



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

**A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS**

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

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

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

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

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

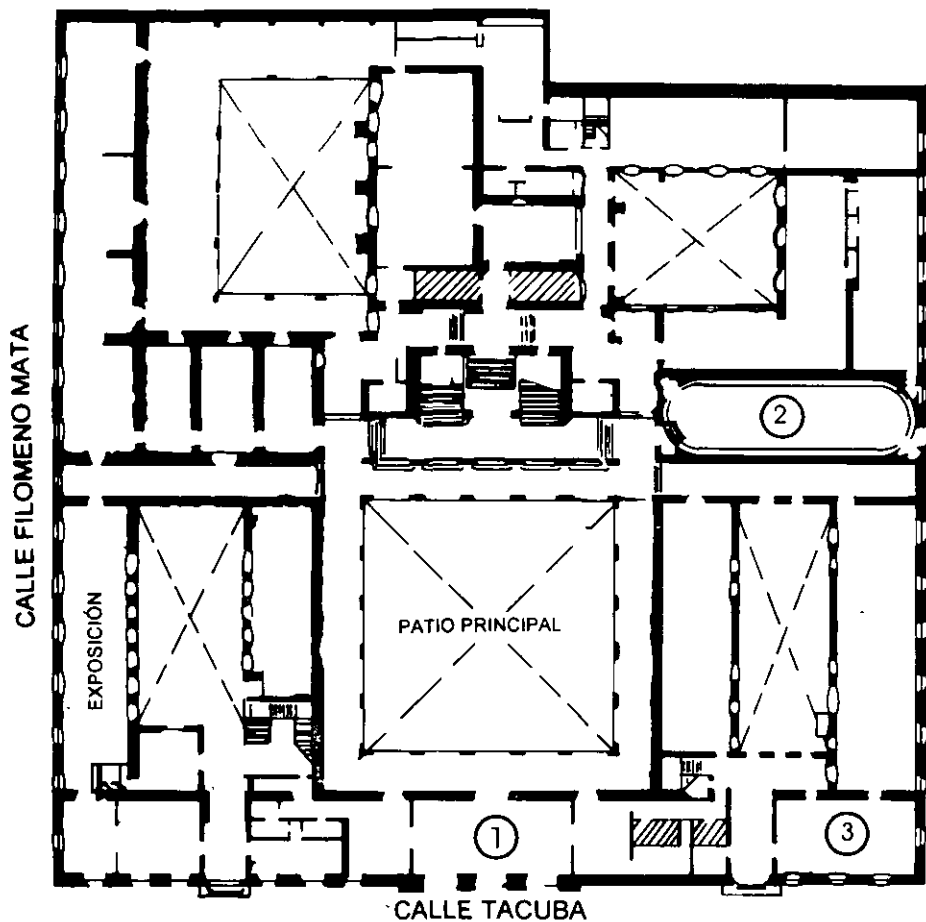
**Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.**

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

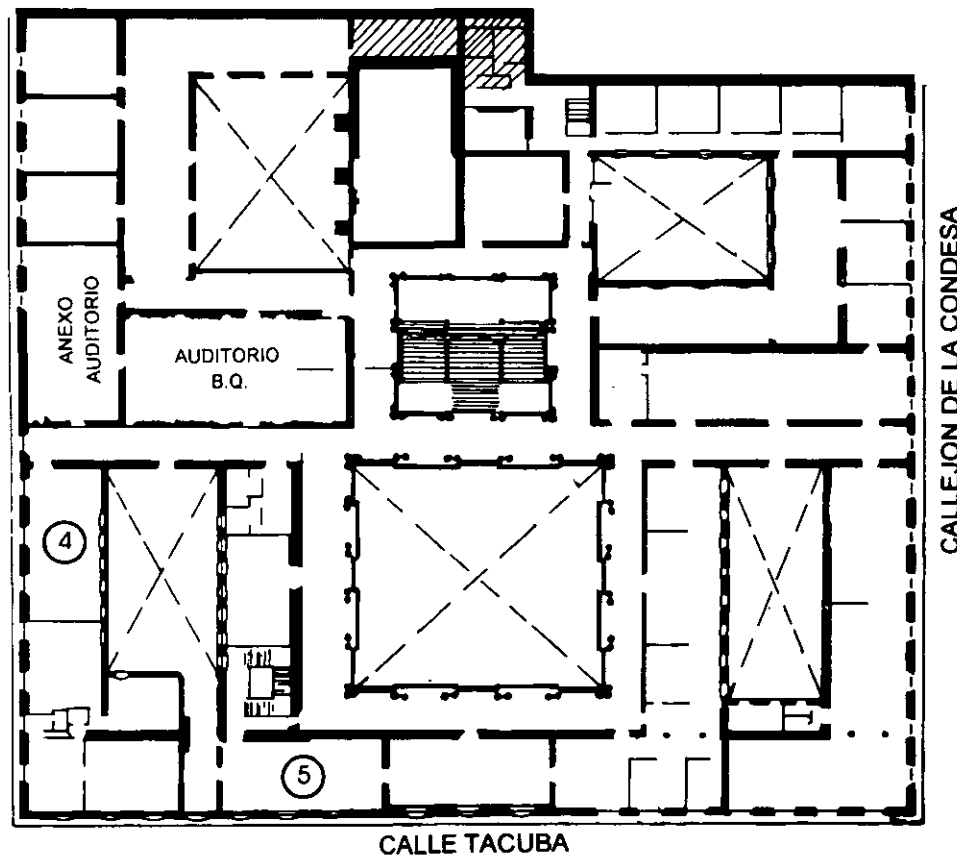
**Atentamente**

**División de Educación Continua.**

# PALACIO DE MINERIA

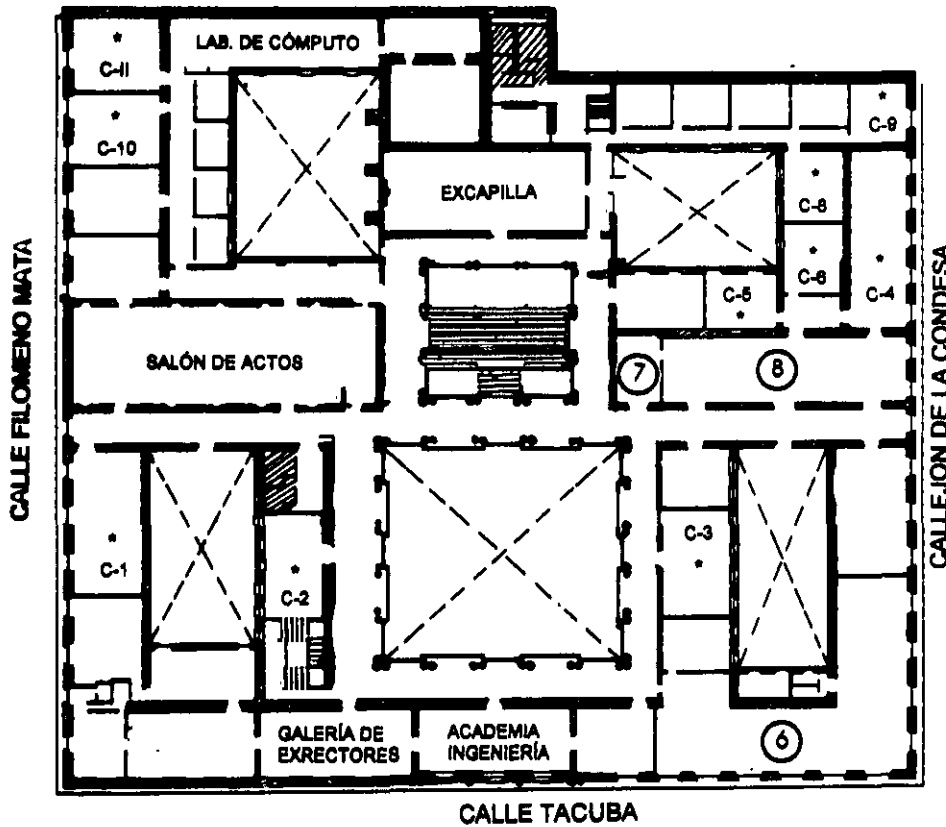


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

# PALACIO DE MINERÍA



## GUÍA DE LOCALIZACIÓN

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

**1er. PISO**



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



# **CURSOS ABIERTOS**

## **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

### **MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

#### **TEMA**

**EVALUACIONES DE RIESGO A LA SALUD**

**EXPOSITOR: MTRA. ROCIO ALATORRE  
PALACIO DE MINERIA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# UTILIDAD DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS DE SUSTANCIAS PELIGROSAS

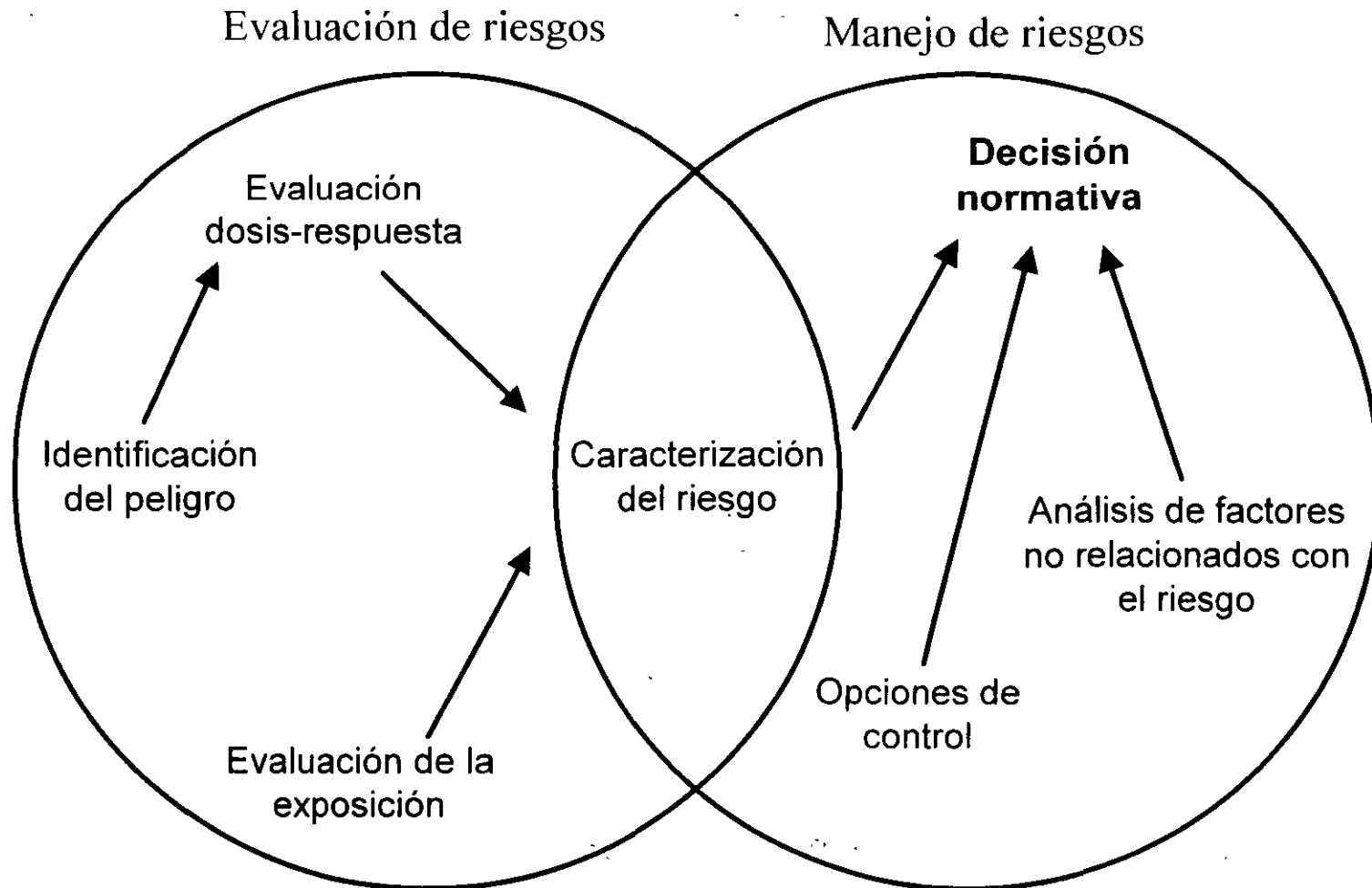
La evaluación de riesgos es una herramienta para:

- Integrar una política ambiental nacional con un enfoque sistemático y de prioridades.
- Medir y comparar problemas asociados a sustancias peligrosas empleando términos comunes.
- Valorar y elegir diferentes opciones de reducción de riesgos con una base común.

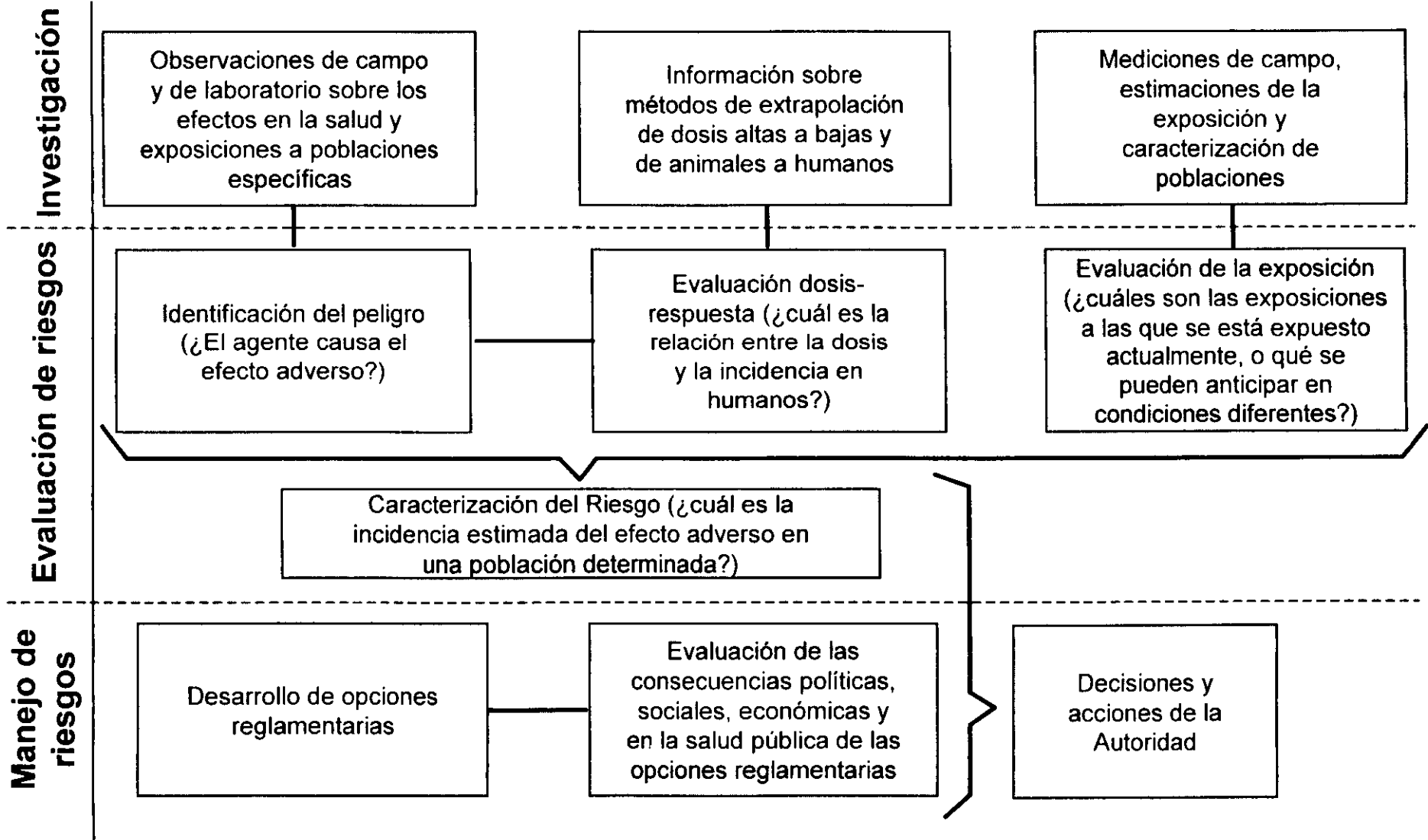
# DEBILIDADES DE LAS ERE'S

- No toman en cuenta de manera adecuada los efectos que pueden ocurrir si se incrementan las dosis
- No consideran las diferencias entre las pruebas conducidas en laboratorio y los datos observados en campo
- No pueden ser utilizadas para estimar los efectos indirectos de los contaminantes, por ejemplo, interacciones en la cadena alimentaria
- No cuantifican las incertidumbres inherentes
- No toman en cuenta de manera adecuada otros efectos a los ecosistemas (relaciones presa-depredador, el metabolismo de las comunidades, los cambios estructurales, etc)

# GESTIÓN DE RIESGOS DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS



# ELEMENTOS DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MANEJO DE RIESGOS

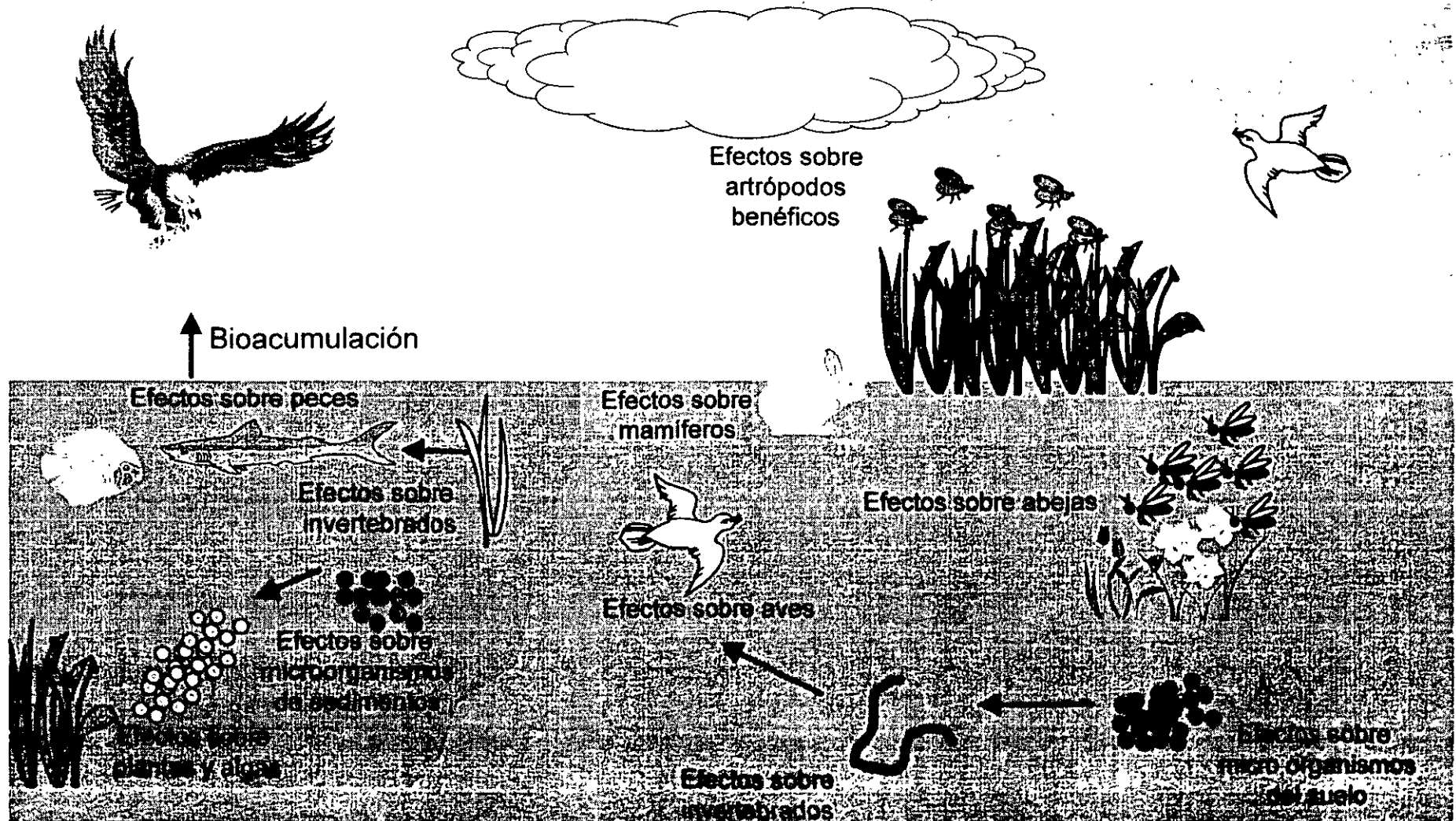




# **MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS**

1. Método de cálculo de cocientes
2. Análisis del error de la extrapolación
3. Análisis de árbol de fallas
4. Método de jerarquía analítica
5. Análisis de incertidumbre de ecosistemas

# EVALUACIÓN DE EFECTOS ECOTOXICOLÓGICOS



# DATOS BÁSICOS PARA EVALUAR LA PELIGROSIDAD Y LOS RIESGOS DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Identidad y peligrosidad de las sustancias	Datos para estimar la exposición	Datos para evaluar efectos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre común y químico</li> <li>• Registro CAS*</li> <li>• Propiedades:               <ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Físicas</li> <li>▸ Químicas</li> <li>▸ Toxicológicas</li> <li>▸ Ecotoxicológicas</li> <li>▸ Persistencia</li> <li>▸ Biodegradabilidad</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuentes en cada fase del ciclo de vida</li> <li>• Patrones de uso</li> <li>• Volumen producido, importado o emitido</li> <li>• Productos y procesos que la involucran</li> <li>• Niveles en medios ambientales (aire, agua, suelo, sedimentos)</li> <li>• Cantidad de sustancia en contacto con receptores</li> <li>• Ingestión diaria de alimentos y bebidas contaminadas</li> <li>• Volumen inhalado de contaminantes</li> <li>• Cantidad de sustancia absorbida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa de morbilidad o mortalidad por padecimientos o alteraciones asociadas a la exposición</li> </ul>

\* CAS: Chemical Abstract Service

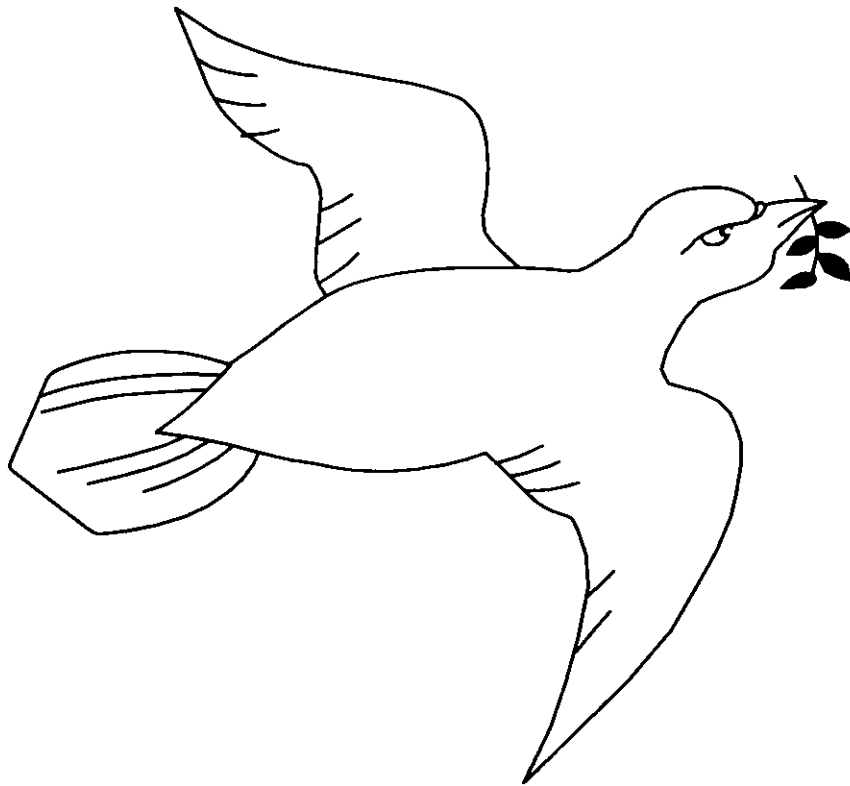
# PROCEDIMIENTOS ESTÁNDAR DE EVALUACIÓN (SEP´S)

- LD50 mediante dosis oral única para aves
- CL50 para alimentación de aves
- Prueba de toxicidad aguda para peces de agua dulce
- Prueba de toxicidad aguda para invertebrados de agua dulce
- Prueba de toxicidad aguda para mamíferos silvestres
- DL50 por contacto agudo en abejas
- Prueba de toxicidad aguda para organismos estuarinos y marinos: a) toxicidad aguda de 96 horas para peces estuarinos; b) toxicidad aguda de 96 horas para camarón; c) pruebas de depositación en conchas de moluscos; d) estudio de 48 hrs en larvas y embriones de moluscos
- Toxicidad de residuos en follajes para abejas

# EVALUACIÓN DE RIESGO

- Los datos de peligrosidad toxicológica y los datos de exposición se comparan utilizando criterios regulatorios de riesgo.
- Típicamente, los datos de peligrosidad toxicológica consisten en valores de dosis letal media ó DL50, y de la concentración letal media ó CL50 agudos, o niveles de efectos no crónicos para la especie indicador más sensible.

# ERE's

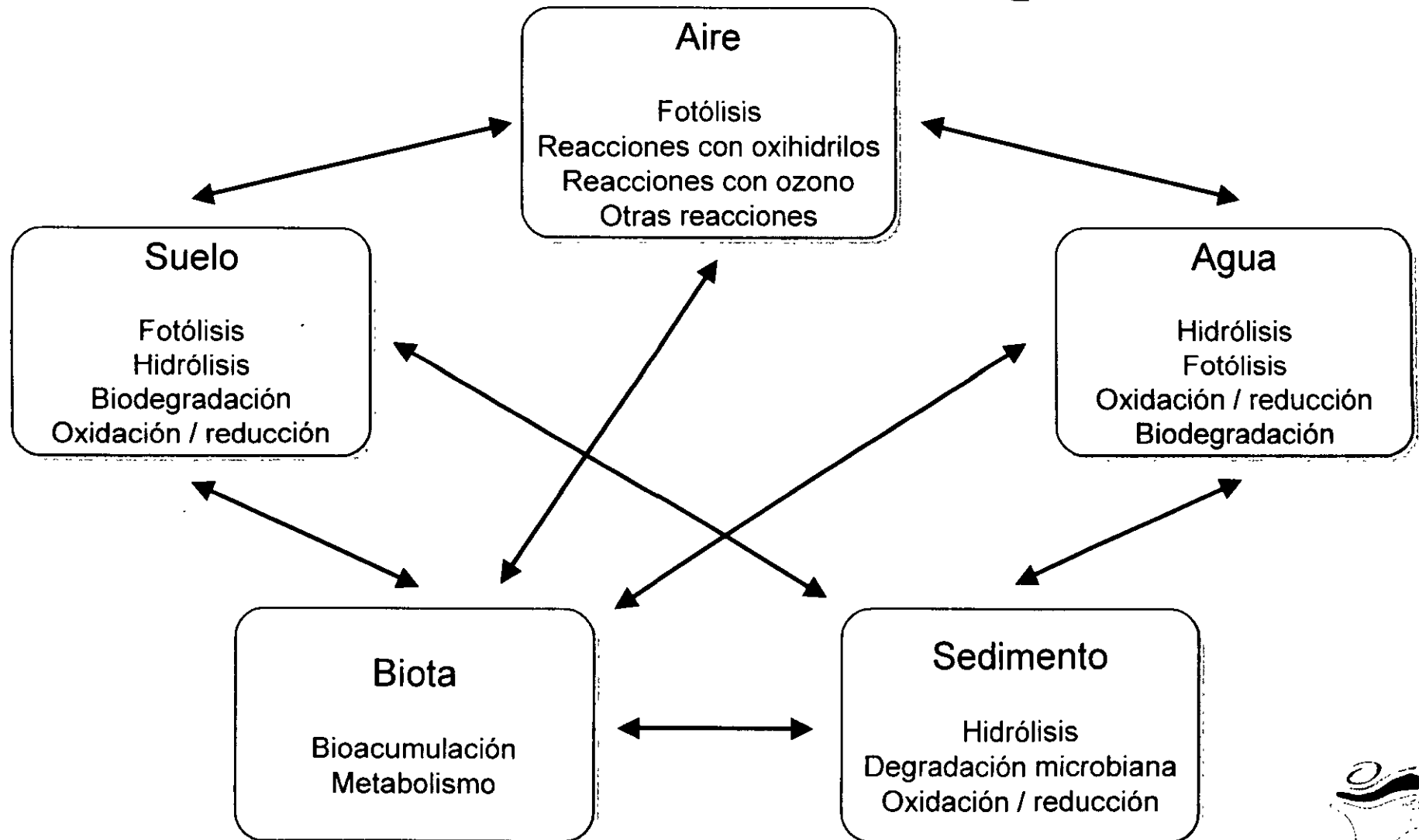


4. La integración de la información de dosis-respuesta dada cierta exposición, para derivar estimaciones sobre la probabilidad de los riesgos asociados al uso de determinadas sustancias en poblaciones no blanco

# FACTORES A CONSIDERAR AL DETERMINAR LA EXPOSICIÓN DE SERES HUMANOS A SUSTANCIAS QUÍMICAS

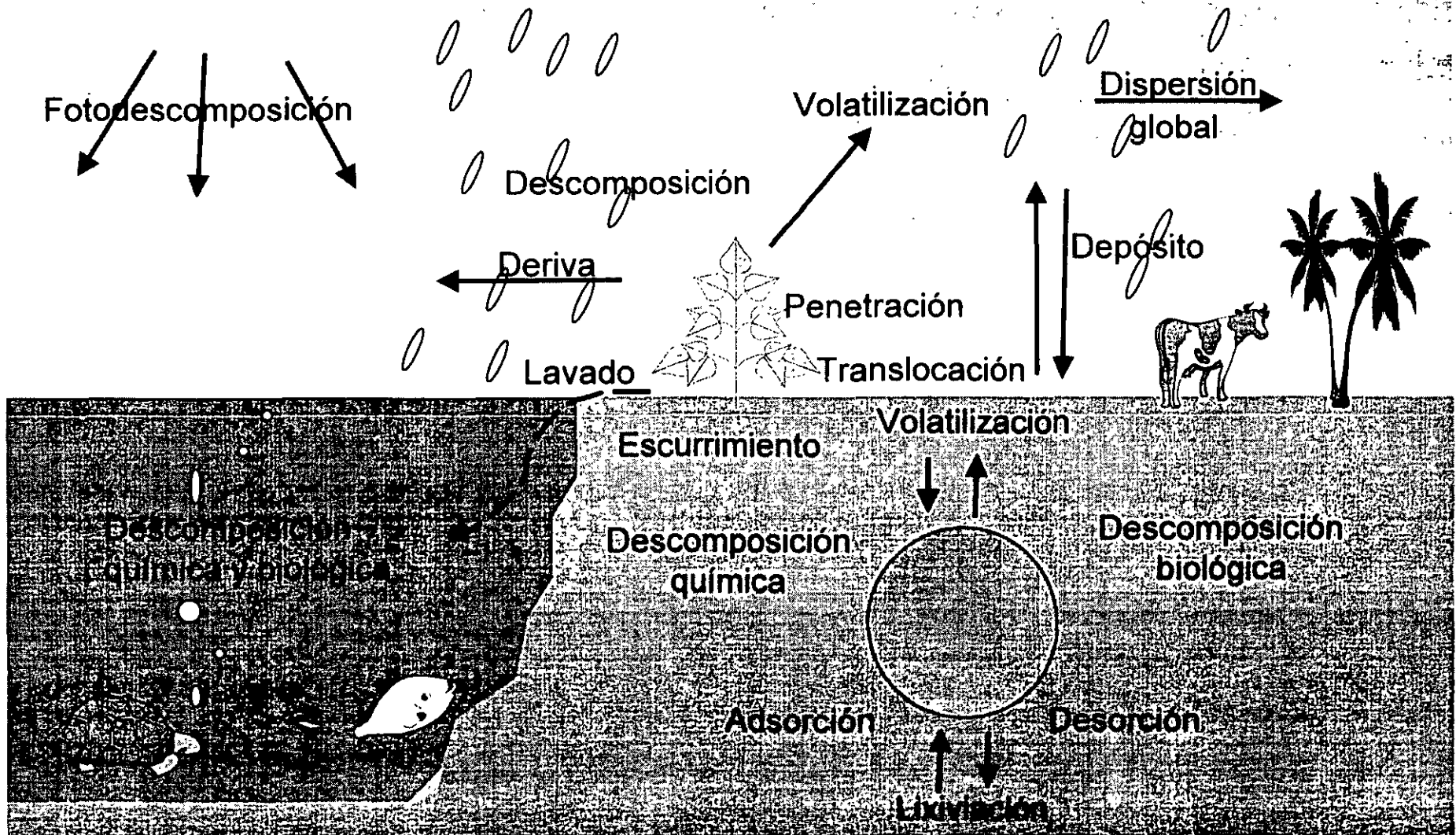
- Exámen del grado y frecuencia de la exposición
  - ¿Que tan grande es la exposición?
  - ¿Que tan frecuente?
  - ¿Con cuánta certidumbre se puede precisar?
- Datos de monitoreos Vs. Estimaciones usando modelos
- Identificación del número de personas expuestas
- Cálculo del grado de absorción por diversas vías de exposición
- Exposición de individuos promedio o típicos, así como de grupos de alto riesgo

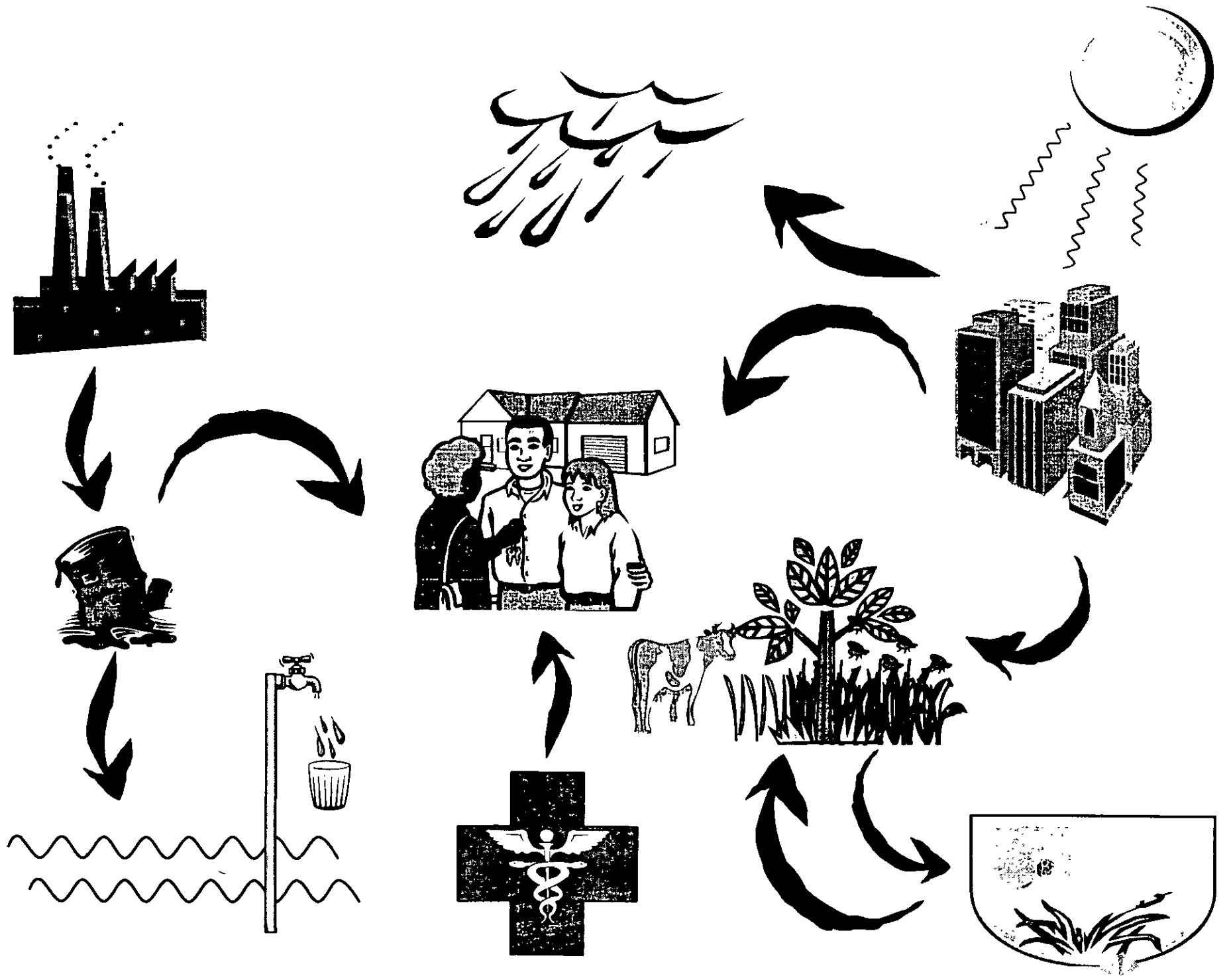
# MECANISMOS QUE INFLUYEN EN EL DESTINO Y TRANSPORTE DE SUSTANCIAS QUÍMICAS





# DESTINO Y TRANSPORTE DE LAS SUSTANCIAS EN EL AMBIENTE





# DEFINICIÓN DE LA EXPOSICIÓN

- Exposición: Es el contacto de un agente químico, físico o biológico con los límites exteriores de un organismo.
- Evaluación de la exposición: Es la determinación o estimación de la magnitud, frecuencia, duración y vía de exposición

# RUTAS DE EXPOSICIÓN

○ Inhalación

○ Ingestión

○ Contacto  
dérmico

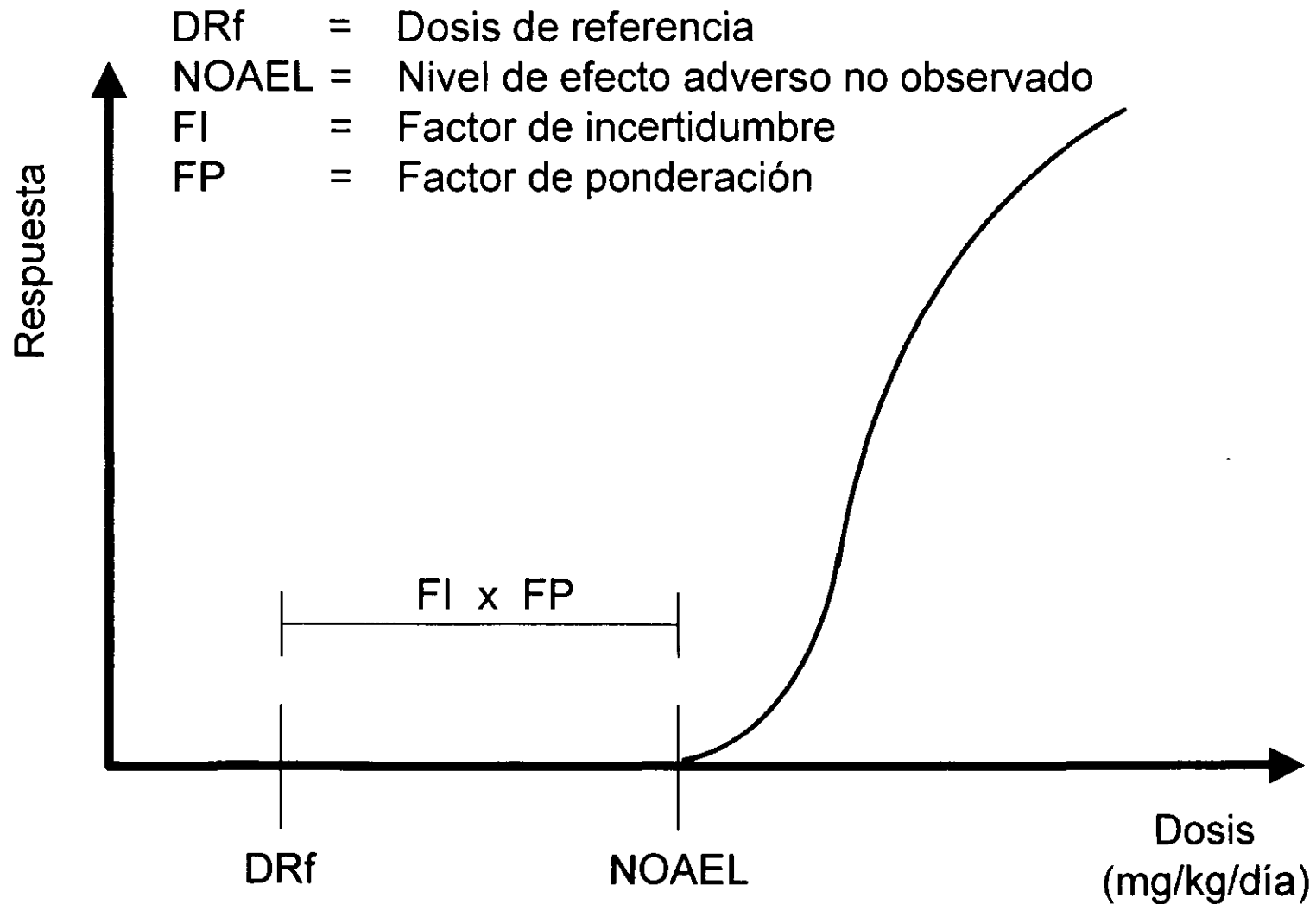


# ERE's

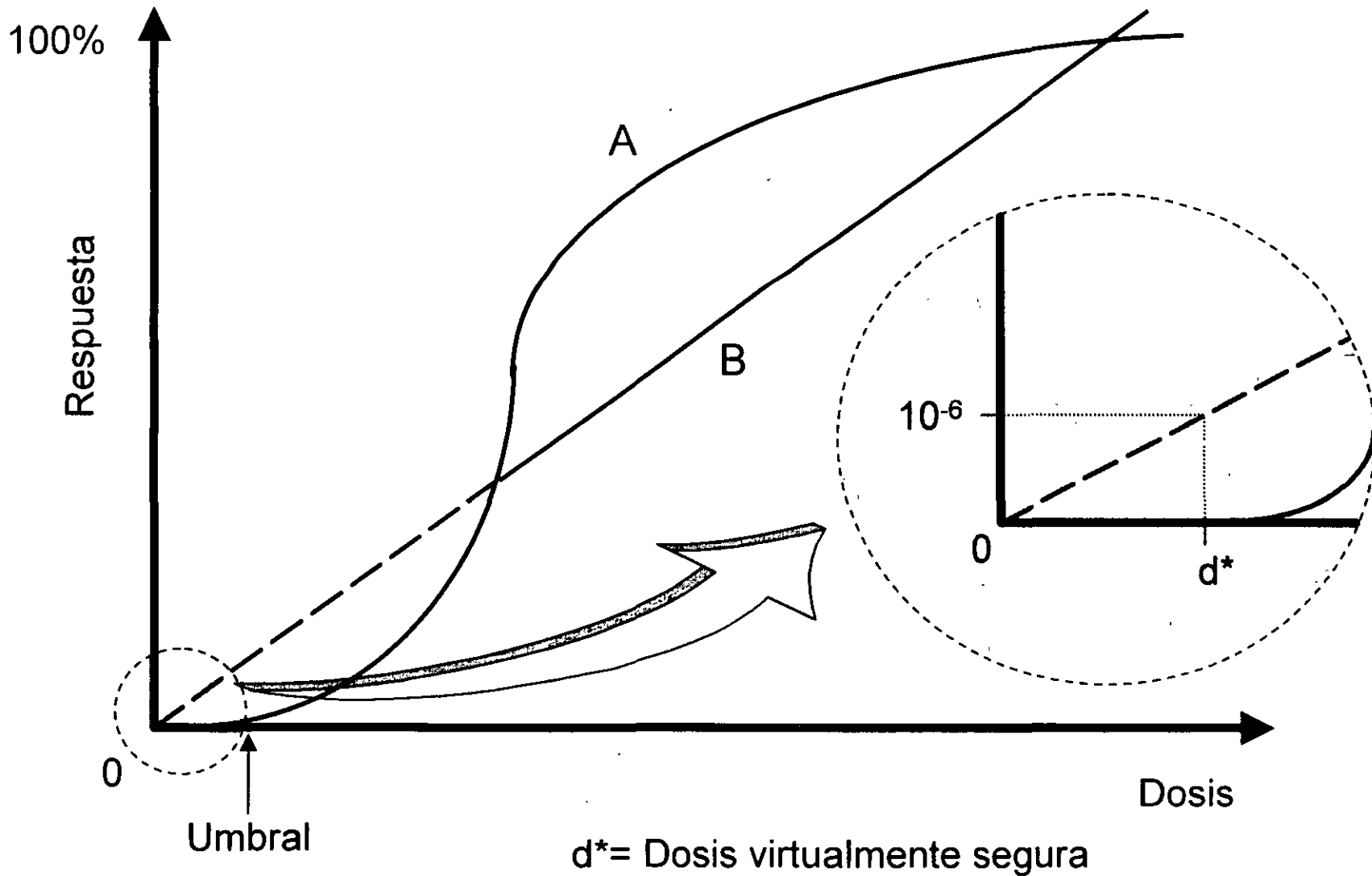


3. La identificación de condiciones de exposición (intensidad, frecuencia y duración)

# DOSIS DE REFERENCIA (DRF)



# RELACIÓN DOSIS-RESPUESTA PARA UN AGENTE NO CARCINOGENICO (A) Y PARA UNA SUSTANCIA CARCINOGENICA (B)



Fuente. Herbert E. Stokinger (1972). Concepts of thresholds in standard setting. Arch. Environ. Health 25:155.

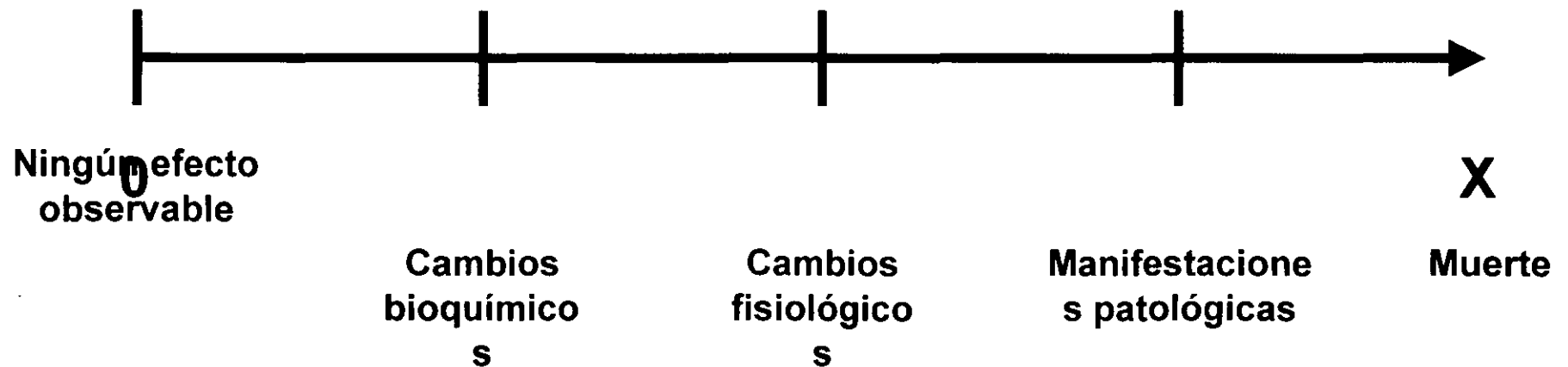
# BASES CONCEPTUALES DE LA GESTIÓN DE LAS SUSTANCIAS PELIGROSAS

Gradiente de toxicidad

**Dosis**

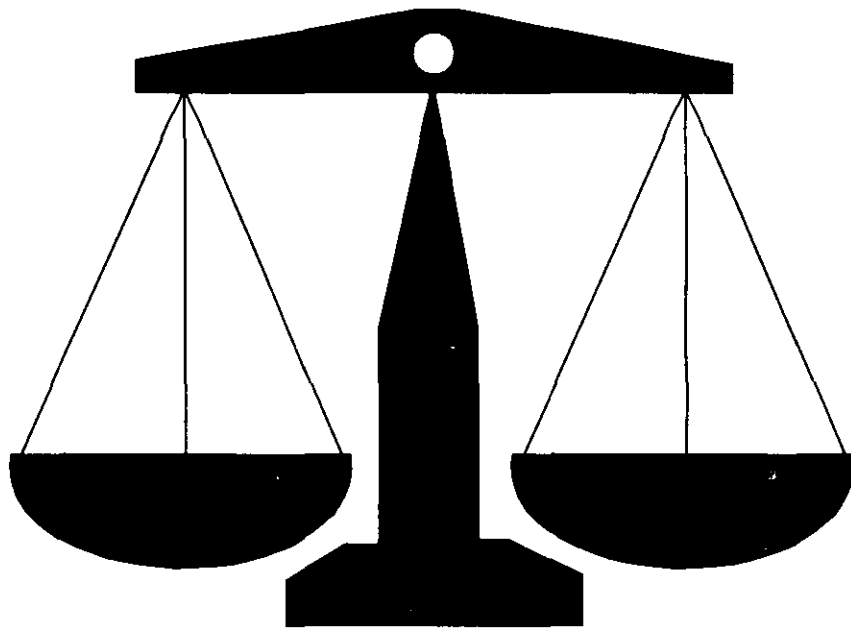
¿Efectos aceptables?

Efectos adversos



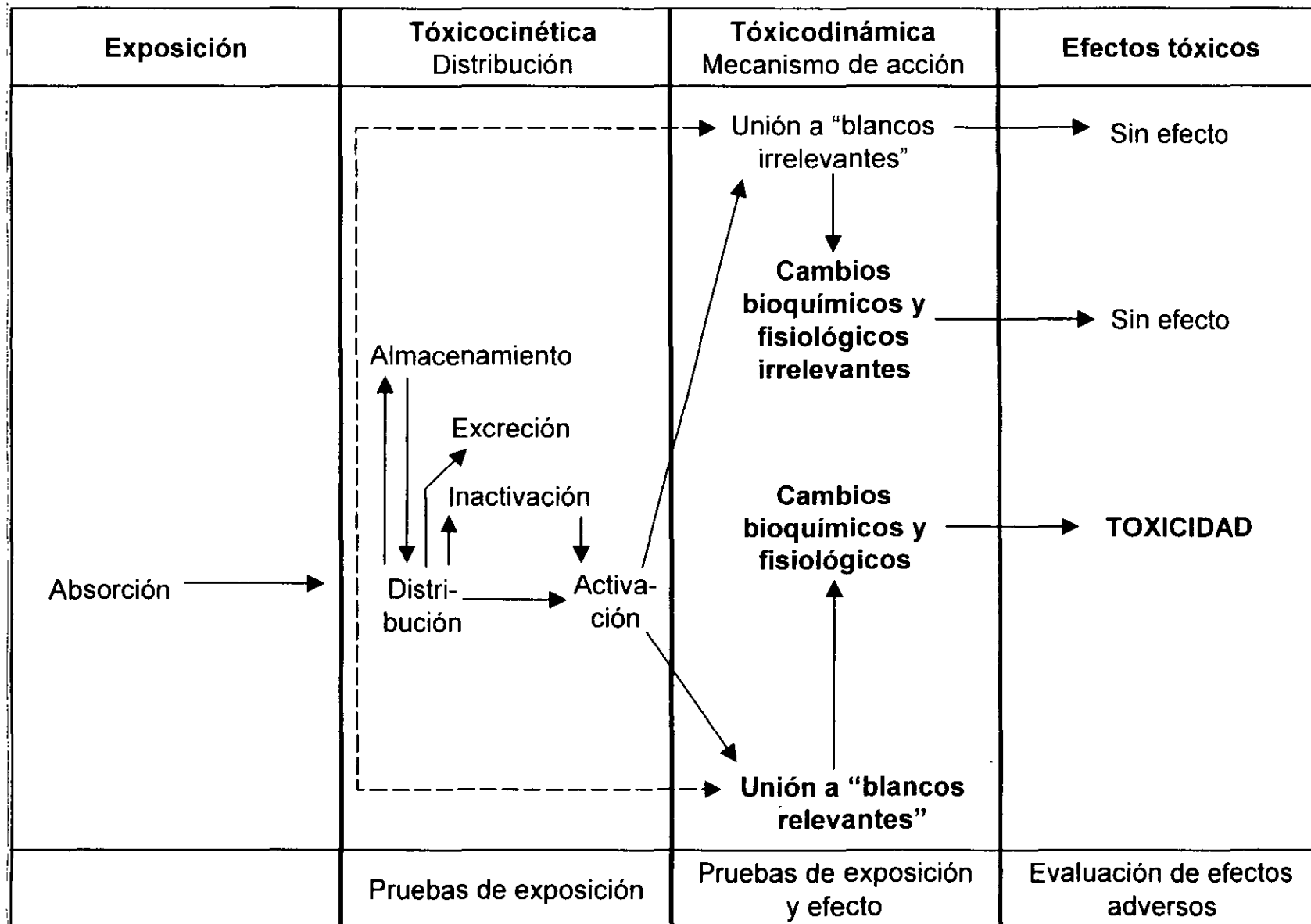


# ERE'S



2. La identificación y evaluación de las relaciones dosis-respuesta cuantitativas observadas

# DESTINO Y REACCIONES DE LAS SUSTANCIAS EN LOS ORGANISMOS Y PRUEBAS PARA DETERMINAR EXPOSICIÓN Y EFECTOS



# PRUEBAS PARA EVALUAR LA TOXICIDAD POTENCIAL DE SUSTANCIAS QUÍMICAS PARA SERES HUMANOS

## ○ Agudas

- Toxicidad aguda oral en ratas
- Toxicidad aguda dérmica
- Toxicidad aguda inhalatoria en rata
- Irritación primaria en ojos en conejos
- Irritación primaria dérmica
- Sensibilidad dérmica
- Neurotoxicidad aguda retardada en gallina

## ○ Subcrónicas

- Alimentación por 90 días en roedores y no roedores

## ○ Crónicas

- Alimentación crónica en dos especies roedor y no roedor
- Oncogenicidad en dos especies en rata y ratón de preferencia
- Teratogenicidad en dos especies
- Reproducción, dos generaciones
- Mutagenicidad:
  - Mutaciones génicas
  - Aberraciones cromosómicas
- Otros efectos genotóxicos

## ○ Especiales

- Metabolismo general

# PRUEBAS PARA EVALUAR LA PELIGROSIDAD AMBIENTAL DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

## Datos sobre destino ambiental

- Degradación en el ambiente:
  - Hidrólisis
  - Fotodegradación en agua
- Metabolismo en el laboratorio
  - Aeróbico en suelo
  - Anaeróbico acuático
  - Aeróbico acuático
- Movilidad
  - Lixiviación y adsorción/desorción
- Disipación en campo
  - Suelo
  - Cuerpos de agua (sedimentos)
  - Bosques

## Toxicidad en organismos de vida silvestre y acuáticos

- Pruebas en aves
  - DL50 oral en aves (preferentemente en pato y codorniz)
  - CL50 en dieta de aves
- Pruebas en organismos acuáticos
  - CL50 en peces de agua dulce (preferentemente trucha arcoiris)
  - CL50 aguda en invertebrados de agua dulce (Dafnia de preferencia)
- Fitotoxicidad en áreas no blanco
  - Germinación de semillas/emergencia de brotes
  - Vigor vegetativo
  - Crecimiento de plantas acuáticas

# PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS QUE HACEN RIESGOSAS A LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Propiedades	Ejemplos de Implicaciones
Solubilidad en agua > 500 mg/l	Peligro de movilización en suelos, contaminación de acuíferos y acumulación en ecosistemas acuáticos.
Presión de vapor > $10^{-3}$ mm de mercurio	Peligro de volatilización y difusión atmosférica.
Persistencia mayor a seis meses reteniendo sus características físicas, químicas y toxicológicas	Peligro de acumulación en los diferentes medios ambientales y de bioacumulación.
Coeficiente de reparto octanol/agua (Log $K_{ow}$ ) > 1	Peligro de absorción a través de membranas celulares y acumulación en tejido adiposo.

