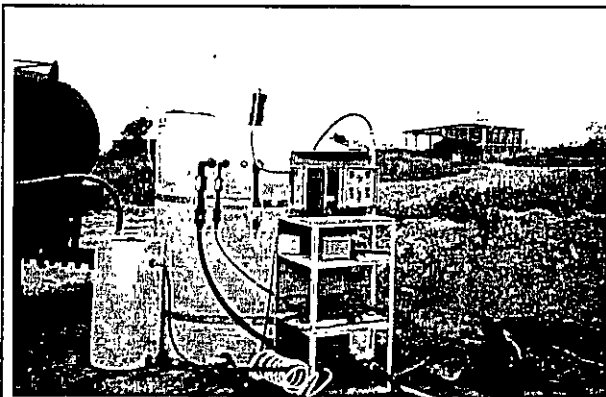
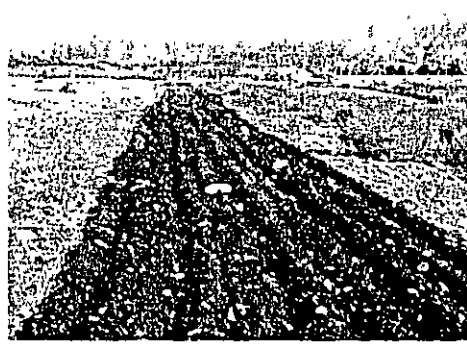
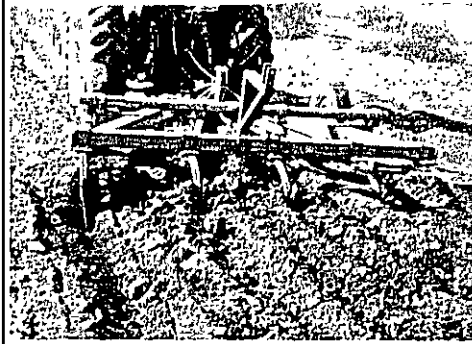








**BIORREMEDIACIÓN  
EN BIOCULTIVO  
(Land-farming)**



**REACTORES**

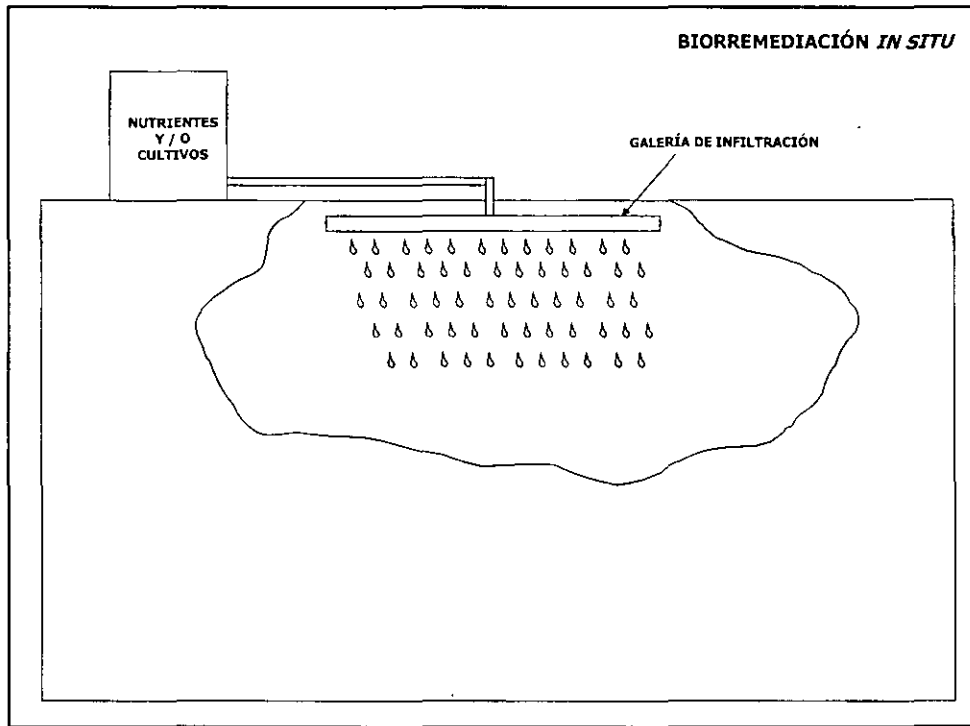




**Ventajas de la adición de composta:**

- ✓ **adsorbe los hidrocarburos volátiles presentes**
- ✓ **reduce las emisiones a la atmósfera ocasionadas involuntariamente por el movimiento del material**
- ✓ **limita la generación de lixiviados por su alta capacidad de retención de líquidos**
- ✓ **mejora la textura del material, permitiendo un mejor intercambio de gases**
- ✓ **contiene flora microbiana nativa muy activa y permite la adhesión de bacterias externas**
- ✓ **contiene nutrientes naturales que estimulan la actividad microbiana**





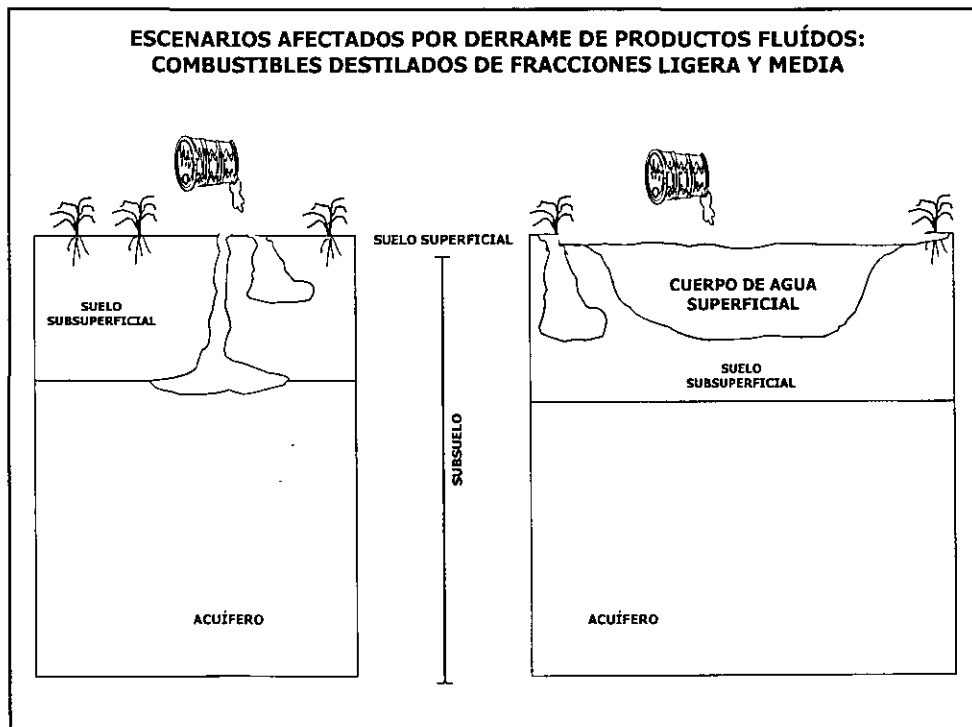
### **APLICACIONES DE LA BIORREMEDIACIÓN**

Según el tipo de contaminantes

- ✓ **Hidrocarburos de fracción ligera**
- ✓ **Hidrocarburos de fracción media**
- ✓ **Hidrocarburos de fracción pesada**

PRODUCTOS REFINADOS	FRACCIÓN	POSIBILIDADES DE BIODEGRADACIÓN
GASOLINA	LIGERA	MUY BUENAS (100%), AUNQUE SE DA NATURALMENTE PÉRDIDA POR VOLATILIZACIÓN
GASAVIÓN		
GASNAFTA		
GASOLVENTE		
QUEROSINA	MEDIA	MUY ALTAS (100%)
TURBOSINA		
DIESEL		
GASÓLEO		
ACEITES	PESADA	REGULARES (50%)
COMBUSTÓLEO		MUY BAJAS (<20%)
ASFALTO		NINGUNA
PETRÓLEO CRUDO →		REGULARES (MÁX. 60%)