# ERE'S



1. La revisión y evaluación de los datos que identifican la naturaleza de la peligrosidad

# **EVALUACIONES DE RIESGO ECOLÓGICO (ERE)**

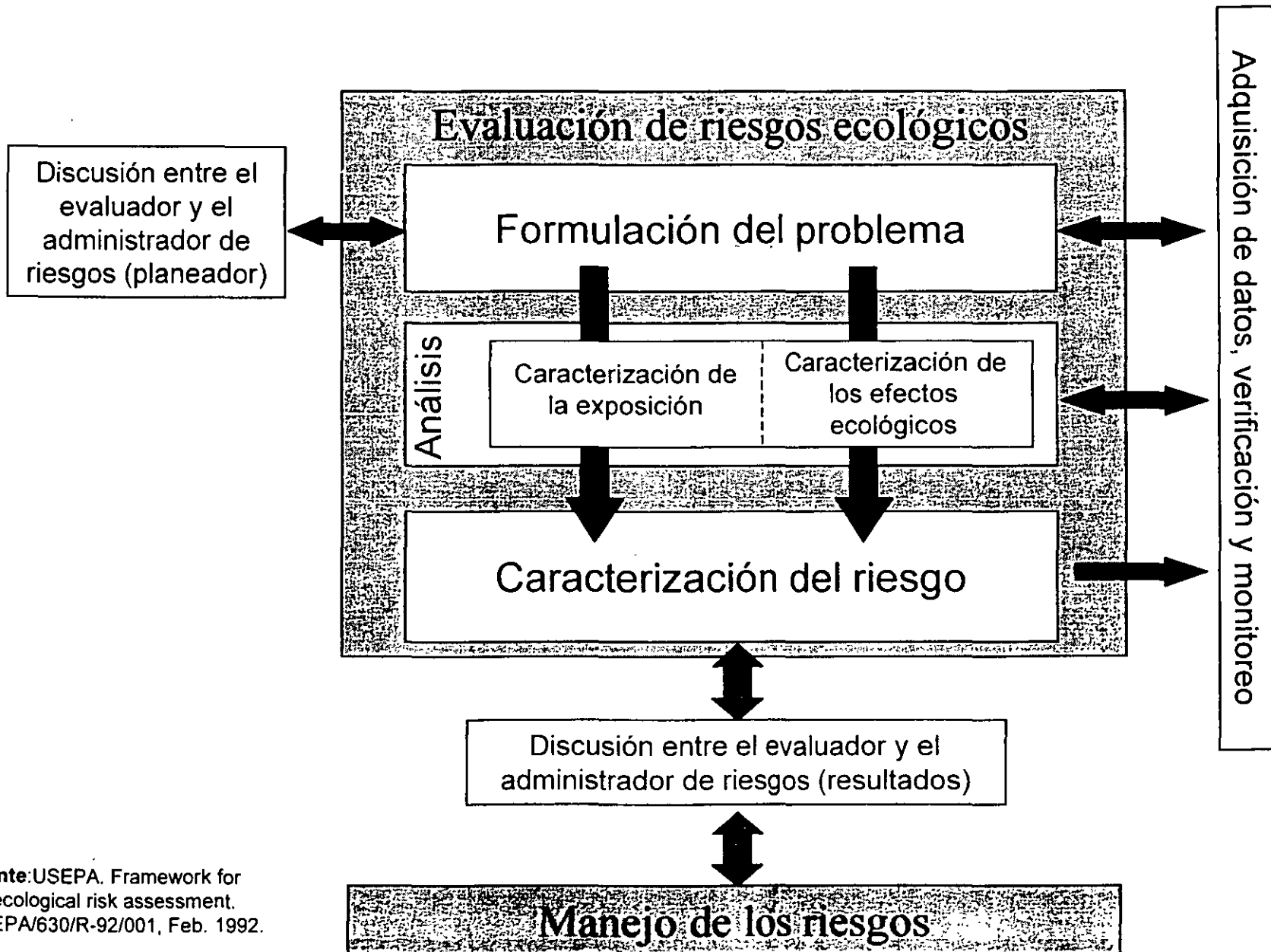
## **PROCEDIMIENTOS**

# ¿QUÉ ES LA EVALUACIÓN DE RIESGOS?

Un proceso cualitativo/cuantitativo que se lleva a cabo para caracterizar la naturaleza y magnitud de los riesgos potenciales para la salud pública, de la exposición a sustancias peligrosas, contaminantes o agentes liberados de sitios que contienen residuos peligrosos.



# MARCO PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS



Fuente: USEPA. Framework for ecological risk assessment. EPA/630/R-92/001, Feb. 1992.

# RIESGO

---

¿Qué es riesgo?

○ La probabilidad de daño, enfermedad o muerte

¿Qué es riesgo Ambiental?

○ La probabilidad de daño, enfermedad o muerte que resulta de la exposición a un peligro ambiental

# **RIESGO**

- Subjetivo
- El mundo no está libre de riesgos
- Incertidumbre y complejidad
- Producto de la probabilidad

## **CURSOS ABIERTOS**

### **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO,  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

#### **TEMA**

**EVALUACIONES DE RIESGO AL AMBIENTE**

**EXPOSITOR: MTRA. ROCIO ALATORRE  
PALACIO DE MINERIA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD Y EL AMBIENTE

... ..

ROCÍO ALATORRE EDEN WYNTER

05 DE NOVIEMBRE DEL 2001

# DEFINICIONES

- Peligrosidad: Propiedad inherente a las sustancias que les confiere la capacidad de provocar efectos adversos en la salud de los seres humanos, la flora, la fauna y los bienes por su corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y/o inflamabilidad.
- Riesgo: Probabilidad de que una sustancia peligrosa provoque un efecto adverso en la salud humana y/o el ambiente en función de la exposición.

## **CURSOS ABIERTOS**

### **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

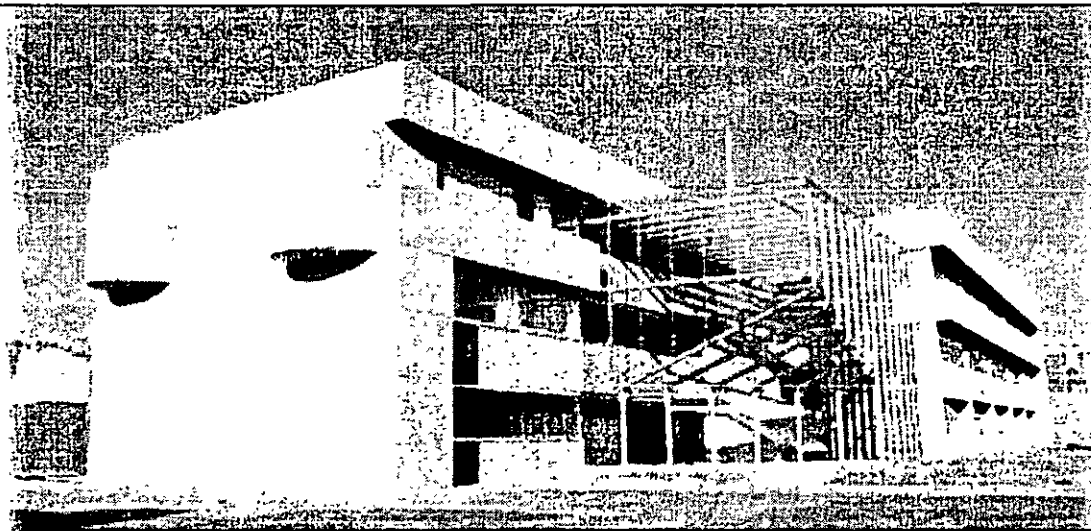
**TEMA**

**INCINERACIÓN DE SUELOS Y RESIDUOS PELIGROSOS**

**EXPOSITOR: ING. VICTOR GUTIÉRREZ  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental

## INCINERACIÓN DE RESIDUOS



*Víctor J. Gutiérrez Avedoy*

05 de noviembre del 2001



# Tratamiento

## DEFINICION

Conjunto de técnicas o métodos de procesamiento químicos, físicos o biológicos, que se aplican a los residuos sólidos con la finalidad de modificar sus características

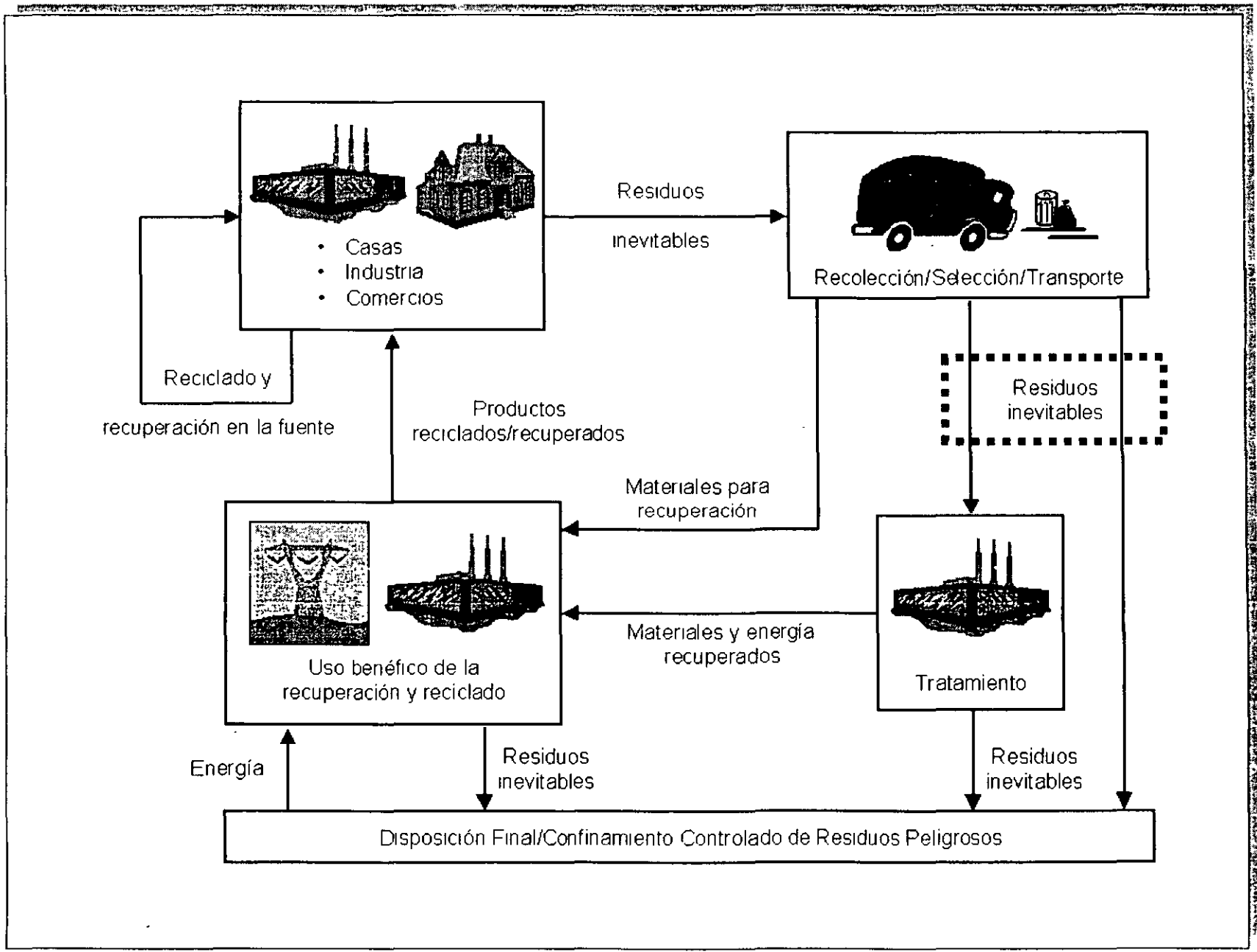
# Tratamiento

## OBJETIVO PRINCIPAL

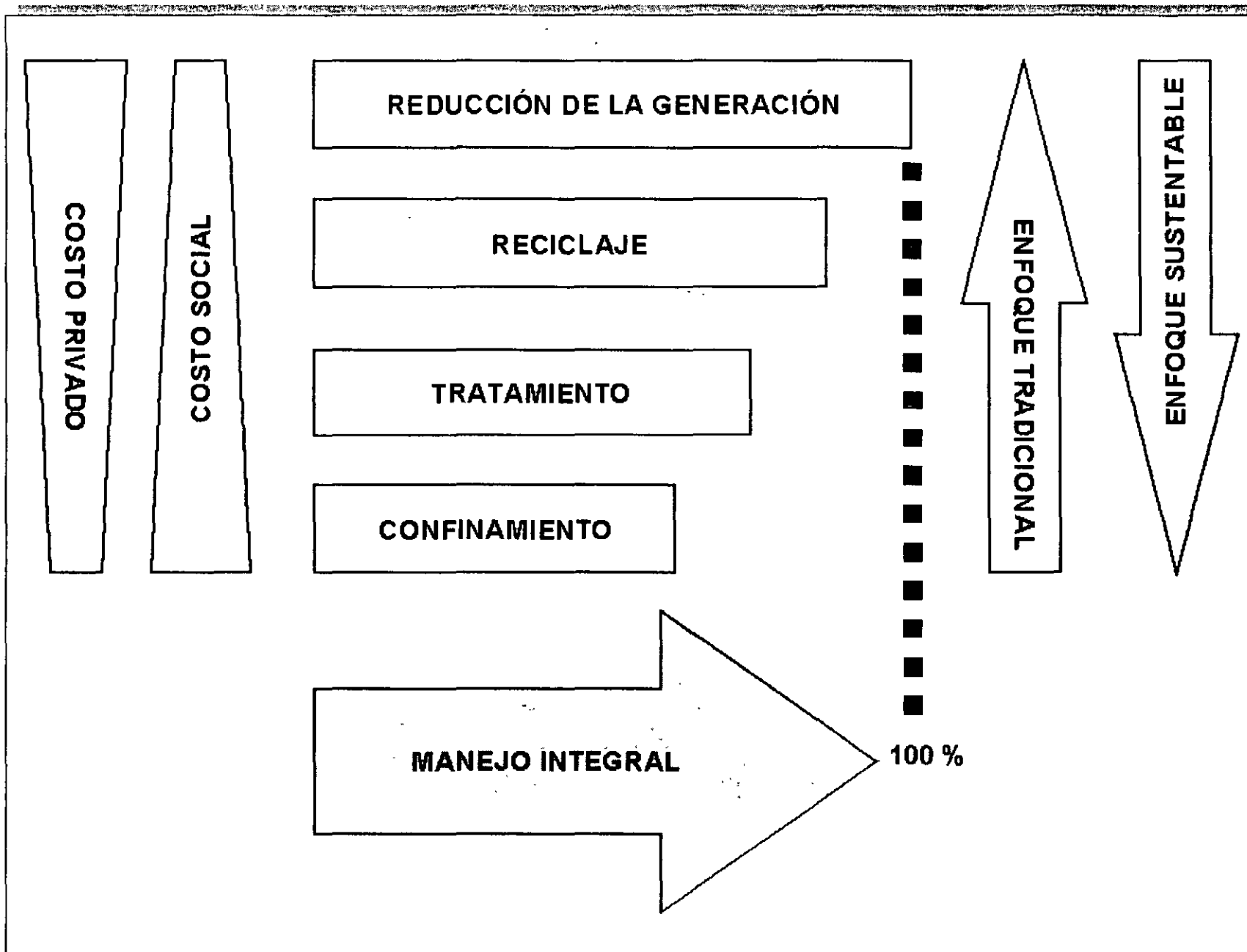
- *Eliminación de peligrosidad*

## Otros:

- **Reciclaje de subproductos**
- **Reducción de volumen**
- **Recuperación de energía**
- **Facilitar su manejo**

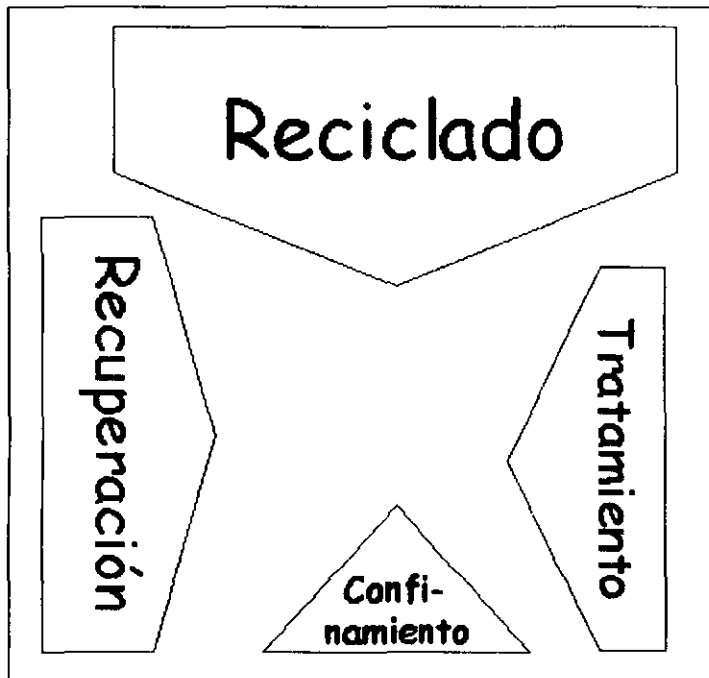


Fuente: **Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, INE 1999**

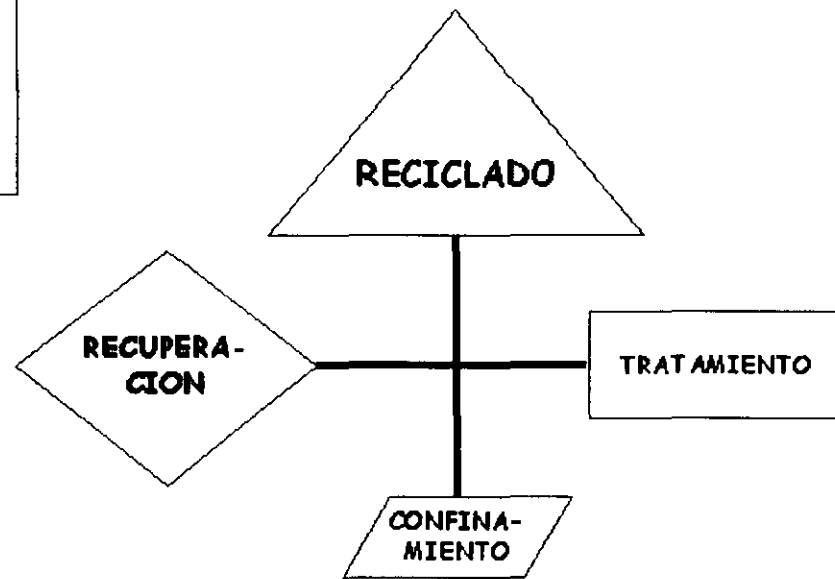


Fuente: *Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, INE 1999*

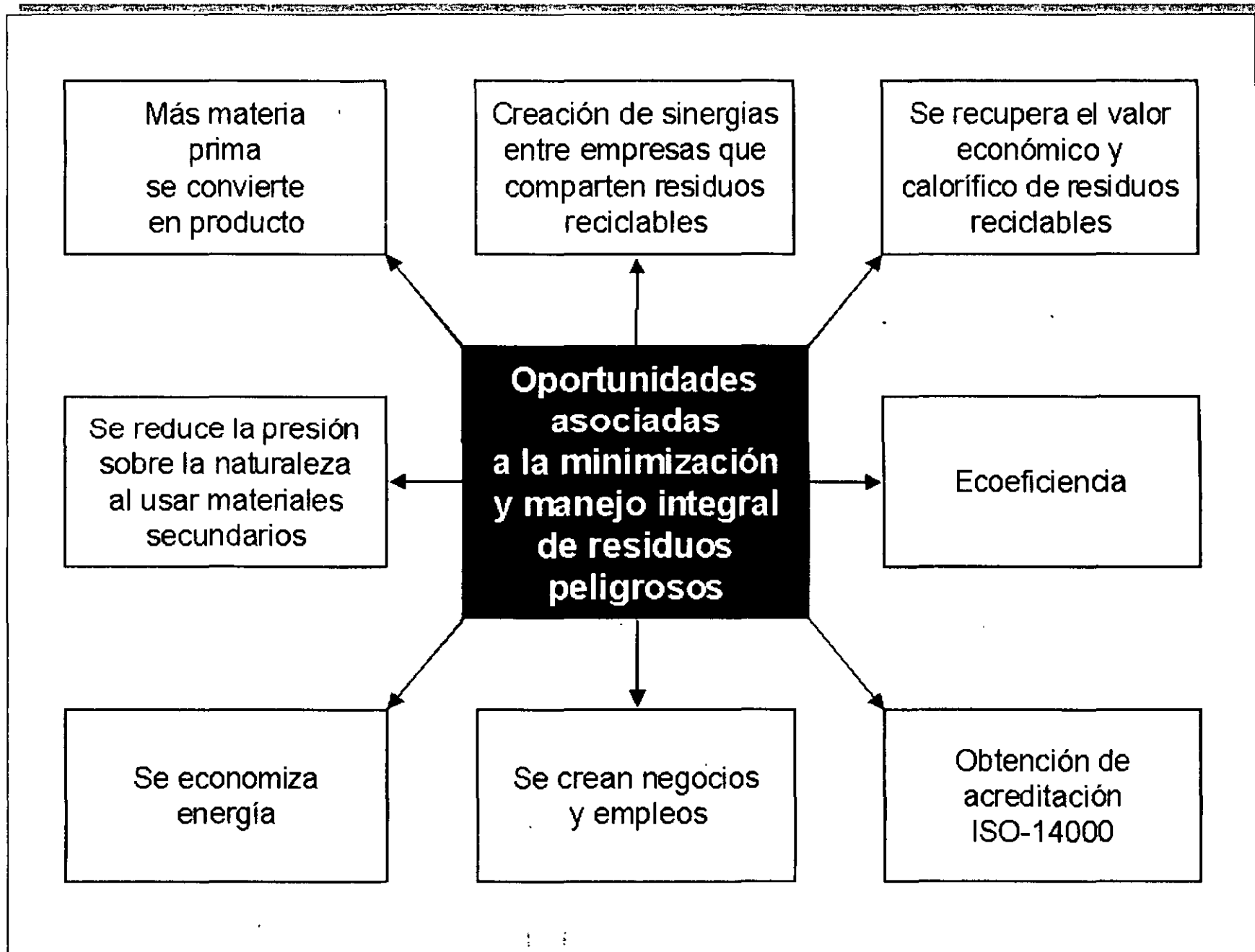
CIMARI



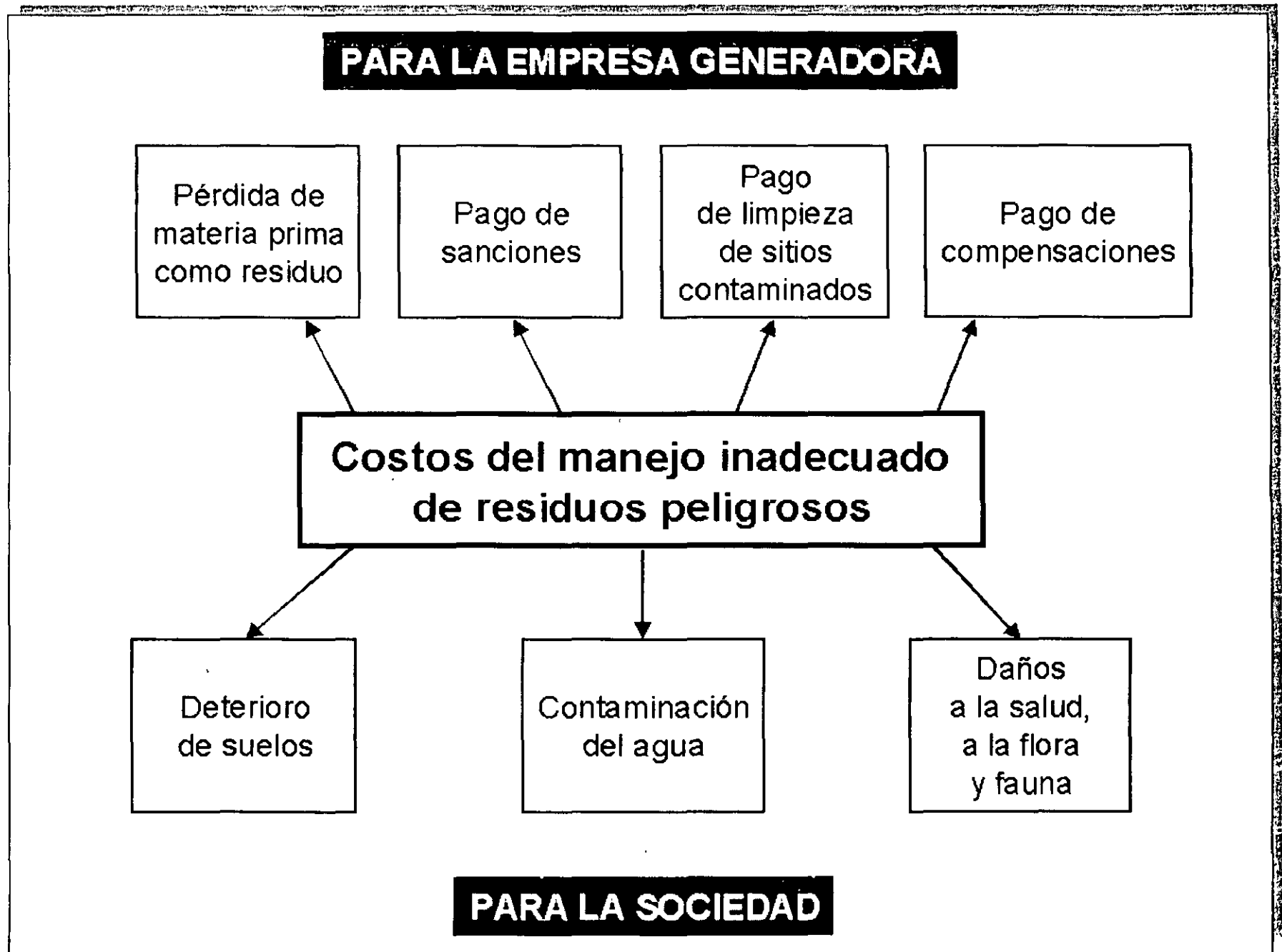
Centro VS Sistema



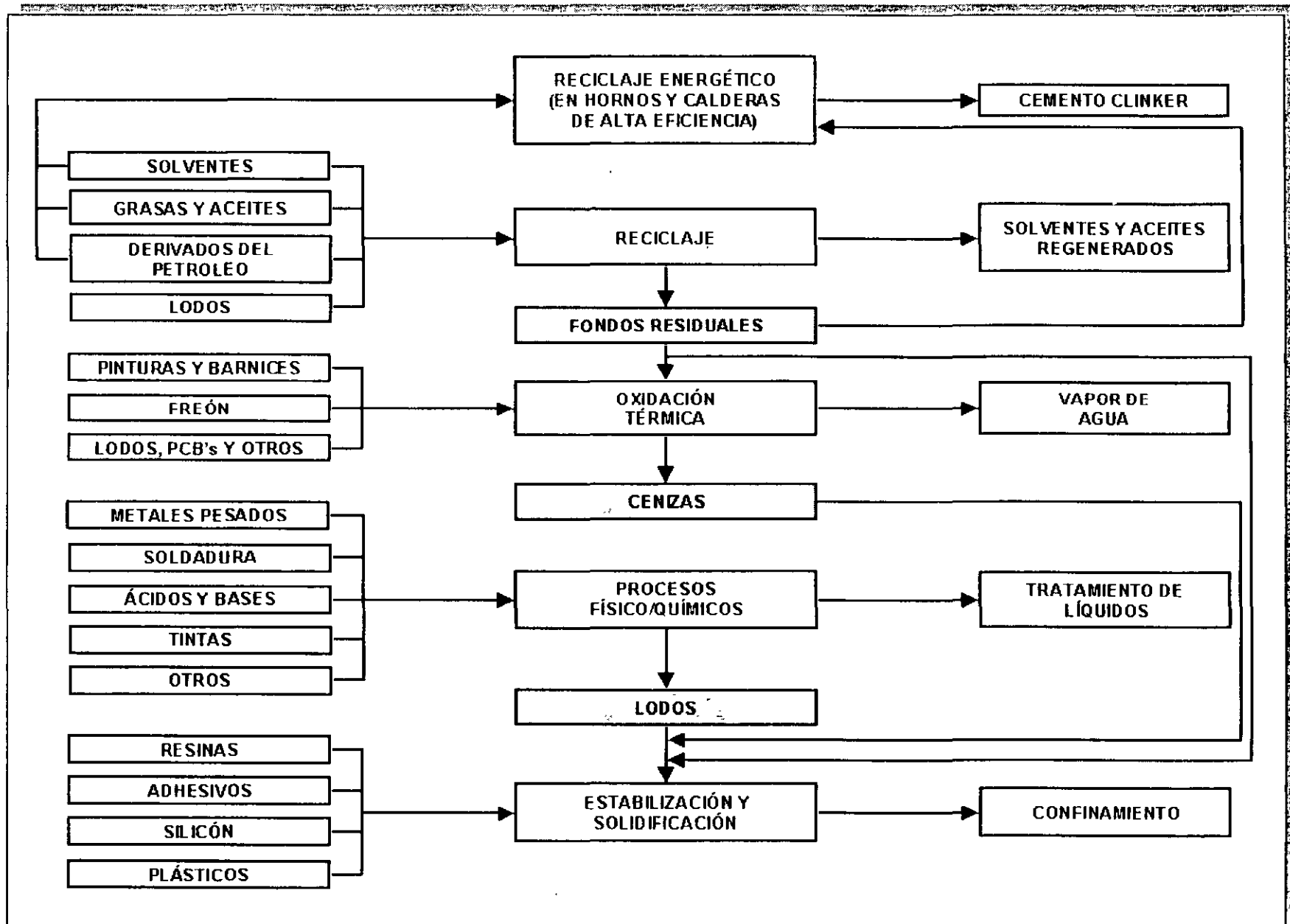
SIMARI



Fuente: *Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos*, INE 1999



Fuente: *Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos*, INE 1999



Fuente: *Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, INE 1999*



# ***Procesos de destrucción térmica***

## **❖ Incineración**

- inyección líquida**
- horno rotatorio**
- horno de lecho fluidizado**

## **❖ Pirólisis**

## **❖ Oxidación con aire húmedo**

## **❖ Calderas industriales**

## **❖ Antorcha de plasma**

# ***Procesos de destrucción térmica***

- ❖ **Hornos industriales**
  - **cementeros**
  - **de fundición**
- ❖ **Incineración infrarroja**
- ❖ **Sal fundida**
- ❖ **Vidrio fundido**
- ❖ **Metal fundido**

# Incineración

## Definición

Proceso de **tratamiento** que consiste en la transformación de los residuos en un producto **gaseoso** y un producto **sólido** relativamente inerte y libre de microorganismos, en base a una **combustión controlada** vía oxidación a **altas temperaturas.**

# Incineración

## Objetivos

- Destrucción del RP, y con ello su peligrosidad
- Recuperación de energía
- Destrucción de microorganismos

# Incineración

## Ventajas

- Las condiciones climatológicas no afectan el proceso
- Requiere relativamente de poco espacio
- Dependiendo de las condiciones de los RP, la recuperación de energía es posible

# Incineración

## Desventajas

- Implica altos costos de capital, operación y mantenimiento
- Requiere de personal especializado para las actividades de operación y mantenimiento
- Durante la combustión se destruyen materiales potencialmente reciclables

# Incineración

## Desventajas

- Requiere de equipos para control de emisiones sumamente eficientes para prevenir la contaminación ambiental
- Se requiere siempre la disposición final de cenizas y escorias
- Para residuos de bajo poder calorífico puede requerirse combustible adicional

# Incineración

## Parámetros

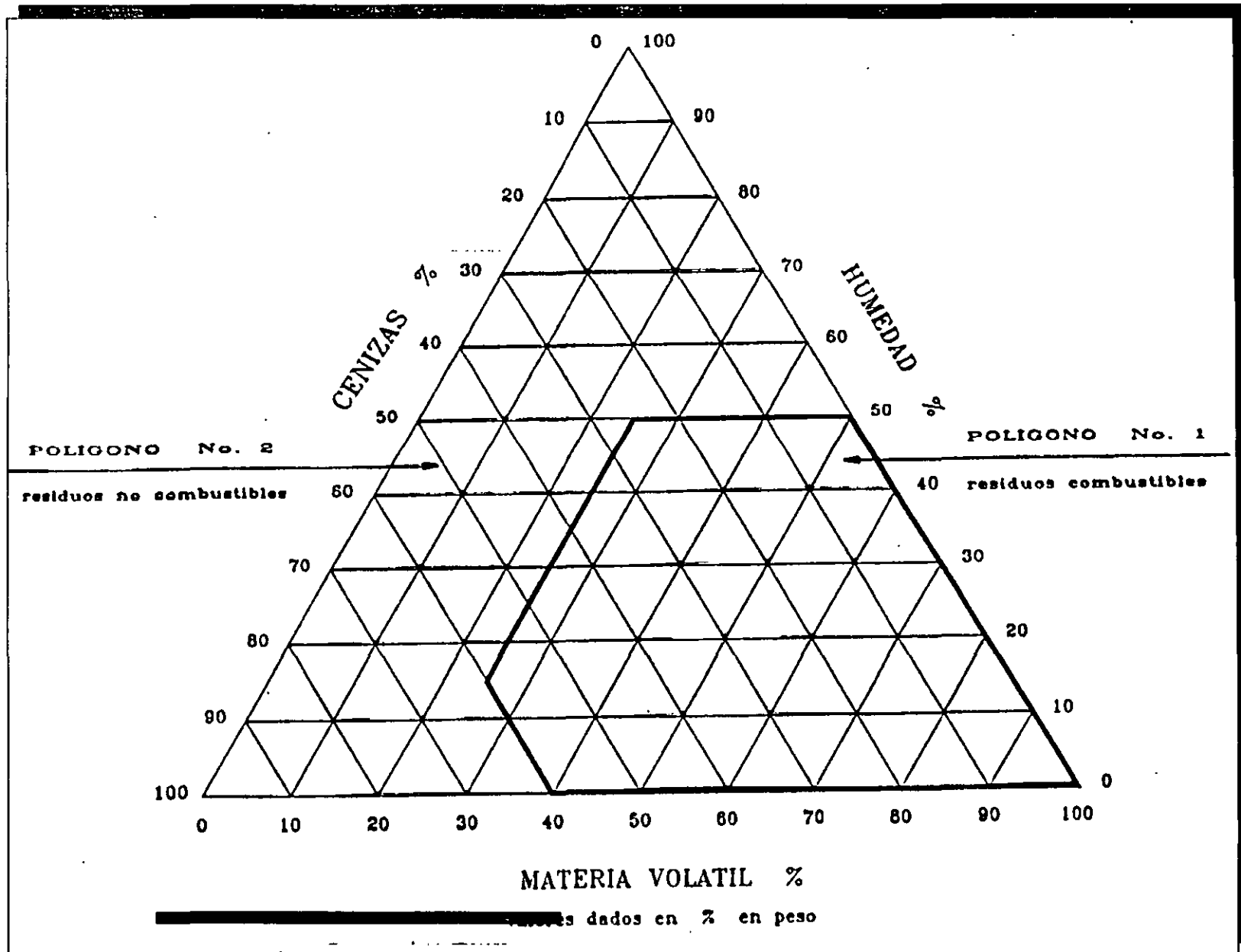
- Humedad
- Material inerte/combustible
- Poder calorífico
  - Superior
  - Inferior



# Incineración

## **Poder calorífico**

Cantidad de calor que se desprende por la combustión completa de la unidad de masa correspondiente



**Diagrama de combustibilidad de los RSM**

# Incineración

## Parámetros de diseño

- Doble cámara
- *Temperatura*
- *Tiempo de residencia*
- *Turbulencia*

# Incineración

## Operación y control

- Alimentación de residuos
- Estado físico
- Composición
- Poder calorífico
- Contenido de cenizas
- Otros

# Incineración

## Exceso de aire

## Temperatura

- Alimentación calorífica constante
- Quemador auxiliar
- Control de exceso de aire

## Emisiones

- Tasa de alimentación
- Equipo de control

# Incineración

## Productos de combustión

### En chimenea

- $\text{CO}_2$
- $\text{H}_2\text{O}$
- Exceso de aire
- Acidos de halógenos
- Oxidos (S, N, P)
- Oxidos metálicos vaporizados

# Incineración

## Productos de combustión

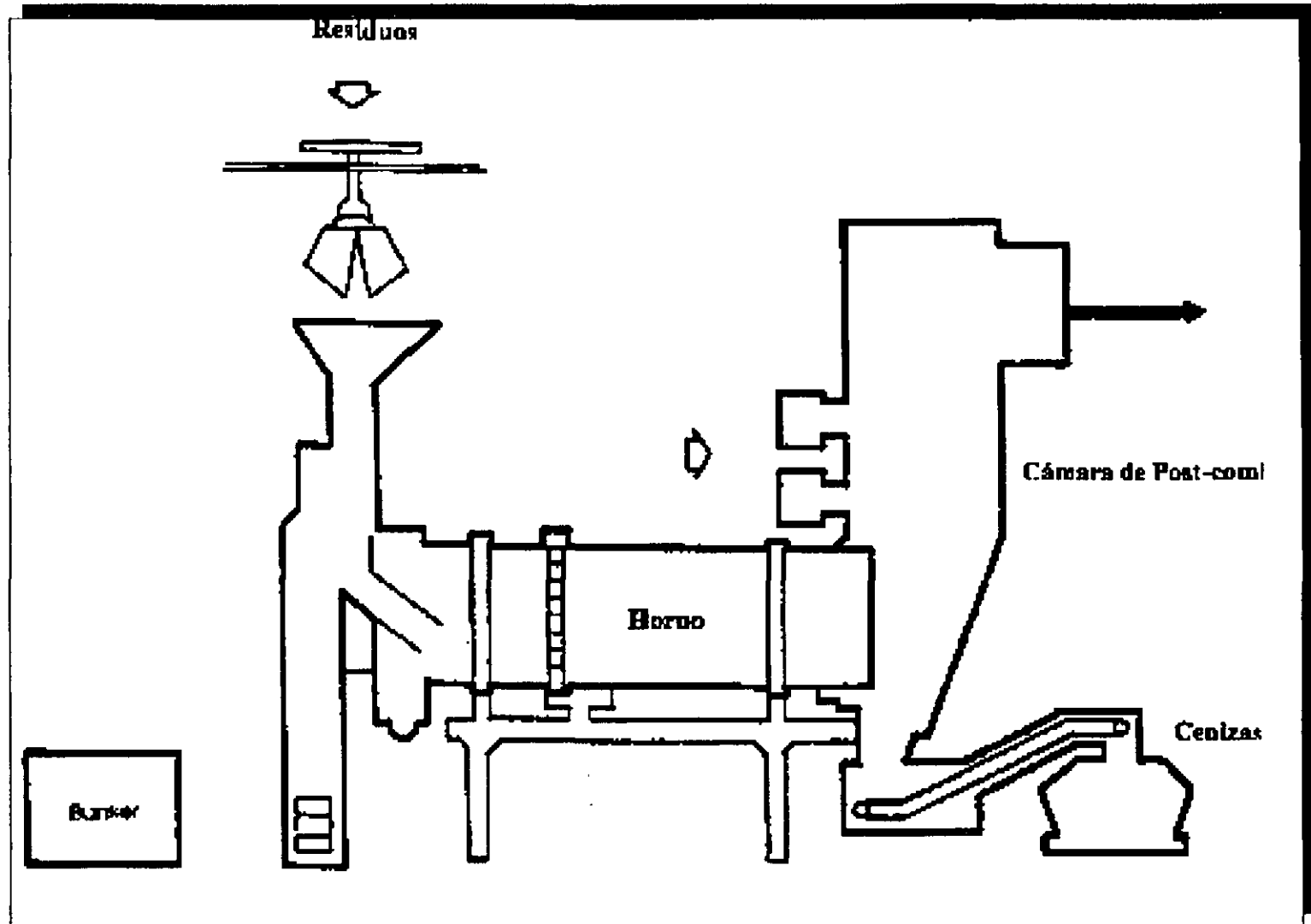
### *En chimenea*

- Productos de **combustión incompleta**
- **Subproductos orgánicos**
- **Partículas**

### *En el hogar*

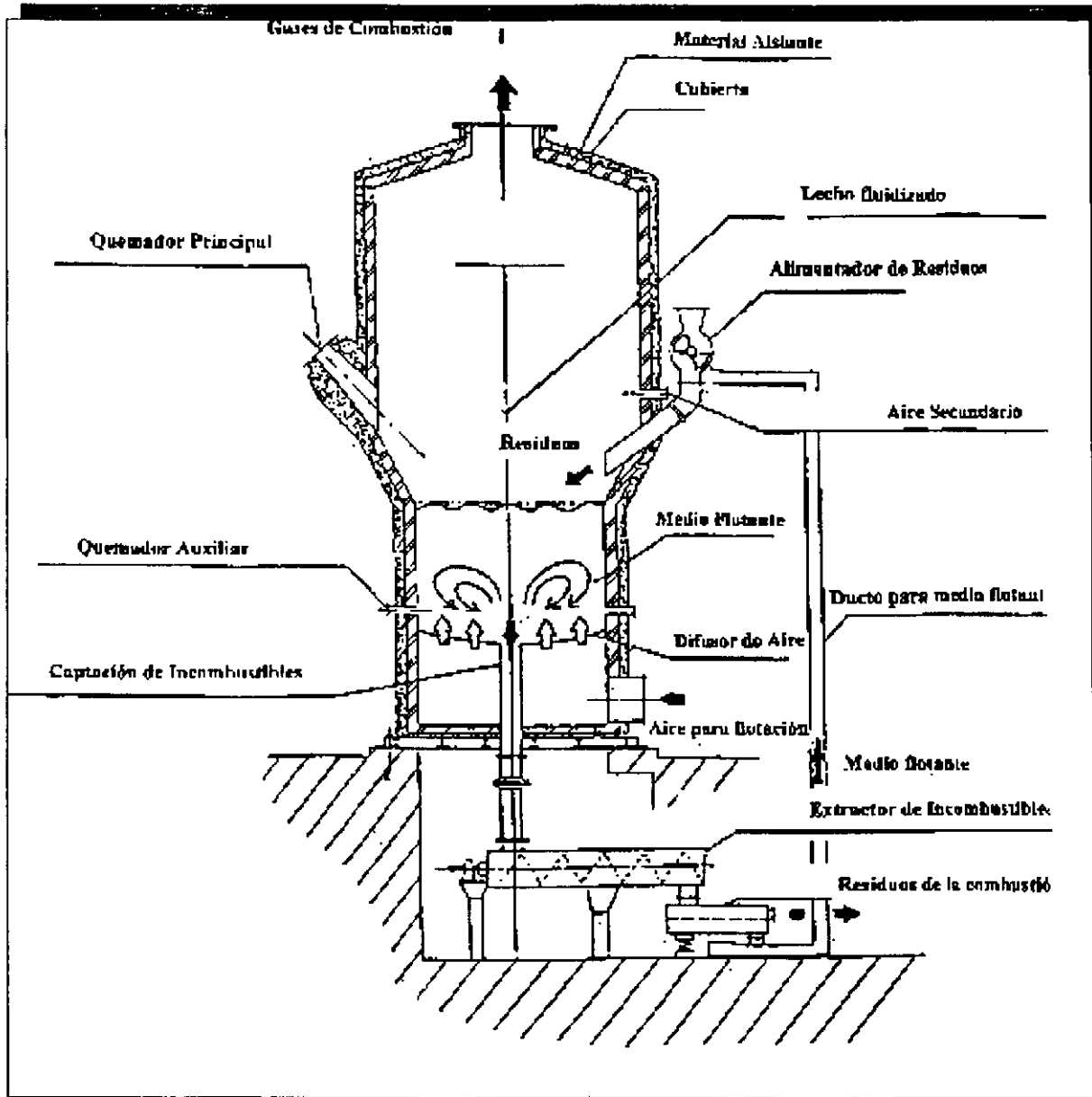
- **Ceniza**
- **Escoria (metales, vidrio, cerámica, etc)**

# Incineración



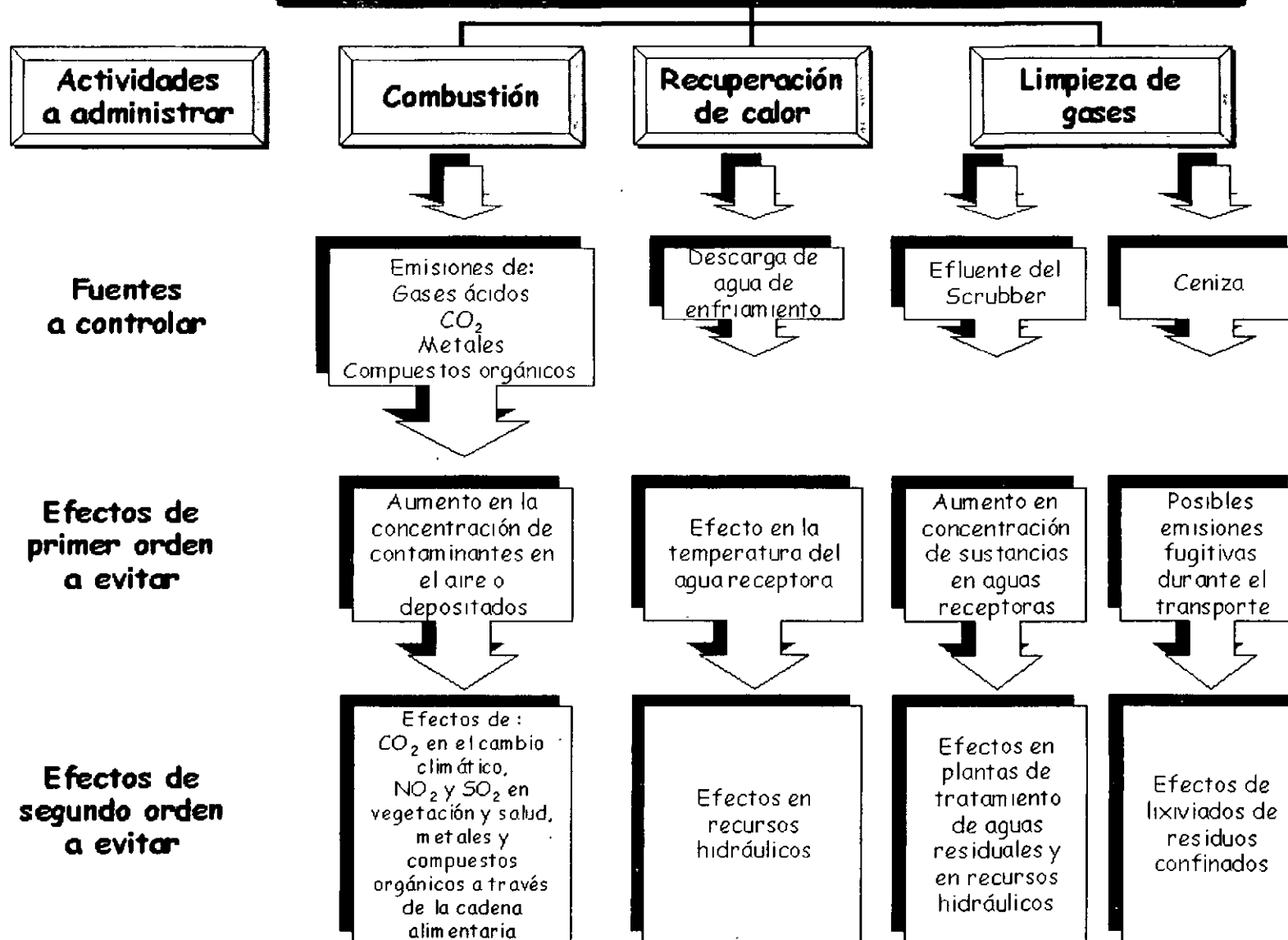
Horno rotatorio





**HORNO DE LECHO FLUIDIZADO**

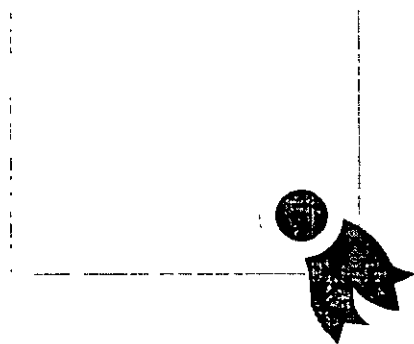
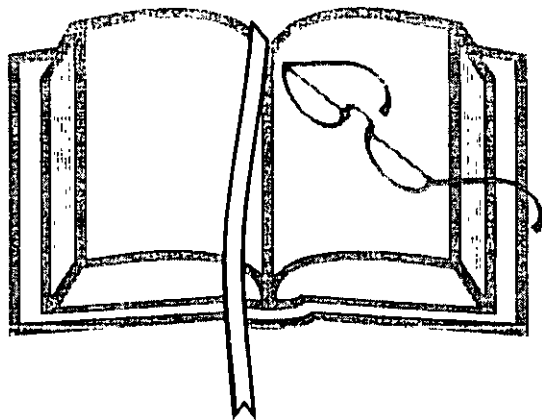
# Proceso de Incineración de residuos peligrosos



Fuente: *Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, INE 1999*

# ¿ Porqué necesito solicitar una autorización ?

## MARCO REGULATORIO



- ↓ Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
  
- ↓ Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)
  
- ↓ Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos, Impacto Ambiental y Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica
  
- ↓ Normatividad

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

## **MARCO REGULATORIO:**

<b>28-ene-1988</b>	<b>Se publica en el Diario Oficial de la Federación.</b>
<b>01-mar-1988</b>	<b>Entra en vigor.</b>
<b>25-nov-1988</b>	<b>Se publica el Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos.</b>
<b>13-dic-1996</b>	<b>Se publica en el Diario Oficial de la Federación el decreto que reforma, adiciona y deroga diversas disposiciones de la LGEEPA.</b>

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

**MARCO REGULATORIO:**

## **TÍTULO I - CAPÍTULO II y IV**

- ↓ **La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos.**
- ↓ **....requerirán previamente de la autorización en Materia de Impacto Ambiental. Las instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos.....**
- ↓ **Para obtener la autorización, los interesados deberán presentar una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) y cuando se trate de actividades altamente riesgosas, esta deberá incluir el estudio de riesgo.**

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

**MARCO REGULATORIO:**

## **TÍTULO IV - CAPÍTULO II**

- ↓ **La calidad del aire debe ser satisfactoria.....**
  
- ↓ **Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas.**
  
- ↓ **No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente.**

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

**MARCO REGULATORIO:**

## **TÍTULO IV - CAPÍTULO VI**

- ↓ **Corresponde a la Secretaría la regulación y el control de los materiales y residuos peligrosos.**
- ↓ **La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera.**
- ↓ **Quienes generen, reusen o reciclen residuos peligrosos, deberán hacerlo del conocimiento de la Secretaría.**
- ↓ **Requiere autorización previa de la Secretaría las actividades que tengan por objeto el manejo de los residuos peligrosos.**

# **REGLAMENTO DE LA LGEEPA EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS**

## **MARCO REGULATORIO:**

### **CAPÍTULO I**

#### **Disposiciones generales**

### **CAPÍTULO II**

#### **De la generación de residuos peligrosos:**

1. Inscribirse en el registro como generador.
2. Bitácora mensual sobre la generación.
3. Remitir a la Secretaría informe semestral.

### **CAPÍTULO III**

#### **Del manejo de residuos peligrosos:**

1. Se requiere autorización de la Secretaría.
2. Presentar manifestación de Impacto Amb.

### **CAPÍTULO IV**

#### **De la importación y exportación de los residuos peligrosos**

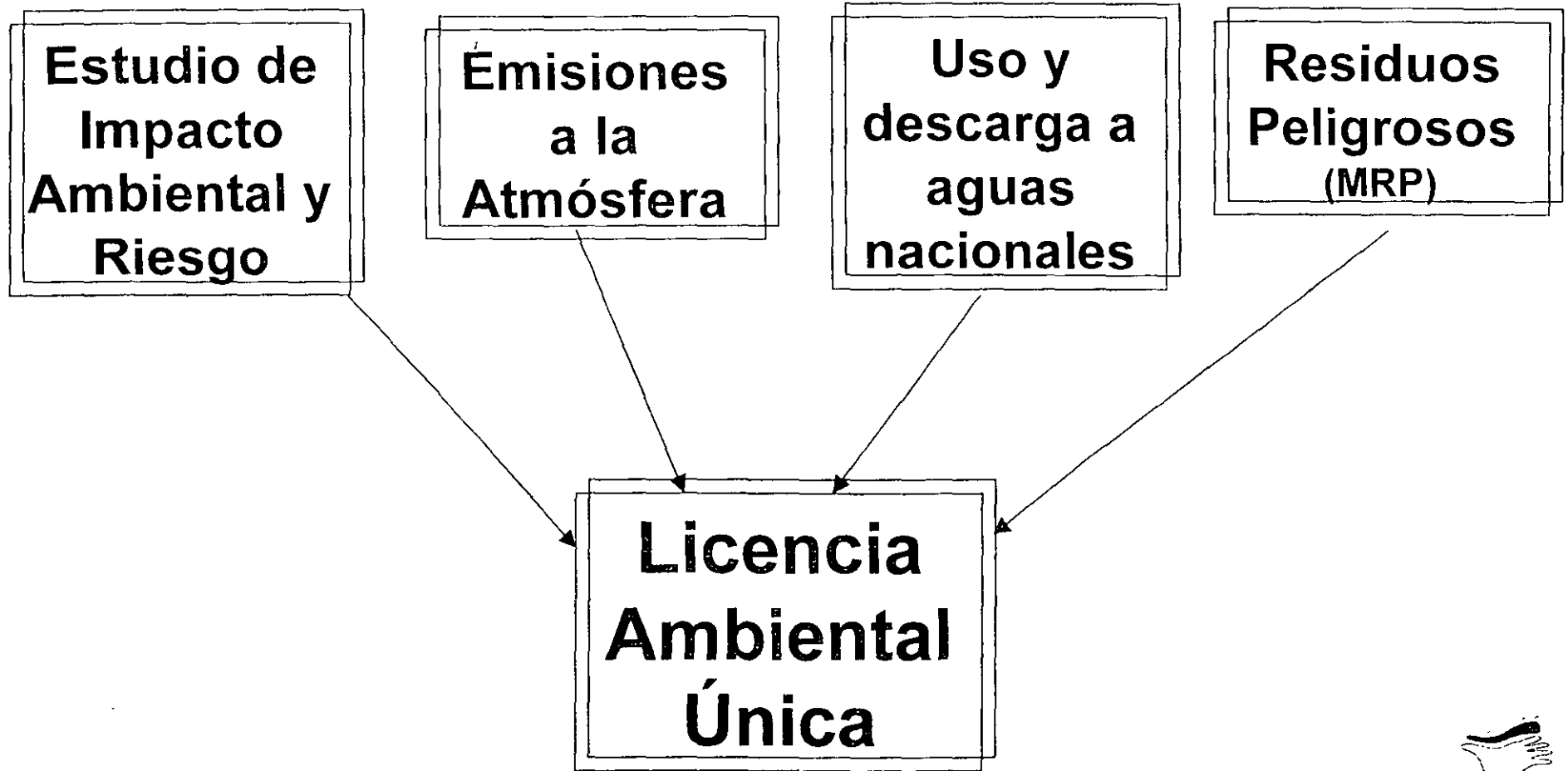
### **CAPÍTULO V**

#### **De las medidas de seguridad y control y sanciones.**



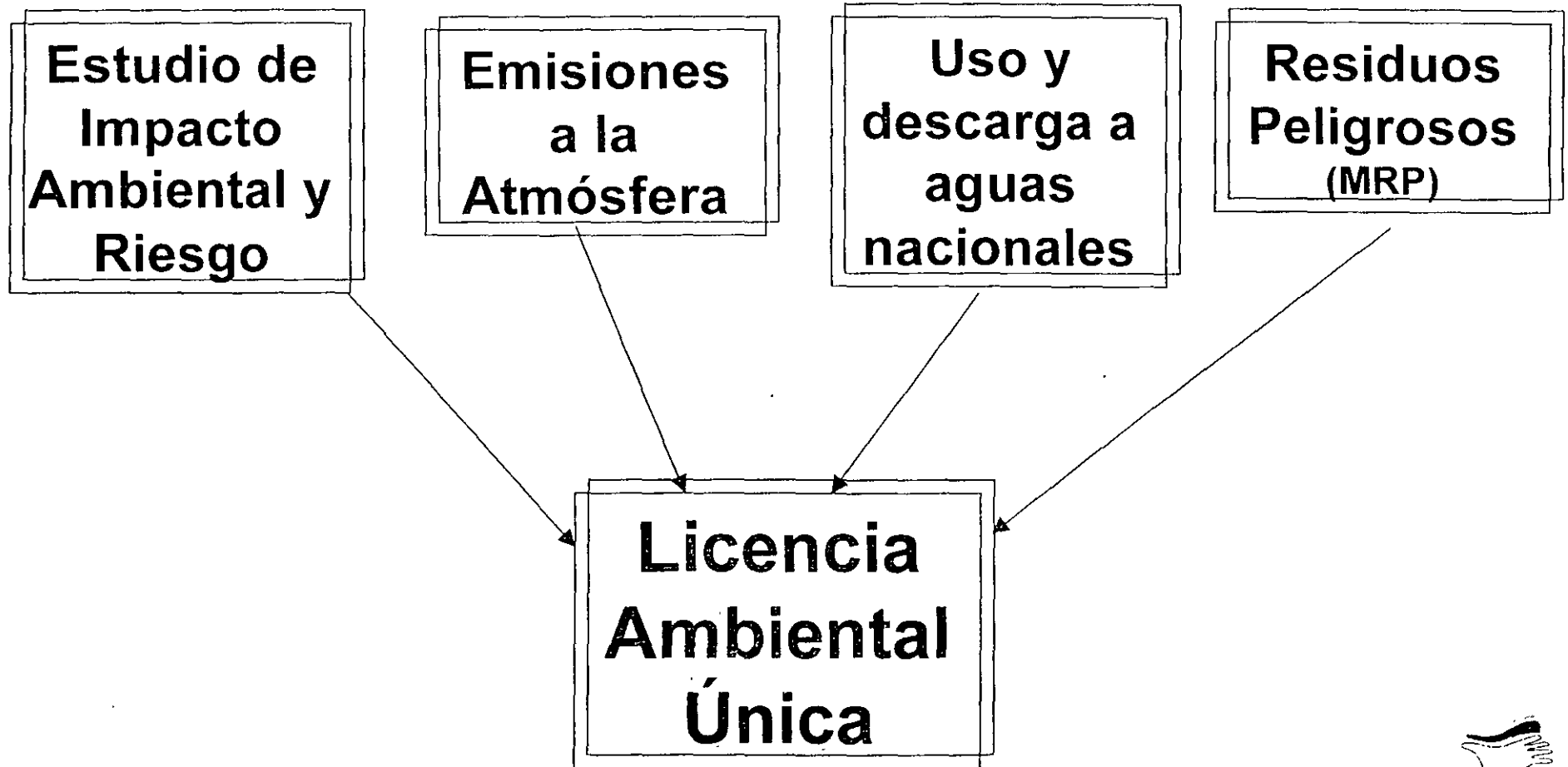
# ***Trámite por Licencia Ambiental Única***

## ***Autorizaciones en materia federal***

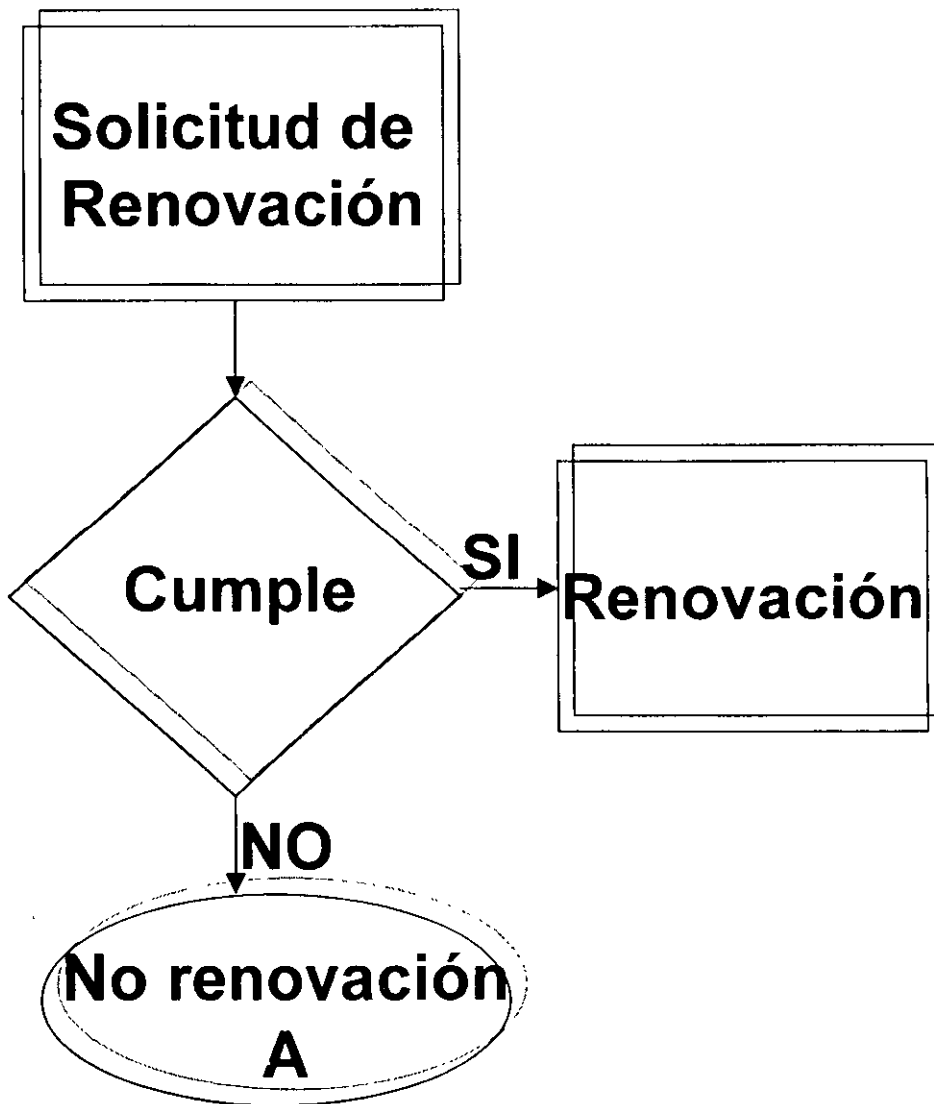


# ***Trámite por Licencia Ambiental Única***

***Autorizaciones en materia federal***



# Renovación de autorización



## Cumple

- Reportes de emisiones a la atmósfera (2 ó 3 veces).
- Parámetro dentro de límites fijados en LAU.
- Liberación por parte de la PROFEPA.
- Resultados del CRETIB a las cenizas.
- Reportes semestrales.
- Cumplimiento a las Condicionantes de la Autorización.

## ***Capacidades instaladas Ton/d RPI***

- ❖ 14 instalaciones con 23 equipos
  - 3 incineradores menores a 2 (21%)
  - 6 incineradores entre 2 y 10 (43%)
  - 2 incineradores entre 10 y 50 (14%)
  - 1 incinerador entre 50 y 100 ( 7%)
  - 2 incineradores mayores a 100 (14%)
  - mínimo 0.067
  - máximo 420.31
  - capacidad total 699.16

## *Usos autorizados incineradores RPI*

Tipo	cantidad	capacidad Ton/d
Lodos PTAR	1	6.48
Solventes	1	6.48
Filtros agotados	2	7.29
Aceites usados	4	3.42
Medicamentos cad.	6	87.38
HC clorados	1	114.06
Breas a. Ftálico	1	7.54
Varios	3	488.73

## ***Situación actual***

- ❖ 7 empresas de RPBI que no han renovado su autorización
  - 4 sin protocolo de pruebas
  - 7 incumplimiento con los parámetros especificados
  - 5 sin entregar reporte semestral
  - 3 sin programa de mantenimiento
  - 6 sin presentar análisis CRETIB
  - 2 sin programa de capacitación
  - 4 sin proyecto ejecutivo
  - 4 sin personal acreditado

## ***Situación actual***

- ❖ 13 empresas de RPBI vigentes con incumplimiento
  - 3 sin Licencia Ambiental Única
  - Todas con incumplimiento en los parámetros establecidos (DyF, metales y PM)
  - 5 sin presentar reporte semestral
  - 4 sin programa de mantenimiento
  - 2 sin programa de operación
  - 6 sin resultados de eficiencia
  - 8 sin presentar resultados de análisis CRETIB

## ***Situación actual***

- ❖ 9 empresas de RPI vigentes
  - 5 cumplen
  - 2 pendientes (1 construcción, 1 protocolo en proceso)
  - 2 no cumplen con parámetros
- ❖ 5 que no han renovado permiso
  - 4 han solicitado renovación via LAU
  - 4 no cumplen con parámetros



# Parámetros y su cumplimiento

Parámetro	Límite Permisible	Unidades	No. Empresas de RPI		No. Empresas RPBI	
			Vig-incumplen	No vig-incum-	Vig-incum	No vig-incum
PST	50	mg/m <sup>3</sup>	2	3	6	3
CO	63	mg/m <sup>3</sup>	2	3	2	1
NO <sub>x</sub>	300	mg/m <sup>3</sup>	1	2	0	0
SO <sub>2</sub>	80	mg/m <sup>3</sup>	1	1	3	0
Pb+Cr+Cu+Zn	0.7	mg/m <sup>3</sup>	2	4	9	2
Hg	0.07	mg/m <sup>3</sup>	1	1	2	0
Cd	0.07	mg/m <sup>3</sup>	1	1	1	0
As+Co+Se+Ni+Sn	0.7	mg/m <sup>3</sup>	2	1	3	0
DyF	0.5	NgEQI/m <sup>3</sup>	1	3	5	3
HCl	15	mg/m <sup>3</sup>	2	2	3	0
T. salida	<250	°C	0	1	3	1

## ***Problemas identificados***

- ❖ Personal poco preparado
- ❖ Falta de instrumentación
- ❖ Operación deficiente
- ❖ Instalaciones inadecuadas
- ❖ Áreas de almacenamiento inadecuadas
- ❖ Chimeneas y plataformas de muestreo mal diseñados
- ❖ Equipo de control inadecuado

## ***Problemas identificados***

- ❖ Consultores no especializados
- ❖ Funcionarios en número insuficiente y no especializado
- ❖ Laboratorios insuficientes y con baja confiabilidad (solo un laboratorio acreditado para realizar análisis de dioxinas con baja resolución y 6 para muestreo)

# ***Límites emisión DyF***

## ❖ **Comunidad Europea (nov 99)**

- 0.1 EQT (ng/m<sup>3</sup>) incineradores >3 t/h residuos municipales
- 0.5 EQT (ng/m<sup>3</sup>) incineradores >1 t/h residuos médicos
- 0.2 EQT (ng/m<sup>3</sup>) incineradores >1 t/h residuos peligrosos

## ❖ **Japón (97)**

incineradores nuevos		incineradores existentes
>4 t/h	0.1 EQT	1 EQT
2-4 t/h	1.0 EQT	5 EQT
<2 t/h	5.0 EQT	10 EQT

# ***Límites emisión DyF***

## ❖ **Estados Unidos de América (agosto 2000)\***

– Incineradores existentes residuos hospitalarios

<100 kg/h            2.3 EQT

100-200 kg/h        2.3 EQT

>200 kg/h            2.3 EQT

– Incineradores nuevos residuos hospitalarios

<100 kg/h            2.3 EQT

100-200 kg/h        0.6 EQT

>200 kg/h            0.6 EQT

\*Federal Register 40 CFR Part.62 Vol.65, No 158

## *Concentración de dioxinas en incineradores municipales, Japón*

Capacidad incinerador	número	<0.1	0.1-1.0	1.0-5.0	5.0-10	10-40	40-80	>80
>4 t/h	591	117	220	127	68	56	3	0
2-4 t/h	873	58	205	250	127	212	21	0
<2 t/h	780	30	100	231	137	219	60	3
total	2244	205	525	608	332	487	84	3

Fuente: Ministerio de Salud y Bienestar del Japón

## *Límites de emisión de contaminantes generados por incineración de residuos peligrosos*

País Contaminante	Comunidad Europea	E.U.A	Japón	México
Partículas (mg/m <sup>3</sup> )	10	<b>Existentes</b> 115 menores a 0.1 tn/hr 69 entre .01-0.2 tn/hr 34 mayor a 0.2 tn/hr <b>Nuevos</b> 69 menores a 0.1 tn/hr 34 entre .01-0.2 tn/hr 34 mayor a 0.2 tn/hr	<b>Existentes</b> 250 menores a 2 tn/hr 150 entre 2 y 4 tn/hr 80 mayores a 4 tn/hr <b>Nuevos</b> 150 menores a 2 tn/hr 80 entre 2 y 4 tn/hr 40 mayores a 4 tn/hr	50
CO(mg/m <sup>3</sup> )	50	46	63	63*
NOx(mg/m <sup>3</sup> )	200 mayor a 6 tn 400 menor a 6 tn	470	450	300
SO2(mg/m <sup>3</sup> )	50	144		80
Ar, Se, Co, Ni, Mn, Sn. (mg/m <sup>3</sup> )	0.5	1.2		0.7
Cadmio (mg/m <sup>3</sup> )	0.05	<b>Existentes</b> 0.16 <b>Nuevos</b> 0.16 menores a 0.1 tn/hr 0.04 entre .01-0.2 tn/hr 0.04 mayor a 0.2 tn/hr		0.07

\* Incluye hospitalarios

Fuentes: Federal Register, 40 CFR Part. 62 Vol. 65, No. 158, 15 de agosto de 2000

Protocolo sobre los Contaminantes Orgánicos Persistentes. Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE-ONU)

Normatividad japonesa en materia de residuos peligrosos (JIS)

Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-098-ECOL-2000

## *Límites de emisión de contaminantes generados por incineración de residuos peligrosos\**

País Contaminante	Comunidad Europea	E.U.A	Japón	México
Pb, Cu, Zn y Cr total (mg/m <sup>3</sup> )	0.5	<b>Existentes</b> 1.2 <b>Nuevos</b> 1.2 menores a 0.1 tn/hr 0.07 entre .01-0.2 tn/hr 0.07 mayor a 0.2 tn/hr		0.7
Hg (mg/m <sup>3</sup> )	0.05	0.55		0.07
Dioxinas/furanos EQT (ng/m <sup>3</sup> )	0.5. hospitalarios mayores a 1 tn/hr 0.2, peligrosos mayores a 1 tn/hr	<b>Existentes</b> 2.3 <b>Nuevos</b> 2.3 menores a 0.1 tn/hr 0.6 entre .01-0.2 tn/hr 0.6 mayor a 0.2 tn/hr	<b>Existentes</b> 10 menores a 2 tn/hr 5 entre 2 y 4 tn/hr 1 mayores a 4 tn/hr <b>Nuevos</b> 5 menores a 2 tn/hr 1 entre 2 y 4 tn/hr 0.1 mayores a 4 tn/hr	0.5**
Condiciones Estándar Normadas	273°K 101.3Kpa 11% O <sub>2</sub>	68°F 1 atm 7% O <sub>2</sub>	273°K 101.3Kpa 12% O <sub>2</sub>	25°C 1 atm 7% O

\* Incluye hospitalarios

Fuentes: Federal Register, 40 CFR Part. 62 Vol. 65, No. 158, 15 de agosto de 2000

Protocolo sobre los Contaminantes Orgánicos Persistentes. Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE-ONU)

Normatividad japonesa en materia de residuos peligrosos (JIS)

Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-098-ECOL-2000



## *Que sigue*

- ❖ Promover buenas prácticas de operación
- ❖ Capacitar a los operadores de los sistemas de incineración (cursos obligatorios)
- ❖ Mejorar y adecuar instalaciones e incorporar la instrumentación y sistemas de control necesarios
- ❖ Fortalecer la capacidad de respuesta de las autoridades

## *Que sigue*

- ❖ Fortalecer a los laboratorios ambientales a través de los esquemas de acreditamiento - aprobación (con base en la norma)
- ❖ Establecer los mecanismos para que los consultores sean corresponsables de sus acciones
- ❖ Revisar los procedimientos de autorización vía LAU y de protocolos de prueba

## *Que sigue*

- ❖ Clausurar aquellas empresas que no puedan o no quieran cumplir con las especificaciones establecidas
- ❖ Desarrollo de un programa de evaluación de los riesgos ambientales y a la salud
- ❖ Elaboración de un inventario de emisiones para instalaciones de incineración
- ❖ Evaluar en el corto plazo los límites de emisión y métodos de muestreo y análisis

## *Que sigue*

- ❖ Desarrollar una norma ambiental para DyF
- ❖ Promover la instalación en México de laboratorios con equipo de alta resolución de DyF.

# RESULTADOS

1. Asumir que existen riesgos ecológicos para el uso de determinadas sustancias

2. Establecer acciones regulatorias tales como:

- Requerir datos adicionales
- Clasificar al plaguicida como restringido para reducir sus riesgos
- Requerir se señalen las restricciones en el etiquetado para reducir el riesgo
- Iniciar revisiones especiales basadas en criterios específicos de riesgo
- No permitir el registro del plaguicida considerado como altamente riesgoso

# **CURSOS ABIERTOS**

## **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

**TEMA**

**CRITERIOS DE MUESTREO DE SUELOS**

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL MUÑOZ MEZA  
PALACIO DE MINERIA  
NOVIEMBRE DE 2001**

## Criterios de muestreo de suelos



*eXperTos Consultores Ambientales*

1

---

---

---

---

---

---

---

---

## Importancia del muestreo

¿Qué es muestreo?

¿Qué es una muestra?



Tipos de muestra

2

---

---

---

---

---

---

---

---

## Muestreo químicamente inalterado

### Definición:

Es aquel que se realiza sin modificar la composición de la muestra, ya sea por pérdida de sus componentes o por adición de una sustancia (incluso agua).

El **muestreo de suelos** se efectúa principalmente en los siguientes casos:

- > Derrames de material peligroso.
- > Suelos de industrias.
- > Lugares o sitios abandonados

3

---

---

---

---

---

---

---

---

### Objetivos Plan de muestreo

- Maximizar seguridad del personal.
- Minimizar tiempos.
- Minimizar costos.
- Reducir errores.
- Proteger la integridad de las muestras colectadas.

4

---

---

---

---

---

---

---

---

### Información sobre antecedentes

- Antecedentes históricos del sitio
- Características del sitio.
- Tipo de contaminante(s).
- Tiempo de permanencia del contaminante en el sitio.
- Información, lo mas precisa posible, para la estrategia de muestreo.

5

---

---

---

---

---

---

---

---

### Movimiento de contaminantes

Factores que determinan el comportamiento de los contaminantes:

- Permeabilidad; porosidad; intercambio iónico; contenido de agua; pH, etc.
- Tipo de contaminante (solubilidad, densidad viscosidad)

6

---

---

---

---

---

---

---

---



## Selección del muestreador

El suelo contaminado es una mezcla compleja de líquidos, semisólidos, todos o sólidos (gránulos, terrones o rocas).  
Determina el equipo de muestreo a utilizar.

- Profundidad de muestreo.
- Características del suelo.
- Volumen a muestrear.
- Tipos de muestreadores

7

---

---

---

---

---

---

---

---

## Muestreadores

*Muestreador de tubo partido, de grano, etc.*

*Palas, cucharones,*

*Muestreadores de Percusión,*

*Hand Auger,*

*Coliwasa*

8

---

---

---

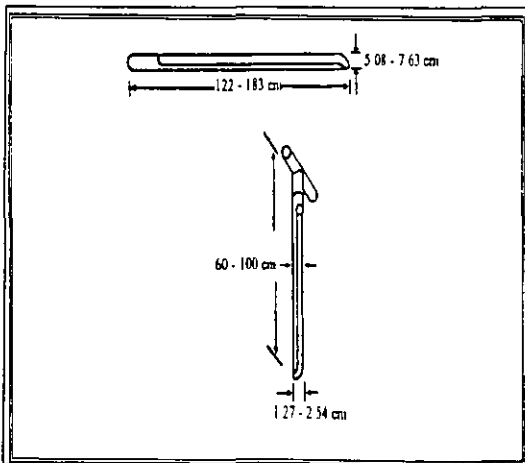
---

---

---

---

---



---

---

---

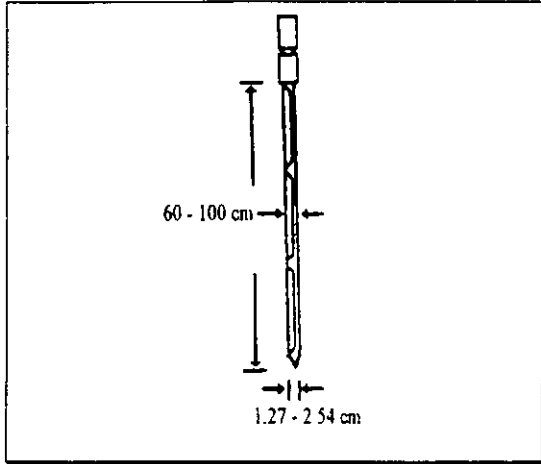
---

---

---

---

---



---

---

---

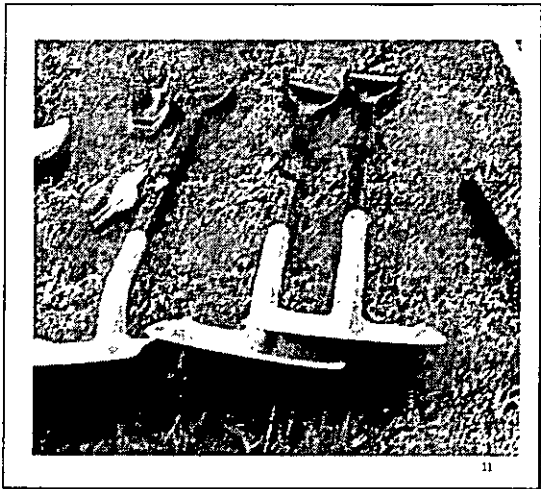
---

---

---

---

---



---

---

---

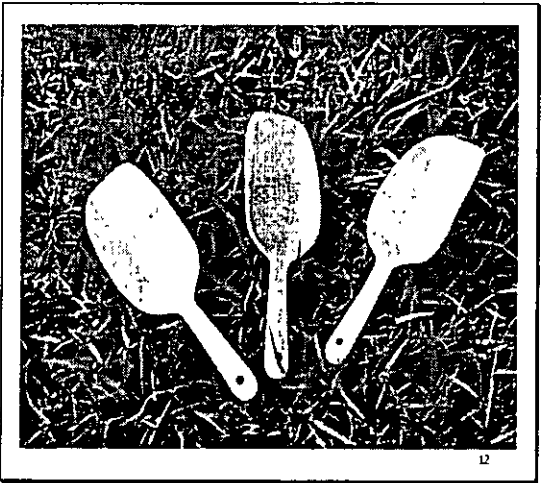
---

---

---

---

---



---

---

---

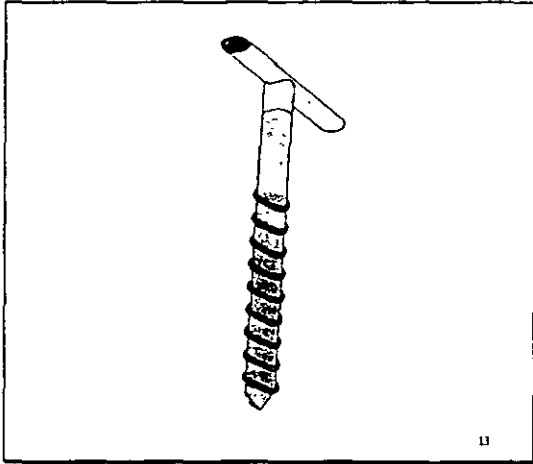
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

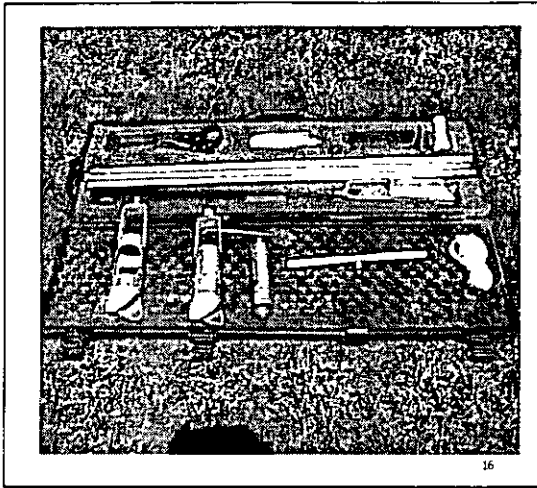
---

---

---

---

---



---

---

---

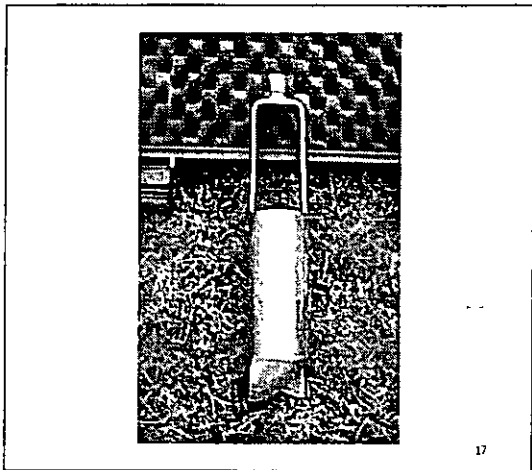
---

---

---

---

---



---

---

---

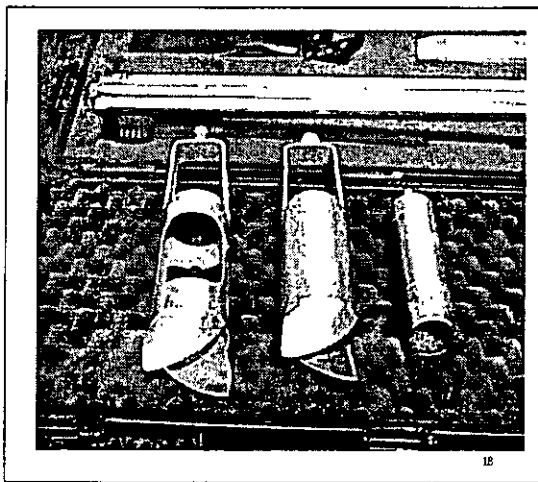
---

---

---

---

---



---

---

---

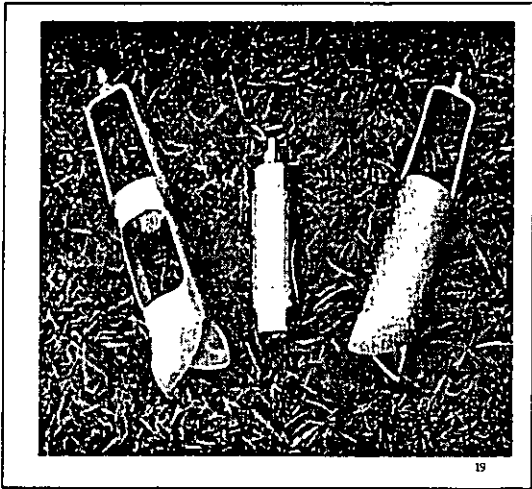
---

---

---

---

---



---

---

---

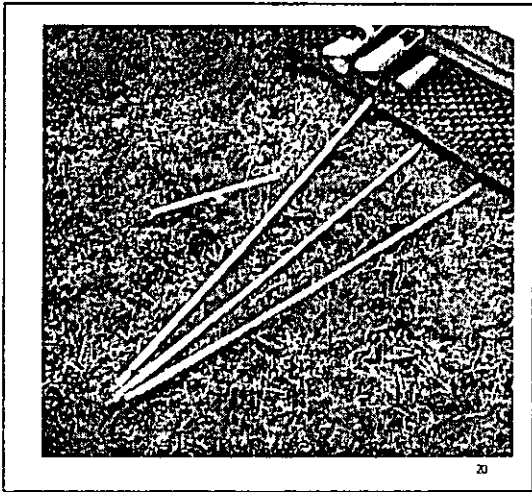
---

---

---

---

---



---

---

---

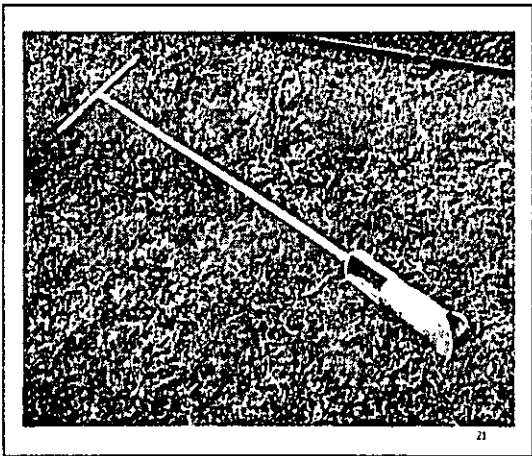
---

---

---

---

---



---

---

---

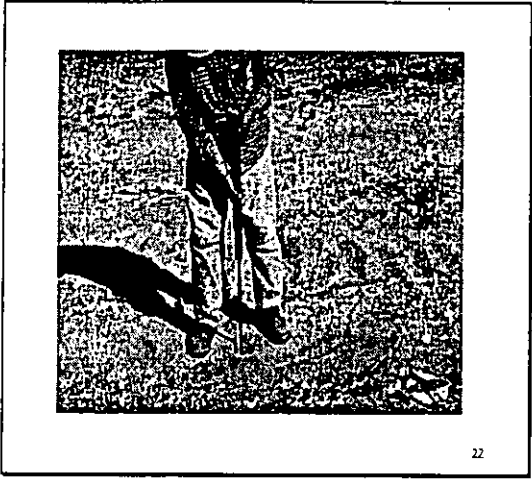
---

---

---

---

---



---

---

---

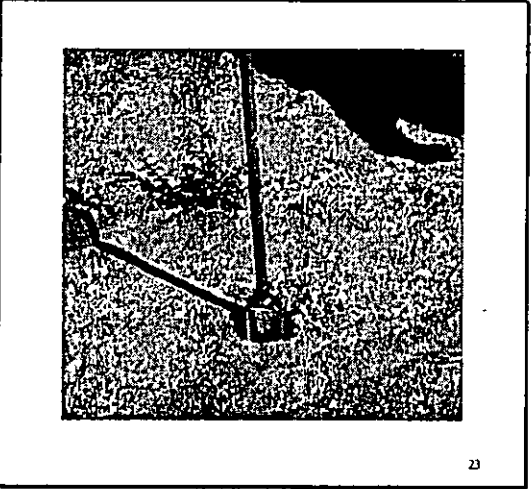
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

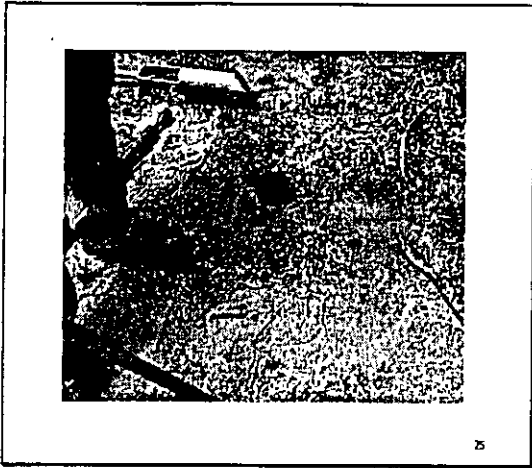
---

---

---

---

---



---

---

---

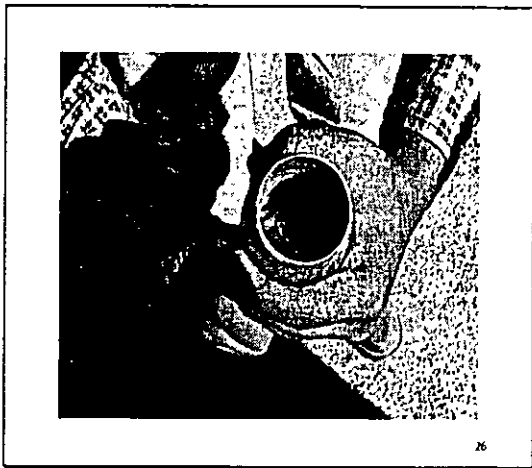
---

---

---

---

---



---

---

---

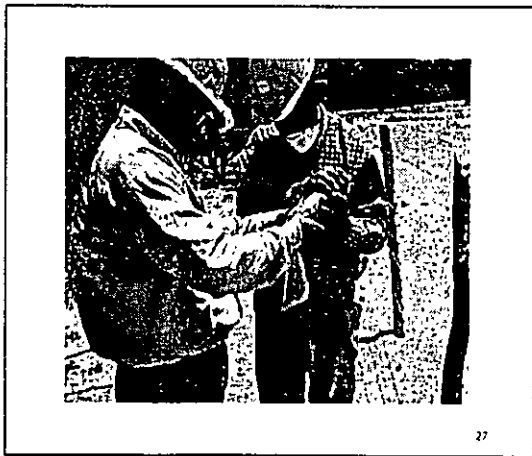
---

---

---

---

---



---

---

---

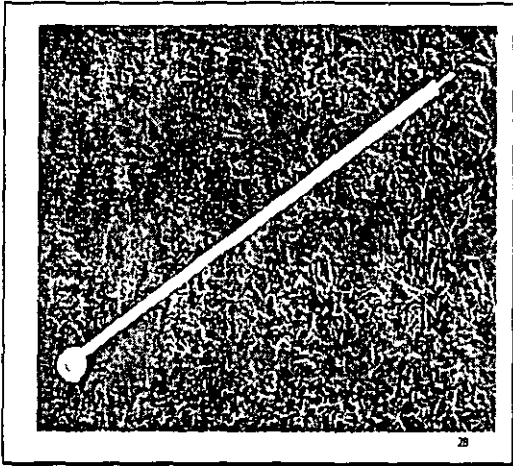
---

---

---

---

---



---

---

---

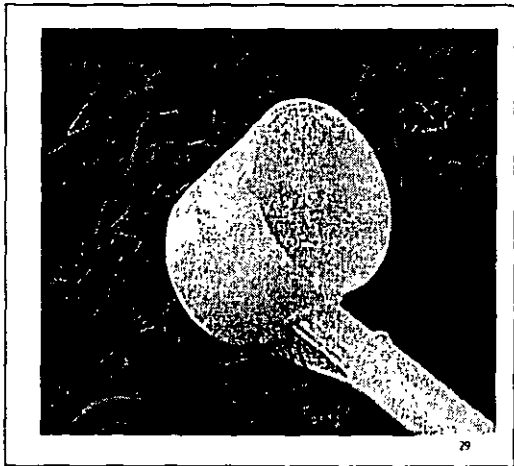
---

---

---

---

---



---

---

---

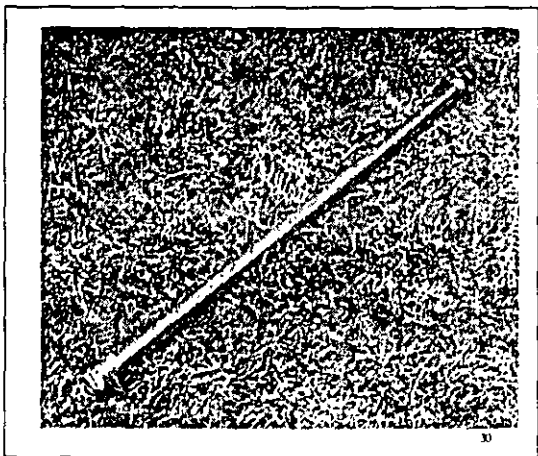
---

---

---

---

---



---

---

---

---

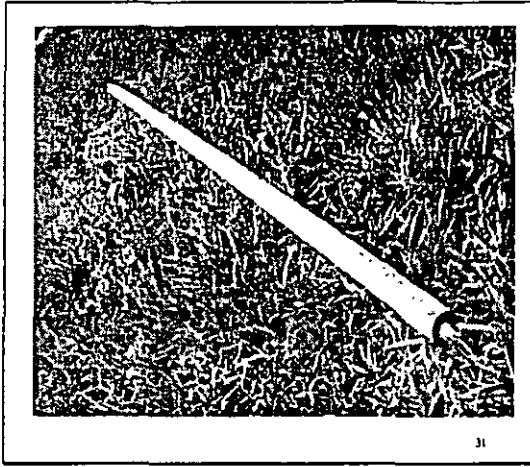
---

---

---

---





---

---

---

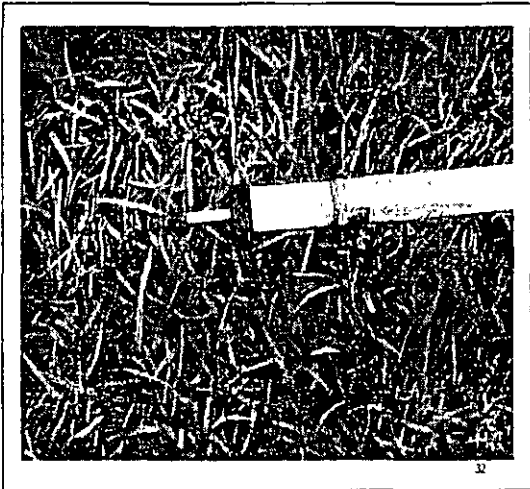
---

---

---

---

---



---

---

---

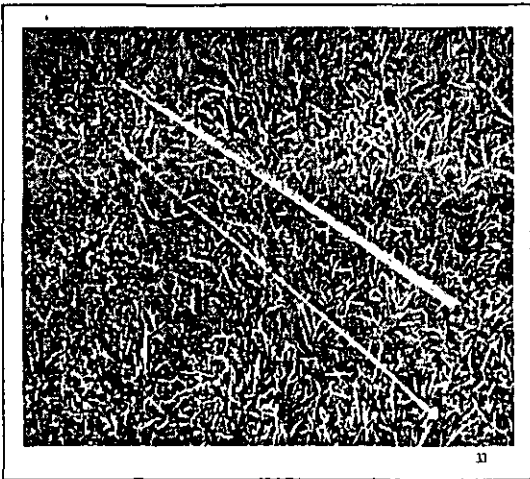
---

---

---

---

---



---

---

---

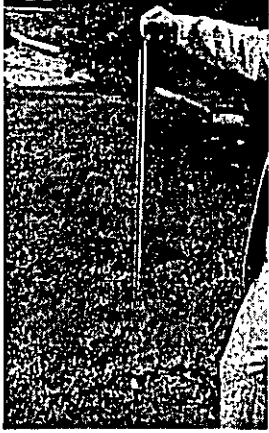
---

---

---

---

---



34

---

---

---

---

---

---

---

---



35

---

---

---

---

---

---

---

---

### Selección del recipiente

- Compatibilidad con el material a muestrear.
- Resistencia del recipiente a la ruptura.
- Reacciones químicas con la muestra.
- Pérdidas por evaporación.

36

---

---

---

---

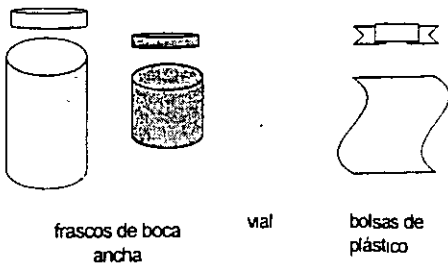
---

---

---

---

## Tipos de recipientes



37

---

---

---

---

---

---

---

---

## Cantidad de la muestra

Determinada por el número y tipo de parámetros a analizar.

Las cantidades son las siguientes en peso seco :

- Nitrógeno, Fósforo,  
Potasio y pH ----- 250 gr.
  - Textura y Densidad ----- 500 gr.
  - Inorgánicos Tóxicos ----- 150 gr.
  - Hidrocarburos ----- 500 gr.
- Cantidades definidas por el GDT el 12 abril 2000.

38

---

---

---

---

---

---

---

---

## Manejo y preservación

- Sellar adecuadamente los recipientes de las muestras.
- Evitar en lo posible el uso de preservadores o aditivos.
- Refrigerar entre 4 y 6°C.

39

---

---

---

---

---

---

---

---

## Precauciones durante el muestreo

- Tomar en cuenta todas las precauciones posibles, ya que se puede estar expuesto a:
- Presencia de materiales que pueden liberar gases tóxicos.
- Materiales corrosivos.
- Materiales inflamables.

40

---

---

---

---

---

---

---

---

## Equipo de protección

La información previa ayuda en la selección del equipo de protección personal.

- Nivel A
- Nivel B
- Nivel C
- Nivel D

41

---

---

---

---

---

---

---

---



42

---

---

---

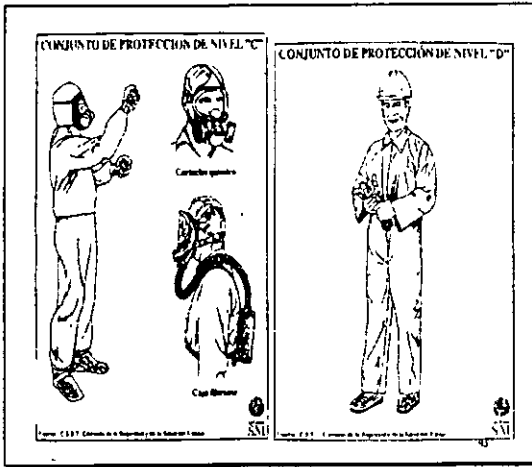
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

# **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

### **TEMA**

**MODELOS DE DISPERSIÓN EN SUELOS**

**EXPOSITOR: ING. MARTÍN MIRANDA  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# **Modelos de Dispersión de Contaminantes en Suelos**

*Noviembre, 2001*

## **Contenido**

- I. Introducción.**
- II. Marco Conceptual de Modelos Matemáticos.**
- III. Software para Modelado de Dispersión de Contaminantes en Suelo.**
- IV. Factores a Considerar en la Selección de Modelos de Dispersión.**
- V. Selección de Modelos de Dispersión.**
- VI. Descripción de Modelos Representativos.**
- VII. Conclusiones.**
- VIII. Referencias Bibliográficas.**



## I. Introducción.

La contaminación del suelo afecta seriamente la calidad de vida de los seres humanos y obstaculiza la continuidad de los procesos biogeoquímicos que configuran el funcionamiento de los ecosistemas.

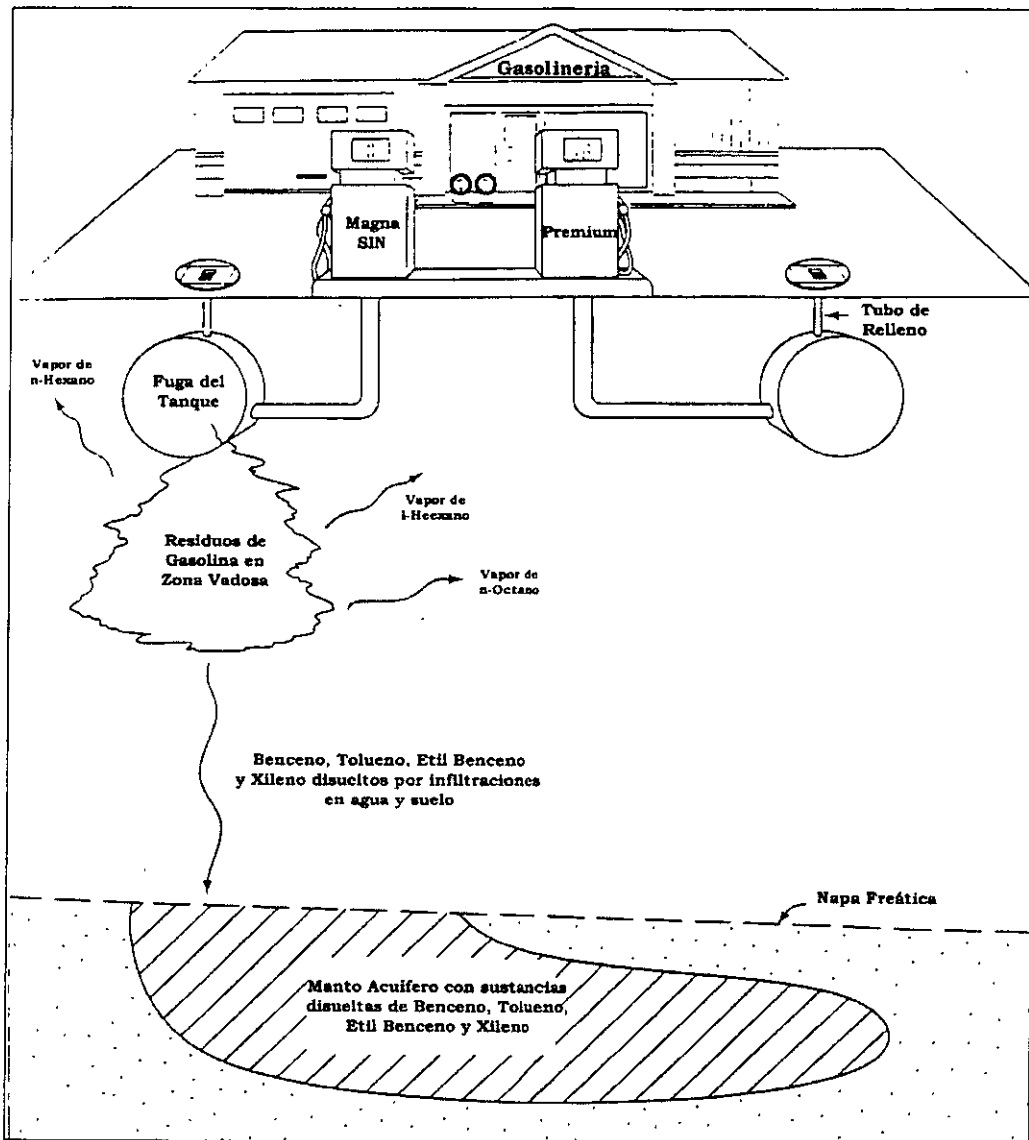
Las instalaciones y los diversos elementos de infraestructura de proceso, manejo, almacenamiento y distribución de productos industriales están constantemente expuestas a incidentes que involucran fugas y/o derrames contaminantes, los cuales pueden suceder accidentalmente o por malas prácticas de operación. La infiltración de los contaminantes al subsuelo, así como su distribución en los diferentes estratos y su destino, están en función de las condiciones del sitio y de las características físicas del subsuelo, entre las cuales, el tipo de material geológico, la presencia de un nivel de agua y el comportamiento del contaminante juegan un papel fundamental.

Entre los contaminantes principales por su frecuencia, peligrosidad y volumetría, se encuentran los hidrocarburos y los metales pesados.

Los hidrocarburos por su baja densidad tienden a flotar en el agua, por lo que cuando se encuentran en fase libre forman una capa cuyo movimiento depende del movimiento del agua. Su interacción con las partículas de suelo se da por afinidad, en los estratos donde hay un mayor contenido de materia orgánica y un mayor tiempo de contacto se favorece más la adsorción, lo cual se traduce en una mayor concentración de contaminantes en el suelo. Para entender este comportamiento se requieren varios análisis, los cuales a su vez deben aportar información relacionada con el tipo de combustible, la localización de la fuente, el tiempo que ha transcurrido desde el derrame, la presencia de sustancias potencialmente peligrosas, así como su efecto en el ambiente. Todos estos aspectos conforman un esquema completo de caracterización, sobre el cual se

establece la responsabilidad jurídica y el grado de contaminación del suelo, y también sirve como base en la toma de decisiones para su remediación.

Las consideraciones previamente planteadas involucran entonces una serie de aspectos que deben ser consideradas en las actividades de caracterización de la contaminación en el sitio y de evaluación de la afectación.



**Figura 1 Proceso de contaminación del manto acuífero por el transporte de gasolina**

Entre los aspectos a considerar en la fase de caracterización deben incluirse aspectos claves tales como:

Definición del tipo de contaminación existente (incluyendo los materiales que presentan altas toxicidades) y cuál es la concentración de estos materiales.

Definición de las características fundamentales del tipo de medio existente (tipo de suelo, textura, climatología, medio circundante, etc.), en relación con las características de transporte y comportamiento intrínseco del contaminante en el medio específico, pero también con las posibilidades de aplicación de tecnologías de limpieza.

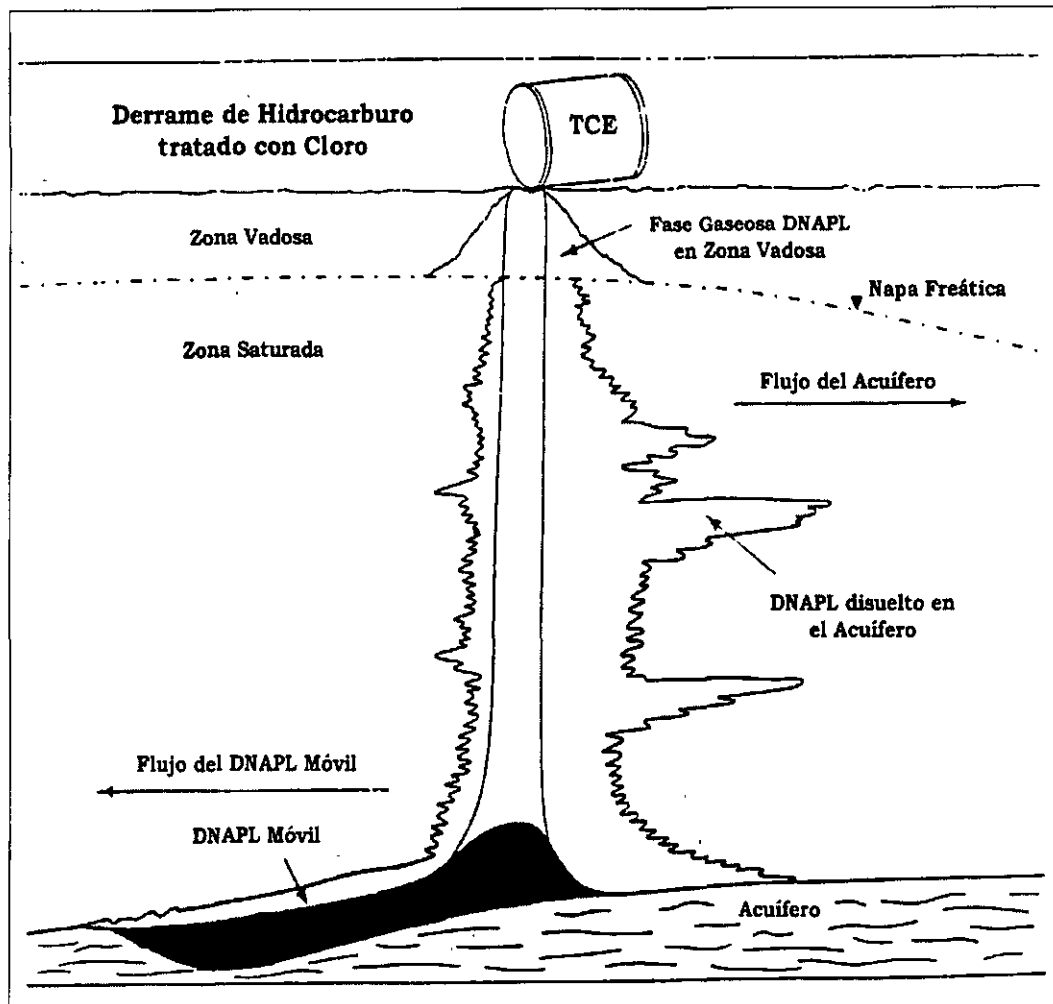
Configuración de la mancha contaminante sobre, debajo y en el nivel de aguas subterráneas y cuál es el grado de contaminación de estos horizontes.

Estas preguntas requieren de una evaluación detallada de las características físicas, químicas, geológicas e hidrológicas del sitio con la finalidad de definir en forma precisa el grado, extensión y forma de afectación, así como para seleccionar la opción de limpieza más viable. La definición de los parámetros mencionados permite afinar el modelo fenomenológico particular y desarrollar un diseño efectivo de solución.

La caracterización del sitio incluye aspectos tales como: investigación de antecedentes, obtención de planos, mapas y cartografía de la geohidrología local y reportes asociados, prospección visual detallada del sitio y toma de registro fotográfico, entre otras.

La caracterización detallada puede incluir metodologías indirectas para complementar las investigaciones de contaminación en suelos, pero siempre debe considerar el muestreo y análisis fisicoquímico directo, que permite confirmar la

existencia y grado de la contaminación y para que sea efectivo debe ser aplicado en forma planificada y muy bien dirigida.



**Figura 2 Representación de pluma contaminante formada por contaminantes tipo DNALP (Líquidos densos no acuosos)**

Por otra parte, las limitaciones físicas, prácticas y económicas implican que no siempre es posible realizar la caracterización de contaminación en suelo mediante metodologías directas e indirectas. De igual forma, en ocasiones los datos recopilados del muestreo directo en áreas limitadas deben ser empleados para la estimación extensiva de fenómenos contaminantes en áreas grandes, o es importante estimar el comportamiento transciente del contaminante.

En este entorno juega un papel importante la simulación del comportamiento del contaminante en el sitio afectado, para lo cual actualmente se dispone de programas de cómputo basados en modelos matemáticos probados.

En este sentido, el desarrollo es creciente, de tal manera que se cuenta con numeroso software para la simulación del transporte de contaminantes en suelo bajo diferentes condiciones, cuya aplicación puede ser general o específica.

Un Modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad. Los modelos matemáticos aplicados al transporte de contaminantes consisten de un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de los contaminantes (solutos) en medios granulares o fracturados, siendo también instrumentos muy importantes en la predicción del movimiento de los contaminantes.

La aplicación de modelos de transporte requiere del entendimiento de las condiciones de flujo en el sistema y por lo tanto del entendimiento de los modelos de flujo. Desde luego la validez o credibilidad de las predicciones dependerá de qué tan bien el modelo represente las condiciones de campo. En este sentido, los datos de campo son esenciales para realizar la calibración del modelo, cuando se utilizan con fines predictivos.

Los Modelos Matemáticos se emplean también para aplicaciones interpretativas y genéricas. Las aplicaciones interpretativas se ocupan como la estructura para estudiar la dinámica del sistema y/u organizar los datos de campo. Esta aplicación no requiere calibración. Las aplicaciones genéricas son utilizadas para analizar las condiciones de flujo y/o transporte en sistemas hidrogeológicos hipotéticos.

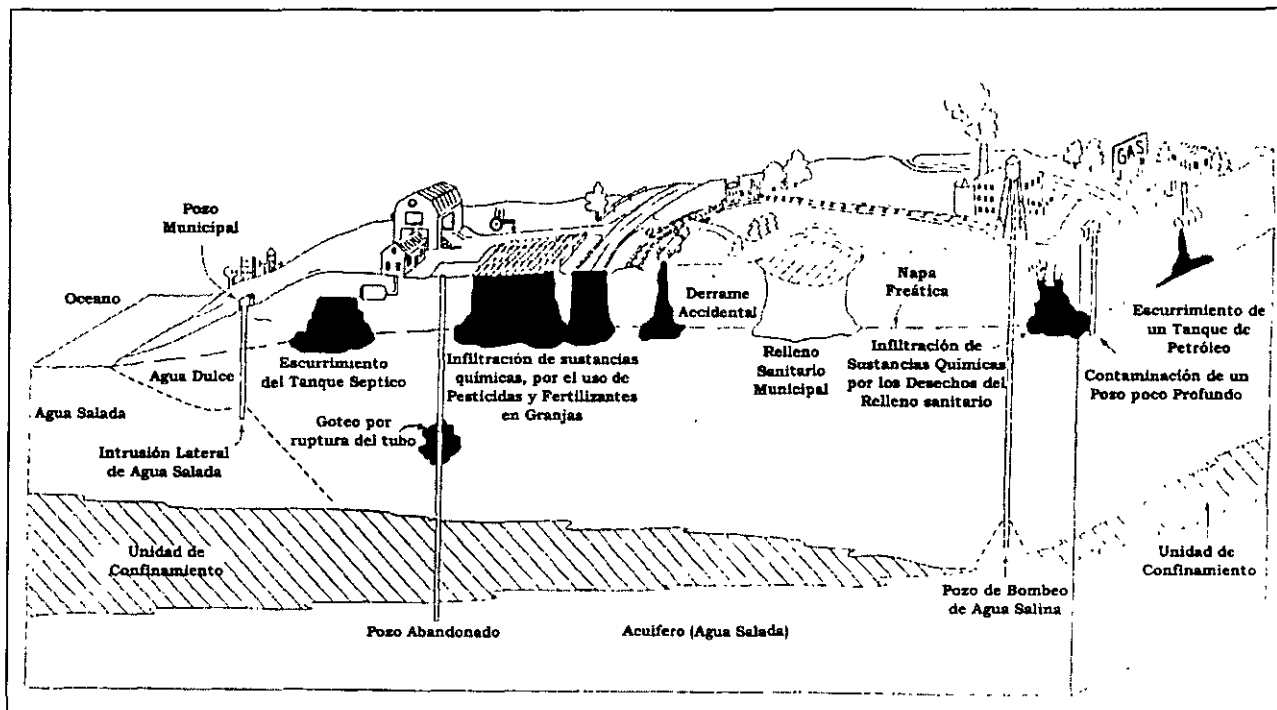


Figura 3. Diversas fuentes generadoras de plumas contaminantes.

En muchos casos es necesario simplificar el problema y llevar a cabo consideraciones dado que las condiciones de campo son, en ocasiones, muy complejas. Para realizar estas simplificaciones se requiere tener un amplio conocimiento de hidrogeología y en particular de hidrogeología de contaminantes.