El sobrecalentamiento genera hidrocarburos muy complejos, por ejemplo los poliaromáticos →



**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PRODUCTOS REFINADOS DE LA FRACCIÓN LIGERA**

**GASOLINA  
GASAVIÓN  
GASNAFTA  
GASOLVENTE**

**BIORREMEDIACIÓN *IN SITU***

- definición de la profundidad de suelo afectado
- descartar presencia de combustibles en fase libre flotando sobre el agua subterránea
- instalación de galerías de infiltración de nutrientes (amonio y fosfatos) y cultivos microbianos
- instalación de pozos de inyección / extracción de gases con sistema de filtración

**CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN SUELO QUE PODRÍA SER BIODEGRADADA  
50,000 mg/kg**

**BIORREMEDIACIÓN FUERA DEL SITIO**

- recomendable la incorporación de composta para evitar volatilización
- construcción de biopilas o bioceldas
- adición de nutrientes (bioestimulación) (amonio y fosfatos)
- adición de cultivos microbianos (bioincremento)

**TIEMPO MÁXIMO QUE PODRÍA TOMAR LA BIORREMEDIACIÓN DE 3 A 6 MESES**

**SEGUIMIENTO ANALÍTICO MENSUAL  
MÉTODO EPA 8015 C PARA LA FRACCIÓN COMPLETA  
MÉTODO EPA 8260 D PARA LOS BTEX**

**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PRODUCTOS REFINADOS DE LA FRACCIÓN MEDIA**

**QUEROSINA  
TURBOSINA  
DIESEL  
GASÓLEO**

**BIORREMEDIACIÓN *IN SITU***

- definición de la profundidad de suelo afectado
- descartar presencia de combustibles en fase libre flotando sobre el agua subterránea
- instalación de galerías de infiltración de nutrientes (amonio y fosfatos) y cultivos microbianos
- instalación de pozos de inyección / extracción de gases con sistema de filtración

**CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN SUELO QUE PODRÍA SER BIODEGRADADA  
50,000 mg/kg**

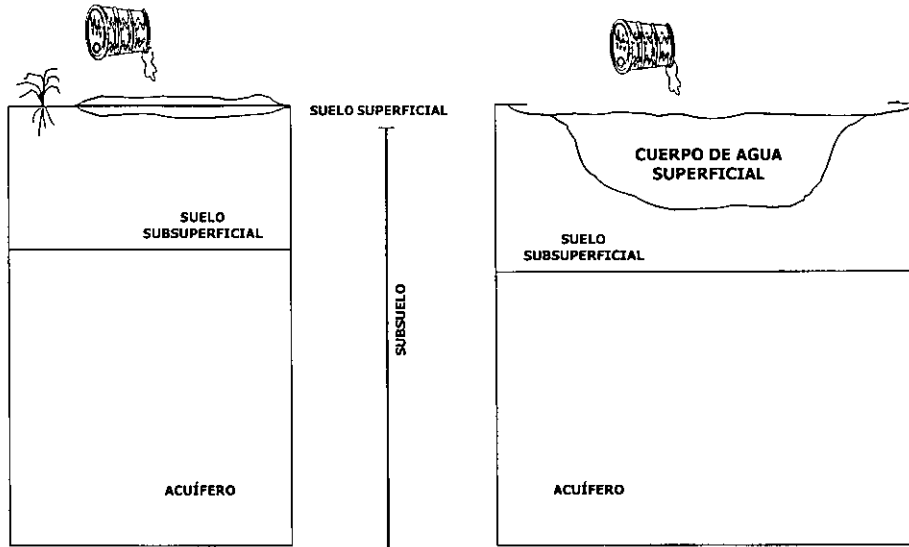
**BIORREMEDIACIÓN FUERA DEL SITIO**

- deseable la incorporación de composta para provocar oxigenación
- construcción de biopilas o bioceldas
- adición de nutrientes (bioestimulación) (amonio y fosfatos)
- adición de cultivos microbianos (bioincremento)