## II. Marco Conceptual de Modelos Matemáticos.

Un modelo conceptual tiene como finalidad definir las características y funcionamiento del marco hidrogeológico, tanto a nivel regional como local, en el área de influencia del sitio contaminado. El modelo conceptual, en este sentido, incluye dos aspectos fundamentales:

a. Definición del Sistema de Flujo Subterráneo. Considera el marco geológico (estratigrafía, sedimentología y estructura); la hidroestratigrafía (distribución y geometría de acuíferos y acuitardos); las propiedades hidráulicas y la distribución de las unidades hidrogeológicas (conductividad hidráulica, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento). Involucra las configuraciones piezométricas y potenciométricas para los diferentes acuíferos y acuitardos, así como la distribución y magnitud de la recarga (precipitación, infiltración de fuentes de agua superficial, etc) y descargas naturales, etc.

b. Mecanismos de transporte. Considera los mecanismos de transporte de solutos o contaminantes en el subsuelo, aunque el análisis de transporte de contaminantes se fundamenta en el sistema de flujo. El uso de indicadores geoquímicos e isotópicos para identificar los mecanismos de transporte que se llevan a cabo en forma natural en el sistema hidrogeológico son de suma importancia, ya que permiten reconocer los mecanismos de transporte que controlan a los diferentes solutos.

En forma general, los sistemas hidrogeológicos pueden dividirse en medios granulares de alta y baja permeabilidad, medios granulares fracturados y rocas fracturadas. Los mecanismos de transporte y los indicadores geoquímicos e isotópicos para cada uno de estos ambientes hidrogeológicos son diferentes.

Sistemas hidrogeológicos
1. Medios granulares de alta y baja permeabilidad
2. Medios granulares fracturados
3. Rocas fracturadas

Dentro del modelo conceptual es importante definir si el análisis de transporte será en zona saturada o no saturada, si se trata de contaminantes miscibles o inmiscibles, o si se presentarán efectos de densidad, dispersión controlada por advección o difusión molecular, así como el tipo de medio: granular, granular fracturado o fracturado.

En cuanto al contaminante, será necesario definir el tipo o tipos de contaminantes presentes en el sistema y seleccionar aquellos que por sus características adversas a la salud o por algún interés particular sean los más peligrosos. Una vez

identificado el contaminante es importante definir sus propiedades físicas y químicas, así como las posibles reacciones que pudiesen llevarse a cabo en el medio granular o fracturado.

## **TIPOS DE MODELOS.**

A partir del medio conceptual que involucra tanto al medio hidrogeológico como al tipo de contaminante, es necesario seleccionar el modelo de transporte más adecuado a las necesidades específicas. En la selección del modelo matemático se requiere mucho cuidado, ya que existen modelos de diferentes tipo y características. Cabe señalar que los modelos matemáticos consisten de las ecuaciones de flujo y/o transporte, de condiciones de frontera y condiciones iniciales. Las condiciones de frontera son especificaciones matemáticas que definen la variable dependiente (carga hidráulica o concentración) o la derivada de la variable dependiente (flujo de masa) en las fronteras, en el dominio de flujo y transporte. Las condiciones de frontera física se definen como parte de la geometría y/o condiciones de flujo y transporte.

Existen modelos unidimensionales, bidimensionales, cuasi-dimensionales, tridimensionales y cuasi tridimensionales; para acuíferos libres y/o confinados, o semiconfinados; transitorios, estacionarios, monocapa, multicapa, para medios granulares, fracturados o ambos; modelos que manejan decaimiento del contaminante, retardación por reacciones químicas o biológicas, que manejan una o varias fases, con efecto de densidad o no; advección y dispersión y posiblemente difusión molecular; modelos de transporte que se pueden acoplar a modelos de flujo, otros que no y requieren de una entrada de datos independiente; modelos que aceptan una fuente puntual, continua o irregular; fuente con geometría regular o no, etc.

De igual manera existen diferentes soluciones a las ecuaciones de flujo y de transporte, estas pueden ser soluciones analíticas o soluciones numéricas. En el caso de soluciones numéricas, éstas pueden ser por diferencias finitas o elementos finitos. Las soluciones anteriores tienen numerosas ventajas y desventajas dependiendo del tipo de condiciones iniciales, de frontera y geometría del sistema hidrogeológico.

Como puede notarse, existe una gran variedad de modelos que se ajustan a problemas específicos o a problemas generales. Pero cabe aclarar que no existe un modelo que resuelva todos los problemas que se presentan en la realidad, por ello se tiene actualmente una gran gama de modelos. En la selección del modelo es importante saber si el modelo ha sido "validado", por lo que se recomienda seleccionar el modelo de acuerdo al tipo de datos que se tienen, es decir, que si solo se cuenta con datos limitados a una o dos dimensiones no debe aplicarse un modelo tridimensional, el cual requiere de muchos más parámetros y datos de campo para su calibración, lo que causará mayor incertidumbre en la predicción que si está respaldado con comprobación, por tal motivo se presenta a



continuación una descripción básica del desarrollo conceptual generalizado, a fin de dar un panorama de la modelación.

### 3. APLICACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.

Se basa en dos elementos, los cuales son la definición del Sistema de Flujo Subterráneo y los Mecanismos de Transporte. A continuación se enuncian algunos términos que son requeridos en un modelo conceptual, para una mejor comprensión.

**Sistema de Flujo Subterráneo:** Dentro del marco principal, el sistema de flujo subterráneo es dependiente del elemento existente en el suelo, es decir, del marco geológico, el cual corresponde a la estratigrafía, sedimentología y estructura. Cabe señalar que existen varios conceptos que se hallan relacionados, entre los cuales destacan:

- Hidroestratigrafía: Distribución geométrica de acuíferos y acuitardos.
- Propiedades Hidráulicas y Distribución de las unidades hidrológicas, conductividad Hidráulica, Transmisibilidad y Coeficiente de Almacenamiento.
- Configuración piezométrica y potenciométricas para los diferentes acuíferos y acuitardos.
- Distribución y magnitud de la recarga, de precipitación por bombeo y descargas naturales.

Por otro lado, se tienen los Mecanismos de Transporte: El uso de indicadores geométricos e isotópicos de los mecanismos de transporte, que se llevan a cabo en forma natural en el sistema hidrológico, permiten determinar las rutas del fluido. En forma general, como se indicó anteriormente, los sistemas hidrológicos pueden dividirse en medios:

- Granulares de alta y baja permeabilidad
- Granulares fracturados
- Rocas fracturadas

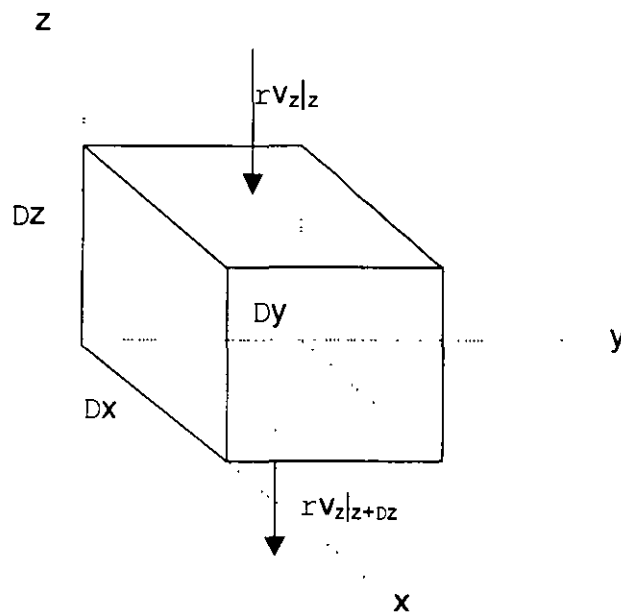
A partir del modelo conceptual que involucra tanto al medio hidrológico como al tipo de contaminante, es necesario seleccionar el tipo de transporte.

En todo caso, la descripción del movimiento de un contaminante en un terreno o en un acuífero está basada en la aplicación de las ecuaciones que definen la conservación de la masa.

La base para el planteamiento matemático consiste en el desarrollo de la ecuación de continuidad para flujo en un medio poroso (que constituye el tipo de sistema hidrogeológico de mayor interés al respecto). A partir del planteamiento de la ecuación de continuidad se obtienen las expresiones para compuestos químicos solubles. En cada caso, la ecuación se compone de los siguientes términos:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Tasa de} & & \text{Tasa de} & & \text{Tasa de} & & \text{Tasa de} \\ \text{acumulación de} & = & \text{entrada de} & - & \text{salida de} & + & \text{generación de} \\ \text{masa} & & \text{Masa} & & \text{masa} & & \text{masa} \end{array} \quad (1)$$

La aplicación más simple de la ecuación anterior es el desarrollo de la ecuación de continuidad unidimensional para flujo a través de un volumen de control abierto, como el que se muestra a continuación. Cabe observar que se pueden obtener ecuaciones similares para el flujo en las direcciones x e y, las tres ecuaciones resultante proporcionan la definición del flujo en tres dimensiones a través del volumen de control.



**Figura 1. Transporte unidimensional de un fluido a través de un volumen de control.**

Simplificando las consideraciones físicas para considerar que el movimiento sólo se produzca en la dirección vertical y el término de generación sea nulo, esto es, no se producen reacciones químicas o bioquímicas, la expresión matemática de la ecuación de continuidad viene dada por la ecuación 2:

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} = \Delta x \Delta y \rho v_z - \Delta x \Delta y \rho v_{z+\Delta z} \quad (2)$$

donde:

$\rho$  = densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>

$v_z$  = velocidad en la dirección z, m/s.

Tomando los límites cuando

$$\Delta z \longrightarrow 0$$

Se obtiene la ecuación 3:

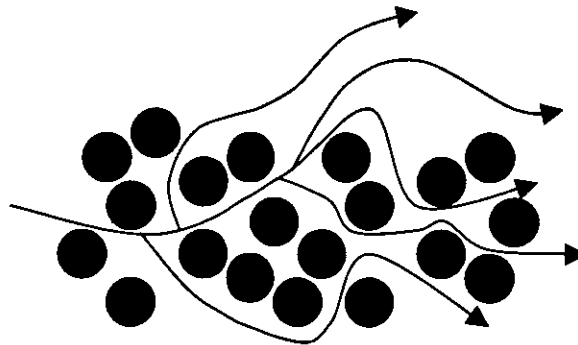
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \quad (3)$$

debido a que la densidad del líquido se puede considerar constante, la velocidad también es constante en el caso de flujo unidimensional (lo cual es poco común en la capa bajo la superficie). Para flujo multidimensional, la divergencia del vector velocidad es cero, y por lo tanto:

$$\nabla v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

**Continuidad en un medio poroso.**

En un medio poroso, como el que se muestra en la Figura 2, el movimiento del fluido puede ser descrito, a escala macroscópica, en la que se estiman las velocidades medias, y a escala microscópica, en la que se consideran las velocidades reales en los poros.



**Figura 2. Variaciones de velocidad a escala local en un medio poroso.**

En la mayoría de los casos, las velocidades medias se calculan tomando como referencia el contenido de agua del medio poroso y la porosidad. La ecuación de continuidad para un medio poroso queda entonces:

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \Theta \rho}{\partial t} = \Delta x \Delta y \Theta \rho v_z - \Delta x \Delta y \Theta \rho v_{z+\Delta z} \quad (5)$$

Agrupando términos y haciendo

$$DZ \longrightarrow 0$$

Tenemos:

$$\frac{\partial(\Theta \rho)}{\partial t} = \frac{\partial(\Theta \rho v)}{\partial z} \quad (6)$$

donde  $\Theta$  = contenido de agua en volumen (volumen de agua por volumen de medio poroso).

El contenido de agua en volumen puede variar considerablemente en un suelo. Por lo general, debido a la dificultad que supone definir las condiciones en un suelo, los balances de masa se plantean para regiones en las que  $\Theta$  es constante; entonces la ecuación de continuidad puede escribirse como:

$$\Theta \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\Theta \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \quad (7)$$

ó

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \quad (8)$$

Y de nuevo, para un líquido, la divergencia del vector de velocidad es nula.

Las velocidades en un medio poroso se suelen representar mediante la ley de Darcy, una expresión empírica que fue obtenida por el ingeniero hidráulico Henry Darcy, en 1856.

$$v = -K_c \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (7)$$

donde:  $v$  = velocidad a lo largo de la dirección de flujo  $L$ , m/s  
 $K_c$  = conductividad hidráulica, m/s  
 $\Delta h$  = pérdida de carga, m, a lo largo de la distancia  $\Delta L$ , m.

La conductividad hidráulica es función de las propiedades del medio poroso, en particular del tamaño de grano (o tamaño de grano efectivo) y de las propiedades de fluido (densidad y viscosidad).

$$K_c = Cd^2 \frac{\rho g}{\mu} \quad (8)$$

donde,  $C$  = constante de proporcionalidad, adimensional

$d$  = tamaño de grano del medio poroso, m

$\rho$  = densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido, N s/m<sup>2</sup>

Los valores de  $K_c$  oscilan, de forma muy general, entre 10<sup>-3</sup> m/s para arenas gruesas y 10<sup>-8</sup> para arcillas. La velocidad depende de la sección transversal que atraviesa el flujo. Las velocidades a través de los poros son superiores y, en un medio poroso saturado, se puede estimar la velocidad de poros media  $U_{poros}$  mediante la ecuación siguiente:

$$U_{poros} = \frac{U}{\Phi} \quad (9)$$

donde  $\Phi$  = porosidad (volumen de huecos / volumen del medio poroso).

### Advección y dispersión hidrodinámica en un medio poroso.

La advección es el movimiento de partículas o de un contaminante debido a la velocidad del fluido. En suelos y acuíferos, el flujo es casi siempre laminar y, en general, definir todos los aspectos de un determinado campo de velocidades bien es imposible o es poco práctico. Por lo tanto, la advección generalmente se relaciona con el transporte mediante la velocidad media del campo. El flujo másico

de una especie contaminante en un medio poroso debido a advección en la dirección  $z$  viene expresado como:

$$\text{Flujo advectivo} = Qu_z C_A \quad (10)$$

Donde  $C_A$  = concentración del contaminante de la especie A en fase acuosa,  $g/m^3$ .

Cuando un medio poroso está saturado,  $Q$  es equivalente a la porosidad  $\Phi$ .

La dispersión mecánica constituye la propagación de masa debido a variaciones de la velocidad a una escala menor que el tamaño del volumen de control y ante el desconocimiento de la velocidad de campo verdadera en el volumen de control sirve como valor representativo de la misma. En suelos y acuíferos, el flujo es casi siempre laminar y la parte del término de dispersión que representa a la variación del flujo, se emplea en describir los efectos de cortante en el campo de velocidades y las trayectorias tortuosas que sigue el fluido a través del medio poroso. La contribución de la tortuosidad a la dispersión, es en general, mucho mayor que la contribución por parte de la difusión molecular. El flujo másico debido a la dispersión hidrodinámica en un medio poroso puede expresarse como:

$$\text{Flujodispersivo} = -\Phi D_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (11)$$

donde  $D_z$  = coeficiente de dispersión hidrodinámica en la dirección  $z$ ,  $m^2/s$ .

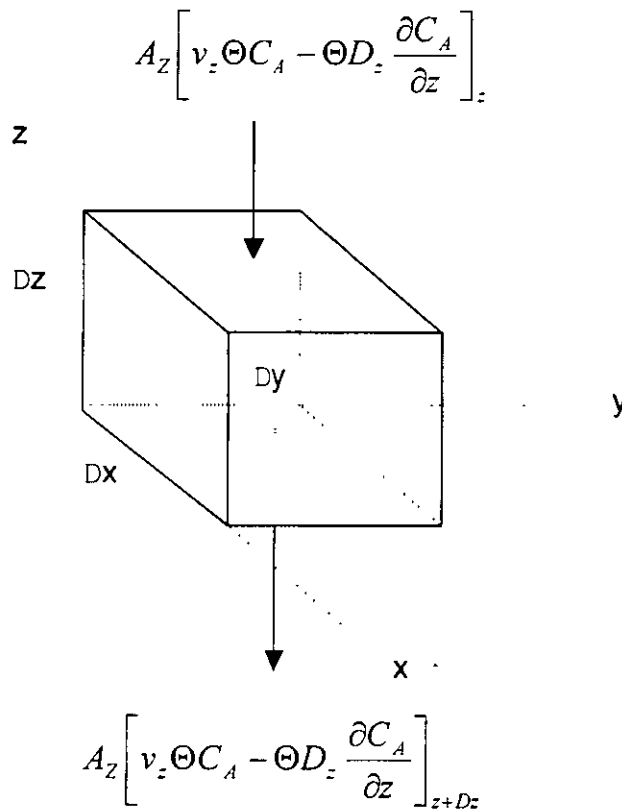
El coeficiente de dispersión hidrodinámica se expresa por lo general, como la suma de dos términos, la dispersión mecánica  $a_z u_z$  y la difusión molecular  $D_m$ , como se muestra a continuación.

$$D_z = a_z u_z + D_m \quad (12)$$

Donde  $a_z$  = dispersión, un coeficiente empírico que representa la tortuosidad y la mezcla en la dirección  $z$ ,  $m$ .

**Transporte de un compuesto conservativo en un medio poroso.**

Un componente conservativo es aquel para el cual el término de generación es nulo. Los elementos hasta ahora desarrollados constituyen la base para el modelado de un componente conservativo, que experimenta transporte por advección y dispersión hidrodinámica, pero no se volatiliza hacia la fase gas ni es adsorbido por la fase sólida. El esquema ilustrativo se presenta en la figura 3.



**Figura 3. Modelo de transporte de masa vertical en un medio poroso**

Entonces, el balance de materias, agrupando términos y tomando el límite cuando  $Dz$  tiende a cero, resulta:



$$\frac{\partial \Theta C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \Theta D_z \frac{\partial C_A}{\partial t} \right) - \frac{\partial \Theta v_z C_A}{\partial z} \quad (13)$$

Esta ecuación es la expresión de advección – dispersión unidimensional para el transporte de un componente conservativo y se aplica al transporte en medio poroso tanto saturado como no saturado.

Las soluciones de la ecuación 13 dependerán de las condiciones de contorno e iniciales. Además, la velocidad media del fluido debe ser conocida. El movimiento de contaminantes en suelos y aguas subterráneas siempre es un problema en tres dimensiones, por lo que la ecuación 13 deberá escribirse también para las direcciones x e y. En ocasiones, el flujo en una o dos dimensiones controla el transporte de contaminante y entonces un modelo unidimensional relativamente sencillo es suficiente.

### Procesos de transferencia entre fases.

Los procesos diferente a la advección y dispersión hidrodinámica que dan lugar al movimiento hacia el interior y el exterior del volumen de control, se denominan en ocasiones procesos de transferencia. Los más significativos son la adsorción, disolución, absorción y volatilización.

En la adsorción, las moléculas de un compuesto en solución resultan adsorbidas en la superficie de un sólido a través de una reacción química (quimisorción) o por fuerzas físicas. Este último caso es el que constituye el interés principal desde el punto de vista de movilidad, ya que no afecta la composición del contaminante. La adsorción se ve afectada por diversos factores, entre ellos: las propiedades del contaminante y del terreno.

Un modelo frecuentemente empleado para la adsorción en el equilibrio de un compuesto a partir de una solución, es la isoterma de Freundlich, obtenida empíricamente

$$\frac{x_A}{m} = K_F C_{Ae}^{1/n} \quad (14)$$

- donde
- $x_A$  = masa de A adsorbida por la fase sólida, g.
  - $m$  = masa de la fase sólida, g
  - $K_F$  = coeficiente de adsorción de Freundlich, unidades variables.
  - $C_{Ae}$  = concentración de A en el equilibrio, g/m<sup>3</sup>
  - $n$  = coeficiente empírico o parámetro de ajuste, adimensional

Por otra parte, Langmuir desarrolló un modelo teórico de adsorción, basado en suponer que la superficie de adsorción está saturada cuando se ha adsorbido una monocapa. La isoterma de Langmuir puede expresarse como

$$\frac{x_A}{m} = \frac{aC_{Ae}}{b + C_{Ae}} \quad (15)$$

- donde
- $a$  = factor que relaciona la masa – sorbato por masa sorbente con la superficie afectada, adimensional
  - $b$  = coeficiente de saturación, g/m<sup>3</sup>

Existe reportado en la bibliografía, la distribución de un contaminante entre las fases sólida y líquida de la siguiente forma:

$$K_{SD} = \frac{S}{C_{Ae}} \quad (16)$$

- donde  $K_{SD}$  = coeficiente de distribución del terreno, L/mg o m<sup>3</sup>/g

$s$  = masa de soluto adsorbido por unidad de masa – seca de terreno ( $x_A/m$ ), adimensional.

La distribución de un terreno es igual al coeficiente de adsorción de Freundlich cuando  $n = 1$ . Ambas isothermas, Langmuir y Freundlich, se aproximan a un comportamiento lineal para concentraciones diluidas de soluto.

#### Volatilización y Condensación.

La volatilización es el proceso en el cual los compuestos químicos contaminantes pasan de una fase líquida o sólida a una fase gas, como resultado de la difusión molecular. La condensación es el proceso por el cual los químicos contaminantes pasan de la fase gas a la líquida otra vez como resultado de la difusión molecular. La aplicación de la ley de Henry, y la aplicación del procesado matemático pueden permitir la complementación de la ecuación 13, pero la expresión final depende de la forma del enunciado seleccionado para la ley de Henry. Una de las posibilidades es la siguiente.

$$\frac{\partial R \Theta C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \Theta D_z \frac{\partial C_A}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\partial \Theta v_z C_A) + K_L a (C_A - C_{Ae}) \quad (17)$$

Siendo  $C_A$  y  $C_{Ae}$  la concentración de la fase acuosa existente y la concentración de la fase acuosa en el equilibrio.

La forma diferencial de las ecuaciones y la dificultad práctica de la obtención de varios de los parámetros incluidos en ellas, ocasionan que la resolución analítica sea poco útil y muy complicada, lo cual abre la posibilidad y enfatiza la importancia de la aplicación de herramientas computacionales.

En realidad, la formulación mono, bi y tridimensional de los modelos reales, involucran matemáticas avanzadas y elementos de análisis numérico que son poco o absolutamente irrealizables sin la ayuda de modelos matemáticos programados.

### **III. Software para Modelado de Dispersión de Contaminantes en Suelo.**

Sin pretender integrar un listado completo y exhaustivo, a continuación se presenta una revisión de alternativas de herramientas computacionales para el modelado de dispersión de contaminantes en suelo.

A grandes rasgos, se establece la siguiente clasificación general.

- 1. Software para transporte de contaminantes en condiciones unidimensionales.**
- 2. Software para transporte de contaminantes en dos dimensiones por el método de elemento finito.**
- 3. Software para transporte de contaminantes en dos dimensiones por el método de diferencias finitas.**
- 4. Software analítico para el transporte de contaminantes en dos dimensiones.**
- 5. Software para transporte de contaminantes en tres dimensiones.**

Cada una de éstas agrupaciones o categorías de software incluyen diversos modelos desarrollados para diferentes aplicaciones y con distintas representaciones espaciales.

A continuación se describen los resultados obtenidos en cada una de las categorías señaladas.

## 1. CATEGORÍA DE SOFTWARE PARA TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN UNA DIMENSIÓN.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1. BIO1D	Es un modelo de diferencias finitas para la simulación de la biodegradación y absorción de hidrocarburos degradables.
2. BIOSCREEN	Es un modelo de evaluación que simula la remediación a través de la atenuación natural de hidrocarburos disueltos en sitios abandonados con combustibles del petróleo.
3. CHEMFLOW	Es un modelo unidimensional a nivel de pantallas que simula el movimiento de agua y de químicos en suelos no saturados.
4. CONTAM	Modelo de diferencias finitas para soluciones unidimensionales de problemas de transporte de contaminantes que involucra difusión, advección y dispersión.
5. CVM	Modelo de elemento finito que provee una primera simulación sencilla para problemas de contaminación de aguas subterráneas a fin de correr modelos más complejos.
6. CXPMPM	Modelo analítico unidimensional para el transporte de sustancias disueltas en acuíferos confinados y no confinados.
7. FEMA	Modelo de elemento finito para el transporte de materiales a través de acuíferos.
8. FEMWASTE	Modelo de elemento finito para el transporte de residuos a través de medio poroso saturado y no saturado.
9. FRACTPORT	Es un modelo integrado por compartimientos que describe el transporte de sustancias disueltas en un medio poroso fracturado.
10. HYDRUS-1D	Modelo de elemento finito que simula el movimiento unidimensional de agua, calor y múltiples sustancias disueltas en medios variablemente saturados.
11. ONE-D	Es un paquete de cinco soluciones analíticas de la ecuación de transporte unidimensional de dispersión-convección con adsorción lineal, producción de orden cero y decaimiento de primer orden.
12. PESTAN	El modelo analítico de pesticidas es una compilación de programas de cómputo que estima el transporte de sustancias orgánicas disueltas a través del suelo y hacia las aguas subterráneas.
13. POLLUTE	Es un software de modelación de capa finita para la migración de contaminantes que usa la solución de 1.5 dimensiones de la ecuación de advección-dispersión.
14. PRZM2	Asocia dos modelos subordinados para predecir el transporte y destino de pesticidas a través de la zona de raíces y de la zona no saturada.
15. PULSE	Es un modelo analítico unidimensional del transporte de sustancias disueltas en acuíferos saturados confinados y no confinados.
16. RITZ	Es un modelo a nivel de pantallas para la simulación del flujo en la zona no saturada y el transporte de residuos aceitosos durante el tratamiento de tierras.
17. SESOIL versión 2.1	Es un modelo a nivel de pantallas para el transporte vertical unidimensional de la zona no saturada (vadosa) que simula el transporte y destino basándose en la difusión, adsorción, volatilización, biodegradación, intercambio de cationes e hidrólisis.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
18. VIRTUS	Es un modelo de diferencias finitas para el destino y transporte de virus en suelos no saturados.
19. VLEACH	Es un modelo de diferencias finitas relativamente simple. Puede simular la lixiviación a través de la zona vadosa de contaminantes volátiles, adsorbentes y no reactivos.
20. WHI UNSAT SUITE	Este software combina los modelos VLEACH, PESTAN y VS2DT en un ambiente gráfico diseñado para simular, en una dimensión, el transporte de contaminantes y el flujo de las aguas subterráneas a través de la zona no saturada.
21. WINTRACE	Es usado para modelar el trazo del agua en una, dos y tres dimensiones del flujo resultante de la combinación de hasta tres diferentes acuíferos superpuestos, empleando la fórmula de Sauty completada con un factor empírico que toma en cuenta los volúmenes muertos.

## 2. CATEGORÍA DE SOFTWARE PARA TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN DOS DIMENSIONES (modelos de elemento finito FEM).

NOMBRE	APLICACIÓN
1. ABCFEM	Es un modelo bidimensional de elemento finito para flujo y transporte de sustancias disueltas. Puede ser usado para la solución de problemas de flujo o para analizar conjuntamente el flujo y transporte de sustancias disueltas en un dominio único.
2. AQUA	Es empleado para la modelación del transporte de contaminantes y flujo de aguas subterráneas, usando el método de elemento finito de Galerkin. Analiza flujo de aguas subterráneas de estado estable y transitorio en condiciones anisotrópicas y no homogéneas. Analiza el transporte estable y transitorio de contaminantes y calor con convección, decaimiento, adsorción y dispersión dependiente de la velocidad.
3. BIOTRANS	Complejo bidimensional por elemento finito que modela el transporte areal de múltiples contaminantes disueltos y oxígeno en aguas subterráneas debido a la convección y dispersión hidrodinámica. La adsorción de contaminantes es considerada y el decaimiento puede ser modelado como una reacción de primer orden, o como un proceso limitado en oxígeno. El transporte tiene lugar en la fracción móvil del espacio del poro con tasa limitada de transferencia de masa entre el espacio del poro móvil e inmóvil (fracturas y matriz del suelo, respectivamente). Puede manejar simultáneamente 5 especies químicas y oxígeno.
4. CTRAN-W	Es un programa de elemento finito para el análisis del transporte de contaminantes a través del suelo o roca. Incluye factores de análisis del transporte de masa para: condiciones de frontera de flujo de masa y concentraciones transitorias; condiciones de frontera de salida libre; coeficiente de difusión molecular como una función del contenido volumétrico de agua; coeficientes independientes de dispersividad en dos direcciones ortogonales, adsorción como una función de la concentración; pérdida de masa debida al decaimiento radio activo; simulación del transporte a través de roca fracturada. El movimiento del contaminante puede ser modelado por rastreo de partículas a partir de las locaciones definidas por el usuario, o por retro rastreo a partir del punto de salida o sumidero.

NOMBRE	APLICACIÓN
5. FEMSEEP	Este programa se encuentra discontinuado. Es un conjunto de programas de menús de control para resolver los problemas de transporte de sustancias disueltas y flujo de aguas subterráneas en estado estable y no estable, en un plano horizontal bidimensional, en una sección transversal vertical, o en un sistema simétrico radial tridimensional. Contiene tres programas de elemento finito separados para flujo, transporte advectivo y transporte advectivo-dispersivo. El acuífero puede ser confinado, confinado permeable o freático
6. FLONET-TRANS	Es empleado para la modelación bidimensional transversal del transporte de contaminantes y el flujo de aguas subterráneas, usando la formulación dual de potenciales hidráulicos y líneas de corriente, para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas saturadas y crear diagramas de red de flujo de dos dimensiones, en sistemas saturados de aguas subterráneas.
7. FRACTRAN	Modelo de elemento finito en dos dimensiones (sección transversal y areal) que simula el flujo de aguas subterráneas en estado estable y el transporte de contaminantes en tránsito en un medio poroso discretamente fracturado. Estima los mecanismos de flujo y transporte a través de las fracturas discretas y de la matriz en bloque, además tiene la opción de solución para el flujo y transporte en medio poroso no fracturado.
8. HYDROGEOCHEM	Es un modelo de elemento finito para simular el transporte hidrológico y la reacción geoquímica, multi-especies y multi-componentes en medios saturados y no saturados, bajo flujo transitorio o de estado estable. Modela advección, dispersión y difusión, complejión acuosa, adsorción, desorción, intercambio de iones, disolución, y reacciones redox y ácido-base. Está diseñado para simular el tránsito y/o transporte en estado estable de Na, de componentes acuosos y el tránsito y/o balance de masa en estado estable de componentes adsorbentes $N_s$ y sitios de intercambio de iones. Hydrogeochem calcula y predice la distribución de la presión "head", del contenido de mezcla, de la velocidad de flujo, y el "total head" sobre un plano tridimensional tanto en medio subsuperficial completamente saturado, completamente no saturado, parcialmente no saturado o parcialmente saturado. Calcula y predice la distribución espacial-temporal de múltiples componentes químicos. El medio puede consistir de muchos tipos de suelos y unidades geológicas como se desee con diferentes propiedades materiales. Los tipos de suelo pueden ser isotrópicos o anisotrópicos. El proceso que gobierna la distribución de químicos incluye: (1) equilibrio geoquímico de complejación acuosa, oxidación-reducción, adsorción y precipitación y disolución, y (2) transporte hidrológico por advección, dispersión y efecto de no saturación.
9. IMF2D	Este programa se encuentra discontinuado. Es un programa bidimensional para el flujo inmisible de aceite y agua a través de suelos.
10. MIGRATE	Es un programa para transporte de contaminantes en dos dimensiones a partir de múltiples fuentes, usando una técnica de capas finitas que provee numéricamente resultados exactos y estables, requiriendo relativamente pequeño esfuerzo computacional y pocos datos de entrada. En resumen, el transporte advectivo-dispersivo considera la adsorción, decaimiento radioactivo y biológico, y el transporte a través de fracturas. Uno o más rellenos sanitarios, tiraderos, vertederos o estanques de disposición pueden ser modelados.
11. MOFAT	Es un modelo de elemento finito de contracorriente cargada para simular el flujo acoplado de agua, líquidos en fase no acuosa (NAPL) y aire, así como el transporte multicomponente hasta de 5 especies no inertes en una sección vertical bidimensional a través de zonas saturadas y no saturadas, en coordenadas cartesianas o radiales



NOMBRE	APLICACIÓN
	<p>El módulo de flujo puede ser usado para simular un sistema de 2 ó 3 fases con fase de gas, tratado dinámicamente o asumiendo presión constante</p> <p>El transporte convectivo–dispersivo en agua, NAPL y en fase de gas es analizado asumiendo un equilibrio local particionado entre fases y con la fase sólida. Simula el flujo y transporte multifases (agua, aceite y gas) de hasta 5 especies químicas no inertes. Modela el flujo de líquidos orgánicos ligeros y densos en sistemas fluidos de tres fases. Simula gases dinámicos o pasivos como un profundo problema de flujo de tres fases. Modela el flujo de agua solamente, el flujo de agua –aceite o el flujo de agua–aceite–gas en medios porosos variablemente saturados. MOFAT analiza el transporte convectivo–dispersivo en agua, NAPL y en fases de gas asumiendo un equilibrio o desequilibrio local particionado entre las fases de fluido y sólido.</p>
12. MOTRANS	<p>Es un modelo de elemento finito bidimensional para simular el flujo del agua, de líquidos densos o ligeros en fase no acuosa (NAPL) y aire, así como el transporte de hasta 5 especies en secciones verticales de dos dimensiones a través de zonas saturadas y no saturadas en coordenadas Cartesianas y radiales. Modela: flujo de gas explícitamente o asumiendo presión constante; transporte por convección–dispersión de agua, NAPL y fases de gas con equilibrio local particionado; interfase de transferencia de masa y dependencia composicional; relaciones de presión capilar del suelo; modela las 3 fases de van Genuchten para relaciones de saturación presión–permeabilidad; histéresis en aceite permeable debido a aceite atrapado.</p>
13. POLUT2D	<p>No está disponible. Es un programa de elemento finito para analizar el transporte de contaminantes a través de suelos para problemas de dos dimensiones. Resuelve el transporte acoplado convectivo–difusivo con flujo no saturado.</p>
14. SEFTRANS	<p>Es un modelo de elemento finito profundamente flexible para la simulación del flujo de aguas subterráneas saturadas y no saturadas y el transporte de contaminantes</p>
15. TRAFRAP-WT	<p>Transporte en medio Fracturado Poroso en condiciones de frontera del nivel freático. Es una compilación de investigaciones de elemento finito bidimensional diseñado para simular el flujo del agua subterránea y el transporte de sustancias disueltas en acuíferos fracturados o granulares, y es capaz de tratar tanto sistemas confinados (permeables) y freáticos. El medio poroso fracturado está representado tanto por las aproximaciones de fractura–discreta o porosidad dual, o por una combinación de ambas.</p>
16. VAM2D	<p>Modelo de elemento finito bidimensional para simular el flujo de aguas subterráneas y transporte de contaminantes en acuíferos confinados y no confinados. Modela saturación y no saturación. Efectos de histéresis en la curva de retención de agua pueden ser simulados. Simula el transporte de una especie de contaminante o un componente de múltiples familias de cadenas que decaen. Simula el flujo de aguas subterráneas en tránsito o en estado estable y el transporte de contaminantes en medio poroso. Analiza problemas de flujo no confinado usando una rigurosa aproximación de modelado saturado – no saturado, empleando eficientes técnicas numéricas. El transporte de contaminantes puede estimarse por advección, dispersión hidrodinámica, equilibrio de adsorción y degradación de primer orden.</p>
17. WINTRAN	<p>Acopla el modelo de flujo de aguas subterráneas de estado estable del programa WinFlow con un modelo de transporte de contaminantes en aguas subterráneas de elemento finito. El modelo de transporte incluye los efectos de dispersión,</p>

NOMBRE	APLICACIÓN
	adsorción lineal (retardación) y decaimiento de primer orden. Simula el flujo de estado estable y el transporte transitorio en acuíferos confinados y no confinados

### 3. CATEGORÍA DE SOFTWARE PARA TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN DOS DIMENSIONES (diferencias finitas FD).

NOMBRE	APLICACIÓN
1. ASM	Modelo de Simulación de Acuífero (ASM en sistema operativo DOS) es un modelo numérico de transporte y flujo bidimensional. Simula condiciones de flujo transitorio y de estado estable, con condiciones del acuífero confinado, freático y confinado permeable. El transporte se basa en el flujo de campo de estado estable. Considera acuíferos heterogéneos y anisotrópicos. Se emplea para realizar evaluaciones iniciales de problemas hidrogeológicos.
2. ASMWIN	Modelo ASM en windows.
3. BIOF&T	Simula el flujo y transporte en las zonas saturada y no saturada en 2 ó 3 dimensiones. Simula la solución para el flujo transitorio de agua en coordenadas Cartesianas a 1 ó 2 dimensiones o radiales a 2 dimensiones y la solución del transporte en fase disuelta de multiespecies en la zona no saturada no acoplada con flujo y transporte multicomponentes en fase acuosa, bi o tridimensional, en acuíferos. Modela la biodegradación, flujo y transporte en las zonas saturada y no saturada en dos y tres dimensiones en medio fracturado o medio poroso heterogéneo y anisotrópico. Es un modelo de elemento finito bi o tridimensional para el flujo de agua y transporte de multicomponentes en fase acuosa en medio poroso variablemente saturado. Tiene la capacidad de modelar sitios contaminados que tienen complejos hidrogeológicos, heterogéneos y/o anisotrópicos. Modela medios fracturados variablemente saturados o medio poroso granular no fracturado basándose en una aproximación dual de la porosidad.
4. BIOPLUME II	Es un modelo de transporte de sustancias disueltas en dos dimensiones que calcula los cambios en concentración con respecto al tiempo debido a la advección, dispersión, mezclado y retardación. Simula el transporte de hidrocarburos disueltos bajo la influencia de la biodegradación limitada en oxígeno. También simula la reaeración y biodegradación anaeróbica como un decaimiento de primer orden en concentraciones de hidrocarburos. El modelo está basado en el modelo bidimensional de transporte de sustancias disueltas de la U. S. Geologic Survey (USGS) denominado MOC (desarrollado por Konikow-Bredehoeft). Resuelve la ecuación de transporte de dos maneras: una para hidrocarburos y otra para oxígeno. Como resultado, dos plumas son calculadas en cada paso, y las dos plumas son combinadas usando los principios de superposición. El modelo asume una reacción instantánea entre el oxígeno y el hidrocarburo. Puede simular los procesos de biodegradación natural, retardación de plumas y esquemas de bioremediación <i>in situ</i> . Bioplume corre en ambiente principalmente de DOS
5. BIOPLUME III	Es un modelo bidimensional de diferencias finitas que simula la atenuación natural de contaminantes orgánicos en agua subterránea debido a los procesos de advección, dispersión, adsorción y biodegradación. Los procesos de biotransformación son potencialmente importantes en la restauración de acuíferos contaminados con contaminantes orgánicos. Como resultado, estos procesos requieren evaluación mediante estudios de planeación de acciones de remediación asociados con hidrocarburos contaminantes.

NOMBRE	APLICACIÓN
	<p>Bioplume III está basado en la compilación MOC de la USGS para el transporte de sustancias disueltas y resuelve la ecuación de transporte de sustancias disueltas seis veces, para determinar el transporte y destino de los hidrocarburos y los aceptores de electrones (<math>O_2</math>, <math>NO_3^-</math>, <math>Fe^{3+}</math>, <math>SO_4^-</math> y <math>CO_2</math>), así como la reacción por productos (<math>Fe^{2+}</math>). Cierta número de aceptores de electrones tales como oxígeno, nitrato, sulfato, hierro (III) y dióxido de carbono han sido considerados en este modelo para simular la biodegradación de contaminantes orgánicos. Tres diferentes expresiones cinéticas pueden ser usadas para simular las reacciones de biodegradación aeróbica y anaeróbica. Estas incluyen: decaimiento de primer orden, reacción instantánea y cinética de Monod. El principio de superposición es usado para combinar la pluma de hidrocarburo con la pluma de aceptor de electrones. El modelo ha sido integrado con una sofisticada plataforma de modelación de agua subterránea conocida como EIS</p> <p>Bioplume III corre en ambiente Windows95.</p>
6. FATMIC 2D	<p>Simula el flujo subsuperficial, el transporte y el destino de los contaminantes que son sometidos a transformación química y/o biológica. El modelo es aplicable a condiciones de tránsito tanto en zonas saturadas y no saturadas. El módulo de flujo es la solución de elemento finito de Galerkin a la ecuación de Richard's. El módulo de transporte es una aproximación híbrida de Lagrangian-Eulerian con un algoritmo adaptado de ampliación (zooming) y captura de picos. Este modelo puede casi eliminar la oscilación espuria, la dispersión numérica y los picos recortados debidos al transporte advectivo. Este modelo numérico simula: el transporte y destino de múltiples microbios, aceptores de electrones, sustratos, nutrientes y densidad dependiente del flujo en medios subsuperficiales saturados no-saturados bajo condiciones de estado estable o de tránsito; distribución múltiple y puntos fuente/sumidero, así como fronteras de origen; procesos que degradan y transforman contaminantes, causando el crecimiento y muerte de microbios, y el control de fluidos. Opera en ambiente de DOS.</p>
7. FTWORK	<p>Es un modelo de diferencias finitas, de bloque centrado, para simular en una y dos dimensiones, o bien efectuar simulaciones cuasitridimensionales, el flujo transitorio y estable, y el transporte transitorio de sustancias disueltas, de especies únicas, en medio saturado bajo condiciones de confinamiento y no confinamiento. El modelo soporta simulaciones tanto areales como de sección transversal en dos dimensiones. La ecuación de flujo es puesta en términos de "hydraulic head", la ecuación de transporte en términos de concentración. El modelo maneja heterogeneidades y anisotropía para el flujo, advección, dispersión hidráulica, decaimiento de primer orden (químico, biológico o radiactivo), y para el equilibrio de adsorción lineal y no lineal. Incluye la opción de estimación de parámetros de la ecuación de flujo estable, usando la técnica de optimización de mínimos cuadrados no lineal de Gauss-Newton con la corrección de Marquardt para estimar la conductividad hidráulica y la recarga. Trabaja en DOS.</p>
8. HSSM	<p>El Modelo de Evaluación de Derrames de Hidrocarburos es un modelo interactivo, semi analítico, propuesto para la simulación de descargas subterráneas de líquidos ligeros en fase no acuosa (LNAPLs). El modelo consiste de módulos separados para el flujo LNAPL a través de la zona no saturada (KOPT o transporte cinemático de contaminantes aceitosos), el esparcido en la periferia capilar (OILENS), y el transporte de componentes derramados, disueltos en la napa freática (TSGPLUME-Transient Source Gaussian PLUME model). El material suelo/acuífero es homogéneo. El esparcimiento en la periferia capilar se asume que es radial y no está sujeto a un gradiente regional de la napa freática. El transporte advectivo-dispersivo de fase disuelta en la zona saturada está sujeto a un flujo regional uniforme y recarga.</p>

NOMBRE	APLICACIÓN
	Trabaja en ambiente DOS y Win3x. Está en español.
9. HYDRUS-2D	<p>Es un ambiente de modelación para el análisis del flujo de agua y el transporte de sustancias disueltas en medio poroso variablemente saturado. Incluye el modelo SWMS 2D de elemento finito bidimensional para la simulación de flujo y transporte de sustancias disueltas en medio variablemente saturado. El programa puede ser usado para analizar el movimiento de agua y sustancias disueltas en medio poroso no saturado, parcialmente saturado y profundamente saturado. Puede manejar regiones de flujo para fronteras irregulares. La región de flujo en sí misma puede estar compuesta de suelos no uniformes teniendo un grado arbitrario de anisotropía local. El flujo y el transporte pueden ocurrir en el plano vertical, o en una región tridimensional exhibiendo simetría radial cerca del eje vertical.</p> <p>Es un modelo de elemento finito para la simulación del movimiento de agua, calor y múltiples sustancias disueltas en medio variablemente saturado. El programa resuelve numéricamente la ecuación de Richard's para flujo de agua saturado-no saturado y las ecuaciones de Fickian basadas en la advección-dispersión, para calor y transporte de sustancias disueltas. Trabaja en Win3x</p>
10. MOC	<p>Es un modelo bidimensional para la simulación del transporte de sustancia disueltas no conservativas en sistemas de agua subterránea saturados. Calcula los cambios en la distribución espacial de la concentración con respecto al tiempo, ocasionados por el transporte convectivo, la dispersión hidrodinámica, la mezcla o dilución a partir de las reacciones químicas o recarga. Permite la simulación de acuíferos confinados, heterogéneos y anisotrópicos. Simula el transporte de sustancias disueltas en aguas subterráneas fluyentes</p> <p>Es aplicable a problemas uni o bidimensionales que involucran el flujo transitorio o estable. Es uno de los modelos más usados para los problemas de transporte de sustancias disueltas. Trabaja en sistema DOS.</p>
11. MOC 386	Es una versión del método de la USGS de programas característicos para el análisis del transporte de contaminantes y flujo de aguas subterráneas con la adición de una utilería que convierte los archivos resumen a los archivos matriciales del Surfer. Trabaja en DOS.
12. MOC ELITE	Es un programa para el análisis bidimensional del transporte de sustancias disueltas por el método del núcleo discreto para obtener la velocidad de campo. Modela medios porosos consistentes de zonas móviles e inmóviles, advección-dispersión, sumideros, espesor de saturación variable, adsorción lineal, y los términos de reacción y decaimiento. Requiere plataforma de Mackintosh.
13. MOC DENSE	Es un modelo bidimensional de sección transversal para el análisis de la intrusión de agua salina. Este modelo simula el transporte de sustancias disueltas en aguas subterráneas corrientes. Es aplicable a problemas de dos dimensiones o de sección transversal involucrando aguas subterráneas con densidad constante o variable. El modelo calcula los cambios en la concentración con respecto al tiempo causados por el proceso de transporte advectivo, dispersión hidrodinámica, mezclado y dilución a partir de la fuente del fluido. Las concentraciones de dos sustancias independientes pueden ser modeladas simultáneamente. Se asume que la temperatura es constante, pero la densidad del fluido y la viscosidad se asume que son una función lineal de la sustancia disuelta primeramente especificada. Si una segunda sustancia disuelta es especificada, se asume que es en cantidades traza tal que no afecta la densidad o viscosidad del fluido. El acuífero puede ser heterogéneo y anisotrópico. Trabaja en DOS.
14. MOCNRC	Es una versión de la Comisión de Regulación Nuclear (NRC) del método de modelos característicos. Trabaja en DOS

NOMBRE	APLICACIÓN
15. PHREEQM-2D	Es un modelo de multicomponentes para el transporte de masa, consistente de dos programas de simulación acoplados: el HST2D y el PHREEQE. Incluye precipitación/disolución e intercambio de iones, y soporta los cálculos cinéticos para un mineral. HST2D-PC es un programa de simulación de diferencias finitas para el flujo de aguas subterráneas dependiente de la densidad y calor asociado y transporte de sustancias disueltas en configuraciones bidimensionales de flujo saturado. Trabaja en DOS.
16. SUTRA	Simula el movimiento de fluidos y el transporte tanto de energía y de sustancias disueltas en un ambiente subterráneo. Emplea un método híbrido bidimensional de elemento finito y diferencias finitas integradas para aproximar las ecuaciones gobernantes. Cálculos: presión del fluido y tanto las temperaturas y concentraciones de la sustancia disuelta, así como ellas varían con el tiempo, en cualquier parte del sistema subterráneo simulado, para modelación areal y de sección transversal en sistemas de aguas subterráneas de flujo saturado, y para modelación de sección transversal de zona de flujo no saturado. Analiza el flujo de densidad dependiente o el flujo de densidad constante tanto en las zonas saturada y no saturada. Analiza el transporte de especies químicas incluyendo procesos de absorción del soluto, producción y decaimiento. Predice la migración de residuos peligrosos en sitios de disposición Trabaja en DOS.
17. SUTRA 386	Es una versión a dos dimensiones de la USGS del método híbrido de elemento finito/diferencias finitas para la simulación del flujo no saturado y el transporte de contaminantes con transporte termal de viscosidad variable y transporte de solutos de densidad variable. Trabaja en DOS.
18. SWMS 2D	Modelo numérico para la simulación del movimiento del agua y sustancias disueltas en dos dimensiones en medios variablemente saturados. El programa numéricamente resuelve la ecuación de Richard's para el flujo de agua saturado-no saturado y resuelve la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos. El programa puede ser empleado para analizar el movimiento de agua y solutos en medios porosos no saturados, parcialmente saturados o profundamente saturados. Puede manejar regiones de flujo para fronteras irregulares. La región de flujo en sí misma puede estar compuesta de suelos no uniformes teniendo un grado arbitrario de anisotropía local. Trabaja en ambiente de DOS.
19. VENT 2D	Modelo bidimensional de diferencias finitas para el transporte de vapor de multicomponentes y fase particionada. Resuelve el flujo advectivo y difusivo en fase vapor de hasta 60 compuestos en una matriz de 35 por 35. Los compuestos químicos pueden particionarse en vapor, disolución, adsorción y líquidos en fase no acuosa (NAPL). La matriz bidimensional puede ser dada en cualquier distribución de permeabilidad y concentraciones iniciales de contaminante. Trabaja en ambiente de DOS.
20. VS2DT	Es un programa de diferencias finitas para el flujo y transporte de solutos en medio variablemente saturado. Modela aproximaciones centradas y de retorno tanto para derivadas espaciales y de tiempo, decaimiento de primer orden, adsorción, isothermas e intercambio de iones. Incluye tres aplicaciones: simulación del transporte de agua y solutos; simulación del transporte de energía y agua; un postprocesador para visualizar los resultados salvados a partir de corridas de simulación previas. Este paquete permite un examen rápido y sencillo del movimiento del agua y de contaminantes (o calor) a través de diferentes regímenes hidrológicos. Es una excelente herramienta para probar hipótesis (por ejemplo, para visualizar la influencia que la pendiente, posición y características hidráulicas de un estrato de baja permeabilidad tiene en el movimiento de un contaminante que se infiltra a partir de la superficie del suelo).

NOMBRE	APLICACIÓN
	Trabaja en ambiente de DOS.

#### 4. CATEGORÍA DE SOFTWARE ANALÍTICO PARA TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN DOS DIMENSIONES.

NOMBRE	APLICACIÓN
1. AGU-10	Es una colección de programas de dominio público para la evaluación analítica del flujo y transporte para homogeneidad y flujo de campo isotrópico, basados en la monografía # 10, Unión Americana de Geofísicos para el Recurso Agua. Consiste de 5 programas de simulación y un programa de utilería en FORTRAN, y dos pre/postprocesadores en QuickBASIC de Microsoft. Los modelos que incluye son: RESSQ que es un modelo semianalítico bidimensional para el flujo y transporte advectivo de solutos a partir de una combinación de fuentes puntuales en un acuífero confinado homogéneo e isotrópico ZQWELL que es una utilería que incluye los efectos de flujo cero en pozos de inyección. RESCUE. LTIRD es una solución analítica para la simulación del transporte advectivo-dispersivo de solutos en un flujo de campo radial. ODAST es una solución analítica para evaluar el transporte unidimensional de solutos incluyendo advección, dispersión, decaimiento (en la fuente y en el acuífero), y equilibrio de adsorción lineal. TDAST es una solución analítica para la evaluación del transporte de solutos en una dimensión, incluyendo advección, dispersión, decaimiento (en la fuente y en el acuífero), y equilibrio de adsorción lineal. RT, ART y AGU son utilerías auxiliares. Trabaja en ambiente de DOS.
2. BEAVERSOFT	Es un paquete de soluciones analíticas y numéricas (diferencias finitas, elemento finito y métodos de camino aleatorio) para el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos, desarrollado como una herramienta educativa. Incluye programas para flujo estable e inestable en dos dimensiones, en acuíferos no homogéneos, flujo a través de presas, transporte de contaminantes por advección y dispersión, y para problemas de intrusión de agua salada. Trabaja en ambiente de DOS.
3. CANVAS	Es una compilación compuesta de métodos analíticos-numéricos para la simulación del transporte y destino de virus en aguas subterráneas. La compilación provee el transporte transitorio tomando en cuenta la advección y dispersión de partículas virales en las zonas no saturada y saturada, la adsorción, la inactivación (muerte paulatina), la cinética de unión y separación y la filtración coloidal. Tanto las fuentes areales y lineales de varias formas en acuíferos confinados y no confinados pueden ser acomodados. Trabaja en ambiente de DOS.
4. NITRO	Es un programa de elemento finito bidimensional de sección vertical o radialmente simétrico para flujo no saturado y transporte de especies de nitrógeno. El transporte es simulado hasta para 2 especies (nitrato y amonio) en equilibrio de adsorción lineal o de Freundlich y transformaciones de orden cero o de primer orden, incluyendo desnitrificación, mineralización de nitrógeno orgánico e inmovilización de nitrógeno. Trabaja en ambiente de DOS.
5. PLUME2D	Es un modelo analítico basado en soluciones de forma cerrada de la ecuación de transporte no conservativo de solutos para descargas continuas o instantáneas de un trazador en una o más locaciones. El programa usa la superposición de

NOMBRE	APLICACIÓN
	soluciones para fuentes individuales para calcular la distribución de concentración resultante para un contaminante trazador en un acuífero confinado, homogéneo con flujo regional uniforme. El trazador puede ser sujeto a retardación y decaimiento radioactivo. Trabaja en DOS.
6. PRINCE	<p>Es un paquete de software de modelación que contiene los 10 modelos analíticos de Princeton para simular el transporte de contaminantes y el flujo de aguas subterráneas, desarrollado por la U.S. EPA en la Universidad de Princeton. Los tres modelos de flujo de aguas subterráneas simulan el flujo en dos dimensiones en acuíferos confinados, mientras los siete modelos de transporte de masa en aguas subterráneas simulan en 1, 2 y 3 dimensiones las concentraciones y aguas subterráneas y las curvas de penetración. Los modelos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>#1 Transporte de masa en una dimensión; Concentración de tipo uno</li> <li># 2 Transporte de masa unidimensional; Concentración de tipo tres</li> <li># 3 Transporte de masa bidimensional; pozos de inyección Wilson-Miller</li> <li># 4 Transporte de masa bidimensional; Acuífero infinito, Fuente de derrame infinito</li> <li># 5 Transporte de masa bidimensional; Acuífero infinito; Fuente Gaussiana</li> <li># 6 Transporte de masa tridimensional; Acuífero confinado YZ; Fuente fragmentada</li> <li># 7 Transporte de masa tridimensional; Acuífero infinito; Fuente Gaussiana</li> <li># 8 Flujo de aguas subterráneas bidimensional; Acuífero semi-infinito; Fronteras de recarga</li> <li># 9 Flujo de aguas subterráneas bidimensional; Acuífero confinado; Fronteras de recarga</li> <li># 10 Flujo de aguas subterráneas; Acuífero infinito; Fronteras sin recarga</li> </ul> <p>Los modelos de transporte de masa simulan los procesos de transporte de contaminante en aguas subterráneas por advección y dispersión, bioremediación intrínseca, equilibrio lineal de adsorción. El tipo de fuente contaminante incluye fuente continua, fuente deformada, fuente de distribución Gaussiana y fuente puntual dependiente del tiempo.</p> <p>Trabaja en ambiente de DOS.</p>
7. RANDOM WALK	Es una compilación generalizada para la simulación bidimensional del flujo de aguas subterráneas y el transporte de soluto usando tanto las soluciones analíticas o una versión bidimensional del modelo PLASM de diferencias finitas. La sección de la compilación sobre el transporte de solutos está basada en la técnica de partícula en una celda para los mecanismos convectivos y una técnica de camino aleatorio para los efectos de dispersión. El modelo también maneja decaimiento de primer orden, equilibrio lineal de adsorción (retardación) y producción de orden cero, problemas de flujo estable e inestable en acuíferos heterogéneos bajo la napa freática y/o condiciones artesianas o artesianas permeables, bombeo de tiempo variable o pozos de inyección, recarga natural o artificial, las relaciones de flujo entre aguas superficial y subterránea, evapotranspiración, conversión de coeficientes de almacenamiento de condiciones de artesianismo a la napa freática, y flujo de manantial. Trabaja en DOS.
8. RESSQM	Es un programa semianalítico bidimensional para el transporte de contaminantes para advección y adsorción en acuíferos confinados y no confinados, homogéneos e isotrópicos, de espesor uniforme donde el flujo regional, las fuentes y

NOMBRE	APLICACIÓN
	sumideros crean un flujo de campo estable Deseable para la determinación de zonas de captura de pozos en condiciones uniformes de flujo estable de aguas subterráneas. Trabaja en ambiente DOS, Win3x y Mac.
9. RWH	Es una versión analítica del modelo de flujo y transporte de solutos de camino aleatorio, específicamente diseñado para propósitos de evaluación y educativos. Simula el transporte de solutos a partir de una o más fuentes en un acuífero confinado, homogéneo e isotrópico de espesor constante y de extensión infinita. Estima para 1 o 2 dimensiones el flujo regional estable de aguas subterráneas y los efectos de superposición de producción de tasa variante y de pozos de inyección, usando la ecuación transitoria de Theis. La ecuación de transporte es resuelta vía la técnica de partícula en una celda para la convección y la técnica de camino aleatorio para la dispersión. El usuario define el número de partículas, cada una con su propia masa, que son introducidas en una o más fuentes circular, rectangular o lineal Trabaja en DOS.
10. SHOWFLOW 2	Interfase de modelación gráfica para modelos de aguas subterráneas. Varios gráficos a partir de diferentes modelos de simulación pueden ser comparados en la evaluación simultáneamente, y los gráficos pueden ser exportados al "clipboard" de Windows para su inclusión en otros programas, tales como procesadores de palabras o programas gráficos. Esta implementación de ShowFlow es para el modelo de transporte de contaminantes de aguas subterráneas para pluma gaussiana estable, denominado SSGPlume, desarrollado en el Centro de Investigación en Recursos de Agua de la Universidad de Texas en Austin. Trabaja en ambiente Win3x, Win95/98, WinNT.
11. TDPLUME	Es un modelo analítico bidimensional para el transporte de solutos a partir de una serie de hasta 250 fuentes lineales, en acuíferos confinados y no confinados con convección y dispersión. El programa simula el destino de un contaminante introducido en el acuífero a partir de un relleno sanitario, de lagunas, corrientes o pozos de inyección. Trabaja en ambiente de DOS.
12. TWODPLME	Modelo analítico bidimensional de transporte de solutos a partir de una serie de hasta 250 fuentes rectangulares, en acuíferos confinados y no confinados con convección y dispersión. El programa simula el destino de un contaminante introducido en el acuífero a partir de un relleno sanitario, de lagunas, corrientes o pozos de inyección. Trabaja en ambiente de DOS.
13. VERTPAK-1	Es un paquete de 8 soluciones analíticas que cubren el flujo de fluidos, de formación de rocas y el transporte de solutos en medio poroso fracturado y no fracturado Las siguientes soluciones analíticas están incluidas: BAREN solución analítica de doble porosidad para pozos de flujo transitorio en un acuífero confinado fracturado como es el dado por Barenblatt et al (1960). Esta solución describe el flujo radial para un pozo de bombeo profundamente penetrado en un acuífero confinado de extensión lateral infinita. GIBMAC, consolidación de eje simétrico y cadena plana de un suelo isotrópico, homogéneo profundamente saturado y semi infinito, con condición de frontera de drenaje libre. GRINRH, flujo transitorio para un pozo parcialmente penetrado en un reservorio confinado con una sola fractura horizontal. GRINRV, flujo transitorio para un pozo profundamente penetrado en reservorio confinado e interceptando el centro de una fractura vertical. HART, deformación termoelástica en la forma de conducta elástica de un medio infinito sujeto a una fuente de calor lineal. LESTER, solución analítica unidimensional de la ecuación de transporte dispersivo-advectivo de solutos que describe la distribución de concentraciones para una cadena de radionúclidos de tres componentes en un medio poroso semi infinito. STRELT, para el flujo transitorio en pozos en un acuífero confinado de porosidad dual. TANG, transporte



NOMBRE	APLICACIÓN
	adveectivo y dispersivo de sustancias disueltas a lo largo de una sola fractura planar con difusión dentro de la matriz de roca adyacente. Trabaja en DSO
14. VIRALT	Es una compilación modular semi-analítica y numérica que simula el transporte y destino de virus en aguas subterráneas. La compilación provee análisis de transporte transitorio y de estado estable tomando en cuenta los mayores procesos físicos, incluyendo: advección y dispersión de partículas virales en la dimensión vertical en la zona no saturada y a lo largo de las rutas de las aguas subterráneas en la zona saturada; adsorción; e inactivación (muerte progresiva). Las fuentes contaminantes de varias formas pueden ser manejadas. Tanto fuentes areales y lineales en acuíferos confinados y no confinados pueden ser acomodados. Trabaja en DOS.
15. WHAEM	Modelo de elemento analítico para cabeza de pozos es un modelo de flujo estable de aguas subterráneas de un solo estrato, diseñado para delinear las zonas de captura y los tiempos de residencia isocrónica de aguas subterráneas para las prácticas de protección de cabezas de pozo. Trabaja en DOS.
16. WHPA	Es un programa integrado de soluciones analíticas y semi-analíticas para la ecuación de flujo de aguas subterráneas acoplado con rutas de arrastre o trazado. Está diseñado para asistir al equipo técnico con la delineación de áreas de protección de cabezas de pozo. Trabaja en DOS.
17. MODEL CAD	Es un paquete completo de pre y post procesadores para la modelación del flujo de aguas subterráneas y el transporte de solutos, e incluye un editor constructor de gráficos, entre otros editores. Trabaja en Win3x, Win95/98, WinNT.

### 5. CATEGORÍA DE SOFTWARE PARA TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN TRES DIMENSIONES.

NOMBRE	APLICACIÓN
1. ADE 3D (3DADE)	Es una compilación de investigaciones para la evaluación de soluciones analíticas de la ecuación tridimensional de transporte de solutos bajo condiciones de flujo uniforme. La ecuación de transporte incluye los términos de advección, dispersión, decaimiento de primer orden, producción de orden cero, factor de retardación, representación del equilibrio de adsorción. Las soluciones están dadas tanto para sistemas de coordenadas Cartesianas y radiales y asumen un flujo unidimensional estable. La solución de escenarios incluye problemas de valor de frontera con una fuente difusa en una región semi-infinita, una fuente rectangular en una superficie y una fuente circular en la superficie, y problemas de valor inicial con una distribución inicial paralelepípeda y una cilíndrica. El programa también incluye tres soluciones simples de estado estable para la continua aplicación de sustancias disueltas en la superficie sin producción, decaimiento, dispersión longitudinal y retardación. Las soluciones analíticas corresponden al transporte tridimensional de solutos durante el flujo unidireccional del agua en medio poroso con propiedades de flujo y transporte uniforme. Trabaja en DOS.
2. AQUA3D	Versión tridimensional del modelo Aqua que modela aguas subterráneas en múltiples estratos y el transporte de contaminantes. Calcula el flujo transitorio y estable por el método de elemento finito de Galerkin. Los parámetros areales tales como permeabilidad, capacidad de almacenamiento, dispersividad y elevaciones son introducidas gráficamente para cada estrato. Resuelve el flujo transitorio de agua subterránea en condiciones de flujo anisotrópico y no homogéneo. En

NOMBRE	APLICACIÓN
	DOS y Windows 95/NT.
3. AT123D	Es un modelo analítico uni, bi y tridimensional para el transporte de contaminantes que incluye advección, dispersión, adsorción y decaimiento. Relacionado con SESOIL por la masa contaminante de cuantiosas aguas subterráneas que entran al acuífero a partir de la zona no saturada. Calcula la distribución espacial-temporal de la concentración de residuos en el sistema acuífero y predice la extensión de tránsito de la pluma contaminante a través del acuífero. Modela acuíferos anisotrópicos y homogéneos con flujo uniforme regionalmente estacionario. Permite retardación y decaimiento de primer orden. Simula una variedad de configuraciones de fuente (incluyendo fuente puntual, fuente lineal y fuente areal) y condiciones posibles de frontera, así como dispersión vertical, horizontal y longitudinal que pueden ser introducidas independientemente. Calcula la distribución en el espacio y en el tiempo de la concentración. Este modelo está basado en una solución analítica del transporte transitorio uni, bi y tridimensional de un químico disuelto, un radionuclido o calor en un acuífero homogéneo con flujo uniforme, regionalmente estacionario. Trabaja en ambiente Win3x.
4. AT123D VERSION 2.1	Es un modelo generalizado tridimensional para el transporte de aguas subterráneas y su destino. Simula el transporte de contaminantes bajo un flujo unidimensional de aguas subterráneas. Los procesos de transporte y destino simulados incluyen advección, dispersión, adsorción y decaimiento biológico. El transporte de contaminantes puede ser simulado con biodegradación simulada y de procesos de decaimiento de primer orden. Puede usar las descargas de contaminantes, dependientes del tiempo, a partir del modelo SESOIL para zona vadosa como carga de agua subterránea. Los resultados pueden usarse para estimar cuan lejos migrará una pluma y compararlos con estándares de aguas subterráneas para evaluar riesgos en tiempos y locaciones específicas. AT123D es el acrónimo de Analítico Transitorio 1, 2 y 3Dimensiones, Simulación del Transporte de Residuos en acuífero. En DOS
5. CHEMPATH	Es un software para modelación tridimensional del transporte de solutos. Acompañado de PATH3D, MODPATH, Micro Fem, Visual MODFLOW, ModIME, BOSS GMS y FLOWPATH. Corre en minutos en comparación con las horas de otros paquetes de transporte tridimensional. Trabaja en Win3x, Win 95/98 y WinNT.
6. FATMIC 3D	Simula el flujo subterráneo, transporte y destino de microbios y contaminantes que son sometidos a transformaciones químicas y/o biológicas. El modelo es aplicable a condiciones de tránsito tanto en zonas saturadas como no saturadas. El módulo de flujo es una solución por el método de elemento finito de Galerkin para la ecuación de Richard's. El módulo de transporte es un híbrido de la aproximación de Lagrangian-Eulerian con un "zooming" adaptado y algoritmo de captura de picos. Este modelo puede casi eliminar las oscilaciones espurias, la dispersión numérica y los picos de recorte debidos al transporte advectivo. Trabaja en ambiente DOS y UNIX.
7. FEHMN	No disponible Es una compilación de simulación numérica para procesos de transporte subterráneo. Modela el flujo tridimensional, dependiente del tiempo, multifase, multicomponentes, no isotérmico y reactivo a través de medios poroso y fracturado. Capacidades: flujo de gas, agua, aceite y calor; flujo de aire, agua y calor; múltiples reacciones químicas y trazadores adsorbidos; formulación de volumen finito/elemento finito; medio saturado y no saturado. Trabaja en DOS.
8. FEMFATE 3D	Es un programa de modelación tridimensional de elemento finito para flujo, transporte, flujo combinado y transporte o densidad dependiente del flujo y transporte, a través de medios saturado y no saturado. Modela estratos heterogéneos y anisotrópicos, elementos dependientes espacial y temporalmente, y fuentes puntuales y sumideros. Las fronteras del flujo

NOMBRE	APLICACIÓN
	<p>incluyen concentraciones prescritas, gradientes de flujo, flujos totales y dirección dependiente de las fronteras. Modela la adsorción. Las aplicaciones típicas son infiltración, protección de cabezas de pozos, pesticidas agrícolas, rellenos sanitarios, sitios de disposición de radionuclidos, sitios de disposición de residuos peligrosos, transporte y flujo de densidad inducida, intrusión salina, etc. Puede simular solamente el flujo, el transporte, combinar secuencialmente el flujo y transporte, o acoplar el transporte y flujo dependiente de la densidad. En comparación con los modelos convencionales de elemento finito y diferencias finitas, el módulo de transporte de FEMFAT ofrece varias ventajas: elimina completamente la oscilación numérica debida a la advección; puede ser aplicado a la matriz de números aleatorios de Peclét desde cero hasta infinito; la aproximación híbrida de elemento finito de Lagrangian-Eulerian es siempre superior y nunca será peor que el método corriente de elemento finito o diferencias finitas. Trabaja en DOS y UNIX.</p>
9. FRAC3DVS	<p>Es un modelo tridimensional de elemento finito para la simulación del flujo estable o transitorio de aguas subterráneas en variable saturación y el transporte advectivo-dispersivo de solutos en medio poroso o poroso discretamente fracturado. Puede usar tanto elementos finitos en bloque de 8 nodos o en prisma de 6 nodos, o diferencias finitas en discretización de 7 puntos del medio poroso, o bien elementos planos rectangulares o triangulares para representar las fracturas si están presentes. Los elementos en bloque pueden ser subdivididos en tetraedros de manera que la matriz compuesta de elementos en bloque no ortogonales puedan ser acomodados. Los procesos de transporte incluyen: advección, dispersión hidrodinámica, adsorción de acuerdo a la isoterma lineal de Freundlich, y transporte multiespecies tanto de cadenas de decaimiento rectas o ramificadas. Trabaja en DOS.</p>
10. HPS	<p>Es un modelo analítico para la simulación tridimensional del transporte de contaminantes a partir de una fuente plana horizontal en un flujo de campo, regional uniforme, de aguas subterráneas. El modelo incorpora transporte advectivo dispersivo (dependiente de la escala), retardación y decaimiento de primer orden. El modelo soporta múltiples fuentes tanto con fuentes de descarga continua o con variación en el tiempo. La fuerza de la fuente es internamente calculada a partir de la concentración de la fuente, de la tasa de recarga y del área de la fuente. Una combinación de las funciones de Green's son usadas para derivar una solución de la descarga instantánea a partir de una fuente plana en un acuífero homogéneo. Una circunvolución integral es aplicada para permitir los cálculos para una descarga no instantánea. El modelo es útil para hacer cálculos a nivel de evaluación con respecto al transporte de contaminantes a partir de rellenos sanitarios, lagunas de residuos, servicios para tratamiento de tierras y áreas con aplicación de pesticidas. Trabaja en DOS.</p>
11. HST3D	<p>Programa tridimensional para transporte de solutos y calor que simula el flujo de aguas subterráneas y calor asociado, así como el transporte de solutos en saturación para tres dimensiones. Las tres ecuaciones gobernantes son acopladas a través de la velocidad intersticial del poro, la dependencia de la densidad del fluido sobre la presión, la temperatura, la fracción de masa del soluto, la dependencia de la viscosidad del fluido sobre la temperatura y la fracción de masa del soluto. La ecuación de transporte de solutos es para una sola especie de soluto con posible equilibrio lineal de adsorción y decaimiento de primer orden. Un modelo complejo de pozo-flujo puede ser usado para simular la tasa de flujo especificada y las condiciones de presión en la superficie del terreno o dentro del acuífero, con o sin constreñimiento de la presión y tasa de flujo. Es aplicable al estudio de inyección de residuos dentro de acuíferos de agua dulce o salina, al movimiento de plumas contaminantes, a la intrusión salina en regiones costeras, a la disposición de salmueras, al</p>

NOMBRE	APLICACIÓN
	almacenamiento de agua dulce en acuíferos salinos, al almacenamiento de calor en acuíferos, a la fase líquida de sistemas geotermales y a situaciones de transporte similares. Trabaja en DOS.
12. KYSPILL	Es un programa para la solución semi analítica dependiente de la escala, de las ecuaciones de transporte y flujo acoplado. Modela la dispersión tridimensional de contaminantes en la zona de suelo no saturado y la propagación bidimensional de una pluma en acuíferos fundamentalmente no confinados. Modelado estático de acuíferos con heterogeneidad. Es una colección de modelos matemáticos sofisticados capaces de predecir la contaminación de aguas subterráneas en la zona no saturada (del suelo) o de la zona saturada (bajo la napa freática), siguiendo un derrame químico de un líquido o contaminante disuelto descargado en el suelo o directamente en la zona saturada. KYSPILL es la forma más efectiva de modelar plumas generadas por: fugas de tanques de almacenamiento subterráneo; lixiviados de rellenos sanitarios; derrames químicos accidentales; plumas en zonas saturada y no saturada. Trabaja en DOS.
13. MODFLOWT	Nueva versión de MODFLOW que incluye módulos para la simulación tridimensional del transporte de contaminantes. Resuelve las ecuaciones de transporte advectivo-dispersivo usando el método profundamente implícito de diferencias finitas. Es ampliamente compatible con las versiones previas de MODFLOW. Los nuevos módulos incluyen transporte básico, transporte de bloque centrado y una solución del algoritmo de Orthomin. Simulan el transporte advectivo-dispersivo de una sola especie miscible sujeta a la adsorción y decaimiento. Ambiente DOS, Win3x, Win95/98, WinNT.
14. MOD1ME	Es un ambiente de modelación modular integrado desarrollado para permitir al usuario del modelo MODFLOW preparar datos de salida, correr las simulaciones y post procesar los resultados interactivamente en un ambiente gráfico. Trabaja en DOS.
15. MONTE3D	No disponible. Es un simulador Monte Carlo de flujo tridimensional y transporte en medio poroso heterogéneo saturado. Trabaja en DOS.
16. MT3D	Es un modelo tridimensional de transporte de solutos para la simulación de advección, dispersión y reacciones químicas de constituyentes disueltos en sistemas de aguas subterráneas. El modelo usa una estructura modular similar a la implementada en MODFLOW. La estructura modular hace posible simular independientemente la advección, dispersión, mezclado fuente/sumidero y reacciones químicas sin reservar espacio de memoria en la PC para las opciones no empleadas. Puede ser usado para simular cambios en la concentración de especies de contaminantes simples miscibles en aguas subterráneas considerando la advección, dispersión y algunas reacciones químicas simples. Las reacciones químicas incluidas en el modelo son: equilibrio lineal controlado o adsorción no lineal, y decaimiento irreversible de primer orden o biodegradación. Utiliza una mezcla de la aproximación de Eulerian-Lagrangian para resolver la ecuación tridimensional advectiva-dispersiva-reactiva, en tres opciones básicas: el método de características (MOC), el método modificado de características (MMOC) y un híbrido de éstos dos métodos (HMOC). Reúne las siguientes capacidades de discretización espacial y condiciones de frontera del transporte: estratos de acuíferos confinados, no confinados, variablemente no confinados/confinados; modela estratos inclinados y celdas de espesor variable dentro de los mismos estratos; concentración especificada o fronteras de flujo de masa; y el los efectos del transporte de solutos de fuentes externas sumideros tales como pozos, drenes, ríos, recarga areal y evapotranspiración. Trabaja en DOS.
17. MT3D586	Es un programa de 32 bits en Windows de la versión DOD 1.5 del modelo MT3D. Trabaja en Win 95/98 y WinNT.
18. MT3D99	Es la versión 99 del modelo MT3D. Trabaja en DOS.

NOMBRE	APLICACIÓN
19. MULAT	Es un programa para el análisis en 3 – dimensiones de flujo de agua profunda en estado estable y el transporte advectivo de partículas, incluyendo adsorción lineal y no-adsorción. El modelo asume el flujo en el acuífero principalmente como horizontal, con flujo vertical de un acuífero a otro a través de la resistencia de los layers. El modelo maneja hasta seis layers. Los acuíferos pueden ser confinados o no confinados, parcialmente confinados o parcialmente no confinados. El flujo de agua profunda puede estar influenciado por varios tipos de pozos, fuentes lineales, líneas de drenaje y líneas de pantalla (paredes impermeables). La geometría del problema puede estar descrita en un trabajo de red de dos dimensiones de elementos triangulares en el plano x – y. El área del modelo está dividida en un número de zonas triangulares, cada una de las cuales es homogénea con respecto a las propiedades del suelo (permeabilidad, porosidad y factor de retardación) y el radio de infiltración. Cada una de las zonas está dividida en un número grande de elementos triangulares.
20. PATH3D	Es un programa general de trazado de partículas para calcular las rutas del agua subterránea y el tiempo de travesía en flujo de campo, bi o tridimensional, transitorio o estable. Puede usarse para simular el movimiento de aguas subterráneas y la advección de contaminantes disueltos en el agua subterránea. Es particularmente útil para el delineamiento de las zonas de captura de contaminantes o las zonas de protección de cabezas de pozo. Trabaja en DOS.
21. PLUME	Es un modelo analítico para calcular el punto de concentración en un acuífero homogéneo que resulta de una descarga continua con variación en función del tiempo, de un componente único radiactivo o no radioactivo a partir de una fuente lineal horizontal. Asume que el flujo es unidireccional (uniforme) y que la fuente lineal está situada perpendicularmente a la dirección del flujo. El modelo estima la advección, la dispersión, la retardación y el decaimiento de primer orden. La pluma puede ser descrita en tres dimensiones con la fuente lineal horizontal en cualquier profundidad del acuífero, o verticalmente promediada sobre el fondo del acuífero. La función de descarga continua de la fuente es reducida a un número limitado de intervalos, fuerza de la fuente/tiempo, especificados por el usuario para la aproximación lineal. Esta función de descarga aproximada es además dividida en un número de intervalos de integración. Trabaja en DOS.
22. PTRAX-P	No disponible. Es un modelo tridimensional de trazado de partículas en medio poroso. Trabaja en Win95/98 y WinNT.
23. PTRAX-PF	No disponible. Es un modelo tridimensional de trazado de partículas para medio poroso y discretamente fracturado. Trabaja en Win95/98 y WinNT.
24. RAND3D	Es una versión tridimensional del algoritmo de camino aleatorio para resolver problemas de transporte de solutos en agua subterránea, incluyendo: cálculo del transporte advectivo horizontal usando uno de los tres diferentes esquemas de interpolación de la velocidad; cálculo del transporte advectivo vertical basado en una interpolación lineal entre los vectores de velocidad vertical de entrada en l nivel superior e inferior de cada estrato; cálculo de la dispersión usando dispersividades constantes, longitudinal, transversal y vertical; cálculo de decaimiento de orden cero, primer orden u orden variable, o volatilización a partir de la napa freática; cálculo de adsorción lineal (retardación); capacidad para representar fuentes areales complejas. Trabaja en DOS.
25. SOLUTE	Es un paquete de menús de control de programas interactivos basado en soluciones analíticas de la ecuación de transporte advectivo–dispersivo para solutos no conservativos Incluye: el modelo ONED–1 para el transporte unidimensional de solutos en una columna semi infinita; concentraciones constantes como condición de frontera interna; retardación y decaimiento de primer orden. El modelo ONED–2 para el transporte de solutos en una columna semi

NOMBRE	APLICACIÓN
	infinita; masa de flujo constante como condición de frontera interna; retardación incluida (no decaimiento). ONED-3 para el transporte de solutos en una columna semi-infinita; flujo de masa dependiente de la concentración como la condición de frontera interna; incluye opciones de retardación y decaimiento de primer orden PLUME2D para el transporte bidimensional areal o de sección transversal de una pluma en un flujo de campo de aguas subterráneas causada por una o más fuentes puntuales continuas; incluye retardación y decaimiento de primer orden. También cuenta con los modelos SLUG-2D, PLUME3D, SLUG-3D, RADIAL, LTIRD, UNITS y SOLUTE. Trabaja en ambiente de DOS.
26. SOLUTRANS	Simula el transporte de solutos usando las soluciones analíticas de Leij et al. Ofrece alternativas rápidas de simples a complejas. El flujo es unidimensional, la dispersión es tridimensional. El equilibrio y no equilibrio (cinético) de adsorción son permitidos. Separa los coeficientes de decaimiento de primer orden para las fases de equilibrio y no equilibrio. Trabaja con Win95/98 y WinNT.
27. SWANFLOW	Es una compilación tridimensional de diferencias finitas para la simulación del flujo de agua y una fase no acuosa inmisible bajo condiciones de saturación y no saturación cerca de la superficie. El paquete puede ser usado en muchas situaciones que requieren el análisis de flujo inmisible, tal como la simulación de la migración de químicos orgánicos, analiza los efectos de las tecnologías de remediación en sitios con residuos peligrosos donde se encontraron fluidos inmiscibles; y evalúa la migración y limpieza a fondo de derrames y fugas de combustibles. Tiene tres limitantes primarias: la fase del aire se considera a presión atmosférica constante, así el flujo del aire no es modelado; la transferencia de masa entre fases no es considerada, por ejemplo, el NAPL no puede disolverse en agua o evaporarse; y la aplicación práctica del paquete a problemas de campo puede ser complicado debido a la falta de datos específicos del sitio relativos a permeabilidad y presión capilar. Trabaja en DOS.
28. SWICHA	Es un paquete de elemento finito, tridimensional, para el análisis de intrusión de agua marina en acuíferos costeros. El modelo simula flujo de fluidos de densidad variable y procesos de transporte de solutos en medio poroso profundamente saturado. Incluye evaluaciones de recursos de aguas subterráneas. Evaluación del desempeño de pozos y análisis de pruebas de bombeo; investigaciones de contaminación en aguas subterráneas; programas de almacenamiento subterráneo de residuos peligrosos. Trabaja en DOS.
29. SWIFT 2000	Es un programa de modelación para el flujo tridimensional de aguas subterráneas, calor y transporte. Trabaja en Win95/98, WinNT y Win2000.
30. SWIFT-486	Es un modelo de diferencias finitas tridimensional para simular el flujo de aguas subterráneas, calor y transporte de salmueras y radionuclidos en suelos porosos y rocas fracturadas. Trabaja en DOS.
31. TARGET	Es una familia de modelos, capaz de simular el flujo de aguas subterráneas y transporte de especies químicas en medio poroso saturado y variablemente saturado con condiciones de frontera complejas y múltiples propiedades materiales, fuentes y sumideros. Consiste de cuatro paquetes de cómputo independientes para la integración vertical bidimensional, confinamiento / no-confinamiento, flujo transitorio de aguas subterráneas y transporte de solutos (TARGET-2DH), orientación vertical bidimensional (sección transversal), variablemente saturado, densidad acoplada, flujo transitorio de aguas subterráneas, y transporte de solutos (TARGET-2DU); multi-estratos (estratos de espesor variable), confinamiento / no-confinamiento, flujo transitorio de aguas subterráneas, y transporte de solutos (TARGET-2DM); y tridimensional, saturación, densidad acoplada, flujo transitorio de aguas subterráneas, y transporte de solutos (TARGET-3DS).

NOMBRE	APLICACIÓN
	Modela recarga o descarga regional o local (v.g. ríos, pantanos, tierras altas, evapotranspiración, infiltraciones); migración de contaminantes densos; flujo y transporte de un derrame o relleno sanitario a la napa freática; variaciones de las propiedades del material (heterogeneidad, anisotropía, hysteresis en la zona no saturada). Trabaja en DOS.
32. TBC	Es el más desarrollado de los modelos numéricos FLOWBIO. Es capaz de simular tridimensionalmente el flujo de aguas subterráneas en saturación, así como el transporte y reacciones químicas (bioquímicas) de algún número de especies. Trabaja en DOS.
33. USGS-SOL	Es una serie de soluciones analíticas de la ecuación diferencial parcial que describe el transporte advectivo-dispersivo de un soluto no conservativo para una variedad de tipos de frontera y configuraciones de fuente de soluto en 1, 2 o tres dimensiones. Trabaja en DOS.
34. MODFLOW-2000	Modelo tridimensional de diferencias finitas para aguas subterráneas que simula el flujo estable e inestable en un sistema de flujo irregular en el cual las capas del acuífero pueden estar confinadas, no confinadas o en una combinación de confinamiento y no confinamiento.

## **IV. Factores a Considerar en la Selección de Modelos de Dispersión.**

La definición de factores a considerar en la selección de un modelo de dispersión no es un asunto absoluto. En realidad, cada situación puede llegar a presentar particularidades que hagan deseable o necesaria la aplicación de un modelo en específico. De cualquier forma, es necesario plantear criterios generales de selección a considerar, mismos que se presentan a continuación:

- ❑ **Tipo de contaminante a modelar**
- ❑ **Capacidad dimensional de simulación**
- ❑ **Actualidad del software**
- ❑ **Plataforma de trabajo del software**
- ❑ **Disponibilidad del software**
- ❑ **Amplitud y profundidad de aplicación**
- ❑ **Disponibilidad y confiabilidad de datos de entrada requeridos por el software**

### **Tipo de contaminante.**

Por razones obvias, un criterio básico para seleccionar los programas recopilados es el tipo de contaminante que simula el modelo, es decir, si puede simular hidrocarburos, metales pesados, ácidos, bases, etc., o no, ya que solo esta característica permite discriminar al software diseñado para fenómenos de dispersión del tipo de contaminantes problema.

En forma muy frecuente, en este criterio se considera que el modelo a elegir sea aplicable a hidrocarburos (ligeros o densos), o sea líquidos en fase no acuosa y a metales pesados, es decir, como sustancias disueltas en agua. Se entiende por hidrocarburos ligeros, a aquellos hidrocarburos que presentan cadenas de  $C_nH_n$  cortas ( $<15$ ), y que principalmente son gases y líquidos volátiles. Por hidrocarburos pesados, se entiende que son los hidrocarburos que presentan cadenas de  $C_nH_n$  largas ( $>25$ ), y que principalmente son líquidos pesados y sólidos. Finalmente, los metales Pesados (inorgánicos tóxicos), son los metales cuya densidad es 5 veces mayor a la densidad del agua, entre los cuales tenemos Plomo, Plomo orgánico, Arsénico, Bario, Cadmio, Mercurio, Níquel, Selenio, Zinc, Cromo, Cianuros, Acrilamida, Acrilonitrilo, etc.

### **Capacidad dimensional de simulación.**



Otro de los criterios de mayor importancia para la selección corresponde a la capacidad del modelo para simular en una, dos o tres dimensiones, ya que esta característica implica las siguientes cualidades: 1°. El modelo está diseñado matemáticamente para representar el fenómeno de transporte de contaminantes en tres, dos o una dimensiones; 2°. El modelo tiene la posibilidad de representación gráfica del problema evaluado para una mejor interpretación y predicción, en el caso de simulación tridimensional.

Se tiene preferencia por los modelos tridimensionales en comparación con los bidimensionales y unidimensionales, así como se les da prioridad a los bidimensionales con respecto a los de una dimensión.

#### **Actualidad del software.**

Con respecto a este criterio, se considera relevante tomar en cuenta la actualidad del modelo, es decir, que tan reciente es la versión disponible, lo que indica la incorporación de nuevas herramientas informáticas, así como de aspectos teóricos matemáticos y avances en la aplicación del modelo a casos reales.

#### **Plataforma de trabajo del software.**

Un aspecto también considerado dentro de los criterios de selección del software es la plataforma sobre la que trabaja éste, es decir, si se trata de sistemas operativos como DOS, UNIX, Mac o ambiente Windows (3x, 95/98, NT).

En términos generales la preferencia es para Windows y DOS por ser los más utilizados en México.

#### **Disponibilidad.**

Adicionalmente se toma en cuenta que la información técnica del modelo esté disponible, así como el programa mismo, ya que en muchos casos se trata de software accesible y gratuito, o bien, solamente demostrativo.

Este criterio se aplica con la siguiente jerarquización de preferencias:

métodos numéricos de elemento finito  
métodos numéricos de diferencias finitas  
métodos analíticos

#### **Amplitud de aplicación.**

Con este criterio se busca dar importancia a aquellos modelos que tienen un mayor número de aplicaciones en lo relativo a los problemas que se pretende resolver, es decir, que su campo de aplicación abarca hidrocarburos ligeros, hidrocarburos densos y metales pesados, así como condiciones de homogeneidad y heterogeneidad del medio. Por otra parte, también se considera que los modelos

representan una herramienta completa para la resolución de los problemas de transporte de contaminantes en suelo.

### **Disponibilidad y confiabilidad de datos de entrada requeridos por el software**

La cantidad de información disponible, la certidumbre y la confiabilidad de ésta, constituye otro de los factores a evaluar para seleccionar un software específico. Por ejemplo, no es recomendable seleccionar una alternativa que desde un inicio se sabe que requiere información muy específica, con la cual no se cuenta o no se tiene confianza en la calidad de la misma. Puede también ocurrir que el pretender recabar la información requerida por el paquete eleve prohibitivamente los recursos requeridos. En este sentido, se debe tomar un enfoque práctico y seleccionar la mejor alternativa, entre aquellas que sean positivamente aplicables.

## **V. Selección de Modelos de Dispersión.**

Para la selección de alternativas viables para modelado de dispersión de contaminantes se propone la siguiente secuencia de actividades:

### **Paso I: Identificación del evento de fuga o derrame.**

El procedimiento da inicio con la identificación de un sitio contaminado, identificándose su ubicación y de ser posible, registrando las coordenadas geográficas específicas del mismo. La determinación precisa de información sobre el tipo de contaminante implicado es otro de los aspectos importantes en este punto, así como la cantidad estimada o conocida de sustancia contaminante que se vio involucrada en el evento.

### **Paso II: identificación del tipo de medio subterráneo**

Este paso consiste en una serie de actividades multidisciplinarias, incluyendo, sin menoscabo de información adicional, las coordenadas geográficas, características edafológicas (pudiendo utilizar para ello las cartas edafológicas del INEGI), a través de las cuales se apreciará el tipo de suelo dominante en el sitio en cuestión (Anexo III). Se requiere también verificar el tipo de medio geológico y evidentemente hidrológico e hidrogeológico predomina en el sitio. En este sentido también son útiles las fuentes de información oficial como INEGI, CNA, INE, entre otras. En este sentido cabe recordar que debe tenerse presente que los estratos de interés serán aquellos que sean afectados por el fenómeno contaminante de manera probable.

### **Paso III: correlación del tipo de suelo y el grado de saturación.**

Una vez identificado el tipo de suelo presente, la estratigrafía, y las condiciones hidrogeológicas existentes, además de las características, cuantificación de sustancias involucradas y demás aspectos importantes en el sitio afectado, se correlaciona esta información, obteniéndose un indicador cualitativo sobre el grado de saturación del mismo. La correlación permite tres posibilidades:

medio saturado,  
medio variablemente saturado-no saturado y  
medio no saturado.

Contando con este indicador cualitativo del grado de saturación, se tiene una primera segregación de los modelos (software) aplicables, los cuales simulan el fenómeno de dispersión bajo alguno o varios de los indicadores de saturación (medios saturados, medios variablemente saturados-no saturados y suelos no saturados).

De esta forma, el usuario tendrá una herramienta de selección, con el fin de aplicar un modelo que le permita reconocer el comportamiento de un contaminante, como una primera aproximación desde gabinete.

**Paso IV: Correlación con el tipo de contaminante involucrado.**

Mediante la inclusión de este factor es posible realizar una segunda segregación de los modelos de dispersión, identificándose los más convenientes para determinar el transporte de los contaminantes en el suelo, en atención a las características de los mismos involucrados con el evento específico.

**5. Paso V: Correlación con las condiciones de homogeneidad-heterogeneidad del medio.**

Enseguida se procede a correlacionar el resultado obtenido del paso anterior, con la opción del modelo de simular condiciones de un medio homogéneo o heterogéneo. Este paso conduce a la elección de un número reducido de modelos aplicables, que el evaluador podrá ocupar para efectuar la simulación de la dispersión de hidrocarburos o metales pesados, según sea el caso.

**6. Paso VI: Evaluación de disponibilidad y confiabilidad de datos de entrada requeridos por las alternativas de modelado aplicables.**

Una vez disminuida la gama de posibilidades, se debe evaluar de forma objetiva cual de entre las posibles, puede ser realmente aplicada, dado que el hecho de que un modelo satisfaga todas las expectativas del evaluador no significa que se cuente con todos los elementos para su aplicación. En otras palabras, debe considerarse lo posible, no sólo lo deseable. Es posible que en ocasiones se deba inclinarse por un modelo menos preciso o acucioso, si no se dispone de toda la información requerida por un modelo más eficiente. Evidentemente, la alternativa al respecto consiste en generar y obtener toda la información requerida para correr el modelo deseado, con todo lo que ello implica. Además, en los casos en que se decida estimar o aproximar datos de los cuales se carezca, debe considerarse la sensibilidad de los resultados ante este hecho, debiendo requerirse entonces ensayos de sensibilidad ante los diversos parámetros.

**6. Paso VII: Aplicación del modelo seleccionado.**

Ya determinados los modelos aplicables para un caso particular de condiciones generalizadas, el usuario podrá realizar una elección final del o de los programas que considera utilizar.

Aún así una vez concluida la simulación, o serie de éstas, los datos obtenidos deben ser analizados y discriminados de forma muy crítica, evaluando la posibilidad de aplicar modelos alternativos, para comparar y complementar la información obtenida.

## VI. Descripción de Modelos Representativos.

Como una forma de ilustrar algunos de los modelos más aplicados en la simulación de la dispersión de contaminantes, a continuación se presenta una descripción específica de los mismos.

### 1. MIGRATE V. 9.

Este programa modela el transporte de contaminantes de múltiples fuentes –ya sea en la superficie o bien, enterradas–, rápidamente y con exactitud.

El model puede considerar adsorción, decaimiento radioactivo y biológico y, el transporte a través de fracturas para el transporte advectivo – dispersivo.

A diferencia de las técnicas de elemento finito y diferencias finitas, el modelo no requiere el uso de un procedimiento “time – maching” o tiempo de procedimiento (marcha).

Este modelo utiliza una técnica de capa o nivel (layer) finito para el modelo de migración de contaminantes. Esta técnica proporciona resultados estables y exactos numéricamente, requiriendo un esfuerzo computacional relativamente pequeño.

El programa puede modelar, en dos dimensiones, uno o más tiraderos a cielo abierto, sitios de desecho enterrados, sitios de disposición o derramamientos. Las fuentes de contaminación que se modelan pueden ser adyacentes o compensadas entre sí.

Las propiedades del modelo pueden ser constantes o transitorias (en tránsito), con concentraciones calculadas para tiempos, profundidades y distancias especificadas.

Este software permite la creación, edición y ejecución de paquetes o juegos de datos que se ingresen al software, mientras que la salida de esta información puede ser en forma gráfica, desplegada en pantalla o en forma impresa. El juego de datos puede ser creado o editado desde el menú “DataEntry” (el juego de datos puede tener tanto propiedades constantes o propiedades que varíen con el tiempo). Además, en la barra de menú se permite la entrada rápida de proyectos de rellenos sanitarios. En este tipo de juego de datos la hidrología y la función de los sistemas diseñados no cambian con el tiempo; solamente la concentración en la fuente y capas o niveles del suelo varían con respecto al tiempo.

Cada propiedad constante del juego de datos se compone de:

Datos generales (como el número de rellenos sanitarios, capas o niveles –layers)  
Condiciones de frontera superior e inferior (masa finita)

Datos de capa o nivel (como la porosidad y coeficiente de difusión)

Las propiedades que varían con el tiempo pueden utilizarse para simular la falla progresiva del sistema de colección de lixiviado en un relleno sanitario o la expansión de un relleno sanitario después varios años o un cambio en las propiedades de la fuente y del acuífero.

Nota: Por cada capa o nivel (layer) presente en el módulo, los parámetros pueden ser especificados en cualquier unidad, el programa convertirá automáticamente todas las unidades para ser usadas en el sistema internacional (SI) o en el sistema americano (US)

Una vez creado el archivo del juego de datos se puede ejecutar desde el menú Execute. La concentración del contaminante se puede calcular para cualquier número de tiempos y distancias específicas.

El modelo puede ser ejecutado interactivamente o en modo *batch*. Los resultados de la ejecución del programa son guardados en un archivo de salida especificado por el usuario.

## 2. MOFAT.

Éste, es un modelo de elemento finito en dos dimensiones para acoplamiento de multifase de flujo y transporte de multicomponentes en una sección de sistema vertical plano o radial. El programa considera el flujo y transporte de tres fases del fluido –agua, líquido en fase no acuosa (NAPL) y gas–; el programa también maneja casos en que las fases de gas y/o NAPL están ausentes en parte o en todo el dominio en algún tiempo dado. El programa simulará solamente el flujo o bien, el flujo acoplado al transporte.

El modelo del flujo puede ser usado para analizar, en dos fases, el flujo de agua y al NAPL en un sistema con presencia de gas pero a presión constante, o el flujo explícito en tres fases: agua, NAPL y gas a presión variable. También puede manejar hasta cinco componentes que particionan entre las fases de agua, NAPL, gas y suelo asumiendo cualquier interfase local de transferencia de masa en equilibrio o como un transporte de masa de primer orden controlado cinéticamente.

La entrada requerida para el análisis del flujo consiste de condiciones iniciales, propiedades hidráulicas del suelo, propiedades del fluido, parámetros de tiempo de integración, datos de condiciones de frontera y la geometría de la malla.

El modelo relaciona tres fases que están definidas por una extensión del modelo van Genuchten que considera efectos de entrapamiento de aceite durante periodos absorción de agua: permeabilidad – saturación – presión de capilaridad.

Para el análisis de transporte, el modelo adiciona los siguientes datos de entrada:

Dispersividad en el medio poroso  
Concentraciones iniciales de fase de agua  
Coeficientes de partición de equilibrio  
Componentes de densidad  
Coeficiente de difusión  
Coeficientes de decaimiento de primer orden  
Coeficientes de transferencia de masa (para análisis de desequilibrio)  
Datos de condición de frontera

Para el análisis de flujo, el tiempo depende de las condiciones de frontera; puede involucrar fases de cabezas en nodos definidas por el usuario o fase de flujo a lo largo de un segmento de frontera con flujo cero, como condición predefinida. Para el análisis de transporte, las condiciones iniciales están especificadas en términos de fase de concentraciones de equilibrio de agua de cada concepto particionable.

El tiempo dependiente de las condiciones de frontera puede ser estipulado tanto para fase de concentración de agua en equilibrio en medio poroso como para flujos prescritos definidos en términos de una concentración influyente en el líquido, o con flujo de dispersividad cero especificado.

La salida del programa consiste de una información básica en los parámetros de entrada, detalles de malla y condiciones iniciales más cabezas de presión, saturaciones y velocidades para cada fase en cada nodo para los intervalos de salida especificados. Para el análisis de transporte, las concentraciones de fase están en la impresión de salida de cada intervalo.

Para la instalación del programa primero debe crearse la carpeta o directorio donde se instalará el programa, enseguida debe descomprimirse el archivo Mofat.zip con WinZip (incluido en la carpeta "Utilerías" del CD de softwares) una vez descomprimido el archivo Mofat.zip, se ejecuta el programa Mofat2.exe para instalar el software, enseguida se deben copiar dos archivos al prompt DOS según se describe enseguida:

Si la RAM de la PC es igual a 4 MB y menor de 8 MB, entonces se deben copiar los archivos 4MBRAM.BLK y MOFAT.BLK

Si la RAM de la PC es igual o mayor a 8 MB, entonces se deben copiar los archivos 8MBRAM.BLK y MOFAT.BLK

Una vez instalado se puede correr el programa tecleando MOFAT2.

### **3. VAM2D.**

Es un modelo de análisis en medio variablemente saturado para dos dimensiones. Vam2d es un modelo de elemento finito que simula el flujo de aguas subterráneas en tránsito o en estado estable y el transporte de contaminantes en medio poroso.

El modelo analiza problemas de flujo no confinado usando una rigurosa aproximación de modelación para saturación-no saturación empleando eficientes técnicas numéricas. Un exacto balance de masa es mantenido aun cuando se simulen relaciones no lineales en mezclas de suelo. Los efectos de histéresis en la curva de retención de agua pueden también ser simulados.

Un amplio rango de condiciones de frontera puede ser tratado, incluyendo superficies de infiltración, condiciones de la napa freática, recarga, infiltración, evapotranspiración y pozos de bombeo e inyección.

La opción del transporte de contaminantes puede estimarse por advección, dispersión hidrodinámica, equilibrio de adsorción y degradación de primer orden. El transporte de una sola especie o de múltiples compuestos emparentados de una cadena en decaimiento puede ser simulado.

Las aplicaciones de Vam2d cubren los siguientes campos:

Investigaciones sobre los recursos de aguas subterráneas, ya que el modelo puede ser usado para simular el flujo de aguas subterráneas en acuíferos confinados y no confinados, así como también para el movimiento de mezclas y solutos en las zonas no saturadas.

Investigaciones sobre contaminación de aguas subterráneas, ya que el modelo puede predecir la extensión de plumas contaminantes y la tasa de migración; para ayudar en el diseño de programas de monitoreo y en esquemas de remediación.

Evaluación del funcionamiento de residuos nucleares subterráneos, debido a que el modelo puede ser usado para simular el flujo del agua en la zona no saturada alrededor de un depósito y evaluar el riesgo por la migración potencial de radionuclidos.

#### Métodos de análisis de Vam2d.

La ecuación de flujo saturado-no saturado en Vam2d es resuelta usando el método de Galerkin tanto con los esquemas iterativos de Picard o de Newton-Raphson, para tratar la no linealidad. El uso del método de elemento finito de contracorriente de carga residual es empleado para resolver la ecuación de transporte advectiva-dispersiva. Esto evita los problemas de oscilación numérica. Las soluciones de matriciales de los problemas de flujo y transporte son ejecutadas usando eficientes soluciones iterativas basadas en los métodos de Orthomin y el gradiente conjugado preconditionado para matrices simétricas y no simétricas, respectivamente.

#### Opciones de simulación (propiedades materiales).

Las propiedades materiales de heterogeneidad y anisotropía pueden ser incluidas en los análisis de flujo y transporte. Estratificación, discontinuidades y otras heterogeneidades pueden ser tratadas. Para un análisis de flujo de saturación variable, las relaciones de mezclas de suelo son provistas al modelo en forma



funcional usando las bien conocidas relaciones de Brooks-Corey y Mualem van Genuchten, con extensiones al manejo de histéresis. Para el análisis del transporte, son permitidas la dispersión dependiente de la velocidad, la retardación dependiente de la mezcla, la adsorción y el decaimiento.

El modelo está provisto de un postprocesador denominado VMPLLOT para simulaciones de flujo y transporte. Con ello puede plotear la red del modelo; diferentes regiones materiales; contornos de saturación, "hidraulic head", "pressure head" y concentración; vectores de la velocidad de campo del flujo de agua subterráneas; las fronteras del flujo transversal; y la posición de la napa freática.

#### **4. ASMWIN (Modelo de Simulación de Acuífero para windows).**

Este programa implementa un modelo completo en dos dimensiones de flujo y transporte en aguas profundas. Este nuevo modelo es una versión, fuertemente reforzada, para Windows de l programa ASM 5.0, que corre bajo DOS (Kinzelbach & Rausch, 1995). El modelo viene con una interfase gráfica profesional de usuario, un modelo de flujo de diferencia finita, una herramienta para la calibración automática del modelo de flujo, un práctico modelo de rastreo, un modelo de transporte de camino aleatorio, un modelo de transporte de diferencia finita y otras herramientas útiles para el modelado.

La interfase gráfica de usuario permite crear y simular modelos con facilidad. Puede manejar modelos de hasta 150 x 150 celdas y 1000 periodos de tiempo (intervalos de bombeo). El modelo puede crear contornos de mapas o plotear con rellenos sólidos los datos de entrada y los resultados de la simulación. Los rellenos sólidos pueden utilizar el rango completo de color RGB (rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés) para el relleno de celdas con diferentes valores. El contorno puede ser adherido a este ploteo. La calidad gráfica del reporte puede ser guardado en una amplia variedad de formatos de archivo incluyendo SURFER, DXF, HPGL Y BMP (mapas de bits de Windows).

Simula condiciones de flujo transitorio y de estado estable, con condiciones del acuífero confinado freático y confinado permeable. El transporte se basa en el flujo de campo de estado estable. También el modelo considera acuíferos heterogéneos y anisotrópicos. Útil para las evaluaciones iniciales de problemas hidrogeológicos.

Simula condiciones de flujo transitorio y de estado estable, con condiciones del acuífero confinado, freático y confinado permeable. Considera acuíferos heterogéneos y anisotrópicos.

Las ecuaciones de flujo discretizadas están resueltas por el método de gradiente conjugado preconditionado (PCG) –módulo ASMAIM1– con la opción de diagonal y preconditionamiento de Cholesky. Para un estado fijo de campos de flujo,

procede una automatización automática del modelo usando el algoritmo de Marquardt – Levenberg en el módulo ASMOPTI.

El módulo ASMPATH de rastreo de partícula ofrece varios métodos de velocidad de interpolación y usa la integración de Euler para computar las rutas de flujo y el tiempo de transporte. Permite realizar el rastreo de partículas con unos clics del ratón. Pero el avance y retroceso del esquema del rastreo de partícula son factibles para un estado estable y la transporte en los campos de flujo. Simultáneamente, calcula y muestra las líneas de ruta o líneas de flujo y las marcas de tiempo de trayectoria. Provee varias opciones de gráficas en pantalla, incluyendo contorno superior, contorno bajo y vectores de velocidad.

En el programa están activos dos modelos de simulación de transporte. El primero, utiliza un esquema de diferencias finitas (Módulo ASMT2SIM) mientras el segundo usa un método de rutas aleatorias basado en la teoría ITO – Fokker – Planck (Módulo ASMWALK).

Las herramientas del model incluyen un extractor de resultado –Result Extractor–, un Interpolador de campo –Field Interpolator–, un generador de campo –Field Generator–, una calculadora de presupuesto de agua –Water Budget Calculator– y un visor de gráficas –Graph Viewer–.

El Result Extractor permite la simulación de resultados de cualquier periodo para un derrame laminar. Los resultados se pueden ver en sus archivos de datos compatibles con ASCII o SURFER. Los resultados de la simulación incluyen la altura hidráulica, velocidades de Darcy y términos de concentraciones y derrames.

El Water Budget Calculator además de calcular el presupuesto de zonas especificado por el usuario, también calcula el cambio de flujo entre zonas semejantes. Permite determinar el flujo a través de una frontera particular.

El Fiel Generator genera campos con los valores de transmisión o conductividad hidráulica distribuidos heterogéneamente. Se basa en el algoritmo de Mejia (1974).

El Graph Viewer despliega temporalmente el desarrollo de curvas de la simulación de resultados incluyendo la altura hidráulica y concentraciones.

## **5. BIOPLUME III.**

Es un modelo bidimensional de diferencias finitas que simula la atenuación natural de contaminantes orgánicos en agua subterránea debido a los procesos de advección, dispersión, adsorción y biodegradación. Los procesos de biotransformación son potencialmente importantes en la restauración de acuíferos contaminados con contaminantes orgánicos. Como resultado, estos procesos requieren evaluación mediante estudios de planeación de acciones de remediación asociados con hidrocarburos contaminantes.

Bioplume III está basado en la compilación MOC de la USGS para el transporte de sustancias disueltas y resuelve la ecuación de transporte de sustancias disueltas seis veces, para determinar el transporte y destino de los hidrocarburos y los aceptores de electrones ( $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4^-$  y  $CO_2$ ), así como la reacción por productos ( $Fe^{2+}$ ). Cierta número de aceptores de electrones tales como oxígeno, nitrato, sulfato, hierro (III) y dióxido de carbono han sido considerados en este modelo para simular la biodegradación de contaminantes orgánicos. Tres diferentes expresiones cinéticas pueden ser usadas para simular las reacciones de biodegradación aeróbica y anaeróbica, éstas incluyen: decaimiento de primer orden, reacción instantánea y cinética de Monod. El principio de superposición es usado para combinar la pluma de hidrocarburo con la pluma de aceptor de electrones. El modelo ha sido integrado con una plataforma de modelación de agua subterránea conocida como EIS. La plataforma de graficación le permite al usuario introducir y crear datos para la simulación del modelo.

La discretización de tiempo y espacio, las características hidrogeológicas del acuífero, las condiciones de frontera y de inicio, las fuentes y sumideros, adsorción, decaimiento de la fuente, decaimiento radioactivo, intercambio de iones y las variables de biodegradación son los diferentes parámetros de entrada del modelo. Los resultados de la simulación son mostrados gráficamente. Bioplume III corre en ambiente Windows95.

## 6. HSSM.

El Modelo de Evaluación de Derrames de Hidrocarburos (Hydrocarbon SIPL: Screening Model -HSSM) es una herramienta práctica para evaluar el impacto de derrames de hidrocarburos a partir de petróleo sobre agua subterránea.

Éste, es un modelo interactivo, semi analítico, propuesto para la simulación de descargas subterráneas de líquidos ligeros en fase no acuosa (LNAPLs). El modelo consiste de módulos separados para el flujo LNAPL a través de la zona no saturada (KOPT o transporte cinemático de contaminantes aceitosos), el esparcido en la periferia capilar (OILENS), y el transporte de componentes derramados, disueltos en la napa freática (TSGPLUME – Transient Source Gaussian PLUME model). El modelo considera el material suelo/acuífero es homogéneo. El esparcimiento en la periferia capilar se asume que es radial y no está sujeto a un gradiente regional de la napa freática. El transporte advectivo – dispersivo de fase disuelta en la zona saturada está sujeto a un flujo regional uniforme y recarga. Simula el comportamiento de contaminantes no miscibles en agua (NAPLs) en sistemas subterráneos idealizados.

El modelo consiste de módulos separados para el flujo de LNAPLs a través de la zona vadosa, el esparcido en la franja capilar y el transporte de compuestos químicos de LNAPL hacia el acuífero freático.

El modelo se basa en un tratamiento aproximado del flujo a través de la zona vadosa, el esparcido de un LNAPL a lo largo del nivel freático, y el transporte miscible de un solo compuesto químico del LNAPL a través de un acuífero freático hacia varios receptores.

El procedimiento que utiliza este modelo no es apropiado para su aplicación a formaciones geológicas heterogéneas, ni son aplicables a cualquier otro escenario diferente al descrito. Este modelo solamente proporciona estimaciones del orden de magnitud de contaminantes.

Para la aplicación de este modelo deben conocerse algunos detalles del derrame ya que se requieren como datos de entrada del modelo, estos detalles pueden incluir los tiempos del inicio y del final del derrame, el caudal de derrame del LNAPL o la profundidad de encharcamiento del LNAPL en la superficie.

El modelo HSSM es un modelo de evaluación y por lo tanto requiere, como todos los modelos de evaluación en computadora, únicamente cantidades relativamente pequeñas de tiempo de computadora y, puede ser usado para estimar los impactos de contaminación dadas sus suposiciones.

Este modelo también incluye una serie de fenómenos químicos e hidrológicos, supone homogeneidad en el subsuelo, se ejecuta rápidamente y excluye algunos fenómenos (por ejemplo, si existe un derrame de gasolina, este modelo puede ser empleado para dar una estimación tosca de las concentraciones de los compuestos de la gasolina en el agua. Este modelo está destinado para dar resultados de orden de magnitud en vista de que un número de los procesos potencialmente importantes se tratan en el modelo de una manera aproximada o se ignoran totalmente. Además, el modelo no se calibra ajustando las distribuciones espaciales de los parámetros, puesto que la heterogeneidad no está contemplada en este modelo.

Trabaja en ambiente DOS y Win3x. Se incluye la versión al español.

## **7. HYDRUS 2D.**

Es un ambiente de modelación para el análisis del flujo de agua y el transporte de sustancias disueltas en medio poroso variablemente saturado. Incluye el modelo SWMS – 2D de elemento finito bidimensional para la simulación de flujo y transporte de sustancias disueltas en medio variablemente saturado. El programa puede ser usado para analizar el movimiento de agua y sustancias disueltas en medio poroso no saturado, parcialmente saturado y profundamente saturado. Puede manejar regiones de flujo para fronteras irregulares. La región de flujo en sí misma puede estar compuesta de suelos no uniformes teniendo un grado arbitrario de anisotropía local. El flujo y el transporte pueden ocurrir en el plano vertical, o en una región tridimensional exhibiendo simetría radial cerca del eje vertical.

Es un modelo de elemento finito para la simulación del movimiento de agua, calor y múltiples sustancias disueltas en medio variablemente saturado. El programa resuelve numéricamente la ecuación de Richard's para flujo de agua saturado -- no saturado y las ecuaciones de Fickian basadas en la advección – dispersión, para calor y transporte de sustancias disueltas. Trabaja en Win3x.

## **8. MOCDENSE.**

Es un modelo bidimensional de sección transversal para el análisis de la intrusión de agua salina. Este modelo simula el transporte de sustancias disueltas en aguas subterráneas corrientes. Es aplicable a problemas de dos dimensiones o de sección transversal involucrando aguas subterráneas con densidad constante o variable. El modelo calcula los cambios en la concentración con respecto al tiempo causados por el proceso de transporte advectivo, dispersión hidrodinámica, mezclado y dilución a partir de la fuente del fluido. Las concentraciones de dos sustancias independientes pueden ser modeladas simultáneamente. Se asume que la temperatura es constante, pero la densidad del fluido y la viscosidad se asume que son una función lineal de la sustancia disuelta primeramente especificada. Si una segunda sustancia disuelta es especificada, se asume que es en cantidades traza tal que no afecta la densidad o viscosidad del fluido. El acuífero puede ser heterogéneo y anisotrópico. Trabaja en DOS.

## **9. VS2DT (v. 3.0).**

Este modelo se creó para resolver problemas de flujo de agua y transporte de solutos en medios porosos variablemente saturados. Es un programa de diferencias finitas. Modela aproximaciones centradas y de retorno tanto para derivadas espaciales y de tiempo, decaimiento de primer orden, adsorción, isothermas e intercambio de iones. Incluye tres aplicaciones: simulación del transporte de agua y solutos; simulación del transporte de energía y agua; un postprocesador para visualizar los resultados salvados a partir de corridas de simulación previas. Este paquete permite un examen rápido y sencillo del movimiento del agua y de contaminantes (o calor) a través de diferentes regímenes hidrológicos. Es una excelente herramienta para probar hipótesis (por ejemplo, para visualizar la influencia que la pendiente, posición y características hidráulicas de un estrato de baja permeabilidad tiene en el movimiento de un contaminante que se infiltra a partir de la superficie del suelo).