**TIEMPO MÁXIMO QUE PODRÍA TOMAR LA BIORREMEDIACIÓN DE 3 A 6 MESES**

**SEGUIMIENTO ANALÍTICO MENSUAL  
MÉTODO EPA 8015 C PARA LA FRACCIÓN COMPLETA**

**ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE PRODUCTOS VISCOSOS:  
CRUDO, COMBUSTÓLEO, ACEITES, DESECHOS PETROLEROS**



**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS  
CON PETRÓLEO CRUDO**

**BIORREMEDIACIÓN *IN SITU***

- poco recomendable

CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN SUELO  
QUE PODRÍA SER BIODEGRADADA  
HASTA EN UN 60% DE LA  
CONCENTRACIÓN ORIGINAL  
50,000 mg/kg

SEGUIMIENTO ANALÍTICO MENSUAL  
MÉTODO EPA 418.1 Y SI SE DESEA APRECIAR  
CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN EPA 8015 C

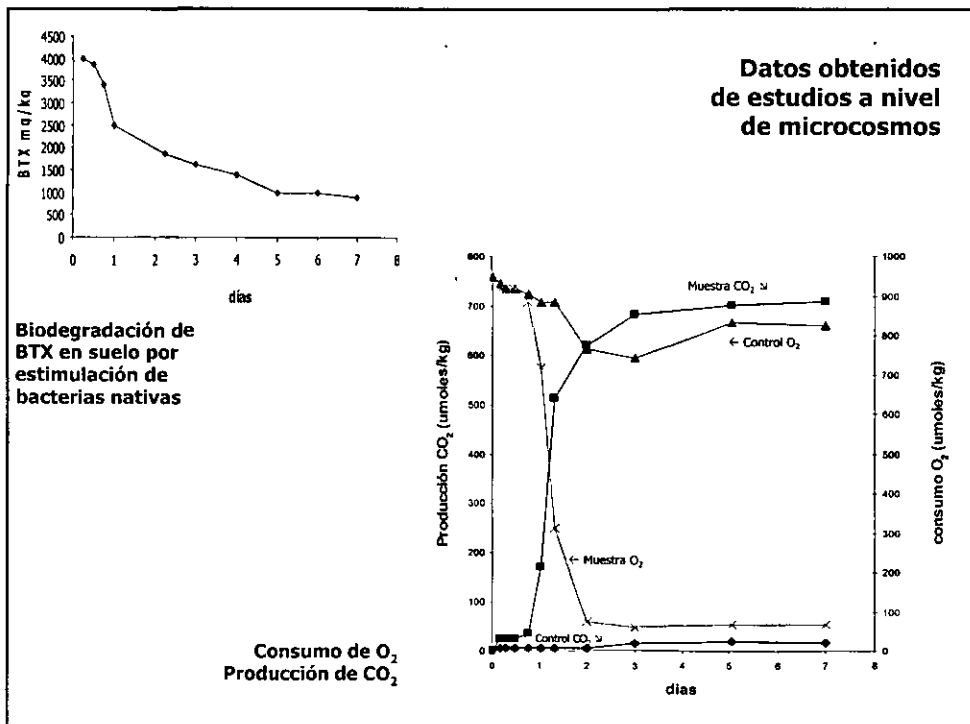
**BIORREMEDIACIÓN FUERA DEL SITIO**

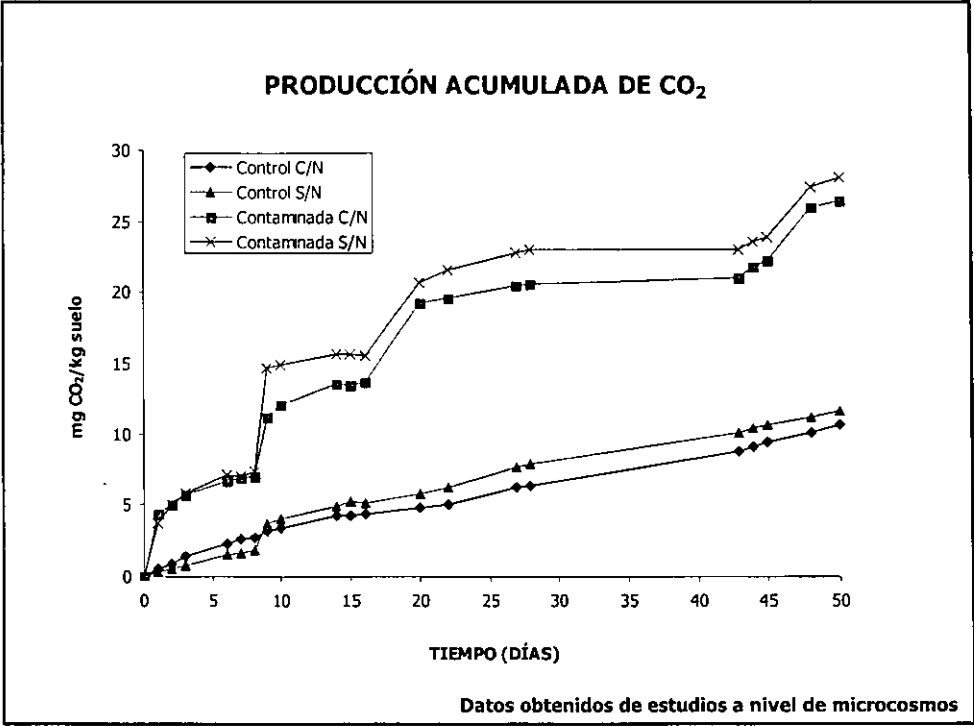
- deseable la incorporación de composta para facilitar el movimiento y provocar oxigenación
- biocultivo (land-farming)
- adición controlada de agentes tensoactivos
- adición de nutrientes (bioestimulación) (amonio y fosfatos)
- adición de cultivos microbianos (bioincremento)

TIEMPO MÁXIMO QUE PODRÍA  
TOMAR LA BIORREMEDIACIÓN  
POR LO MENOS UN AÑO

## PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO EN UNA BIORREMEDIACIÓN

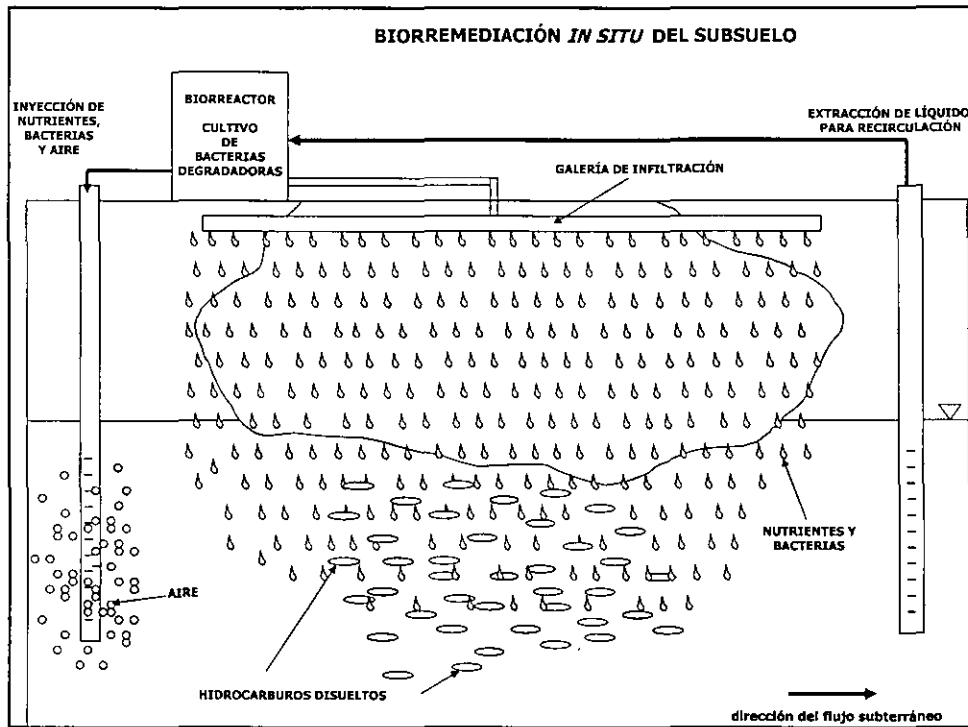
- **contaminantes residuales**
  - consumo de nutrientes
    - variación del pH
  - porcentaje de humedad
  - proporción de bacterias
    - producción de CO<sub>2</sub>
    - consumo de oxígeno