Fue creado como un programa autosuficiente para leer los datos de estructuración de la simulación de los archivos de entrada, y escribir los resultados de la simulación en archivos de salida. En esta versión, comparándola con la anterior (v. 2.5), ningún rasgo nuevo fue agregado, sin embargo, el código del programa fue modificado para correr en forma interactiva y la definición del parámetro "alpha" van Genuchten se revisó para estar en congruencia con el uso establecido. El programa está integrado por un preprocesador y un postprocesador para que la simulación pueda ser corrida en un ambiente visual interactivo.

Las mayores características del VS2DT 3.0 incluyen lo siguiente:

Uso de aproximaciones de diferencia finita para resolver la ecuación de Richard para flujo y la ecuación de advección y dispersión para transporte.

Las regiones simuladas pueden ser columnas de una dimensión, secciones verticales cruzadas en dos dimensiones o cilindros axialmente simétricos en tres dimensiones.

Las condiciones de frontera para el flujo incluyen: presión piezométrica especificada, flujo especificado, infiltración con estancamiento, transpiración de planta, evaporación de suelo abierto y caras de la filtración.

Las características hidráulicas de no-saturación pueden estar representadas por: las ecuaciones de van Genuchten, Brooks – Corey y Haverkamp así como los datos de tabulación.

El proceso de transporte incluye advección, dispersión, decaimiento de primer orden, absorción de equilibrio como lo descrito por las isothermas Freundlich o Langmuir, e intercambio de iones.

Trabaja en ambiente de DOS.

## 10. PRINCE.

Prince es el popular paquete de modelación que contiene los 10 modelos analíticos de Princeton de más amplio uso para la simulación del transporte de contaminantes y el flujo de aguas subterráneas. Los modelos analíticos fueron desarrollados por la US EPA en la Universidad en Princeton por el Dr. Michael Unger. Estos modelos fueron inicialmente desarrollados como herramientas para probar la validez de los más complejos resultados de las modelaciones numéricas.

Los tres modelos de flujo de aguas subterráneas simulan en dos dimensiones el flujo en acuíferos confinados, mientras que los siete modelos restantes de transporte de masa, simulan en una, dos y tres dimensiones, las concentraciones en aguas subterráneas y las curvas de penetración. A continuación se da una breve descripción de los 10 modelos que conforman el Prince:

Modelo 1. transporte de masa unidimensional. Concentración de tipo uno.

Modelo 2. transporte de masa unidimensional. Concentración de tercer tipo.

Modelo 3. transporte de masa en dos dimensiones. Pozos de inyección Wilson-Miller.

Modelo 4. transporte de masa en dos dimensiones. Acuífero infinito. Fuente infinita "Strip".

Modelo 5. transporte de masa bidimensional. Acuífero infinito. Fuente Gausiana.

Modelo 6. transporte de masa tridimensional. Acuífero confinado YZ. Fuente "Patch".

Modelo 7. transporte de masa tridimensional. Acuífero infinito. Fuente Gausiana.

Modelo 8. flujo de aguas subterráneas en dos dimensiones. Acuífero semi infinito. Fronteras de recarga.

Modelo 9. flujo de aguas subterráneas en dos dimensiones. Acuífero confinado. Fronteras de recarga.

Modelo 10. flujo de aguas subterráneas en dos dimensiones. Acuífero infinito. Fronteras sin recarga.

Los modelos de transporte de masa de Prince simulan los procesos de transporte de contaminantes, tales como:

advección y dispersión  
bioremediación intrínseca y  
equilibrio lineal de adsorción

Los tipos de fuentes contaminantes manejadas por Prince incluyen fuentes continuas, fuentes "slug", fuentes de distribución gaussiana y fuente puntual dependiente del tiempo.

Prince calcula los contornos de concentración con variación en el tiempo, en el sitio y puede también ser usado para plotear las curvas de concentración-distancia y las curvas de penetración de la concentración en cualquier locación.

Los modelos analíticos Prince pueden ser utilizados en varias aplicaciones. Los modelos de flujo pueden ser usados para problemas de la zona de captura y espaciamiento bien direccionado en condiciones de frontera de recarga y de barrera. Los modelos de transporte de masa pueden dirigir problemas dentro de un flujo de campo uniforme, y pueden considerar procesos tales como la dispersión, el equilibrio lineal de adsorción y el decaimiento de primer orden en su análisis. Pueden también simular fuentes contaminantes de área, continuas, "slug" y puntuales dependientes del tiempo. Algunas de las aplicaciones más populares de Prince son:

Evaluación de riesgos sobre la salud a largo plazo para receptores de bajo gradiente.

Aportaciones a los costos de remediación para el Superfondo PRP's.

Avance de plumas contaminantes, decaimiento biológico y atenuación final.

Evaluación de herramientas para cumplimiento de programas de biodegradación natural (intrínseca).

Verificación de modelos numéricos bi y tridimensionales para transporte de masa y flujo.

Prince viene con un completo manual del usuario que provee las ecuaciones de cada modelo y describe el medio físico de cada uno. Adicionalmente, también incluye ejemplos tutoriales para cada modelo. El soporte técnico está disponible por teléfono, fax y correo electrónico.

Los requerimientos del hardware son:

IBM PC compatible  
RAM de 640 Kb

Coprocesador matemático  
Tarjeta de gráficos y pantalla VGA o EGA

### **11. AT123D V.2.1.**

Es un modelo generalizado tridimensional para el transporte de aguas subterráneas y su destino. Fue desarrollado para estimar las concentraciones de transporte, dispersión, degradación y adsorción de contaminantes en el flujo de aguas profundas, en una dimensión.

Los mecanismos de transporte y destino simulados incluyen advección, dispersión, adsorción y decaimiento biológico y pérdidas de calor a la atmósfera. Los resultados del modelo pueden ser usados para estimar lo lejos que migrará la pluma de un contaminante y puede ser comparado con aguas subterráneas estándar para evaluar riesgos en locaciones y tiempos específicos. El transporte de contaminantes puede modelarse usando uno de estos dos métodos:

Transporte de contaminantes sin decaimiento, y  
Transporte de contaminantes con biodegradación, como procesos de decaimiento de primer orden.

La opción de no biodegradación es usada para evaluar el transporte y destino de contaminantes en no-degradación. Los resultados con biodegradación también puede ser comparado con las condiciones de sitio y/o modelado con biodegradación para evaluar los efectos de remediación a través de la atenuación natural (RNA).

Puede usar las descargas de contaminantes, dependientes del tiempo, a partir del modelo SESOIL para zona vadosa como carga de agua subterránea. Los parámetros de entrada son almacenados en un archivo de texto. Este archivo contiene información sobre el acuífero, el contaminante y los parámetros de salida. Los parámetros de acuífero incluyen información que definen las propiedades del suelo y del acuífero, de la descarga y de las propiedades del contaminante.

La información de los parámetros de entrada son obtenidos de varias fuentes incluyendo análisis de laboratorio, investigaciones de campo y en referencias bibliográficas. Los parámetros de entrada pueden ser editados utilizando cualquier editor o procesador de palabras.

Los archivos de salida contienen los parámetros de entrada y los resultados de salida del escenario del modelo. El modelo corre en ambiente DOS.

### **12. FATMIC 3D.**

Es un modelo de 3-Dimensiones de Flujo de Subsuperficie, Destino y Transporte de Microbios y Químicos (3-Dimensional Subsurface Flow, FAte and Transportof Microbes and Chemical).



Simula el flujo subterráneo, transporte y destino de microbios y contaminantes que son sometidos a transformaciones químicas y/o biológicas. El modelo es aplicable a condiciones de tránsito tanto en zonas saturadas como no saturadas. El módulo de flujo es una solución por el método de elemento finito de Galerkin para la ecuación de Richard's. El módulo de transporte es un híbrido de la aproximación de Lagrangian–Eulerian con un “zooming” adaptado y algoritmo de captura de picos. Este modelo puede casi eliminar las oscilaciones espurias, la dispersión numérica y los picos de recorte debidos al transporte advectivo.

El modelo está diseñado para obtener la densidad dependiente de la velocidad del campo del fluido y resuelve la ecuación de transporte advectivo – dispersivo acoplado con la biodegradación y la producción de biomasa microbial.

Modela el flujo en medios saturados y no saturados así como el transporte y destino de siete componentes:

- Un sustrato
- Dos electrones aceptores
- Un elemento de trazo
- Tres poblaciones de microbios.

Para cada aplicación específica, deben asignarse máximo 74 controles integrados usando los PARÁMETROS manifiestos en el programa principal. El modelo tiene instrucciones para modificar subrutinas ESSFCT, WSSFCT, VBVFCT, DBVFCT, NBVFCT, CBVFCT y SPFUNC, respectivamente, si el usuario utiliza diferentes formas analíticas de condiciones de frontera, funciones de valores de fuerza de la fuente profunda y las funciones de propiedades de suelo de las usadas en este programa.

En la entrada de datos, el programa incluye índices de control, propiedades del medio, ya sea en forma tabular o analítica, la geometría en la forma de los elementos y los nodos, condiciones iniciales y condiciones de frontera para el flujo y transporte y constantes de interacción microbio–química.

La salida principal incluye la distribución espacial de la presión piezométrica y la altura piezométrica total, volumen de humedad, componente de velocidad de Darcy, concentraciones y flujo de materiales para cualquier espacio de tiempo deseado. Además, para propósitos de depuración de errores se pueden imprimir variables de diagnóstico, como el número de nodos no convergentes y residuales, si se desea.

Trabaja en ambiente DOS y UNIX.

### **13. KYSPILL.**

Es una colección de sofisticados modelos matemáticos, rápidos, con orientación gráfica, de menús controladores y de fácil uso, capaces de predecir la contaminación de aguas subterráneas en la zona no saturada (del suelo) o la zona saturada bajo la napa freática, que sigue un derrame químico de un contaminante líquido o disuelto, liberado en el suelo o directamente en la zona saturada.

Kyspill es la forma más efectiva para modelar plumas contenidas generadas por:

- fugas de tanques subterráneos de almacenamiento
- lixiviados de rellenos sanitarios
- derrames químicos accidentales
- plumas en zona saturada y no saturada
- fuentes puntuales y no puntuales

Mientras existan programas que estén escritos tanto para la zona no saturada como para la saturada, Kyspill ofrecerá un paquete completo de predicciones tanto para el suelo como para el acuífero subyacente. Es el modelo más sencillo de implementar. Primero seleccionas el tipo de fuente apropiada a partir del menú de datos. Entonces introduces los datos relevantes del acuífero y del derrame. Para la mayoría de los derrames, necesitas solamente un dato de entrada a la pantalla; necesitas un diagnóstico de datos detallados y ayuda en línea. Finalmente puedes seleccionar una variedad de contornos de mapa y curvas de penetración a partir del menú de corridas (Run). En unos segundos Kyspill genera los gráficos que te permiten predecir la ruta contenida, las regiones locales de no cumplimiento, los volúmenes estimados de contaminante, el plan de la red de monitoreo o el diseño de las operaciones de limpieza.

En Kyspill convergen años de investigación científica acerca de fenómenos de dispersión en medios porosos. Fue desarrollado basándose en las últimas técnicas de soluciones semi analíticas de ecuaciones diferenciales estocásticas. Implementa nuevas soluciones estables para las ecuaciones de transporte de contaminantes y flujo acoplado en acuíferos heterogéneos.

Kyspill es el único modelo comercialmente disponible de escala dependiente, para contaminación de aguas subterráneas, capaz de predecir la dispersión en suelos en tres dimensiones y la subsecuente propagación bidimensional en acuíferos heterogéneos no confinados. También considera contaminantes reactivos o degradables.

Los creadores de Kyspill intentaron desmitificar la modelación de la contaminación de aguas subterráneas y ponerla a disposición de todos los profesionales medioambientales y en hidrología de aguas subterráneas.

Kyspill puede ser usado en una variedad de tareas. Las aplicaciones típicas incluyen la evaluación de la presente extensión de la contaminación en suelo y acuífero, el pronóstico de la futura extensión de un escenario particular

contaminado, y la predicción de la ruta de la pluma en el suelo y en el acuífero subyacente. Dado el tamaño y la cantidad de una concentración inicial de un derrame en un punto particular en un acuífero y en un tiempo particular y algunas características del acuífero, el modelo puede ser usado para predecir la dirección general del movimiento de la pluma; la velocidad del movimiento; la concentración en un punto particular de interés en el acuífero en un tiempo dado en el futuro; la evolución de la concentración con el tiempo y su máxima concentración en un pozo o en un punto sensible; la distribución espacial del contaminante a lo largo de su eje más crítico en un tiempo dado en el futuro; la distribución areal de la pluma en un tiempo dado; la relación entre la pluma de la zona no saturada y la pluma de la zona saturada, etc. De esta manera Kyspill es primariamente una herramienta de predicción para ser usada en el diagnóstico de modelaciones subsecuentes más detalladas o mediciones de campo más detalladas, o como una base para decidir y planear acciones de remediación.

Este modelo puede ser usado como una herramienta de predicción preliminar cuando información escasa es disponible. Debido a sus simplicidad y pocos datos requeridos, Kyspill proveerá al modelador con una estimación conservadora e los efectos de un problema de contaminación.

Kyspill puede ayudar al modelador a planear mediciones más detalladas de concentraciones o de parámetros del acuífero. Ya que una estrategia efectiva para la instalación de dispositivos de medición requiere un conocimiento inicial sobre la localización de la pluma y el tiempo de transcurso durante la vida del instrumento, Kyspill puede proveer información invaluable en el diseño de una red de monitoreo piezométrico.

Puede ser usado también, como un medio para diseñar la acción de remediación de un sitio o como una manera para investigar el peor escenario posible de contaminación. Predecir valores de concentración en ciertos puntos sensibles (en pozos de abasto de agua) es un paso crucial al decidir si habrá o no una acción de limpieza y quizás el tipo de acción de remediación a emplear.

Kyspill puede ser usado para estimar los volúmenes de suelo contaminado o de aguas subterráneas contaminadas lo que constituye una importante información para el contratista de limpieza.

Este modelo no requiere que el modelador esté bien versado en matemáticas, ecuaciones diferenciales, análisis numérico o programación de computadoras. Sin embargo, se asume cierta familiaridad con los principios básicos de la hidrología de acuíferos, flujo de aguas subterráneas y propagación de contaminantes. Una comprensión sobre los mecanismos de recarga, la capacidad para identificar la dirección regional del flujo de aguas subterráneas a partir de las mediciones de la elevación de la napa freática, y la capacidad para proveer buena calidad de los parámetros de suelo y acuífero (porosidad, densidad en volumen seco, conductividad hidráulica y dispersividad) son todos esenciales. Es también importante conocer las propiedades físico químicas del contaminante a modelar.

Esto ayudará en la determinación del grado de movilidad y degradación potencial del contaminante en el medio subterráneo. Finalmente, el modelador necesita proveer a Kyspill con las concentraciones iniciales del contaminante en suelo y acuífero. esto implica la capacidad para muestrear y determinar las concentraciones del contaminante con la ayuda de apropiados instrumentos de laboratorio y campo.

Kyspill predice la propagación del contaminante bajo las siguientes condiciones físicas:

El suelo está caracterizado por una variabilidad aleatoria en sus propiedades suelo-agua. La estratificación es errática y no dominan patrones particulares.

La zona no saturada no es profunda (menos de 20 metros), y el acuífero subyacente no es confinado.

La napa freática en el acuífero no confinado tiene pendiente moderada, y las simplificaciones de Dupuit para describir el flujo de aguas subterráneas son válidas.

El acuífero puede ser homogéneo o heterogéneo. La heterogeneidad del acuífero en la conductividad hidráulica varía erráticamente en el espacio (aleatoriamente), y no existen patrones particulares. La heterogeneidad del acuífero está caracterizada por las propiedades estadísticas de la conductividad hidráulica, en particular por sus medias, sus desviaciones estándar y una estructura de correlación exponencialmente decayente.

Las fuentes contaminantes fueron originadas por una derrame puntual en el suelo o en el acuífero. las fuentes no puntuales fueron originadas y generadas por una fuente puntual en un pasado distante desconocido en el suelo o en el acuífero ;

Las reacciones químicas entre el contaminante y las partículas del suelo están gobernadas por una cinética lineal de adsorción isotérmica.

El decaimiento biológico, radiactivo o químico es gobernado por un proceso de degradación de primer orden.

La dependencia de la escala en los parámetros de dispersión (incrementos en distancia o tiempo) es primariamente explicada por la heterogeneidad del acuífero en la escala de campo.

Los procesos más importantes en la propagación de contaminante son la advección (debido a la recarga a partir de la lluvia en la zona no saturada y los gradientes hidráulicos regionales en la zona saturada), los mecanismos de dispersión debidos a la heterogeneidad del acuífero, adsorción y decaimiento.

La propagación del contaminante es esencialmente un proceso tridimensional en la zona no saturada. Esto implica que la componente vertical del flujo sea despreciada en el acuífero y que los valores de concentración reportados por el modelo son promedio sobre las magnitudes de concentración vertical.

#### **14. MODFLOW 2000.**

Modelo tridimensional de diferencias finitas para aguas subterráneas. El programa está estructurado en forma modular para permitir que sea fácilmente modificado para adaptar el paquete de programas para una aplicación particular.

Este modelo simula el flujo estable e inestable en un sistema de flujo irregular en el que los layers o capas del acuífero pueden estar confinadas, no confinadas o en una combinación de confinamiento y no-confinamiento.

El modelo puede simular el flujo de presiones externas tal como flujo de pozos, recarga de área, evapotranspiración, drenajes para flujo, y flujo a través de canchales de ríos.

La conductividad hidráulica o transmisibilidad de cada layer puede diferir espacialmente y se anisotrópico (restringido a tener las direcciones principales alineadas con los ejes de la rejilla) y el coeficiente de almacenamiento puede ser heterogéneo.

Además, para simular el flujo de aguas profundas, el alcance del MODFLOW – 2000 ha sido expandido para incorporar las capacidades mencionadas tal como transporte de solutos y estimación de parámetros.

La ecuación de flujo de aguas profundas se resuelve usando aproximaciones por diferencias finitas. La región del flujo está subdividida en bloques en los que las propiedades del medio se asumen como uniformes. La vista del plano de bloques está hecha desde una rejilla de líneas perpendiculares que pueden ser variadas mutuamente. Los layers o capas del modelo pueden tener espesores variados. Se usa una ecuación de flujo para cada bloque, llamados celdas. El modelo permite varias soluciones para resolver el problema de la matriz de resultados; el usuario puede elegir la mejor solución para un problema particular. Los balances de radio de flujo y volumen acumulativo de cada tipo de flujo de entrada y de salida son computados para cada periodo de tiempo.

## **15. MODFLOWT.**

Nueva versión de MODFLOW que incluye módulos para la simulación tridimensional del transporte de contaminantes. Resuelve las ecuaciones de transporte advectivo-dispersivo usando el método profundamente implícito de diferencias finitas. Es ampliamente compatible con las versiones previas de MODFLOW. Los nuevos módulos incluyen transporte básico, transporte de bloque centrado y una solución del algoritmo de Orthomin. Simulan el transporte advectivo-dispersivo de una sola especie miscible sujeta a la adsorción y decaimiento. Ambiente DOS, Win3x, Win95/98, WinNT.

## **16. RAND3D.**

Es una versión tridimensional del algoritmo de camino aleatorio para resolver problemas de transporte de solutos en agua subterránea. RAND3D incluye: cálculo del transporte advectivo horizontal usando uno de los tres diferentes esquemas de interpolación de la velocidad; cálculo del transporte advectivo vertical basado en una interpolación lineal entre los vectores de velocidad vertical de entrada en el nivel superior e inferior de cada estrato; cálculo de la dispersión usando dispersividades constantes, longitudinal, transversal y vertical; cálculo de decaimiento de orden cero, primer orden u orden variable, o volatilización a partir de la napa freática; cálculo de la adsorción lineal (retardación); capacidad para representar fuentes areales complejas; cálculo de concentraciones de soluto existiendo el modelo en sumideros (pozos o corrientes); mapeo de contorno de sección transversal o de vista en planta al usar áreas seleccionadas del modelo; salida matricial de concentraciones de soluto por estrato para plotear; gráficos de pantalla interactiva – movimientos de pluma, factores geográficos (usando archivos de coordinación especial); capacidad de simulación del flujo transitorio, en corridas de múltiples pasos.

## **17. SWANFLOW.**

Es una compilación tridimensional de diferencias finitas para la simulación del flujo de agua y una fase no acuosa inmisible bajo condiciones de saturación y no saturación cerca de la superficie. El paquete puede ser usado en muchas situaciones que requieren el análisis de flujo inmisible, tal como la simulación de la migración de químicos orgánicos; analiza los efectos de las tecnologías de remediación en sitios con residuos peligrosos donde se encontraron fluidos inmiscibles; y evalúa la migración y limpieza a fondo de derrames y fugas de combustibles.

Las ecuaciones gobernantes son un subgrupo simplificado de las ecuaciones de flujo de tres fases para medio poroso comúnmente usado en simulaciones de depósitos de petróleo. Los gradientes de presión en la fase de gas (aire) son asumidos como despreciables (la fase de aire se considera a presión atmosférica constante, así el flujo del aire no es modelado). El agua, la viscosidad del NAPL y la densidad son dependientes de la presión. La permeabilidad relativa y la presión de capilaridad son funciones de la saturación de agua; la permeabilidad relativa del NAPL es función de la saturación de aire y agua. La saturación del aire es una función de la presión del NAPL. La permeabilidad (en dirección de X, Y y Z), la compresibilidad del medio, porosidad, tasas fuente/sumidero y las relaciones presión capilar-permeabilidad relativa-saturación pueden variar en el espacio. Las condiciones de frontera aceptables incluyen: flujo especificado, fluidos potenciales especificados, y flujo de fluidos que es dependiente de los fluidos potenciales en las fronteras.

Tiene tres limitantes primarias: la fase del aire se considera a presión atmosférica constante, así el flujo del aire no es modelado; la transferencia de masa entre fases no es considerada, por ejemplo, el NAPL no puede disolverse en agua o evaporarse; y la aplicación práctica del paquete a problemas de campo puede ser

complicado debido a la falta de datos específicos del sitio relativos a permeabilidad y presión capilar.

## **VII. Conclusiones.**

La gravedad de las consecuencias de la contaminación del suelo ha incrementado la preocupación y la intensidad de las acciones encaminadas a su comprensión y estudio, dado que afecta seriamente la calidad de vida de los seres humanos y obstaculiza la continuidad de los procesos biogeoquímicos que configuran el funcionamiento de los ecosistemas.

En este contexto, no siempre es posible realizar la caracterización directa de contaminación en suelo y subsuelo y además de que , en ocasiones se requiere complementar y generalizar la información disponible para la evaluación extensiva de fenómenos contaminantes.

En este entorno juega un papel importante la simulación del comportamiento del contaminante en el sitio afectado, para lo cual actualmente se dispone de programas de cómputo basados en modelos matemáticos probados.

En este sentido, el desarrollo es creciente, de tal manera que se cuenta con numeroso software para la simulación del transporte de contaminantes en suelo bajo diferentes condiciones, cuya aplicación puede ser general o específica. Los modelos matemáticos aplicados al transporte de contaminantes consisten de un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de los contaminantes (solutos) en medios granulares o fracturados, siendo también instrumentos muy importantes en la predicción del movimiento de los contaminantes.

La aplicación de modelos de transporte requiere del entendimiento de las condiciones de flujo en el sistema y por lo tanto del entendimiento de los modelos de flujo. Desde luego la validez o credibilidad de las predicciones dependerá de qué tan bien el modelo represente las condiciones de campo. En este sentido, los datos de campo son esenciales para realizar la calibración del modelo, cuando se utilizan con fines predictivos.



Por otra parte, hablando del software existente para el modelado de dispersión de contaminantes, a grandes rasgos, se establece la siguiente clasificación general.

1. Software para transporte de contaminantes en condiciones unidimensionales.
2. Software para transporte de contaminantes en dos dimensiones por el método de elemento finito.
3. Software para transporte de contaminantes en dos dimensiones por el método de diferencias finitas.
4. Software analítico para el transporte de contaminantes en dos dimensiones.
5. Software para transporte de contaminantes en tres dimensiones.

La definición de factores a considerar en la selección de un modelo de dispersión no es un asunto absoluto. En realidad, cada situación puede llegar a presentar particularidades que hagan deseable o necesaria la aplicación de un modelo en específico. De cualquier forma, es necesario plantear criterios generales de selección a considerar, mismos que se presentan a continuación:

1. Tipo de contaminante a modelar
2. Capacidad dimensional de simulación
3. Actualidad del software
4. Plataforma de trabajo del software
5. Disponibilidad del software
6. Amplitud y profundidad de aplicación
7. Disponibilidad y confiabilidad de datos de entrada requeridos por el software

## VIII. Referencias Bibliográficas.

- ABDUL, S.A 1988. "Migration of Petroleum Products Through sandy Hydrogeologic systems". In. GWMR.
- ABDUL, S.A 1989. "Limitations of Monitoring Wells for the detection and Cuantification of Petroleum products in soil and aquifers" In : GWMR.
- Ayllon T. y J. Chavez. 1998. "México: Sus recursos naturales y su población". Ed. Limusa. México D.F. 288 p.
- Bear, J. 1983. "Hydraulics of Groundwater". McGraw-Hill. New york, USA.
- Benegar, J. 2000. "Data input guide for swift for windows: The sandia waste-isolation flow and transport model for fractured media". HSI GeoTrans, Virginia, USA. 205 p.
- Cherry, J. 1983. "Migration of Contaminants in Groundwater at a landfill": A case study, espec. Issue. Journal of Hydrology 63 (2) 1-179.
- CFE. 1979. "Manual de diseño de obras civiles: Geotecnia". Instituto de Investigaciones Electricas. México D.F.
- Dufield. G. 1998 "User's manual of ModFlowt: a modular three-dimensional groundwater flow and transport model". HidroSolve Inc. Virginia, USA. 155 p.
- Enkerlin, E., G. Cano, R. Garza y E. Vogel (Eds.). 1997. "Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible", International Thomson Editores. México D.F. 690 p.
- ESC. 1999. "User's guide of AT123D". Environmental Software Consultans, Inc. Wisconsin, USA. 27 p.
- ESC. 1999. "User's guide of SESOIL". Environmental Software Consultans, Inc. Wisconsin, USA. 38 p.
- Eweis, Juana B. & Ergas Sarina J. 1999 "Principios de Biorrecuperación". WCB/McGraw – Hill. España. 327 p.
- Foth H. & L. Turk. 1982. "Fundamento de la ciencia del suelo". CECSA. México D.F. 527 p.
- Frind E.O. 1982. "The principal direction Technique. A new approach to groundwater contaminant transport modeling in Proceedings". Fourth

- International Conference on finite elements in water resources, Technical University Hannover, Germany.
- Frind E.O. & G. Matanga. 1985. **"Water resources research"**. Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Ontario. Vol. 21. No. 2. Pages 159-169
- Fuat A. y D. Gidi. 1995 **"Saneamiento de sitios contaminados"** PROFEPA, Gaceta ecológica 36: 60-69.
- García E. 1986. **"Apuntes de Climatología"** 5ta edic. Edit. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 155 p.
- Gavande S. 1972. **"Física de suelos: Principios y aplicaciones"**. Edit. Limusa, México D.F. 351 p.
- Gour-Tsyh G. & T. Short. 1997 **"2DFATMIC: User's Manual of a Two-Dimensional Subsurface Flow, Fate and Transport of Microbes and Chemicals Model"**. EPA. Washington DC, USA. 132 p.
- Glynn J. & G. Heinke. 1996. **"Ingeniería Ambiental"** 2ª Edic. Prentice Hall Hispanoamericana. México D.F. 778 p.
- Harvey J. 1987. **"Geología para ingenieros geotécnicos"**. Ed. Limusa. México D.F. 157 p.
- Hildebrand, F. 1965. **"Advanced calculus for Applications"**. Prentice-Hall, N.J., USA.
- HT. 1999. **"User's guide of ModelCad for Windows"**. Hydro Trak, Inc. USA.
- INEGI. 1981. **"Guías para la interpretación de cartografía: Edafología"**. SPP/INEGI. México, D.F. pp. 11-41.
- INEGI. 1982. **"Geología de la República Mexicana"**. SPP/INEGI. México, D.F. 81 p.
- INEGI, 1995. **"Estadísticas del Medio Ambiente, México 1994"** INEGI, México D.F. 447 p.
- Juárez E. y A. Rico. 1999. **"Mecánica de suelos: Flujo del agua en suelos"**. Tomo 3. Ed. Limusa, México D.F. 414 p.
- Juárez E. y A. Rico. 2000. **"Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos"**. Tomo 1, 3ª edic. Ed. Limusa, México D.F. 643 p.
- Juárez E. y A. Rico. 2000. **"Mecánica de suelos: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos"**. Tomo 2. Ed. Limusa, México D.F. 704 p.

- Kraemer S., H. Haitjema & V. Kelson. 2000. **“Workin with WhAEM2000; Source water assessment for a glacial outwash wellfield, Vincennes, Indiana”**. EPA. Washington DC, USA. 49 p.
- Lesser, M. 1993. **“Prospección de contaminación de acuíferos por hidrocarburos”**. VI Curso Internacional de Geohidrología y Contaminación de Acuíferos. UNAM. México D.F.
- Lesser, M. 1993. **“Determinación de hidrocarburos volátiles en la contaminación del suelo”**. VI Curso Internacional de Geohidrología y Contaminación de Acuíferos. UNAM. México D.F.
- Lesser, M. 1993. **“Saneamiento de acuíferos contaminados por hidrocarburos”**. VI Curso Internacional de Geohidrología y Contaminación de Acuíferos. UNAM. México D.F.
- Lesser, M. 1993. **“Contaminación de acuíferos por hidrocarburos prospección y saneamiento”**. VI Curso Internacional de Geohidrología y Contaminación de Acuíferos. UNAM. México D.F.
- Martín E. & J. Jonson (Eds.). 1986. **“Hazardous Waste Management Engineering”**. Van Nostrand Reinhold Company. New York, USA. 520 p.
- Mazari, M. 1995. **“El potencial de contaminación del agua subterránea”** Centro de ecología, UNAM. Gaceta ecológica 36: 53-58
- Nebel, B. & R. Wright. 1999. **“Ciencias Ambientales: Ecología y desarrollo sostenible”** 6ª edic. Prentice Hall Hispanoamericana. México D.F. 698 p.
- Nyer, E. 1993. **“Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation”**. Lewis Publishers. 214 p.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1999. **“Evaluación Comparativa de Modelos de Dispersión de Contaminantes”** PROFEPA. México. 1999.
- Rzedowski, J. 1978. **“Vegetación de México”** Edit. Limusa. México D.F. 432 p.
- Saval S. 1995. **“Remediación y Restauración”** en: PEMEX Ambiente y Energía. Instituto de Investigaciones Jurídicas 69:152-189.
- Saval S. 1998. **“La Reparación del daño. Aspectos técnicos: Remediación y Restauración”** en: PEMEX Ambiente y Energía. Instituto de Investigaciones Jurídicas 87:209-235

Schäfer, D., W. Schäfer & R. Therrien. **"TBC: Efficient simulator for three-dimensional saturated groundwater flow + multispecies transport + reactions in porous formations"**. Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, Germany. 57 p.

Thomsom, L. 1968. **"Theoretical Hydrodynamics"**. MacMillan, New York, USA.

Willms, G. 1982. **"The streamfunction method: A direct approach to simulate groundwater flow, in Proccedings."** Fourth International Conference on Finite Elements in Water Resources. University of Hannover, Hannover, Germany.

Zheng C. 1990 **"MT3D: a modular three-dimensional transport model for simulation for advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems"**. S.S. Papadopulos & Associates, Inc./EPA. Washington DC, USA. 163 p.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

### **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

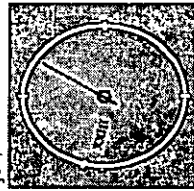
**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

#### **TEMA**

**MUESTREO DE SUELOS CONTAMINADOS**

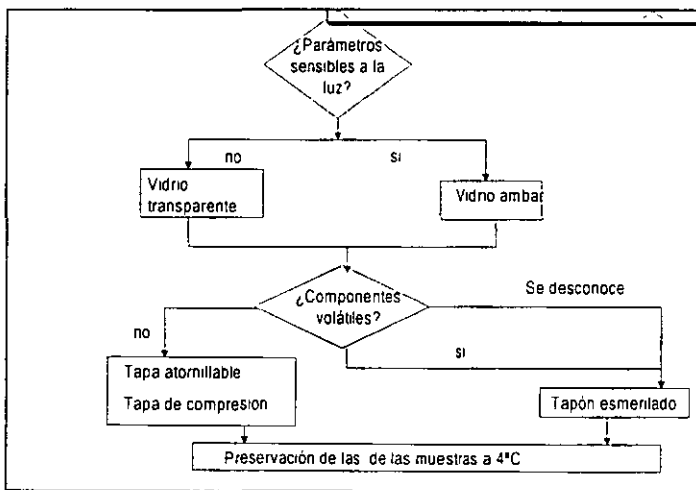
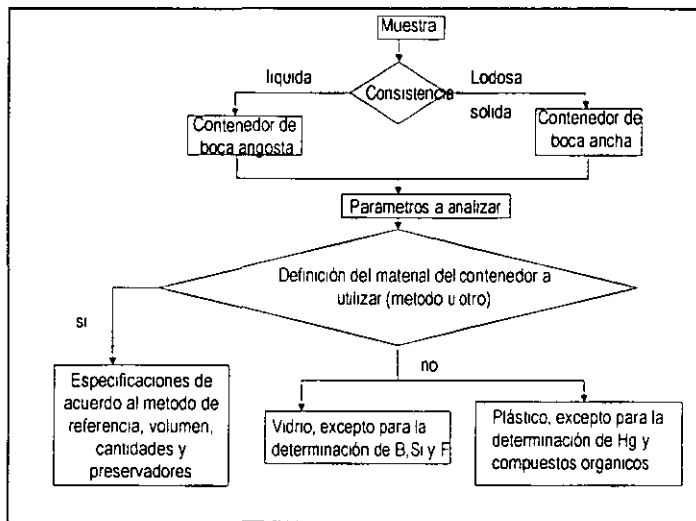
**EXPOSITOR: ING. CRISTINA ARÁOZ TREJO  
PALACIO DE MINERIA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# Muestreo Estadístico



*eXperTos Consultores Ambientales*

1



## Estrategia de muestreo

Para la estrategia de muestreo existen básicamente dos procedimientos :

- **Muestreo Dirigido** o a Juicio de Experto (no estadístico).

Se tiene información previa del sitio, se conoce el compuesto, análisis dirigido. Ejemplo Emergencias Ambientales.

4

## Estrategia de muestreo

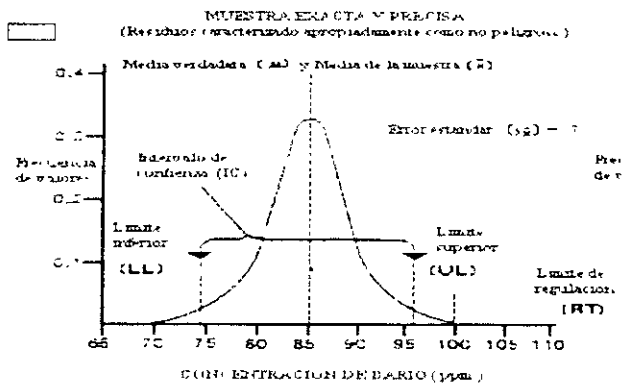
- **Muestreo Estadístico.**

No se cuenta con información, es necesario muestrear toda el área, ha transcurrido un intervalo de tiempo considerable.

Ejemplo: Sitios Abandonados.

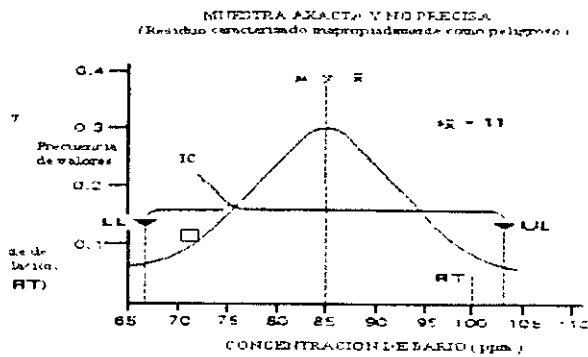
5

## Muestra exacta y precisa

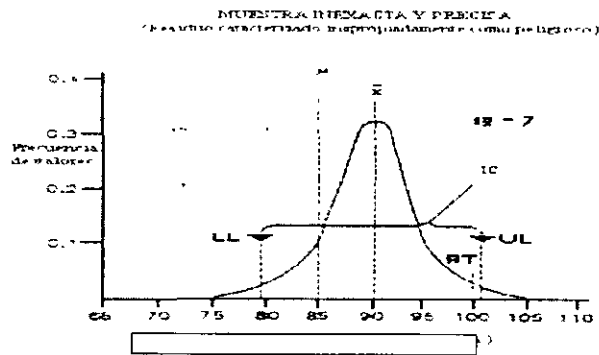




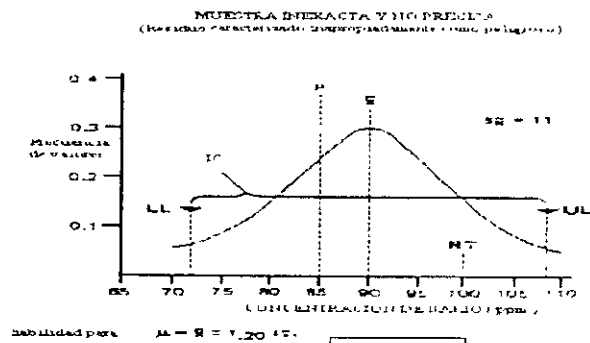
## Muestra exacta y no precisa

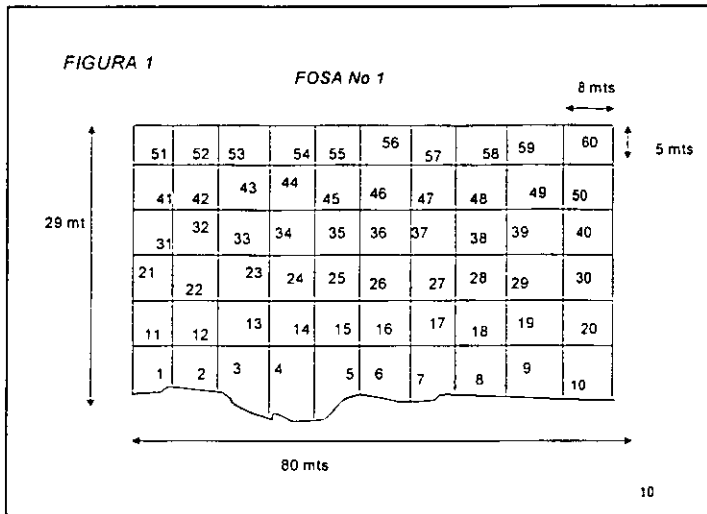


## Muestra no exacta y precisa



## Muestra no exacta y no precisa





**Muestreo aleatorio**  
Tabla de números aleatorios

03 47 43 73 86	36 96 47 36 61	46 08 63 71 62
97 74 24 67 62	42 81 14 57 20	42 53 32 37 32
16 76 62 27 86	56 50 26 71 07	32 90 79 78 53
12 58 85 99 26	96 96 68 27 31	05 03 72 93 15
55 59 56 35 84	38 54 82 46 22	31 62 43 08 09
16 22 77 84 39	49 54 43 54 82	17 37 83 23 78
84 42 17 53 31	57 24 55 06 88	77 04 74 47 67
63 01 63 78 99	16 95 55 67 19	98 10 50 71 75
33 21 12 34 29	78 64 56 07 82	52 42 07 44 38
67 60 86 32 44	09 47 27 96 54	48 17 46 08 62
18 18 07 92 46	44 17 16 58 09	79 83 86 19 62
26 62 38 97 75	84 16 07 44 99	83 11 46 32 24
23 42 40 64 74	82 97 77 77 81	07 45 32 14 08
52 36 28 19 05	50 92 26 11 97	00 56 78 31 38
37 89 94 35 12	83 39 50 08 30	42 34 07 96 88
70 29 17 12 13	40 33 20 38 26	13 89 51 03 74
56 82 18 37 35	96 83 50 87 75	97 12 25 93 47
99 49 57 22 77	88 42 95 45 72	16 64 38 16 00
16 08 15 04 72	33 27 14 34 09	45 59 34 68 48
31 18 93 32 43	50 27 89 87 19	20 15 37 00 49

11

Caso no.	Tipo de residuo	Tipo de recipiente	No de muestras
1	Líquido	Tambores, pipas, tanques de almacenamiento	De 3 a 10 muestras diferentes
2	Líquido	Estanques, lagunas	De 3 a 20 muestras compuestas diferentes
3	Sólido: polvos granulados	Bolsas, sacos	De 3 a 5 muestras compuestas diferentes
4	A granel	-----	Mismo que el caso 3
5	Lodos	-----	Mismo que el caso 3
6	Suelos contaminados	-----	De 3 a 20 muestras compuestas diferentes

## Criterios cuantitativos

- Una muestra simple y puntual por cada **310 m<sup>2</sup>** por cada **1 m** profundidad cuando se realice tratamiento "**in situ**".
- Una muestra compuesta por cada **500 ton (310m<sup>2</sup>)** cuando se realice tratamiento "**on site**".
- Una muestra por cada **310 m<sup>2</sup>** en el fondo de la fosa cuando se realice tratamiento "**ex situ**".
- Procedimiento de aseguramiento de calidad: se tomará una **muestra duplicada** por cada 5, 6 ó 7 muestras tomadas. (Juicio de experto).

13

## Media y varianza de la muestra

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

14

## Desviación y error estándar

$$s = \sqrt{S^2}$$

$$S_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

15

### Número de muestra e intervalo de confianza

$$n_1 = \frac{t_{0.20}^2 s^2}{\Delta^2}$$

$$IC = \bar{x} \pm t_{0.20} s_{\bar{x}}$$

16

---

---

---

---

---

---

---

---

### Identificación de las muestras

- Número de muestra.
- Profundidad.
- Fecha y hora de recolección.
- Nombre del técnico.

17

---

---

---

---

---

---

---

---

### Etiquetas

Técnico responsable _____	muestra No. _____
lugar del muestreo _____	
fecha del muestreo _____	hora del muestreo _____
información de campo _____	

18

---

---

---

---

---

---

---

---

## Registro de la información

- Motivo del muestreo.
- Descripción y localización.
- Responsable de la contaminación.
- Localización de los puntos de muestreo.
- Observaciones en campo.



19

---

---

---

---

---

---

---

---

## Bitácora

- Observaciones en campo.
- Fecha y hora de recolección.
- Equipo de muestreo utilizado.
- Número e identificación de la muestra.
- Referencias: mapas, fotografías, etc.



20

---

---

---

---

---

---

---

---

## Cadena de Custodia

Para documentar formalmente la transportación y movimientos de las muestras desde el momento de su recolección hasta su ingreso al laboratorio debe llevarse un registro de cadena de custodia.

Cuenta con la siguiente información:

- Número de muestras.
- Responsable que solicita el análisis.
- Parámetros a determinar.
- Lugar y dirección de recolección.
- Nombres y firmas de los custodios.

21

---

---

---

---

---

---

---

---

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Registro de Cadena de Custodia</div>	Muestra No _____
Origen de la muestra: _____	
Nombre de la empresa _____	
Dirección _____	
Nombre del muestreador _____	
Fecha del muestreo _____ hora del muestreo _____	
Punto, lugar y dirección del muestreo _____	

22

---

---

---

---

---

---

---

---

<b>Cadena de Custodia</b>				
<b>ENTREGA LA MUESTRA (S)</b>			Fecha hora	
nombre	firma	cargo		
<b>RECIBE LA MUESTRA (S)</b>				
nombre	firma	cargo		

23

---

---

---

---

---

---

---

---

### Recepción de muestras

Muestra etiquetada como	contenedor				Análisis solicitado	Codigo de muestra
	vial	frasco	bolsa	Preservación		

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Entrega de muestras en el laboratorio</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Recepción de muestras en el laboratorio</div>
Nombre _____	Nombre _____
cargo _____	cargo _____
firma _____	firma _____

24

---

---

---

---

---

---

---

---

## Control de calidad



**Duplicado de campo.**- Dos muestras tomadas de una misma población y dándoles tratamientos idénticos durante el muestreo y análisis.

**Réplica.**- Una misma muestra se divide para obtener dos muestras que son representativas de la misma población y que fueron tomadas en el mismo tiempo o espacio.

**Blanco de análisis.**- Una misma muestra se divide y cada porción es analizada por diferentes analistas o laboratorios.

25

---

---

---

---

---

---

---

---

## Control de calidad



**Blanco del método o blanco del reactivo.**- Se prepara con agua pura, la cual se trata de la misma forma que la muestra.

**Muestra ciega.**- Es una muestra proporcionada al analista con una composición e identidad conocida por el proveedor pero desconocida para el analista.

**Blanco de viaje.**- Muestra de agua pura que acompaña a las muestras durante el tránsito, recolección y almacenaje. Mide la contaminación acumulativa derivada del viaje.

26

---

---

---

---

---

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

# **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

**TEMA**

**TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN**

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL MUÑOZ MEZA  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE DE 2001**



# Tecnologías de restauración



eXperTos Consultores Ambientales

---

---

---

---

---

---

---

---

## Clasificación

- ◆ *In situ.*
- ◆ *Ex situ.*
- ◆ *On site.*

---

---

---

---

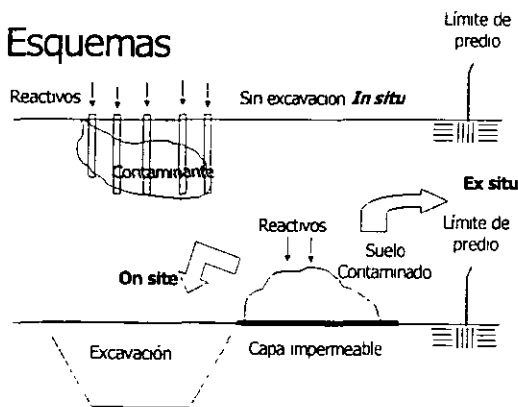
---

---

---

---

## Esquemas



---

---

---

---

---

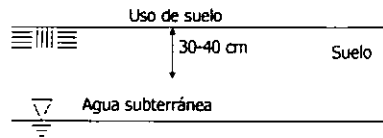
---

---

---

## Suelo

- ◆ No definición oficial.



- ◆ Parte mas alta del regolito.
- ◆ Procesos biogeoquímicos.

4

---

---

---

---

---

---

---

---

## Homogeneidad

- ◆ Estratos homogéneos/heterogéneos.
- ◆ Estratos Isótropos/anisótropo.
- ◆ Mayormente heterogéneos y anisótropo.

5

---

---

---

---

---

---

---

---

## Transporte

- ◆ Movimiento de contaminantes, principalmente, f(flujo de agua en el subsuelo).
- ◆ Distribución espacial y temporal del agua afecta el movimiento.
- ◆ Precipitación.- Escorrentía e infiltración.

6

---

---

---

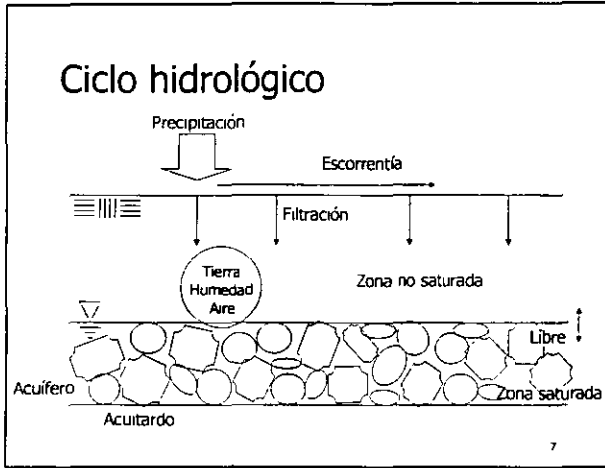
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

### Composición del suelo

	%		Tamaño (mm)	Área específica (mm <sup>2</sup> /g)
Minerales	45	Arcilla	<0.002	5-500
		Limo	0.002-0.02	0.1-1
		Arena	0.02-2	<0.1
Materna Orgánica	5			800-1,000
Agua	25			
Aire	25			

---

---

---

---

---

---

---

---

- ### Factores
- ◆ Inmiscibles en agua (LFNA).
  - ◆ Densidad y viscosidad diferentes a la del agua.
  - ◆ Mayor.- Líquido sumergidor Disolventes clorados.
  - ◆ Menor.- Líquido flotante Gasolinas, HC, MTBE.

---

---

---

---

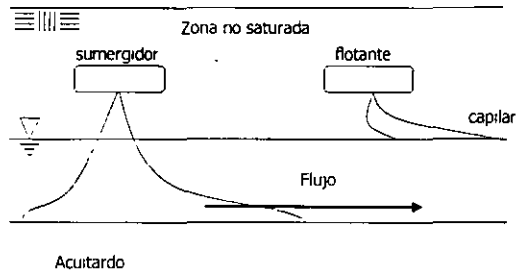
---

---

---

---

# Movimiento LFNA



10

---

---

---

---

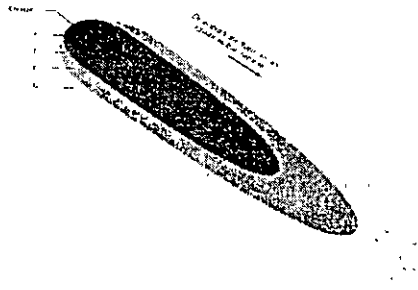
---

---

---

---

# Estela continua



11

---

---

---

---

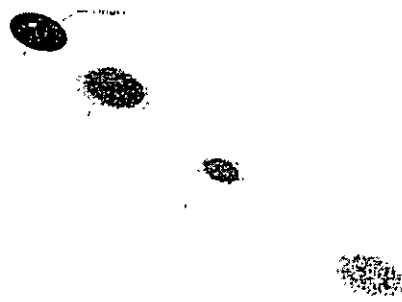
---

---

---

---

# Estela puntual



12

---

---

---

---

---

---

---

---

## Objetivo final

- ◆ Disminuir la peligrosidad, el riesgo o la movilidad de las sustancias. Mas estables, menos móviles.
- ◆ Cambiar estado de agregación, extracción o recuperación del suelo.
- ◆ Metabolizar los contaminantes, microorganismos o vegetales.
- ◆ Destruir física o químicamente a los contaminantes.

13

---

---

---

---

---

---

---

---

## Excavación y confinamiento

- ◆ \$\$\$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Buena aceptación (?).
- ◆ Buen nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Situación particular en México.

14

---

---

---

---

---

---

---

---

## Contención

- ◆ \$\$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Poca aceptación.
- ◆ ¿Nivel de limpieza?
- ◆ Aplicación de una capa.

15

---

---

---

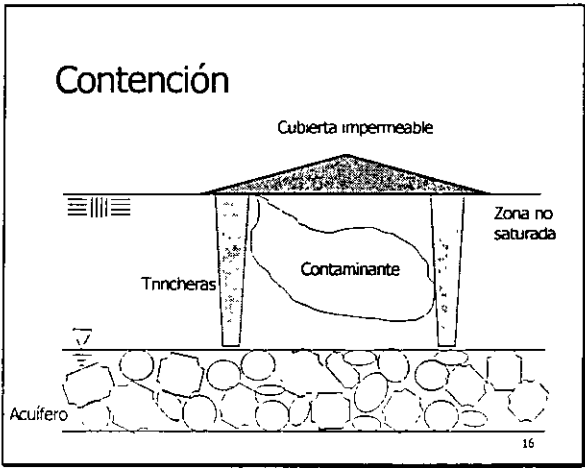
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

- ### Contención
- ◆ Construcción de barreras laterales.
  - ◆ Limitar la movilidad.
  - ◆ Cubierta superior impermeable, con drenaje.
  - ◆ Especificaciones especiales, programa de seguimiento y control de acceso.
- 17

---

---

---

---

---

---

---

---

- ### Atenuación natural
- ◆ \$.
  - ◆ Tiempo muy largo.
  - ◆ Poca aceptación.
  - ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
  - ◆ Alternativa por default.
- 18

---

---

---

---

---

---

---

---

## Incineración

- ◆ \$\$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Regular aceptación (?).
- ◆ Buen nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Dioxinas, no para metales, Cl.



19

---

---

---

---

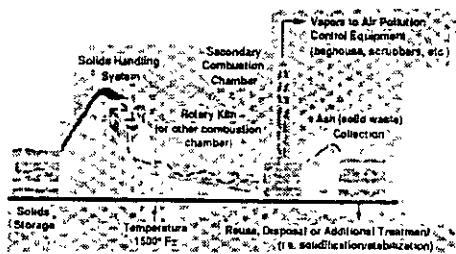
---

---

---

---

## Calcinación



20

---

---

---

---

---

---

---

---

## Desorción térmica

- ◆ \$\$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Regular aceptación.
- ◆ Buen nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Baja oferta.

21

---

---

---

---

---

---

---

---

## Desorción térmica

- ◆ Punto de ebullición distinto al suelo.
- ◆ HC, solventes, plaguicidas, etc.
- ◆ Buena opción on site.
- ◆ Control de flujo de gases de salida y de combustión.

22

---

---

---

---

---

---

---

---

## Biorrestauración

- ◆ \$.
- ◆ Tiempo de regular a largo.
- ◆ Buena aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Aplica para hidrocarburos, tiempo largo.

23

---

---

---

---

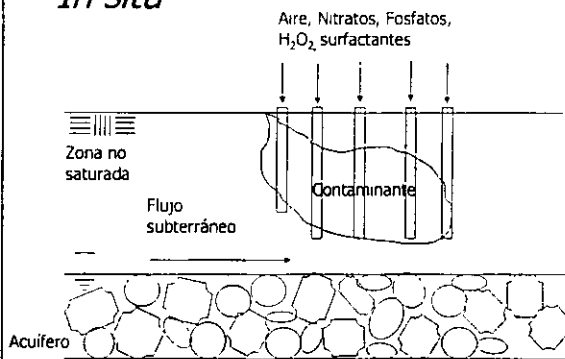
---

---

---

---

## *In situ*



---

---

---

---

---

---

---

---



## Bioremediación

- ◆ Promover la metabolización de contaminantes.
- ◆ Aplicable a HC.
- ◆ Nutrientes, aire, agua, etc.
- ◆ ¿Uso de surfactantes?

25

---

---

---

---

---

---

---

---

## Lavado *in-situ*

- ◆ \$\$\$.
- ◆ Tiempo regular.
- ◆ Baja aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Limitante hidrogeológica.

26

---

---

---

---

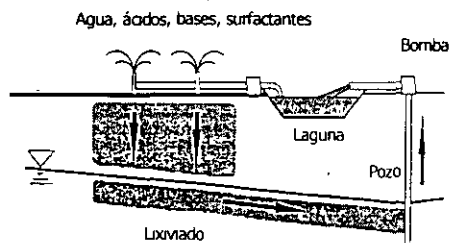
---

---

---

---

## Lavado *in-situ*



27

---

---

---

---

---

---

---

---

## Lavado *in-situ*

- ◆ Recirculación de grandes volúmenes de agua.
- ◆ Aislar el líquido de trabajo de acuífero.
- ◆ Adición de químicos.
- ◆ Tren de tratamiento de agua.

28

---

---

---

---

---

---

---

---

## Lavado on-site

- ◆ \$\$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Regular aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Requiere excavación y reactivos.

29

---

---

---

---

---

---

---

---

## Lavado on site

- ◆ Acción mecánica y agua.
- ◆ Finos, lavado con agentes quelantes y otros químicos.
- ◆ Gruesos, por abrasión.
- ◆ Grandes cantidades de RESPEL y agua contaminada, tratamiento.

30

---

---

---

---

---

---

---

---

## Vitrificación

- ◆ \$\$\$.
- ◆ Tiempo regular.
- ◆ Baja aceptación.
- ◆ Buen nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Suelos orgánicos homogéneos, silicatos.

31

---

---

---

---

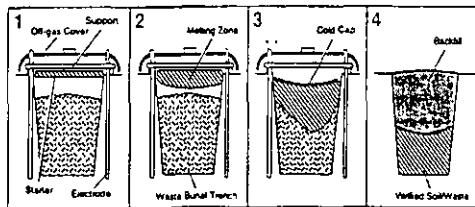
---

---

---

---

## Vitrificación



32

---

---

---

---

---

---

---

---

## Vitrificación

- ◆ Proceso térmico, altos silicatos, Inorgánicos tóxicos.
- ◆ Inyección de  $O_2$ , cuatro electrodos.
- ◆ Cristal, sin fracción lixiviable.
- ◆ Muy caro, riesgoso, afecta la capacidad de carga del suelo.

33

---

---

---

---

---

---

---

---

## Tratamiento químico

- ◆ \$\$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Regular aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Oxidantes fuertes.

34

---

---

---

---

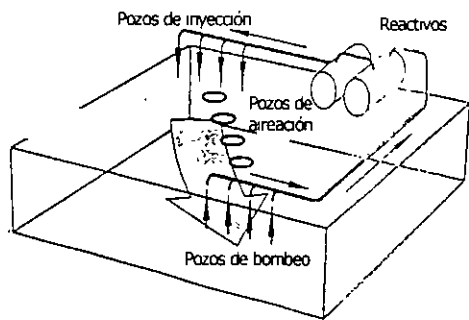
---

---

---

---

## Tratamiento químico



35

---

---

---

---

---

---

---

---

## Especificaciones

- ◆ REDOX, pueden ocurrir en el suelo.
- ◆ Adición de agentes oxidantes.
- ◆ Adición de agentes reductores.
- ◆ Oxidación química de compuestos orgánicos.

36

---

---

---

---

---

---

---

---

## Oxidación

- ◆ Caracterización de contaminantes.
- ◆ Potencial REDOX.
- ◆ Productos de oxidación.
- ◆ Solubilidad.

37

---

---

---

---

---

---

---

## Factores que influyen

- ◆ Distribución de los contaminantes.
- ◆ Humedad.
- ◆ Tipo de suelo y horizontes.
- ◆ Catalizadores para oxidación presentes (Hierro, aluminio y trazas de metales).

38

---

---

---

---

---

---

---

## Agentes oxidantes/reductores

- ◆ Ozono, Peróxido de hidrógeno.
- ◆ Polvos de metales catalizados y borohidruro de sodio, catalizadores: hierro zinc o aluminio.
- ◆ Plaguicidas órgano fosforados.
- ◆  $Cr^{6+}$  a  $Cr^{3+}$ .

39

---

---

---

---

---

---

---

## Inyección de aire

- ◆ \$.
- ◆ Tiempo regular.
- ◆ Regular aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Requiere postratamiento.

40

---

---

---

---

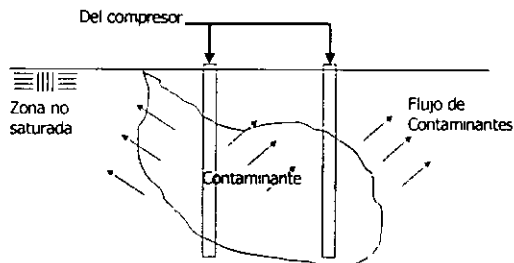
---

---

---

---

## Inyección de aire



41

---

---

---

---

---

---

---

---

## Inyección de Aire

- ◆ Se promueve la volatilización de los contaminantes.
- ◆ COV's, gasolinas, acetonas, disolventes, etc.
- ◆ Hay que controlar las emisiones.

42

---

---

---

---

---

---

---

---

## Extracción de vapores

- ◆ \$\$\$.
- ◆ Tiempo regular.
- ◆ Regular aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Puede usarse con vapor.

43

---

---

---

---

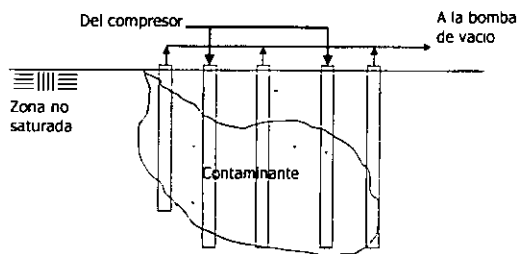
---

---

---

---

## Extracción de vapores



44

---

---

---

---

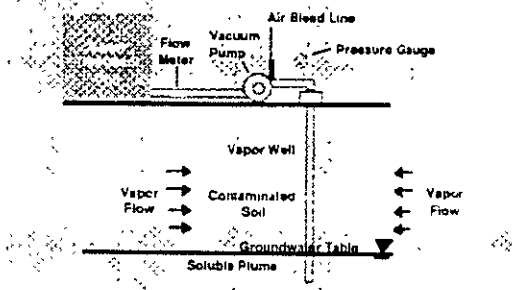
---

---

---

---

## Extracción de vapores



45

---

---

---

---

---

---

---

---

## Extracción...

- ◆ Solventes o vapor.
- ◆ Aquellos que disuelvan a los contaminantes.
- ◆ Vapor, aire, frío o caliente.
- ◆ Gradiente de presión.
- ◆ Controlar los gases de salida.

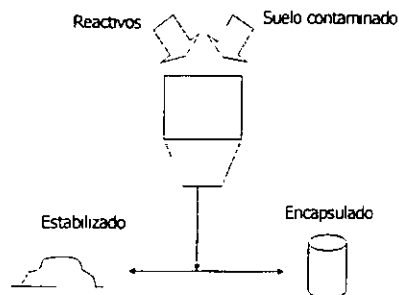
46

## Solidificación/estabilización.

- ◆ \$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Regular aceptación (?).
- ◆ Buen nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Bueno para metales, limita la movilidad y el riesgo.

47

## Solidificación



48



## Estabilización/Solidificación

- ◆ Forma menos soluble o móvil.
- ◆ Encapsular en un sólido de alta integridad estructural.
- ◆ Sólido no lixiviable.
- ◆ Inyección de agua y reactivos a presión al suelo.

49

---

---

---

---

---

---

---

---

## Continuación...

- ◆ Control de pH.
- ◆ Precipitación química de metales como hidróxidos, sulfuros, bromuros.
- ◆ Adsorción con arcillas o carbón activado.
- ◆ Reacciones exotérmicas, gases tóxicos, riesgo de explosión.

50

---

---

---

---

---

---

---

---

## Neutralización

- ◆ \$.
- ◆ Tiempo corto.
- ◆ Buena aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Usado primordialmente para ácidos.

51

---

---

---

---

---

---

---

---

## Fitorestauración

- ◆ \$.
- ◆ Tiempo de regular a largo.
- ◆ Buena aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ Acumulación de contaminantes en el tejido vegetal.

52

---

---

---

---

---

---

---

---

## Bombeo y tratamiento

- ◆ \$\$.
- ◆ Tiempo largo.
- ◆ Regular aceptación.
- ◆ Regular nivel de limpieza alcanzable.
- ◆ VOC` s, requiere reinyección.

53

---

---

---

---

---

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

# **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

### **TEMA**

**ESPECIFICACIONES DE ANÁLISIS DE LABORATORIO**

**EXPOSITOR: Q. EMMA BUENO  
PALACIO DE MINERIA  
NOVIEMBRE 2001**

## RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

### TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA ANÁLISIS QUÍMICOS



**IBQ. EMMA BUENO LÓPEZ**  
28 DE MARZO, 2001

---

---

---

---

---

---

---

---

### CONTENIDO

- CONTAMINANTES DEL SUELO CONSIDERADOS
- TÉCNICAS DE ANÁLISIS
- CRITERIOS INTERINOS

---

---

---

---

---

---

---

---

### CONTAMINANTES CONSIDERADOS EN LOS CRITERIOS INTERINOS PARA RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

#### CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS

- GASOLINA. BENENO, TOLUENO, XILENOS
- DIESEL. HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS
- RESIDUOS ACETOSOS. HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS Y RECUPERABLES

#### CONTAMINACIÓN POR INORGÁNICOS TÓXICOS Y OTROS

- ARSÉNICO, BARIO, CADMIO, CROMO, MERCURIO, NÍQUEL, PLOMO, SELENIO ZINC
- CIANUROS
- ACRILAMIDA
- ACRILONITRILO
- AROMINAS

---

---

---

---

---


---

---

---

1991 11 22

## CROMATÓGRAFOS DE LÍQUIDOS



---

---

---

---

---

---

---

---

1991 11 22

## TÉCNICAS ANALÍTICAS

Espectroscopia en infrarrojo. Técnica para identificar compuestos orgánicos de acuerdo a la estructura de sus grupos funcionales en donde la absorción de la luz infrarroja produce cambios en los estados vibracionales de energía de una molécula que corresponden a un espectro único.

---

---

---

---

---

---

---

---

1991 11 22

## ESPECTRÓMETRO DE INFRARROJO



---

---

---

---

---

---

---

---

## FRACCIONES TÍPICAS DEL PETRÓLEO CRUDO OBTENIDAS POR DESTILACIÓN

FRACCIÓN GAS	COMPOSICIÓN APROXIMADA HIDROCARBUROS CON UNO A CUATRO ÁTOMOS DE CARBONO C <sub>1</sub> a C <sub>4</sub>
ETER DE PETRÓLEO	C <sub>5</sub> a C <sub>6</sub>
GASOLINA	C <sub>7</sub> a C <sub>10</sub>
TURBOSINA	C <sub>11</sub> a C <sub>12</sub>
DIESEL	C <sub>13</sub> a C <sub>17</sub>
ACEITES PESADOS Y LUBRICANTES LIGEROS	C <sub>18</sub> a C <sub>25</sub>
LUBRICANTES Y ASFALTOS	> C <sub>25</sub>

---

---

---

---

---

---

---

---

## TÉCNICAS ANALÍTICAS

**CROMATOGRAFÍA.** Técnica de separación de los componentes de una mezcla de sustancias basada en sus propiedades fisicoquímicas y su interacción con una fase estacionaria que permita su identificación y cuantificación.

Las propiedades del compuesto que se quiere identificar, determinan las condiciones del análisis (tipo de fase estacionaria y móvil, condiciones de temperatura y presión, tipo de detector)

Los tipos de cromatografía utilizados con mayor frecuencia son: cromatografía de gases y de líquidos

---

---

---

---

---

---

---

---

## CROMATÓGRAFOS DE GASES




---

---

---

---

---

---

---

---



## TÉCNICAS ANALÍTICAS

Espectrofotometría de Absorción Atómica. La muestra se introduce por un capilar para hacerla llegar a una flama donde el elemento a identificar llega al estado basal absorbiendo energía a una determinada longitud de onda característica del elemento.

---

---

---

---

---

---

---

---



## ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA



---

---

---

---

---

---

---

---



## MÉTODOS ANALÍTICOS RECOMENDADOS PARA HIDROCARBUROS EN SUELOS

CONTAMINANTE	MÉTODO
GASOLINA	EPA 8015B
BENCENO	EPA 8240, 8260B
TOLUENO	EPA 8240, 8260B
XILENOS	EPA 8240, 8260B
DIESEL	EPA 8015B
HAP	EPA 8310, 8100, 8270
ACEITE GASTADO, COMBUSTÓLEO	
PETRÓLEO CRUDO, EMULSIONES	EPA 418.1 ASTM 3921

---

---

---

---

---

---

---

---



### CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS

- EPA 8015B. Detector FID, análisis de hidrocarburos base gasolina y diesel.
- EPA 8100. Detector, hidrocarburos policíclicos aromáticos.
- EPA 8240. Detector de masas, compuestos orgánicos volátiles
- EPA 8260. Detector de masas, análisis por purga y trampa
- EPA 8270. Detector de masas, extractos de matrices sólidas solubles en cloruro de metileno
- EPA 418 1 y ASTM 3921. Detección por infrarrojo

---

---

---

---

---

---

---

---



### MÉTODOS ANALÍTICOS RECOMENDADOS PARA INORGÁNICOS TÓXICOS Y OTROS COMPUESTOS

CONTAMINANTE	MÉTODO
ARSÉNICO	EPA 7061
BARIO	EPA 7080
CADMIO	EPA 7130
CROMO	EPA 7190
MERCURIO	EPA 7471
NÍQUEL	EPA 7520
PLOMO	EPA 7420
SELENIO	EPA 7741
ZINC	EPA 7950
CIANURO	EPA 9010A
ACRILAMIDA	EPA 8260B
ACRILONITRILLO	EPA 8260B
AROMINAS	EPA 8260B

---

---

---

---

---

---

---

---



### CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE INORGÁNICOS Y OTROS COMPUESTOS

- EPA 7061. Espectrofotometría de absorción atómica (EAA) por generación de hidruros
- EPA 7080. EAA por aspiración directa
- EPA 7130. EAA por aspiración directa
- EPA 7190. EAA por aspiración directa
- EPA 7471. EAA por vapor frío
- EPA 7420. EAA por aspiración directa
- EPA 7520. EAA por aspiración directa
- EPA 7741. EAA por generación de hidruros
- EPA 7950. EAA por aspiración directa
- EPA 8260B. Detector de masas con purga y trampa
- EPA 9010A. Colorimetria

---

---

---

---

---

---

---

---



CRITERIOS INTERINOS DE RESTAURACIÓN DE  
SUELOS CONTAMINADOS CON  
HIDROCARBUROS

10  
10  
10

CONTAMINANTE	AGRICULTURA FORESTAL (mg/Kg)	RESIDENCIAL COMERCIAL (mg/Kg)	INDUSTRIAL (mg/Kg)
Gasolina	200	200	500
Benceno	20	20	50
Tolueno	40	40	100
Xilenos	40	40	100
Diesel	1000	1000	2000
Benzopireno	0.08	0.08	0.80
Benzo(a)antraceno	0.80	0.80	8.0
Benzo(b)fluoranteno	0.80	0.80	8.0
Benzo(k)fluoranteno	8.00	8.00	80.0
Criseno	80	80	800
Residuos acetosos (HC rec.)	1000	1000	2000

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

CRITERIOS INTERINOS DE RESTAURACIÓN DE  
SUELOS CONTAMINADOS CON INORGÁNICOS  
TÓXICOS Y OTROS COMPUESTOS

10  
10  
10

CONTAMINANTE	RESIDENCIAL (mg/Kg)	AGRÍCOLA (mg/Kg)	INDUSTRIAL (mg/Kg)
Arsénico	20	20	40
Bario	750	150	1500
Cadmio	20	20	100
Cromo	375	75	750
Mercurio	20	20	100
Níquel	150	75	700
Plomo	200	100	1500
Selenio	20	20	100
Zinc	800	300	1500
Cianuro	50	5	500
Acliamida	0.2	0.02	2.4
Acloritrilo	1.4	0.02	4.8
Aromas y otros disolventes	40	40	100

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**


### **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

#### **TEMA**

**PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y  
SUELO UAM AZCAPOTZALCO**

**EXPOSITOR: ING. MIGUEL ANGEL FLORES BACA  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE 2001**



# *Análisis Fisicoquímicos de Suelos*

---

1

---

---

---


---

---

---

---

---



## *Análisis físicos*

*Aquellos que no tiene que ver con la composición de los suelos y que su desarrollo no implica la destrucción o alteración del material .*

2

---

---

---


---

---

---

---

---



## *Analisis químicos*

*Aquellos que tienen que ver con la composición de los suelos y/o su desarrollo implica la destrucción o alteración del material .*

3

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Físicos 1*

- ◉ *Muestreo en el Laboratorio.*
- ◉ *Muestreo en el sitio.*
  - ▣ *Totalidad de la muestra*
  - ▣ *Disminución de partículas*
- ◉ *Cuarteo.*
- ◉ *Toma de duplicado o triplicado.*
- ◉ *Descripción, visual.*

4

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Físicos 2*

- ◉ *Textura de campo, táctil .*
  - ▣ *Arcillas*
  - ▣ *Limos*
  - ▣ *Arenas*
- ◉ *Textura en Laboratorio, gravimetría.*

5

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Físicos 3*

- ◉ *Composición, gravimetría y oxidación.*
  - ▣ *Agua*
  - ▣ *Orgánica*
  - ▣ *Mineral*
  - ▣ *Aire*
- ◉ *Permeabilidad, carga de agua.*
  - ▣ *Horizontal*
  - ▣ *Vertical*

6

---

---

---

---

---

---

---

---



## Físicos 4

- Porosidad:
  - ▣ Densidad aparente/densidad de partículas
- Compactación:
  - ▣ Densidad aparente/densidad compactada
- Saturación:
  - ▣ Volumen vacío/volumen de agua

7

---

---

---

---

---

---

---

---



## Físicos 5

- Densidad.
  - ▣ Real, en campo y laboratorio.
  - ▣ Aparente, en laboratorio.
- Velocidad de .
  - ▣ Absorción.
  - ▣ Adsorción.

8

---

---

---

---

---

---

---

---



## Químicos 1

- pH, 5% en agua.
- Intercambio iónico.
  - ▣  $Ca^{++}$
  - ▣  $Mg^{++}$
  - ▣  $K^+$
  - ▣  $Na^{++}$
  - ▣  $Cl^-$
  - ▣  $NO_3^-$

9

---

---

---

---

---

---

---

---



## Química 2

### • *Modificación Química, apreciación:*

- ▣ Ácidos
- ▣ Alcalis
- ▣ Oxidantes, dicromatos o peróxidos
- ▣ Reductores, halogenuros

10

---

---

---

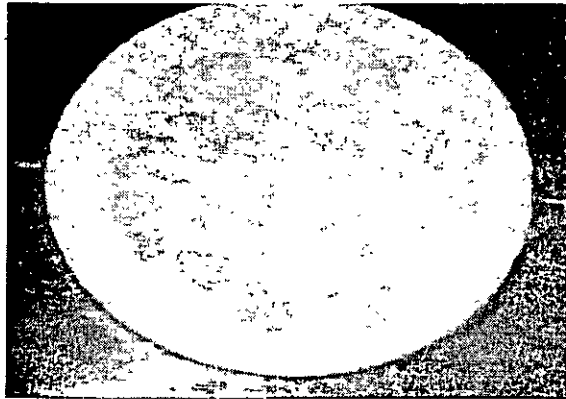
---

---

---

---

---



11

---

---

---

---

---

---

---

---



## Bibliografía recomendada 1

- Chapman, H. D. **Métodos de análisis para suelos y plantas.** Trillas. México 1979.
- Jackson, M. L. **Análisis Químicos de suelos.** Ediciones Omega. 3 edición, Barcelona, 1976.

12

---

---

---


---

---

---

---

---



- Keith, L. H. EPA 's Sampling and analysis Methods. Lewis Publisher, Inc. USA, 1992.
- Legault, A. R. Ingeniería de carreteras y aeropuertos. CECSA. 6 Edición. México 1983.

13

---

---

---


---

---

---

---

---



- Foth, H. D. **Fundamentos de la ciencia del suelo.** CECSA. México, 1992.
- Association of Official Analytical Chemist. Editor, Kenneth, E. **Official Methods of Analysis.** 15 Edición. Virginia, USA, 1990.

14

---

---

---


---

---

---

---

---



*Análisis de HC's*

Hidrocarburos del petróleo

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Preliminares:*

### *CADENA DE CUSTODIA*

- *Si el laboratorio toma la muestra, la custodia la tiene desde ese momento.*
- *Si el laboratorio recibe la muestra, la custodia se comparte entre los muestreadores y el laboratorio.*

16

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Selección de la técnica*

- *Para HC's la metodología US EPA 8015 es la recomendada por el GDT para:*
  - ▣ *Base gasolina*
  - ▣ *Base diesel*
- *Se debe conocer el origen de la fuga o la fuente precisa de la contaminación, cambio de programa de temperaturas.*

17

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Cromatografía de gases*

- *Técnica analítica de separación e identificación de los componentes de una mezcla.*
- *Tiene dos fases inmiscibles, fija y móvil.*
- *La separación se logra por interacción de la muestra en ambas fases.*

18

---

---

---

---

---

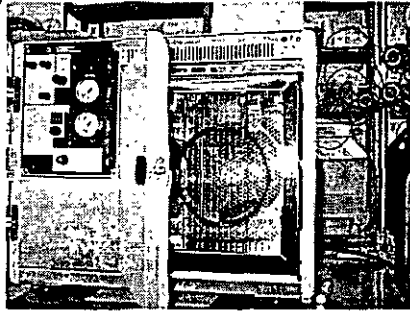
---

---

---



## Equipo de cromatografía de gases



---

---

---

---

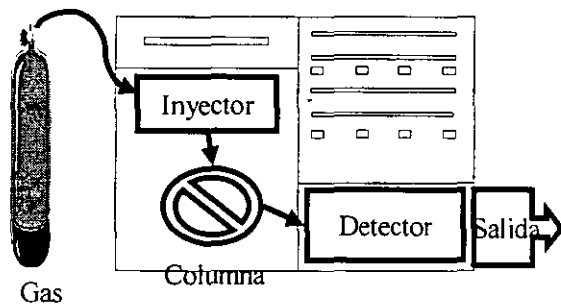
---

---

---

---

## Partes del cromatógrafo



---

---

---

---

---

---

---

---

## Tipos de gases

- ◆ **Acarreadores o estabilizadores:**
  - ▣ Helio
  - ▣ Nitrógeno
  - ▣ Argón
- ◆ **Combustibles:**
  - ▣ Hidrógeno
- ◆ **Comburentes:**
  - ▣ Aire

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Tipos de inyectores*

- *Sobre columna*
  
- *Capilares*
  - ▣ *Inyección sin purga*
  - ▣ *Split*
  - ▣ *Split / splitless 8015*

22

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Tipos de columnas*

- *Empacadas*
  
- *Capilares, 8015. DB-1 de 30 m. Película de 0.1 micras. Diámetro 0.52 mm*

23

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Tipos de detectores*

- *ECD, captura de electrones.*
  
- *PID, fotoionización.*
  
- *MS, masas atómicas.*
  
- *FID, ionización de flama 8015.*

24

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Tipos de salidas*

- *Integrador*
- *Computadora personal, work station*

25

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Humedad*

- *Este parámetro es de una gran importancia debido a que los resultados deberán reportarse siempre en base seca.*
- *El procedimiento es por gravimetría.*

26

---

---

---

---

---

---

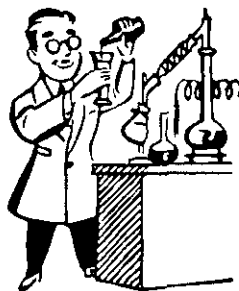
---

---



## *Extracción de HC's*

- *Técnica de extracción por Soxhlet.*
- *Extracción por reflujo en Fiehdich.*
- *Extracción por agitación.*



27

---

---

---

---

---

---

---

---



## Reflujo Fieldrichs

- Tomar muestra entre 50 g y 100 g para evitar la concentración posterior en kuderna-danish.
- Reflujar el solvente por 4 horas, con enfriamiento de agua helada.
- Separar por decantación y secar con sal anhidra.

28

---

---

---

---

---

---

---

---



## Inyección en el cromatógrafo

- Inyectar blanco de solvente.
- Inyectar estándares de la base a analizar para realizar calibración.
- Tomar entre 3 y 10 microlitros de extracto, puede se adicionado con analitos control.

29

---

---

---

---

---

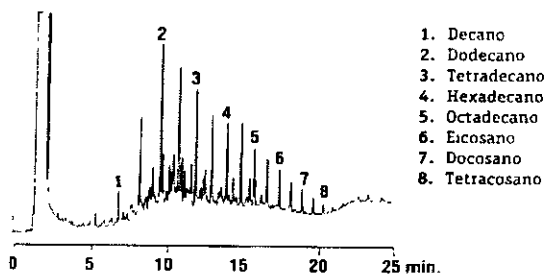
---

---

---



## Cromatograma base diesel



30

---

---

---

---

---

---

---

---



## Resultados

- Los resultados tanto en integrador como en work station, integran el área final bajo la curva.
- La curva de calibración se forma con el resultado de cada área con respecto a cada concentración.
- Se interpola el área de cada muestra.

11

---

---

---

---

---

---

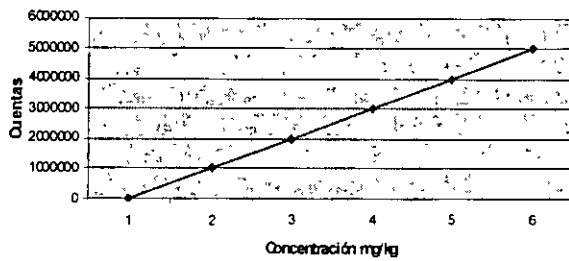
---

---



## Construcción de la curva

Curva de calibración



32

---

---

---

---

---

---

---

---



## Análisis de Inorgánicos Tóxicos (Metales Pesados)

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Preliminares*

- *Cadena de custodia.*
- *Humedad.*

14

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Selección de la técnica*

- *En este caso solo existen dos técnicas posibles:*
  - ▣ *Absorción atómica*
  - ▣ *Emisión de plasma*
- *Para los dos casos cada metal tiene una metodología US EPA distinta, debido al cambio de lámparas y de recepción longitud de onda.*

15

---

---

---

---

---

---

---

---



## *Digestión de muestras*

- *Se toman de 10 a 20 g de suelo.*
- *Se colocan en matraz Erlenmeyer se les vierte 100 mL de agua desionizada.*
- *Se adicionan 10 ml de ácido nítrico y 5 ml de ácido perclórico.*
- *Se calienta en parrilla hasta la evaporación en un 95 % aproximado.*
- *Se regresa a su volumen original con agua desionizada.*

16

---

---

---

---

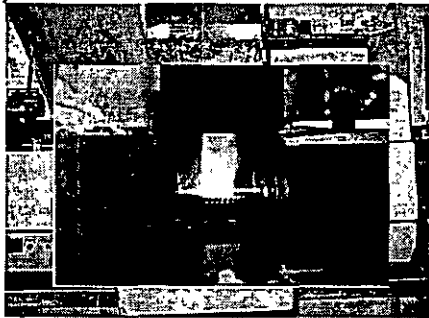
---

---

---

---

## Equipo de Absorción Atómica



17

---

---

---

---

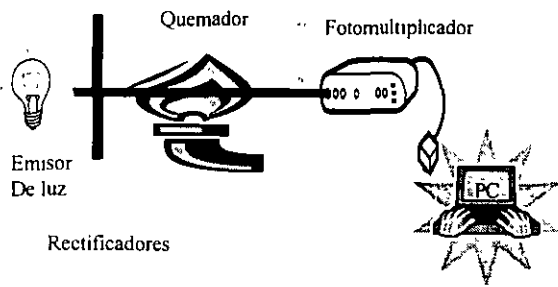
---

---

---

---

## Espectrómetro de Absorción Atómica



18

---

---

---

---

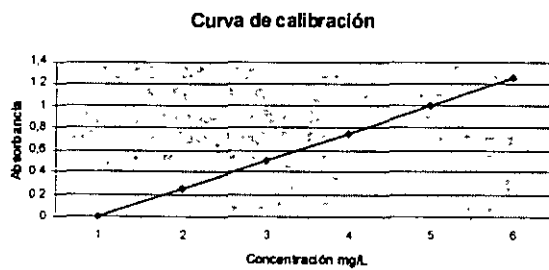
---

---

---

---

## Curva de calibración



19

---

---

---

---

---

---

---

---



### *Resultados*

- *Al valor final deberá expresarse en mg/kg.*
- *No olvidar tomar en cuenta el valor de humedad.*

40

---

---

---

---

---

---

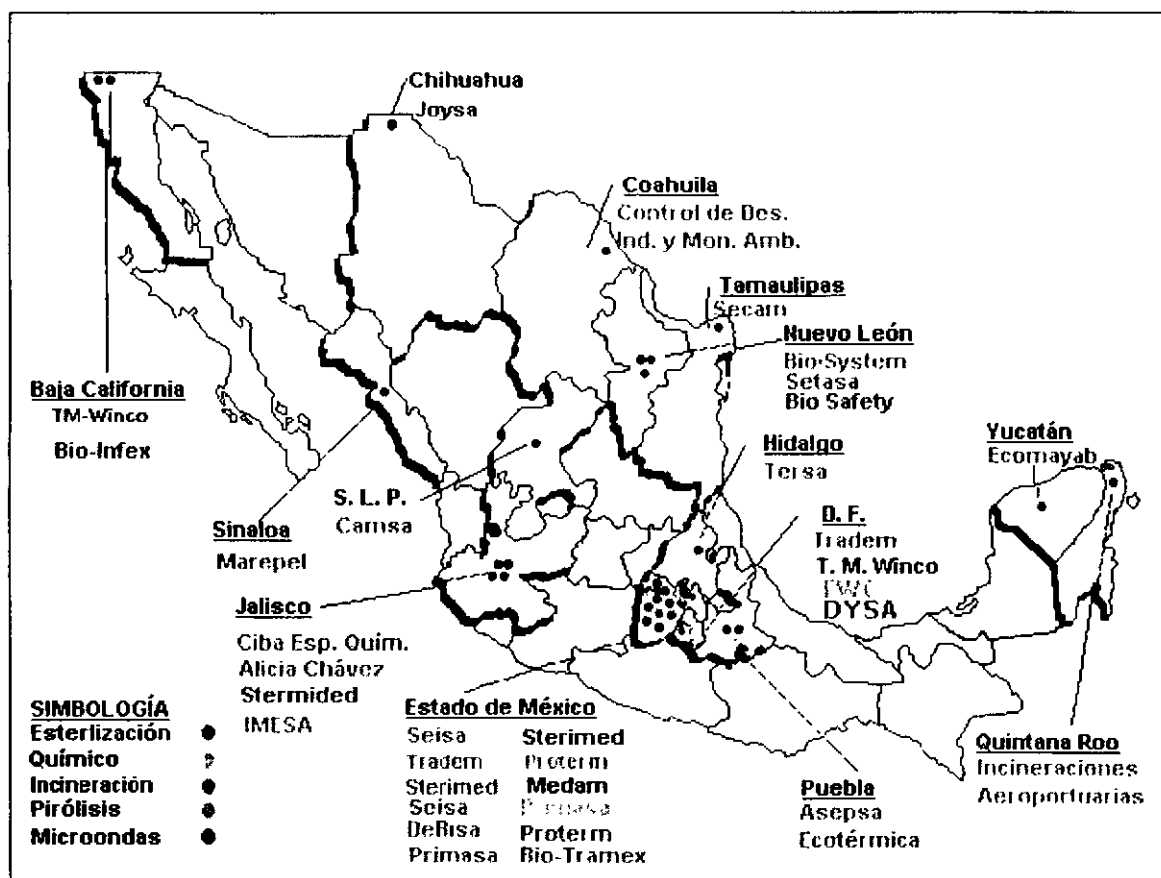
---



## ***Capacidades instaladas Ton/d RPBI***

- ❖ 22 instalaciones con 31 equipos
  - 6 incineradores menores a 2 (27%)
  - 13 incineradores entre 2 y 4 (59%)
  - 3 incineradores mayores a 4 (14%)
  - mínima 0.36
  - máxima 14.00
  - capacidad total 69.54

# Distribución geográfica de la infraestructura para el tratamiento de los residuos biológico-infecciosos en México

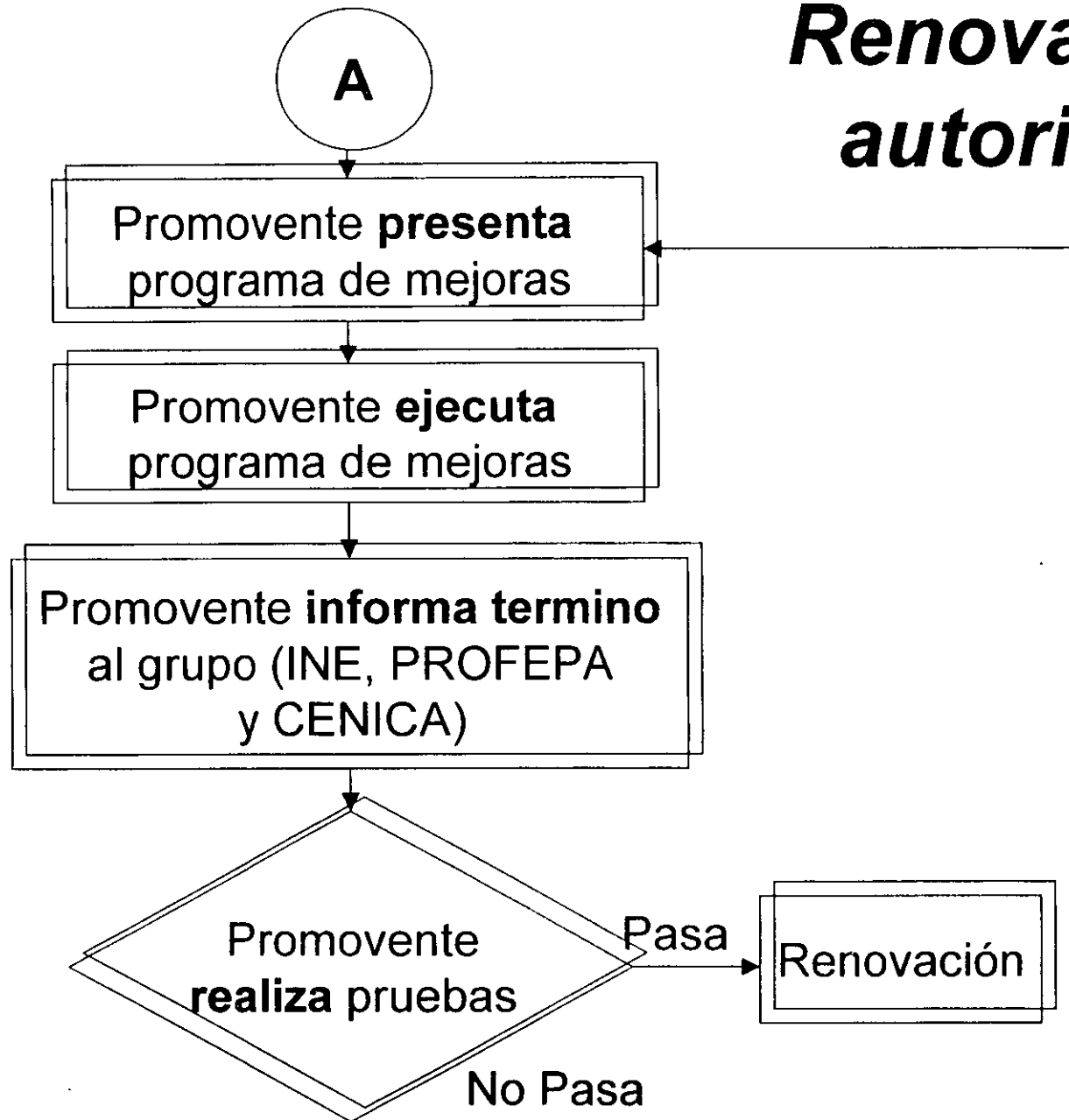


ENTIDAD FEDERATIVA	INFRAESTRUCTURA Equipos	CAPACIDAD Kg/hr
Baja California	2	1280
Coahuila	1	200
Chihuahua	1	208
Distrito Federal	10	1596
Estado de México	16	12404
Hidalgo	1	1000
Jalisco	4	2728
Nuevo León	4	1020
Puebla	2	550
Quintana Roo	1	300
San Luis Potosí	1	90
Sinaloa	1	200
Tamaulipas	2	220
Yucatán	1	270
<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>22086</b>

## ***Incineración en México***

- ❖ La incineración como método de tratamiento ha ayudado a resolver una problemática de disposición de residuos
- ❖ Se autorizó la incineración sin contar con un marco regulatorio
- ❖ Se autorizaron incineradores sin un criterio homogéneo
- ❖ No se realizaron estudios de mercado, lo que provocó que se concentrarán principalmente en la parte central del país

# Renovación de autorización





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

# **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**



**TEMA**

**PROCEDIMIENTO DE RESTAURACIÓN BIOLÓGICA**

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# 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

### CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUERDO A SU BASE DE FUNCIONAMIENTO

**Biológicas:**

biorremediación, fitorremediación

**Físicoquímicas:**

solidificación, estabilización, microencapsulación

**Térmicas:**

incineración, desorción térmica, inyección de vapor

### CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE ACUERDO A SU EFECTO SOBRE LOS CONTAMINANTES

**Retención:**

fixación, microencapsulación, vitrificación, solidificación/estabilización

**Extracción o separación:**

extracción de vapores, air stripping, filtración por carbón activado, extracción de producto libre

**Transformación:**

biorremediación, fitorremediación, incineración

### TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN

Características

- ✓ económicas: más baratas que otras tecnologías
- ✓ efectivas: los contaminantes son realmente transformados
- ✓ versátiles: el proceso se adapta a las condiciones del sitio según sus requerimientos
- ✓ seguras: amables con el ambiente

### LA BIORREMEDIACIÓN FUNCIONA PARA:

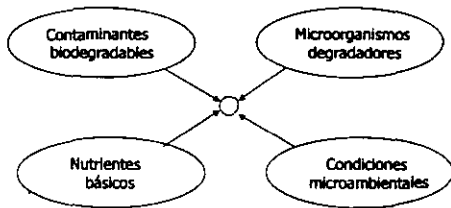
COMPUESTOS ORGÁNICOS EN SUELOS Y CUERPOS DE AGUA BIODEGRADABLES O BIOTRANSFORMABLES

COMPUESTOS INORGÁNICOS EN CUERPOS DE AGUA BIOACUMULABLES O BIOTRANSFORMABLES

COMPUESTOS INORGÁNICOS EN SUELOS BIOTRANSFORMABLES

NO FUNCIONA PARA:  
COMPUESTOS INORGÁNICOS RECALCITRANTES  
(son no-biodegradables)

Para que ocurra la biorremediación se requiere ....



### BIODEGRADACIÓN

CONTAMINANTES + BACTERIAS + NUTRIENTES

condiciones favorables  
(pH, oxígeno, humedad)

BIÓXIDO DE CARBONO

### BIOTRANSFORMACIÓN

CONTAMINANTES + BACTERIAS + NUTRIENTES

condiciones favorables  
(pH, oxígeno, humedad)

COMPUESTOS QUÍMICAMENTE DIFERENTES

### BIOACUMULACIÓN

CONTAMINANTES

células

### CARACTERÍSTICAS MICROBIANAS DEL SUELO

- baja densidad microbiana ( $10^8 - 10^7$  bacterias/g suelo)
- microorganismos adheridos a las partículas del suelo
- microorganismos aclimatados a una gran variedad de compuestos orgánicos para satisfacer sus requerimientos nutricionales

### TIPOS DE MICROORGANISMOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

	TEMPERATURA °C	
	INTERVALO	ÓPTIMO
psicrófilos	-2 a 30	12 a 18
mesófilos	20 a 45	25 a 40
termófilos	45 a 75	55 a 65

**INTERVALOS DE pH PARA EL CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS**

	mínimo	óptimo	máximo
bacterias	3-5	6.5-7.5	8-10
levaduras	2-3	4.5-5.5	7-8
hongos	1-2	4.5-5.5	7-8

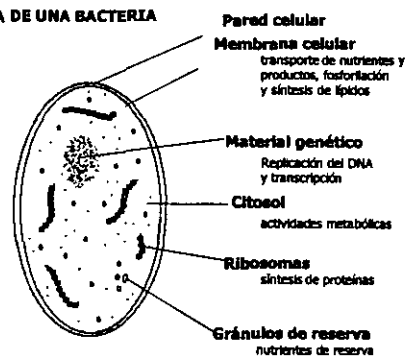
**TIPOS DE MICROORGANISMOS INVOLUCRADOS EN LA BIODEGRADACIÓN O BIOTRANSFORMACIÓN DE CONTAMINANTES**

- Bacterias
- Hongos
- Levaduras
- Actinomicetos
- Algas

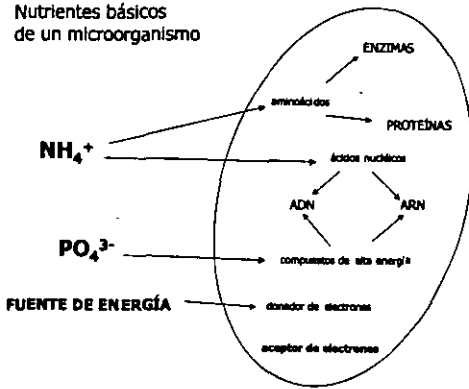
**ATRIBUTOS DE LAS BACTERIAS**

- fueron los primeros microorganismos que aparecieron en la tierra
- su velocidad de crecimiento es mayor que la de otros microorganismos
- poseen alta frecuencia de mutación
- realizan con facilidad la transferencia de material genético (plásmidos, transposones)
- tienen la más amplia versatilidad bioquímica

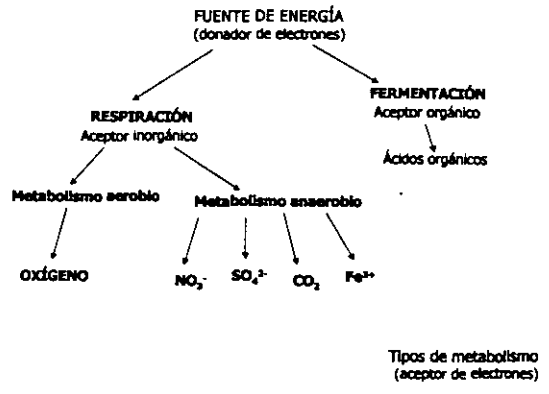
**ESTRUCTURA DE UNA BACTERIA**



**Nutrientes básicos de un microorganismo**



**FUENTE DE ENERGÍA (donador de electrones)**

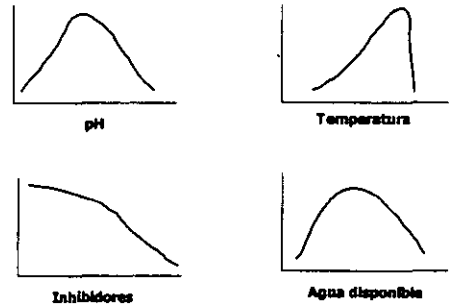




### EFACTORES DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN EL SUELO

- pH
- temperatura
- presencia de tóxicos
- disponibilidad de oxígeno
- biodisponibilidad de los contaminantes
- biodegradabilidad de los contaminantes
- contenido de agua disponible

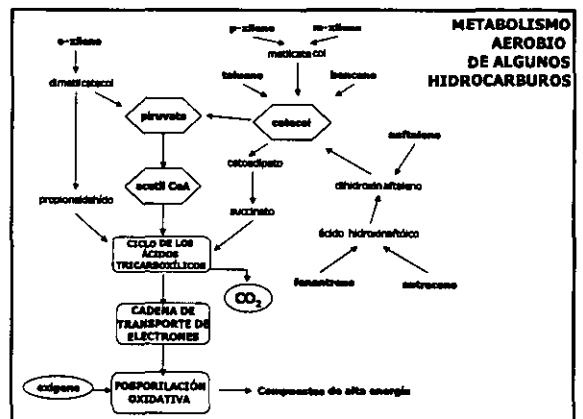
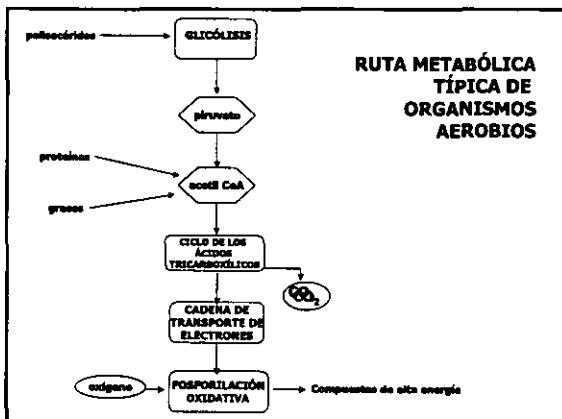
### RESPUESTA SOBRE LA ACTIVIDAD MICROBIANA

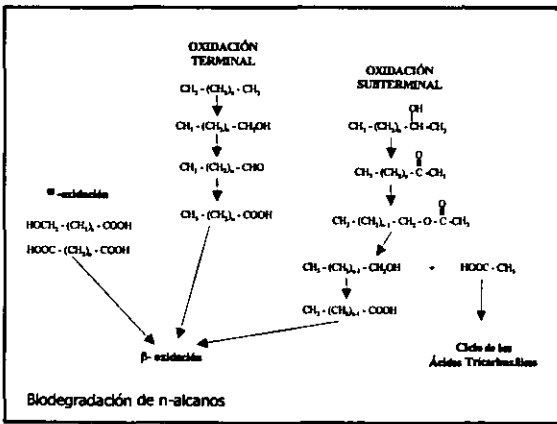
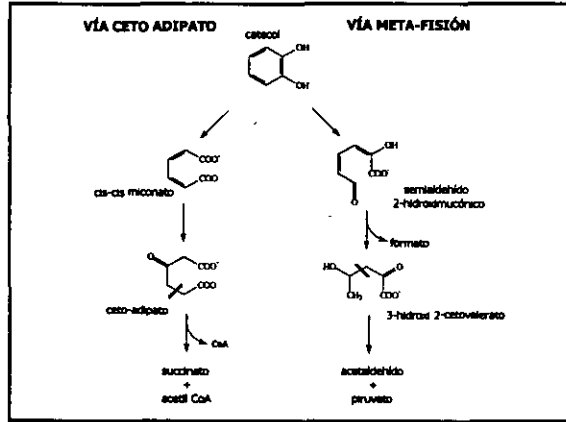
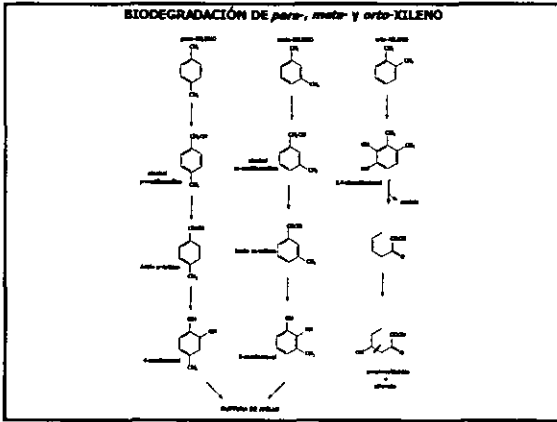
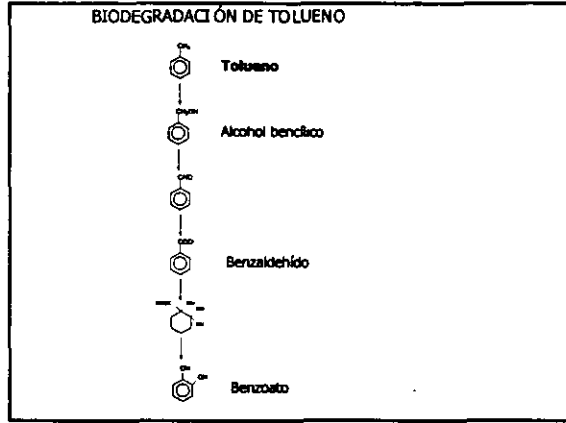
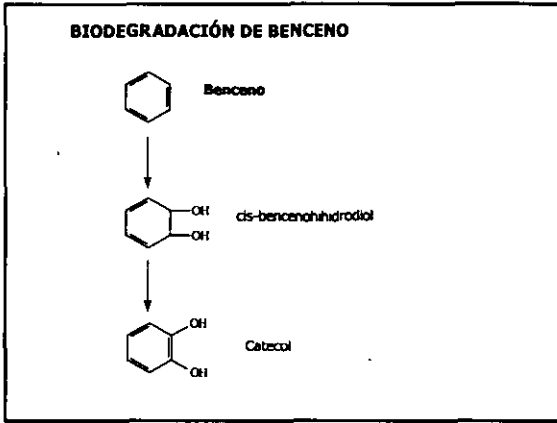


### DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN

- largos tiempos de tratamiento respecto a otras tecnologías
- no aplica cuando se tienen:
  - ✓ materiales geológicos impermeables
  - ✓ presencia de metales pesados inhibidores de la actividad microbiana
  - ✓ compuestos orgánicos altamente halogenados

### Rutas de degradación de hidrocarburos





### POTENCIAL RELATIVO DE BIODEGRADACIÓN

Mono-Aromáticos

Alcanos de cadena lineal

Alcanos ramificados

Cicloalcanos saturados (Naftenos)

Poliaromáticos

Menor potencial

## 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

↓

#### 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:

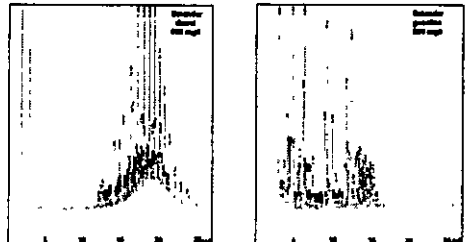
- √ tamaño
- √ forma
- √ heterogeneidad
- √ dirección preferencial del flujo

### CARACTERIZACIÓN DE CONTAMINANTES

características del "alimento" para los microorganismos:

- √ tipo
- √ diversidad
- √ concentración
- √ posibles inhibidores de la actividad microbiana

### Perfiles cromatográficos de diesel y gasolina EPA 8015 B



### CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

características del microambiente del suelo o subsuelo

- √ pH
- √ nutrientes naturales
- √ interacción con los contaminantes
- √ tipo de matriz

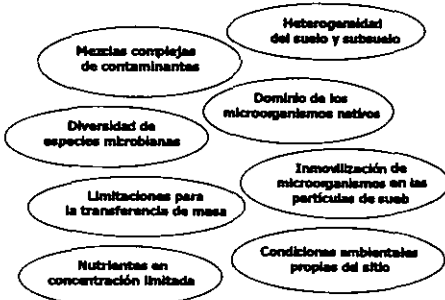
### CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA\*

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)
- √ con genes catabólicos (*xyIE*, *ndoB*, *alkB*)

\*puede aplicarse también a inóculos y preparaciones comerciales

En un sitio contaminado se tienen ....



## BIORREMEDIACIÓN

ATENUACIÓN NATURAL

PRODUCCIÓN DE INÓCULOS (Bioincremento)

FERTILIZACIÓN (Bioestimulación)

PRODUCTOS COMERCIALES (Bioincremento)

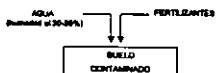
#### ATENUACIÓN NATURAL



#### BIOAUMENTACIÓN



#### BIOESTIMULACIÓN



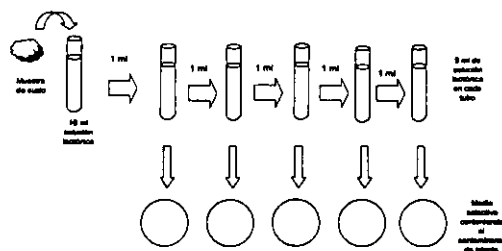
#### BIOCOMPOSTEO



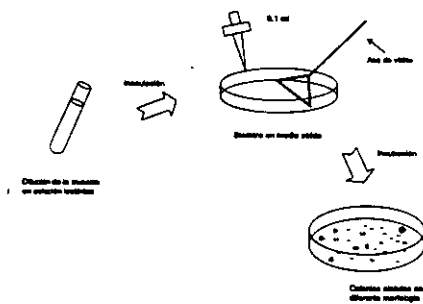
# PRODUCCIÓN DE INÓCULOS

## Caracterización del suelo

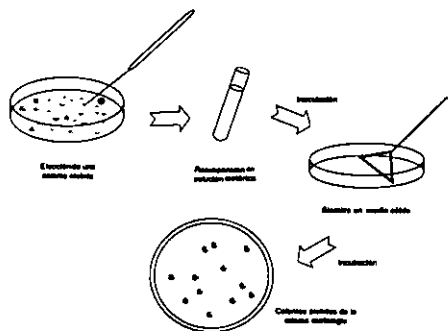
Parámetro	Concentración
pH	8.38
humedad (%)	3.63
materia orgánica (%)	18.54
fosfatos (mg/kg)	0.33
nitrógeno total (mg/kg)	457.71
nitrógeno amoniacal (mg/kg)	372.06
<b>bacterias degradadoras de diesel industrial (ufc/g de suelo)</b>	<b>3.49 x 10<sup>4</sup></b>



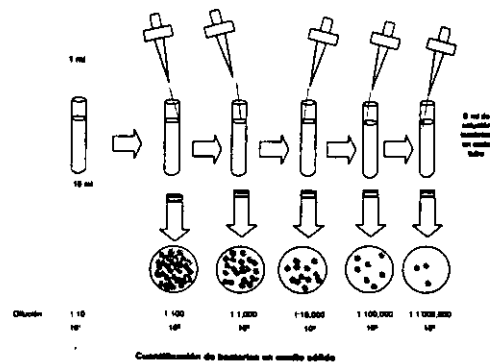
Alimentación de bacterias en medio sólido por diluciones



Siembra para aislamiento de bacterias en medio sólido



Siembra para purificación y enriquecimiento de bacterias degradadoras en medio sólido



Cuantificación de bacterias en medio sólido

## PRODUCTOS COMERCIALES

- concentrados bacterianos
- concentrados enzimáticos
- fertilizantes
- agentes tensoactivos (surfactantes)
- "oxigenadores"

## OPCIONES DE OPERACIÓN

---

### en el sitio (*in-situ*)

el tratamiento se realiza en el propio sitio; se utiliza cuando la contaminación del subsuelo es profunda y/o se alcanza el manto freático

## OPCIONES DE OPERACIÓN

---

### sobre el sitio (*on-site*)

se utiliza cuando la contaminación está en el agua subterránea, la cual se extrae para ser tratada en reactores colocados en la superficie; también se usa en suelos que son excavados para ser tratados en la superficie a un lado de la excavación, pero sin necesidad de ser transportados a otro sitio

## OPCIONES DE OPERACIÓN

---

### fuera del sitio (*off-site*)

se utiliza cuando es necesario excavar el suelo contaminado y llevarlo a otro sitio para su tratamiento

## TIPOS DE BIORREACTORES

BIOPILAS

BIOCELDAS

BIOCULTIVO  
(Land-farming)

AGITADOS  
Y  
AEREADOS

### ATENUACIÓN NATURAL

DISMINUCIÓN NATURAL DE LA  
CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES  
EN SUELO Y SUBSUELO



RIESGO A LA SALUD

### ATENUACIÓN NATURAL

BIODEGRADACIÓN QUE REALIZA LA  
FLORA NATIVA  
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN EN CASCADA  
DE LOS DIFERENTES  
ACEPTORES DE ELECTRONES DISPONIBLES:

- ✓ Oxígeno
- ✓ Nitratos
- ✓ Sulfatos
- ✓ Ion férrico
- ✓ 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

## Pruebas de biotratabilidad

### NIVELES DE OPERACIÓN PARA LAS PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD

- ✓ Demostración en campo
  - ✓ Mesocosmos
    - ✓ Microcosmos
- } laboratorio

#### PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD DE SUELOS A NIVEL MESOCOSMOS

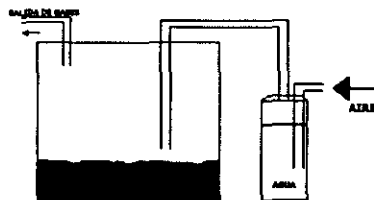
##### CHAROLAS ABIERTAS

Adicionar agua para mantener los niveles de humedad en el suelo



#### PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD DE SUELO A NIVEL MESOCOSMOS

##### BIORREACTOR CERRADO



#### PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD

##### SEGUIMIENTO EN EL LABORATORIO

- Biodegradación de contaminantes
  - Consumo de oxígeno
  - Generación de CO<sub>2</sub>
  - Consumo de nutrientes



##### RESULTADOS

- ✓ Datos cinéticos
- ✓ Requerimiento de nutrientes
- ✓ Limitaciones de la actividad metabólica

#### INFORMACIÓN QUE SURGE DE LAS PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD

- ✓ forma de operación a escala real
- ✓ estrategia de seguimiento y control del proceso
- ✓ requerimientos de materiales
- ✓ tiempo de ejecución
- ✓ costo





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

### **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

**MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO  
Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

**TEMA  
CASO PRÁCTICO  
EXTRACCIÓN DE VAPORES**

**EXPOSITOR: ING. MARTÍN MIRANDA  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE 2001**

### INTRODUCCIÓN

EL VENTEO DE SUELOS *IN SITU* ES UN TRATAMIENTO ESPECIALMENTE ATRACTIVO PORQUE EL SUELO ES TRATADO EN EL MISMO SITIO, SIN REQUERIR EQUIPAMIENTO SOFISTICADO, Y EL COSTO ES TÍPICAMENTE MENOR QUE EN OTRAS OPCIONES.

---

---

---

---

---

---

---

---

### INTRODUCCIÓN

•ALTERNATIVA TECNICA Y ECONOMICAMENTE EFECTIVA PARA SITIOS CONTAMINADOS CON COMPUESTOS RELATIVAMENTE VOLATILES

•ACOPLA POZOS DE EXTRACCIÓN Y BOMBAS DE VACÍO PARA REMOVER VAPORES DE LA ZONA VADOSA

•SISTEMAS COMPLEJOS PUEDEN INCORPORAR TRINCHERAS, POZOS DE INYECCION DE AIRE, POZOS PASIVOS Y SELLOS SUPERFICIALES

•REQUIERE TRATAR LOS VAPORES EXTRAIDOS

---

---

---

---

---

---

---

---

### INTRODUCCIÓN

MEDIANTE LA APLICACIÓN DE VACÍO Y REMOCIÓN DE VAPORES DE LOS POZOS DE EXTRACCIÓN, SE INDUCE EL FLUJO DE VAPOR A TRAVÉS DE LA ZONA INSATURADA. LOS CONTAMINANTES SON VOLATILIZADOS DESDE LA MATRIZ DE SUELO Y SON TRANSPORTADOS POR EL FLUJO DE GAS (PRINCIPALMENTE AIRE) HACIA LOS POZOS DE EXTRACCIÓN.