**Cuando la contaminación con productos de fracciones ligera y media, se encuentra en el suelo subsuperficial y algunos hidrocarburos están disueltos en el agua subterránea los principales retos son la disponibilidad de nutrientes y de oxígeno.**

**La descripción de las alternativas teóricas existe, pero en México aún no se han llevado a la práctica debido al riesgo que implica su aplicación.**



## RECOMENDACIÓN

**Cuando existe afectación al acuífero debido a la presencia de producto libre flotando sobre el nivel estático, no podrá aplicarse biorremediación,**

**primero procede una remediación física que consiste en la extracción del producto libre, seguida de su separación del agua subterránea**



## **DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN**

---

- **largos tiempos de tratamiento**
  - **difícil en materiales geológicos impermeables**
  - **susceptible a la presencia de inhibidores**
  - **difícil degradación de compuestos altamente clorados**
- 



**Un suelo contaminado adicionado de cal constituye un ambiente poco propicio para el desarrollo microbiano: aumenta el pH y reduce la disponibilidad de agua**

## **ATENUACIÓN NATURAL**

DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES  
EN SUELO Y SUBSUELO POR EFECTO DE LAS CONDICIONES NATURALES  
DEL SITIO, ESPECIALMENTE DE LA **FLORA NATIVA**

MEDIANTE LA UTILIZACIÓN EN CASCADA  
DE LOS DIFERENTES  
**ACEPTORES DE ELECTRONES** DISPONIBLES:

- ✓ Oxígeno
- ✓ Nitratos
- ✓ Ion férrico
- ✓ Sulfatos
- ✓ Bióxido de carbono

## **SEGUIMIENTO DE LA ATENUACIÓN NATURAL**

- ✓ Pérdida documentada de la concentración de contaminantes
- ✓ Registros de campo para demostrar que realmente están ocurriendo procesos naturales
- ✓ Ensayos en el laboratorio para confirmar la existencia de una actividad biodegradadora



Cada monitoreo es una re-caracterización

## ATENUACIÓN NATURAL: Monitoreo periódico a largo plazo

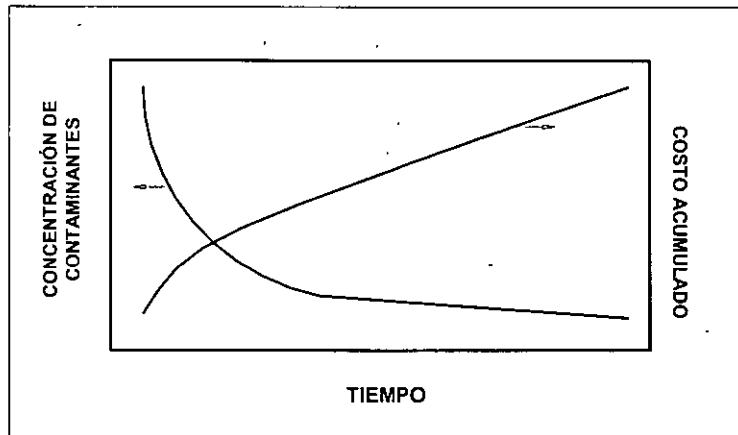
### √ EN CAMPO

- perforaciones discretas a la profundidad de la contaminación
- obtención de muestras inalteradas
- medición *in situ* de gases:  
(oxígeno, bióxido de carbono, nitrógeno, metano)

### √ EN EL LABORATORIO

- cuantificación de los contaminantes "objetivo" para la evaluación del riesgo a la salud
- cuantificación de la masa total de contaminantes
- cuantificación de bacterias degradadoras
- detección de genes catabólicos
- cuantificación de aceptores finales de electrones





COMPORTAMIENTO DE LA REMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO

**ssb@pumas.iingen.unam.mx**