---

---

---

---

---

---

---

---

## INTRODUCCIÓN

### FACTORES PRINCIPALES

- COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CONTAMINANTE
- LAS VELOCIDADES DE FLUJO DE VAPOR A TRAVÉS DE LA ZONA INSATURADA
- RUTA DE FLUJO INDUCIDA EN RELACIÓN CON LA LOCALIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

---

---

---

---

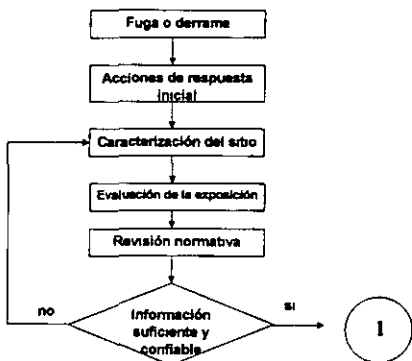
---

---

---

---

### DIAGRAMA GENERAL DE ACTIVIDADES



---

---

---

---

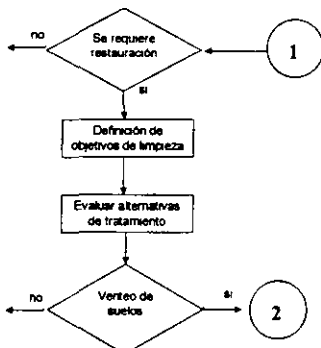
---

---

---

---

### DIAGRAMA GENERAL DE ACTIVIDADES



---

---

---

---

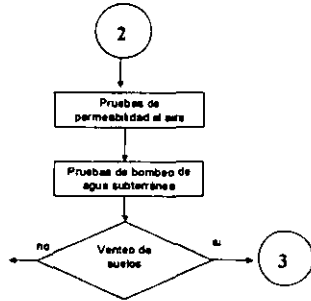
---

---

---

---

**DIAGRAMA GENERAL DE ACTIVIDADES**




---

---

---

---

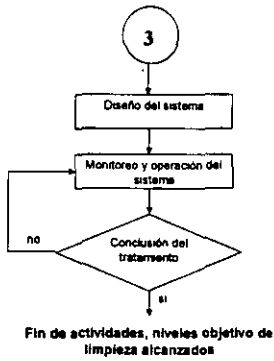
---

---

---

---

**DIAGRAMA GENERAL DE ACTIVIDADES**




---

---

---

---

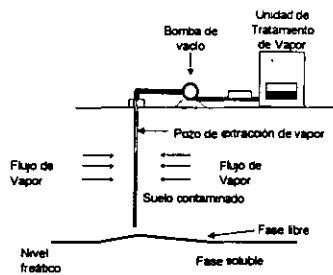
---

---

---

---

**ESQUEMA BÁSICO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE VAPORES EN SUELO**




---

---

---

---

---

---

---

---

**CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

**1. ACCIONES DE RESPUESTA INICIAL  
MEDIDAS DE MITIGACIÓN  
(CORTO PLAZO: DÍAS)**

**2. CARACTERIZACIÓN DETALLADA  
(DETERMINAR LAS RUTAS DE MIGRACIÓN  
POTENCIALES Y EVALUAR EL POSIBLE  
IMPACTO AMBIENTAL EN LAS CONDICIONES  
ACTUALES Y LA FACTIBILIDAD DE  
MIGRACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL  
FUTURO)**

---

---

---

---

---

---

---

---

**CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

**INVESTIGACIÓN DE ANTECEDENTES  
(Registros, planos, registros, entrevistas)**

**EVALUACIÓN PRELIMINAR DE SITIO  
(Observación y/o técnicas preliminares de  
evaluación, planteamiento inicial de modelo)**

**CARACTERIZACIÓN DETALLADA DEL SITIO  
(Metodologías directas e indirectas, sondeos,  
instalación de pozos de monitoreo de agua)**

**CARACTERIZACIÓN DE CONTAMINANTES  
(Análisis fisicoquímicos cuantitativos)**

---

---

---

---

---

---

---

---

**CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

**INFORMACIÓN ESPECÍFICA**

**Características subsuperficiales – geología del sitio  
(Estratigrafía, tipo de suelo, estimación de  
permeabilidades, temperaturas)**

**Características subsuperficiales – hidrogeología del  
sitio  
(Profundidad de manto freático, gradiente, estimación  
de conductividad hidráulica)**

**Delineación de contaminantes  
(Distribución zona saturada/no saturada, fase libre,  
extensión de zona contaminada)**

---

---

---

---

---

---

---

---

**CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

**EJEMPLO DE METODOLOGÍAS ANALÍTICAS PARA ANÁLISIS DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS**

EPA 8240, 8260, 8020, 8010 – Compuestos orgánicos volátiles (VOC's).  
EPA 8270 – Compuestos orgánicos semi – volátiles.  
EPA 418.1 - Hidrocarburos totales de petróleo (TPH).  
EPA 8015 B – Hidrocarburos base diesel, hidrocarburos base gasolina.  
EPA 8310, 8100, 8270 – Hidrocarburos aromáticos polinucleares.

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

- 1.- ¿CONCENTRACIONES DE VAPOR ESPERADAS?
- 2.- ¿CONCENTRACIÓN SUFICIENTEMENTE GRANDE BAJO CONDICIONES IDEALES DE FLUJO DE VAPOR (100 – 1000 PIES CUADRADOS POR MINUTO), PARA ALCANZAR VELOCIDADES DE REMOCIÓN ACEPTABLES?
- 3.- ¿RANGO DE VELOCIDADES DE FLUJO DE VAPOR QUE PUEDEN SER REALMENTE ALCANZADAS?

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

- 4.- ¿LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTE Y LAS VELOCIDADES DE FLUJO DE VAPOR REALES PRODUCIRÁN VELOCIDADES DE REMOCIÓN ACEPTABLES?
5. ¿QUÉ RESIDUOS, SI LOS HAY, PERMANECERÁN EN EL SUELO?, ¿QUÉ CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN DE VAPOR Y SU CONCENTRACIÓN OCURRIRÁN CON EL TIEMPO?, ¿CÓMO SE RELACIONAN ESTOS VALORES CON LOS REQUERIMIENTOS REGULATORIOS?
- 6.- ¿CABE ESPERAR ALGÚN EFECTO NEGATIVO SOBRE EL SUELO POR LA APLICACIÓN DEL VENTEO?

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE**

**1.- ¿CONCENTRACIONES DE VAPOR ESPERADAS?**

La primera pregunta puede ser contestada con base en los resultados de las investigaciones suelo - vapor, análisis de fase vapor en las muestras de suelo contaminado, o modelos de equilibrio de vapor. En algunos casos simplemente conociendo los compuestos presentes es suficiente para estimar si el venteo es practicable. En ausencia de datos de investigación de vapores en suelo, las concentraciones de vapores contaminantes pueden ser estimadas.

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE**

**1.- ¿CONCENTRACIONES DE VAPOR ESPERADAS?**

(1)

$C_{est}$  = estimado de concentración de vapor contaminante [mg/L]  
 $x_i$  = fracción mol del compuesto  $i$  en la fase líquida residual ( $x_i = 1$  para un compuesto único).  
 $P_i^v$  = presión de vapor de componente puro a la temperatura  $T$  [atm]  
 $M_w$  = peso molecular del componente  $i$  [mg/mol]  
 $R$  = Constante universal de los gases =  $0.821 \text{ l-atm/mol}^\circ\text{K}$   
 $T$  = Temperatura absoluta del contaminante residual

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE**

**2.- ¿CONCENTRACIÓN SUFICIENTEMENTE GRANDE BAJO CONDICIONES IDEALES DE FLUJO DE VAPOR (100 - 1000 PIES CUADRADOS POR MINUTO), PARA ALCANZAR VELOCIDADES DE REMOCIÓN ACEPTABLES?**

La segunda pregunta es contestada multiplicando la concentración estimada  $C_{est}$  por un rango de velocidades razonables de flujo,  $Q$

$$R_{est} = C_{est} Q \quad (2)$$

$R_{est}$  denota la velocidad estimada de remoción, y  $C_{est}$  y  $Q$  deben expresarse en unidades consistentes. En operaciones documentadas se reportan velocidades de flujo de vapor de 10 - 100 pies cuadrados por minuto, aunque velocidades de 100 - 1000 son alcanzables para suelos arenosos o mediante un número elevado de pozos

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE**

Los valores de  $C_{est}$ , se manejan también en  $ppm_{CH_4}$

(3)

Para instrumentos de campo calibrados con otros compuestos (butano, propano), los valores de ppm son convertidos a (mg/L) reemplazando el peso molecular de  $CH_4$  en la ecuación 3 por el peso molecular del compuesto de calibración.

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

Valores aceptables o deseables de velocidad de remoción  $R_{aceptable}$  pueden ser determinados dividiendo la masa liberada estimada  $M_{lib}$ , entre el tiempo máximo aceptable de limpieza t:

$$R_{aceptable} = M_{lib}/t \quad (4)$$

Generalmente,  $R_{est}$  menores a 1 kg/día serán inaceptables en la mayoría de los casos. Los suelos contaminados con componentes que tienen concentraciones de vapor saturado menores a 0.3 mg/L (450  $ppm_{CH_4}$ ) no serán buenos candidatos, a menos que las velocidades de flujo excedan 100 pies cuadrados por minuto. Como regla muy general, esto puede ser aplicable a compuestos con puntos de ebullición superiores a 150°C o presiones de vapor de componente puro menores a 0.0001 atm a la temperatura subterránea.

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

3.- ¿Qué rango de velocidades de flujo de vapor pueden ser realmente alcanzadas?

La ecuación siguiente predice velocidad de flujo por unidad de grosor de ranura de pozo Q/H [ $cm^2/s$ ]

(5)

donde:

k = permeabilidad de suelo al flujo de aire [ $cm^2$ ] o [darcy]

m = viscosidad del aire =  $1.8 \times 10^{-4}$  g/cm-s o 0.018 cp

$p_w$  = presión absoluta en el pozo de extracción [ $g/cm-s^2$ ] o [atm]

$P_{atm}$  = presión ambiente absoluta (aproximadamente  $1.01 \times 10^4$  g/cm-s<sup>2</sup> o 1 atm)

$R_w$  = radio del pozo de extracción de vapor [cm]

$R_i$  = radio de influencia del pozo de extracción de vapor [cm]

---

---

---

---

---

---

---

---



**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

4.- ¿Las concentraciones de contaminante y las velocidades de flujo de vapor reales producirán velocidades de remoción aceptables?

Para este caso "óptimo" las velocidades de remoción son dadas por la ecuación 2.

$$R_{est} = C_{est} Q \quad (2)$$

Otras condiciones menos óptimas son a menudo encontradas en casos reales, y es útil cuantificar qué tanto disminuirá la velocidad de remoción con relación al valor predicho en la ecuación 2

---

---

---

---

---

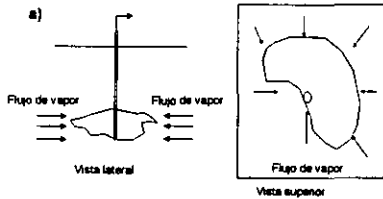
---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

4.- ¿Las concentraciones de contaminante y las velocidades de flujo de vapor reales producirán velocidades de remoción aceptables?



---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

Una fracción F del vapor fluye a través del suelo no contaminado. La fracción puede ser estimada en forma muy aproximada evaluando la localización del pozo en relación con la distribución de contaminantes. En la figura aparentemente 25 % del vapor fluye a través de suelo no contaminado. La máxima velocidad de remoción para este caso es entonces:

$$R_{est} = (1 - F)C_{est} Q \quad (6)$$

---

---

---

---

---

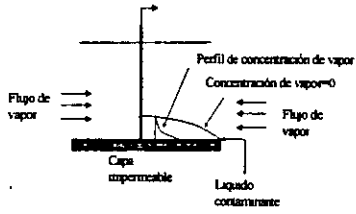
---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

b)



En este caso, la difusión constituye la resistencia más fuerte a la transferencia de masa

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

$$R_{est} = hQC_{est}$$

$$h = (1/3H)(6Dmk)^{1/2} [\ln(R_2/R_w)/(P_{atm} - P_w)]^{1/2} (R_2^2 - R_1^2)^{1/2} \quad (7)$$

Donde.

- h = eficiencia relativa a la máxima velocidad de remoción
- D = coeficiente efectivo de difusión suelo - vapor [cm<sup>2</sup>/s]
- m = viscosidad del aire = 1.8x10<sup>-4</sup> g/cm-s
- k = permeabilidad de suelo al flujo de aire [cm<sup>2</sup>]
- H = Grosor del intervalo ranurado [cm]
- R<sub>1</sub> = radio de influencia del pozo de extracción de vapor [cm]
- R<sub>w</sub> = radio del pozo de venteo [cm]
- P<sub>w</sub> = presión absoluta en el pozo de venteo [g/cm-s<sup>2</sup>]
- P<sub>atm</sub> = presión ambiente absoluta (aproximadamente 1 01 x 10<sup>4</sup> g/cm-s<sup>2</sup>)
- R<sub>w</sub> = radio del pozo de extracción de vapor [cm]
- R<sub>1</sub> < r < R<sub>2</sub> = Define la región en la cual la contaminación está presente

---

---

---

---

---

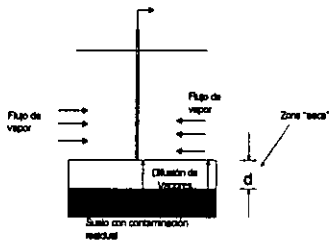
---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

c)




---

---

---

---

---

---

---

---

ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE

$$R_{est} = p(R_2^2 - R_1^2)C_{est} D/d(t) \quad (10)$$

Donde D es el coeficiente efectivo de difusión de vapor en el medio poroso (ecuaciones 8 y 9) y  $C_{est}$  es la concentración estimada de equilibrio de vapor (ecuación 1). Con el tiempo  $d(t)$  aumenta. En el caso de un sistema de un solo componente el grosor de la zona seca puede ser calculado del balance de masa:

$$\begin{aligned} r_0 C_s (dd/dt) &= C_{est} D/d(t) & (11) \\ R_{est} &= p(R_2^2 - R_1^2)(C_{est} DC_s r_0 / 2t)^{1/2} \end{aligned}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE

Donde  $C_s$  es el nivel residual de contaminación en la zona de baja permeabilidad [gramos de contaminación / gramos de suelo]. La solución a las ecuaciones 10 y 11 resulta en la siguiente ecuación que predice el cambio en la velocidad de remoción con el tiempo.

(12)

---

---

---

---

---

---

---

---

ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE

5. ¿Qué residuos, si los hay, permanecerán en el suelo?, ¿Qué cambios en la composición de vapor y su concentración ocurrirán con el tiempo?, ¿Cómo se relacionan estos valores con los requerimientos regulatorios?

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

Conforme los contaminantes son removidos, el nivel de contaminación residual de suelo decrece y las composiciones residuales de la mezcla se enriquecen en los compuestos menos volátiles. Ambos procesos disminuyen las concentraciones de vapor, y las velocidades de remoción.

Existen limitaciones prácticas sobre los niveles de contaminación que pueden ser alcanzadas por esta tecnología. El conocimiento de estas limitaciones es necesario para establecer los objetivos de limpieza de una forma realista y para diseñar sistemas de venteo efectivos. Las predicciones de modelos computacionales pueden ser usadas para estimar las velocidades de remoción (si se cuenta con una velocidad de flujo de vapor), o de forma alternativa, las predicciones pueden ser usadas para estimar la velocidad de flujo de vapor requerida.

---

---

---

---

---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**

6.- ¿Cabe esperar algún efecto negativo sobre el suelo por la aplicación del venteo?

Es posible que el venteo induzca la migración de vapores contaminantes provenientes de fuentes ajenas al sitio hacia los pozos de extracción.

La aplicación de vacío durante la extracción en los pozos puede también causar ascenso local en el nivel freático. Como medidas de control, pueden aplicarse los pozos pasivos, de inyección y los sistemas de bombeo de agua subterránea.

---

---

---

---

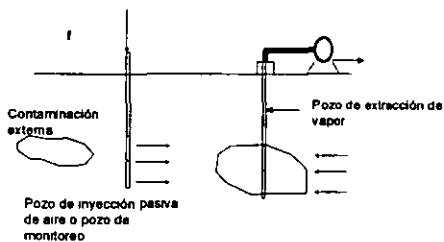
---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**



**Uso de pozo pasivo para prevenir migración de vapores de contaminación externa**

---

---

---

---

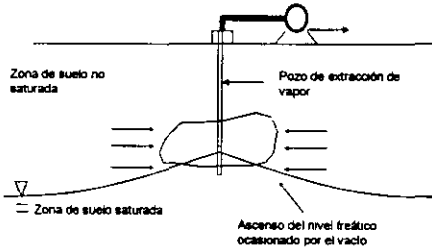
---

---

---

---

**ELECCIÓN DEL VENTEO COMO UNA ALTERNATIVA VIABLE.**



**Ascenso en el nivel freático ocasionado por la aplicación de vacío**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Información de diseño.**

Después de resolver las cuestiones previamente planteadas llega el momento de evaluar las respuestas obtenidas para decidir si la aplicación del venteo todavía es considerada una buena opción. Si este es el caso, entonces se requiere de información más detallada para la implementación propiamente dicha del sistema. Específicamente, la permeabilidad del suelo al flujo de vapor, las concentraciones de vapor y las características del acuífero deben ser determinadas

---

---

---

---

---

---

---

---

**Pruebas de permeabilidad al aire**

Una forma de realizar esta determinación consiste en remover vapores a una velocidad constante de un pozo de extracción, mientras se monitorea contra el tiempo la distribución transiente de presión subsuperficial en puntos prefijados

La velocidad de flujo y la distribución de presión transiente son usadas para estimar la permeabilidad del suelo al flujo de vapor. El cambio esperado en la distribución de presión subsuperficial con el tiempo  $P'(r,t)$  puede describirse por la siguiente expresión.

(13)

---

---

---

---

---

---

---

---

Para  $(r^2vm/4kP_{Atm}t) < 0.1$ , la ecuación 13 puede ser aproximada por

(14)

Donde:

$P'$  = Presión manométrica medida a la distancia  $r$  y tiempo  $t$ .

$m$  = Grosor del estrato

$r$  = distancia radial desde el pozo de extracción de vapor

$k$  = permeabilidad del suelo al flujo de aire

$\mu$  = viscosidad del aire =  $1.8 \times 10^{-4}$  g/cm-s

$v$  = fracción de suelo vacía

$t$  = tiempo

$Q$  = velocidad volumétrica de flujo de vapor del pozo de extracción

$P_{Atm}$  = presión ambiente atmosférica = 1.0 atm =  $1.013 \times 10^6$  g/cm-s<sup>2</sup>

---

---

---

---

---

---

---

---

La ecuación 14 predice que la graficación de  $P'$  contra  $\ln(t)$  será igual a una línea recta con pendiente  $A$  y ordenada al origen  $B$  igual a:

(15)

La permeabilidad al flujo de vapor puede ser entonces calculada de los datos mediante uno de dos métodos. El primero es aplicable cuando  $Q$  y  $m$  son conocidos. La pendiente calculada  $A$  es entonces usada.

(16)

---

---

---

---

---

---

---

---

El segundo método debe ser usado cuando  $Q$  o  $m$  no se conocen, en este caso ambos valores  $A$  y  $B$  son usados:

(17)

La ecuación 13 también puede ser utilizada para elegir las localizaciones de los puntos de monitoreo de presión subterránea antes de realizar la determinación de permeabilidad de aire, proponiendo una estimación de  $k$ , y la velocidad del flujo a ser usado.

---

---

---

---

---

---

---

---

**Pruebas de bombeo de agua subterránea.**

Dos parámetros del acuífero se necesitan para el diseño: transmisividad promedio  $T$  y coeficiente de almacenamiento  $S$ . Estos parámetros pueden ser estimados usando los resultados de la determinación estándar de bombeo transiente de agua subterránea con una velocidad constante de bombeo. Usando los valores estimados, la velocidad de bombeo requerida puede ser calculada del siguiente modo:

$$Q = 4\pi TS(r,t)/W(u) \quad (19)$$

Donde:  $W(u)$  es la función de pozo de  $u = Sr^2/4Tt$ , y  $s(r,t)$  es el abatimiento requerido a la distancia  $r$  y al tiempo de bombeo igual a  $t$ .

---

---

---

---

---

---

---

---

**Diseño del sistema.**

En esta etapa deben ser considerados los elementos para el diseño del sistema de venteo de suelos *in situ*. Aún contando con todos los datos requeridos y siguiendo un proceso estructurado en la toma de decisiones, la intuición y la experiencia pueden jugar un papel muy importante. No existen substitutos para una correcta comprensión fundamental de los procesos de flujo de vapor, fenómenos de transporte y flujo de agua subterránea.

---

---

---

---

---

---

---

---

**Diseño del sistema.**

**Selección del número de pozos de extracción.**

El número mayor de entre los obtenidos por tres métodos que atienden, cada uno a distintos criterios, será el número recomendable. El objetivo es satisfacer los requerimientos de velocidad de remoción y alcanzar la remoción de vapor de toda la zona de contaminación.

---

---

---

---

---

---

---

---

Para el primer estimado los cambios en la composición y concentración de vapor en la contaminación residual con el tiempo son ignorados. La velocidad aceptable de remoción  $R_{\text{aceptable}}$  es calculada de la ecuación 4, mientras que la velocidad de remoción estimada de un pozo sencillo  $R_{\text{est}}$  es estimada seleccionando para ello entre las ecuaciones 2, 6, 7, o 12, dependiendo de las condiciones específicas del sitio (escenarios a, b o c). El número de pozos  $N_w$  requeridos para alcanzar la velocidad aceptable de remoción es:

$$N_w = R_{\text{aceptable}}/R_{\text{est}} \quad (20)$$

Las ecuaciones 2, 6 y 7 requieren estimados de flujo de vapor, que puede ser calculado de la ecuación 5, empleando la permeabilidad medida del suelo y el vacío de extracción de pozo elegido  $P_w$ . En este punto se debe determinar los compresores y bombas de vacío disponibles porque las características de estas unidades limitarán el rango de valores factibles para  $P_w$  y  $Q$ . Por ejemplo un compresor que puede bombear 100 pies cuadrados por minuto a 2 pulgadas de agua de vacío solamente puede bombear 10 pies cuadrados por minuto a 100 pulgadas de agua de vacío.

El segundo método, que considera los cambios en la composición con el tiempo, utiliza predicciones de modelos computacionales. Estos modelos basados en condiciones de equilibrio son usados para calcular el flujo mínimo de vapor para alcanzar un grado de restauración dado. El número mínimo requerido de pozos de extracción es igual a la velocidad mínima requerida de flujo promedio dividida entre la velocidad de flujo por pozo.



El tercer método permite determinar el número de pozos que asegure que los vapores y la contaminación residual de suelo son removidas de toda la zona de contaminación ( $N_{rem}$ ), y es simplemente igual al cociente del área de contaminación  $A_{con}$  entre el área de influencia de un solo pozo de venteo  $\pi R_i^2$ :

(21)

---

---

---

---

---

---

---

---

Lo anterior requiere un estimado de  $R_i$ , el cual define la zona en la cual se induce flujo de vapor. Un estimado de  $R_i$  puede ser obtenido a partir de la distribución radial de presión de la prueba de permeabilidad de aire y de la ecuación de distribución de presión radial en estado estacionario.

(22)

Donde  $P(r)$ ,  $P_{Atm}$  y  $R_w$  son la presión absoluta medida a la distancia  $r$  de pozo de venteo, la presión absoluta ambiental, la presión absoluta aplicada en el pozo de extracción de vapor y el radio del pozo de extracción, respectivamente

---

---

---

---

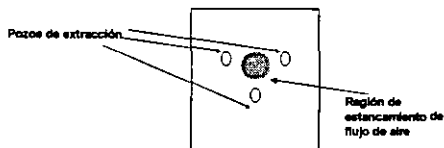
---

---

---

---

**Localización y espaciado de pozos, pozos pasivos y sellos superficiales.**



---

---

---

---

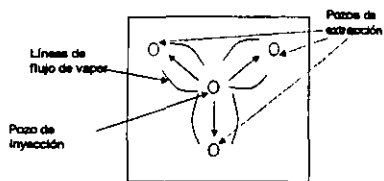
---

---

---

---

**Localización y espaciado de pozos, pozos pasivos y sellos superficiales.**



---

---

---

---

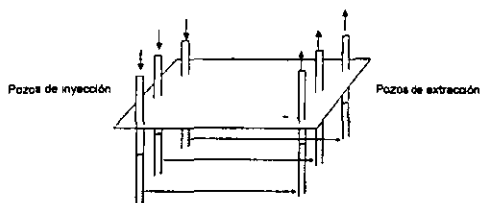
---

---

---

---

**Localización y espaciado de pozos, pozos pasivos y sellos superficiales.**



---

---

---

---

---

---

---

---

**Construcción y ranurado de pozos.**

Los pozos deben presentar ranurado únicamente a lo largo de la zona de contaminación, a menos que la permeabilidad al flujo de vapor sea tan lenta que las velocidades de remoción se puedan incrementar si se induce flujo en una capa adyacente de suelo. Las remociones estimadas para varios escenarios de limitación de transferencia de masa pueden ser calculadas de las ecuaciones 7 y 12.

---

---

---

---

---

---

---

---

### **Construcción y ranurado de pozos.**

Los pozos son construidos típicamente de tubería ranurada (PVC) El tamaño de ranura y su número por pulgada debe ser seleccionado para maximizar el área abierta de la tubería. Son similares a los pozos de monitoreo de agua subterránea en su construcción, pero no se necesita filtrar los vapores antes de entrar al pozo. El empaque filtrante debe ser, tan grueso como sea posible. Sobre la sección de medio filtrante se colocan pellets de bentonita y una lechada de cemento como sello para evitar que el ciclo de flujo de vapor se interrumpa por infiltraciones provenientes de fugas en este segmento.

---

---

---

---

---

---

---

---

### **Tratamiento de vapores extraídos**

- Unidades de combustión de vapores
- Unidades de oxidación catalítica
- Lechos de carbón activado
- Descargas directas
- Biofiltros

---

---

---

---

---

---

---

---

### **Sistemas de bombeo de agua subterránea.**

En los casos en que los suelos contaminados se ubican en las cercanías del nivel freático (por encima o por debajo), se requieren sistemas de bombeo de agua subterránea para asegurar que los suelos contaminados permanezcan expuestos al tratamiento. En el diseño del sistema de bombeo debe tenerse en cuenta que el vacío ocasionado por la extracción provoca la elevación del nivel del manto freático. Dado que este ascenso será mayor en los pozos de extracción, los pozos de bombeo se deben colocar en las cercanías de éstos. Sus sellos superficiales deben ser instalados en forma que se prevengan las infiltraciones de aire.

---

---

---

---

---

---

---

---

**Integración del sistema.**

Los componentes del sistema (bombas, pozos, unidades de tratamiento de vapores, etc.) deben combinarse para permitir la máxima flexibilidad de operación posible. Los requerimientos específicos pueden incluir:

- Válvulas separadas, medidores de flujo, manómetros para los pozos de extracción e inyección.
- Filtros de aire para remover partículas de los vapores bombeados y medidores de flujo
- Trampas para remover todo líquido de la corriente de vapor bombeada.

---

---

---

---

---

---

---

---

**Monitoreo.**

La operación debe ser monitoreada para asegurar su eficiencia y para determinar el momento adecuado de paro. Como mínimo, se debe proveer lo siguiente

- Fecha y hora de las mediciones
- Velocidades de flujo de vapor extraído e inyectado
- Lecturas de presión a cada pozo de extracción e inyección
- Composiciones y concentraciones de vapor de los pozos de extracción.
- Temperatura ambiente y subterránea.
- Nivel freático
- Adicionalmente existen algunas otras medidas, tales como:  
Concentraciones de vapores suelo-gas y composiciones.

---

---

---

---

---

---

---

---

**Determinación del término de la operación de venteo.**

Si el monitoreo se ha realizado en forma continua y adecuada, entonces se pueden aplicar los siguientes criterios

- Cantidad removida acumulada
- Concentraciones de pozos de extracción
- Composición de vapores de los pozos de extracción.
- Composición y concentración de contaminantes en fase gaseosa en suelo.
- Consecución de los niveles de limpieza objetivo

---

---

---

---

---

---

---

---

**CONCLUSIONES**

Se ha presentado una metodología sistemática para la evaluación, selección y aplicación de la tecnología de venteo de suelos en la atención de eventos de contaminación de suelo

Si bien existen bases analíticas y herramientas computacionales, en el proceso de toma de decisiones se debe reconocer la importancia de la experiencia y la intuición en lo referente a este tipo de sistemas

---

---

---

---

---

---

---

---

**CONCLUSIONES**

La concentración de vapor contaminante en la corriente extraída y la velocidad de remoción son los factores críticos para adoptar o rechazar esta metodología en cada caso específico.

En el funcionamiento real del sistema, puede ser tan importante la operación de extracción, como las actividades auxiliares de inyección, monitoreo y bombeo de manto freático

---

---

---

---

---

---

---

---

**CONCLUSIONES**

Las características geohidrológicas particulares dan la pauta en relación con los requerimientos de pozos pasivos o de inyección, así como de sistemas de bombeo

Si bien la tecnología permite abatir rápidamente las concentraciones iniciales, existe un límite, por debajo del cual la disminución de la concentración de contaminantes se va haciendo cada vez más difícil. No obstante, el método puede ser complementado con medidas adicionales posteriores e incluso simultáneas, para alcanzar los niveles de limpieza requeridos.

---

---

---

---

---

---

---

---

## ESTUDIO DE CASO.

### APLICACIÓN DEL MÉTODO DE VENTEO DE SUELOS PARA LA RESTAURACIÓN DE UN SITIO AFECTADO POR UNA FUGA DE GASOLINA.

#### Investigación preliminar del sitio.

El sitio afectado se encuentra en el interior de un predio de manejo de hidrocarburos refinados. La afectación provino de la falla de un ducto de conducción de gasolina. El estimado global de producto derramado fue de aproximadamente 12,000 litros de gasolina. Superficialmente el terreno presenta terracería con cubierta vegetal.

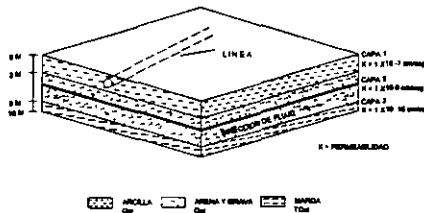


FIG. 1 DISTRIBUCIÓN DE CAPAS DE SUELO

Debido a la profundidad del ducto en el punto de la falla, se encontró que la gasolina había afectado un volumen de la capa arcillosa, además de llegar a penetrar la capa arenosa y alcanzar el manto freático.

Se detectó producto libre sobreyaciendo al nivel freático y se detectaron altas concentraciones de hidrocarburos en fase vapor y en fase líquida en la capa arenosa.

La distribución de capas en el subsuelo (Fig. 1) está formada por depósitos arcillosos de baja permeabilidad, sin embargo, en la segunda capa la permeabilidad se incrementa drásticamente por sus características areno - gravosas, facilitando la dispersión de contaminantes que hayan logrado atravesar la capa inicial. En esta segunda capa se encuentra un acuífero (Fig. 2), el cual permitió la dispersión del contaminante a través del subsuelo aunque de forma moderada, ya que el gradiente geohidráulico medido con los pozos construidos indica una estabilidad relativa en la inclinación del acuífero y una velocidad baja de flujo.

---

---

---

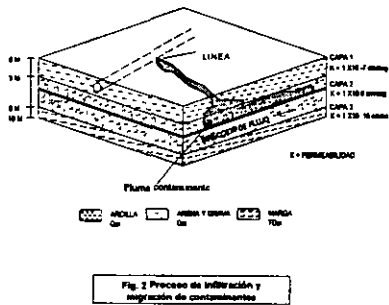
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

Los análisis físico-químicos realizados indicaron la presencia de benceno, tolueno, xilenos y etilbenceno en concentraciones (para BTEX totales), cercanas a 1,000 ppm y TPH's de 10,000 ppm.

De acuerdo con las estimaciones realizadas, se calculó que en el sitio permanecían 7,000 litros de gasolina.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Restauración del Subsuelo y Manto Freático.

La afectación existente en el estrato arcilloso fue eliminada mediante la extracción y tratamiento del suelo contaminado.

La segunda capa está constituida por arenas y gravas las cuales en su parte inferior alojan el acuífero por su capacidad de almacenamiento de agua subterránea, estas gravas presentan hidrocarburos adheridos a su estructura con valores de 10,000 ppm de TPH's

Se aplicó para el tratamiento de esta capa el método de venteo, que se define como la remoción de hidrocarburos en la zona vadosa y saturada a partir de la inyección de aire en el subsuelo y extracción de vapores. Adicionalmente se realizó la extracción y tratamiento de agua contaminada.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Aplicación del método de esquema de decisión al caso particular.

1.- ¿Qué concentraciones de vapor se espera que sean obtenidas?

Con base en composiciones típicas existentes para el producto derramado (gasolina) y empleando la ecuación 1, la concentración en TPH'S para esta gasolina es:

$$C_{est} = 240 \text{ mg/L}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

2.- ¿Es esta concentración lo suficientemente grande bajo condiciones ideales de flujo de vapor (100 – 1000 pies cuadrados por minuto), para alcanzar velocidades de remoción aceptables?

Se empleó la ecuación 4 para calcular  $R_{aceptable}$ , asumiendo  $M_{vb} = 7000$  y  $t = 150$   
 $R_{aceptable} = 47 \text{ kg/día}$

Usando la ecuación 2,  $R_{est} = C_{est} Q$

$C_{est} = 240 \text{ mg/L}$  y  $Q = 2800 \text{ L/min}$  (100 pies cuadrados por minuto)

$$R_{est} = 970$$

Que es mayor que  $R_{aceptable}$

---

---

---

---

---

---

---

---



3.- ¿Qué rango de velocidades de flujo de vapor pueden ser realmente alcanzadas?

En función de los datos del sitio, se sabe que la permeabilidad es muy alta. Usando la ecuación 5,

(5)

Las velocidades de flujo para un pozo de extracción son (considerando 0.90 atm de vacío en el pozo):

$$0.08 < Q < 0.8 \text{ m}^3/\text{m-min} \quad R_w = 5.1 \text{ cm}, R_i = 3 \text{ m}$$

El grosor de esta zona y el grosor probable de ranurado es de 2 metros. La velocidad total de flujo por cada pozo en esta zona se estima como:

$$0.16 < Q < 1.6 \text{ m}^3/\text{min}$$

4.- ¿Las concentraciones de contaminante y las velocidades de flujo de vapor reales producirán velocidades de remoción aceptables?

Usando  $C_{est} = 240 \text{ mg/L}$ , las máximas velocidades de remoción a ser obtenidas son calculadas de la ecuación 2:

$$56 \text{ kg/d} < (R_{est})_{max} < 560 \text{ kg/d}$$

Como medida de seguridad, se estimará que solamente el 50% del vapor realmente fluye a través del suelo contaminado, así que el estimado de velocidad de remoción será de la mitad de estos valores. La velocidad de remoción aceptable de  $R_{aceptable} = 47 \text{ kg/día}$ , que queda abarcada dentro del rango.

5. ¿Qué residuos, si los hay, permanecerán en el suelo?, ¿Qué cambios en la composición de vapor y su concentración ocurrirán con el tiempo?, ¿Cómo se relacionan estos valores con los requerimientos regulatorios?

Como requerimiento regulatorio se consideró el criterio de 200 partes por millón de hidrocarburos, no obstante tratarse de suelo de uso industrial. El nivel residual inicial es de aproximadamente 10,000 ppm. Se estableció como objetivo remover al menos el 90% de la contaminación.

---

---

---

---

---

---

---

---

5. ¿Qué residuos, si los hay, permanecerán en el suelo?, ¿Qué cambios en la composición de vapor y su concentración ocurrirán con el tiempo?, ¿Cómo se relacionan estos valores con los requerimientos regulatorios?

De acuerdo con las velocidades máximas de remoción para este tipo de gasolinas, se requiere de 100 litros de vapor/g-residual para alcanzar el objetivo. El estimado inicial de 7000 kg de TPH, por lo que  $7 \times 10^8$  litros de vapor son necesarios en total. Sobre un periodo de cinco meses, esto corresponde a un flujo promedio  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Por otra parte, dado la cercanía del manto freático, es necesario considerar el efecto del aumento en el nivel, ocasionado por el vacío.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Diseño del sistema

Con base en la permeabilidad existente y asumiendo un diámetro de 6 pulgadas en los pozos de venteo, con una sección ranurada de 2 metros,  $P_w = 0.90 \text{ atm}$  y  $R_f = 3 \text{ m}$ , entonces la ecuación 5 predice:

$$Q = 1.1 \text{ m}^3/\text{min}$$

De los cálculos previos, un flujo mínimo de  $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{min}$  se requiere para conseguir los objetivos. El número de pozos será entonces igual a  $2.5/1.1 = 2.3$ , asumiendo que el 100 % del vapor fluya a través del suelo contaminado. Un estimado más conservador, de 50% de eficiencia en el flujo de vapor hace necesario el doble de pozos.

---

---

---

---

---

---

---

---

### **Diseño del sistema**

Para reforzar el funcionamiento del sistema se colocaron un total de cinco pozos de inyección, en arreglo triangular, con los pozos de monitoreo sirviendo como pozos pasivos.

Los resultados de los avances mensuales en la eliminación de los niveles de contaminación son graficados en una curva de saneamiento, en la cual se puede observar la disminución de los valores de TPH's en el tiempo. Los muestreos se realizan en forma mensual en la curva de la figura 5 se puede observar la disminución de los niveles de contaminación de 10,000 ppm a 500 ppm en un periodo de 3 meses de extracción/inyección.

---

---

---

---

---

---

---

---



**Aspecto de la perforación de pozos de inyección**

---

---

---

---

---

---

---

---



**Pozo de inyección instalado**

---

---

---

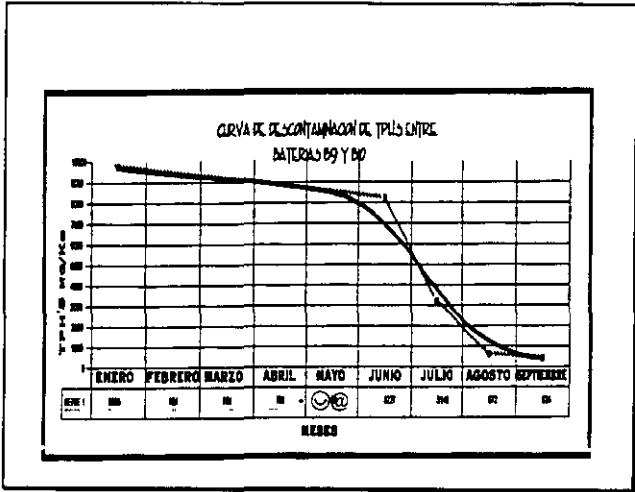
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

**Resultados.**

Los objetivos de limpieza fueron alcanzados en un tiempo menor al proyectado.

Las concentraciones de hidrocarburos totales se abatieron en un 90%.

Al final del procedimiento, no se detectó presencia de BTEX.

---

---

---

---

---

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001**

## **CURSOS ABIERTOS**

# **DIPLOMADO EN RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS**

## **MODULO II: ESPECIFICACIONES DE LABORATORIO, MUESTREO Y ANÁLISIS DE SUELOS CONTAMINADOS**

### **TEMA**

### **EL PUNTO DE VISTA DE LOS LABORATORIOS**

**EXPOSITOR: Q. JUAN IGNACIO USTARAN  
PALACIO DE MINERÍA  
NOVIEMBRE DE 2001**

# El Papel de los Laboratorios Analíticos en la Restauración de Suelos Contaminados

Q. Juan Ignacio Ustaran C.

Director General de Laboratorios ABC Química  
Investigación y Análisis S.A. de C.V.



## Contenido

- ♦ Introducción
- ♦ El Plan de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC) de los trabajos de Muestreo y Análisis.
- ♦ Criterios de Calidad del Suelo (CCS)
- ♦ Métodos de Muestreo de Suelos
- ♦ Métodos Analíticos para Análisis de los CCS
- ♦ Conclusiones

## Introducción (1)

"La Química Analítica en muchos casos, no es absoluta, es decir, los resultados obtenidos dependen del método analítico utilizado"

- ♦ Cual es el concepto de "matriz" en la química analítica del medio ambiente?
  - ♦ Los métodos analíticos se desarrollan para determinar un analito contenido en un "vehículo" de composición conocida (orina humana, sangre humana, agua de mar, agua con poco contenido de sólidos, aceite de transformador, aire ambiente, etc.).
  - ♦ Si la variación de la composición de ese "vehículo", es muy grande, pueden existir interferencias con los analitos medidos y los resultados no ser veraces

## Introducción (2)

- ♦ A esos "vehículos" se le denomina MATRIZ.
- ♦ Cuando se desarrolla un método estandarizado siempre se prueban las interferencias de , matriz, aparte de validar el método con sus demás parámetros (sensibilidad, rango de trabajo, precisión exactitud, especificidad y robustez).

---

---

---

---

---

---

---

---

## Introducción (3)

ES EL SUELO UNA MATRIZ ???

**NO !!!**

- ♦ Un suelo de Sonora (Alcalino, arenoso, sin materia orgánica, etc.) no tiene nada que ver con un suelo de Tabasco (Acido, limoso, con alto contenido de materia orgánica, etc.).
- ♦ Los analitos como los COSVs se adsorben en forma diferente y las recuperaciones son distintas, en algunos casos, no aceptables por los métodos tradicionales.

---

---

---

---

---

---

---

---

## Introducción (4)

- ♦ Es imposible tener en el caso de los suelos y de los residuos peligrosos, un método para cada matriz.
- ♦ Por lo tanto, se deben tomar en cuenta 2 parámetros fundamentales:
  - ♦ 1.- Utilizar métodos validados y estandarizados para suelos.
  - ♦ 2.- Seguir protocolos de aseguramiento y control de calidad que nos indiquen claramente si se tienen interferencias de matriz en las muestras analizadas.

---

---

---

---

---

---

---

---

## Introducción (5)

**OJO !!! EL SUELO NO ES UNA MATRIZ UNIFORME** (como el agua de una laguna)

La migración de los contaminantes en el suelo es muy diferente que en el agua

A diferencia de un cuerpo de agua estático, donde existen movimientos verticales cíclicos (por gradientes de temperaturas en el día por ejemplo), en el suelo existen movimientos causados por difusión en tercera dimensión y por transporte activo en la capa vadosa.

## Introducción (6)

Por todo lo anterior el muestreo de suelos y la interpretación de los resultados debe hacerse en forma tridimensional e interpretarse por medio de modelos matemáticos (por ejemplo modelos de dispersión con curvas de isoconcentración en 2 y 3 dimensiones) y no por medios estadísticos (el promedio no es válido).

## El Plan de QA/QC (1)

- † Un instrumento básico para asegurar la calidad de los muestreos y de los resultados analíticos es el Plan de QA/QC de los Trabajos de Muestreo y Análisis.
- † Este documento son las especificaciones contractuales en términos de procedimientos, técnicas, personal y equipo a utilizar, y las fechas límite para desarrollar las diferentes actividades.



## Plan de QA/QC (2)

- \*Tabla de Contenido
- \*Descripción Detallada del Proyecto
- \*Organigrama y Definición de Responsabilidades del Proyecto
- \*Objetivos de Calidad de los Datos Analíticos:
  - Límites de Detección Requeridos
  - Límites Prácticos de Cuantificación Requeridos
  - Precisión y Exactitud Requeridos

---

---

---

---

---

---

---

---

## Plan de QA/QC (3)

- \*Procedimientos de Interpretación de Resultados
  - Modelos matemáticos
- \*Procedimientos de Muestreo
  - Determinación del Número de Muestras
  - Selección de sitios de muestreo
  - Procedimientos específicos de toma de muestras
  - Procedimientos de Análisis de campo
  - Preservación y transporte de muestras
- \*Custodia de las Muestras
- \*Procedimientos Analíticos

---

---

---

---

---

---

---

---

## Plan de QA/QC (4)

- \*Reducción de Datos, Validación y Reporte
- \*Control de Calidad
  - Muestreo (Muestras Dobles)
  - Análisis (Muestras Sintéticas, Duplicadas, Adicionadas, Adicionadas Duplicadas, Recuperación de Surrogados y de Estándares Internos, etc )
- \*Auditorías de Desempeño y del Sistema
- \*Incidencias y Acciones Correctivas

---

---

---

---

---

---

---

---

## Criterios de Calidad del Suelo (1)

\*En el suelo, la definición de contaminante no es tan clara como en la del agua o del aire, ya que en un suelo pueden existir de forma natural compuestos químicos y elementos en concentraciones que en otros suelos serían tóxicos.

UN CONTAMINANTE SOLO LO ES, SI ESTA  
POR ENCIMA DEL NIVEL BASE EXISTENTE  
EN EL AREA DE ESTUDIO

## Criterios de Calidad del Suelo (2)

\*Por lo anterior, es necesario fijar dichos criterios base para todo el país, ya que es muy difícil en muchos lugares contaminados, determinar cual es el nivel base y cual el grado de contaminación.

\*Por otro lado, solo los contaminantes con la capacidad de migrar deben ser los que se tomen en cuenta.

\*La prueba para determinar la capacidad de migración debe ser realizada de acuerdo al tipo de suelo.

## Criterios de Calidad del Suelo (3)

\*Se deben fijar parámetros indicadores de contaminación además de los parámetros regulados de los criterios de calidad.

\*Lo anterior para disminuir costos iniciales de diagnóstico.

\*Si un parámetro indicador esta "alto" entonces se debe medir los parámetros regulados correspondientes.

## Criterios de Calidad del Suelo



---

---

---

---

---

---

---

---

## Criterios de Calidad del Suelo



---

---

---

---

---

---

---

---

## Parámetros Indicadores

PARAMETRO INDICADOR	CONTAMINANTE

---

---

---

---

---

---

---

---

## Métodos de Muestreo de Suelos

- \*Es muy difícil realizar un muestreo adecuado sin tener datos preliminares.
- \*Se debe utilizar un enfoque para detectar puntos críticos (hot spots) y su difusión tridimensional, no para determinar homogeneidad del terreno.
- \*El método de cuadrícula circular es el más adecuado (proporciona información para elaborar curvas de isoconcentración).

## Métodos Analíticos para Suelos

- \*Los métodos analíticos existentes para determinar contaminantes en suelos tienen requisitos importantes de QC, los cuales se deben exigir, sino se tienen altas probabilidades de tener resultados erróneos (Una variación alta entre varias muestras de un mismo sitio puede ser debida al sitio y no al análisis o viceversa).
- \*Es muy importante utilizar en los parámetros regulados solo métodos estandarizados y validados.

## Métodos Analíticos para Suelos

- \*NO SE DEBE USAR EL METODO 418.1 DE TPHs PARA JUZGAR EL GRADO DE CONTAMINACION O LA CALIDAD DE UNA RESTAURACION DE UN SITIO, SOLO COMO UN PARAMETRO INDICADOR.
- \*Solo se deben utilizar métodos analíticos que tengan QC intramuestras (estándares surrogados, estándares internos)

## Métodos Analíticos



---

---

---

---

---

---

---

---

## Métodos Analíticos



---

---

---

---

---

---

---

---

## Métodos Analíticos



---

---

---

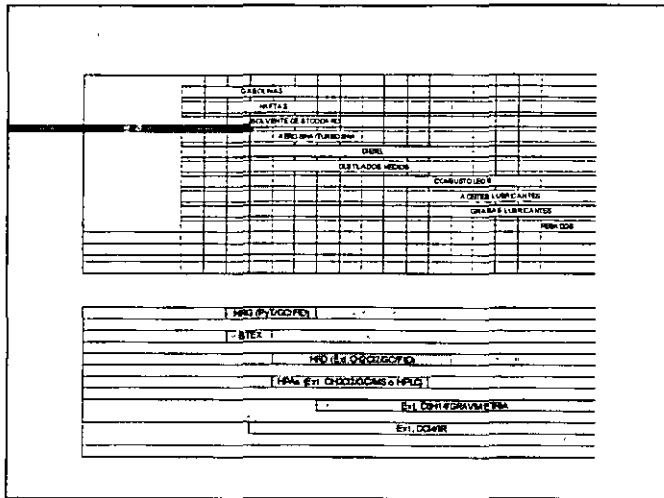
---

---

---

---

---



### Problemática para la Identificación y Cuantificación de HCs en Suelos y Aguas Subterráneas

- \* Los HCs de importancia ambiental son generalmente mezclas complejas como la gasolina, el diesel, el petróleo crudo, etc.
- \* Por lo que al ingresar al suelo, sufren cambios importantes en su composición debido a los procesos de intemperización:
  - \* Volatilización de compuestos ligeros
  - \* Adsorción selectiva en componentes del suelo
  - \* Biodegradación selectiva de componentes de las mezclas
  - \* Solubilización y transporte selectivo

### Problemática para la Identificación y Cuantificación de HCs en Suelos y Aguas Subterráneas

- \* Lo anterior cambia los perfiles cromatográficos que sirven como base para su identificación.
- \* Además, en el caso del método 418.1 cambia la respuesta cuantitativa del producto, por lo que en muchos casos, no es proporcional su disminución respecto a la pérdida real de HCs.
- \* Como la cuantificación cromatográfica esta basada en estándares de productos comerciales "frescos", la cuantificación de muestras intemperizadas, no es exacta.

## Problemática para la Identificación y Cuantificación de HCs en Suelos y Aguas Subterráneas

⊛ Lo anterior se evita al utilizar la cuantificación por medio de estándares internos y no relacionada a una mezcla de HCs comercial (como gasolina o diesel), sino a un producto puro.

---

---

---

---

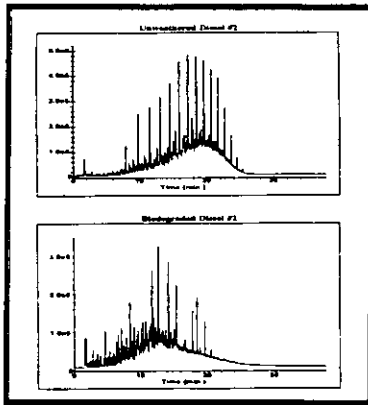
---

---

---

---

## Intemperización del Diesel



---

---

---

---

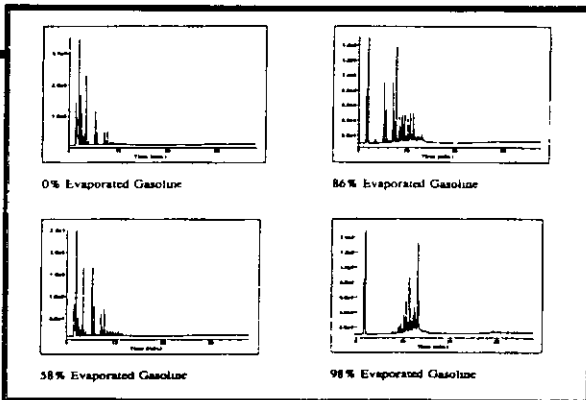
---

---

---

---

## Intemperización de la Gasolina



---

---

---

---

---

---

---

---

## El Reporte de Resultados Analíticos (1)

- ◆ El reporte de resultados de las mediciones efectuadas en un Proyecto de Remediación de Suelos debe contener al menos:
  - ◆ Reporte detallado de las actividades de muestreo con cadenas de custodia.
  - ◆ Resultados Analíticos en un formato que cumpla con los requisitos de la NMX EC 17025 IMNC 2000 con los siguientes anexos:
    - ◆ Cadenas de Custodia Internas
    - ◆ Memorias de cálculo de los lotes analíticos, que sean rastreables.

## El Reporte de Resultados Analíticos (2)

- ◆ Documentos emitidos por los instrumentos de medición (Cromatogramas, espectros, gráficas, etc.)
- ◆ Reporte de Control de Calidad Estadístico
- ◆ Reporte de Control de Calidad de las Muestras

TODOS LOS ELEMENTOS ANTERIORES  
DEBEN SER RASTREABLES CON LOS  
REGISTROS BASICOS DEL LABORATORIO  
(BITACORAS DE LOS ANALISTAS)

## La Auditoría Postanalítica

- ◆ Después de haber recibido los resultados analíticos, el Cliente deberá regresar al Laboratorio y verificar que los resultados analíticos son rastreables y trazables y asegurarse que todo lo que el laboratorio dijo, este respaldado y sea legalmente defendible.



## Conclusiones

- ♦ ANTES DE CONTRATAR A UN LABORATORIO, CONOZCANLO FISICAMENTE AL MENOS.
- ♦ NUNCA SE DEBE INICIAR UN PROYECTO DE RESTAURACION DE SUELOS SI NO SE HA ELABORADO UN PLAN DE QA/QC CON EL LABORATORIO SELECCIONADO.
- ♦ EL TIEMPO INVERTIDO SERA AMPLIAMENTE RECOMPENSADO POR LA SEGURIDAD EN LOS DATOS ANALITICOS.

---

---

---

---

---

---

---

---



Para mayor información:

Q. Juan Ignacio Ustaran C.

Tel: 5337 1160

Fax: 5635 8487

Email:

justaran@labsabc.com.mx

---

---

---

---

---

---

---

---

# Criterios de Calidad del Suelo

# Criterios de Calidad del Suelo

**INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO**

# Parámetros Indicadores

PARAMETRO INDICADOR	CONTAMINANTE

# Métodos Analíticos

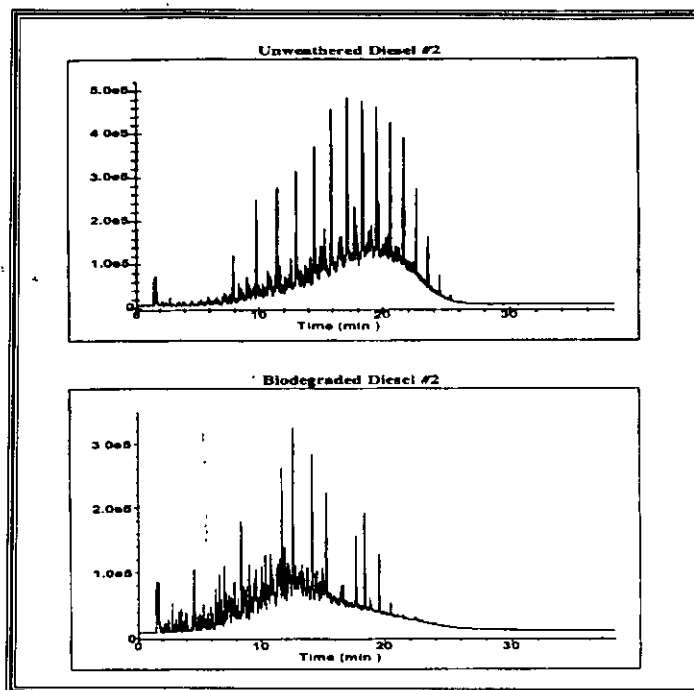

# Métodos Analíticos


# Métodos Analíticos

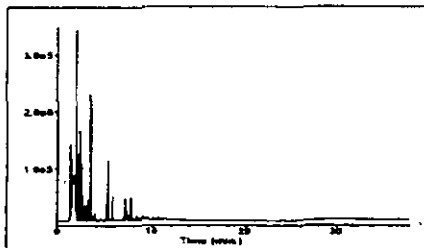




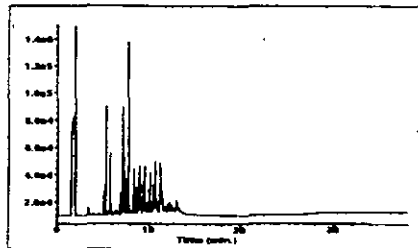

# Intemperización del Diesel



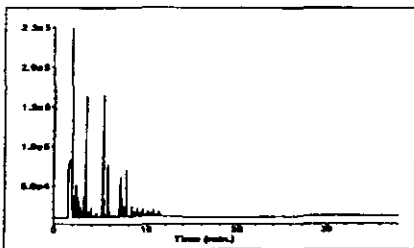
# Intemperización de la Gasolina



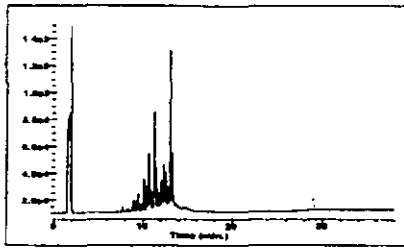
0% Evaporated Gasoline



86% Evaporated Gasoline



58% Evaporated Gasoline



98% Evaporated Gasoline