

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.

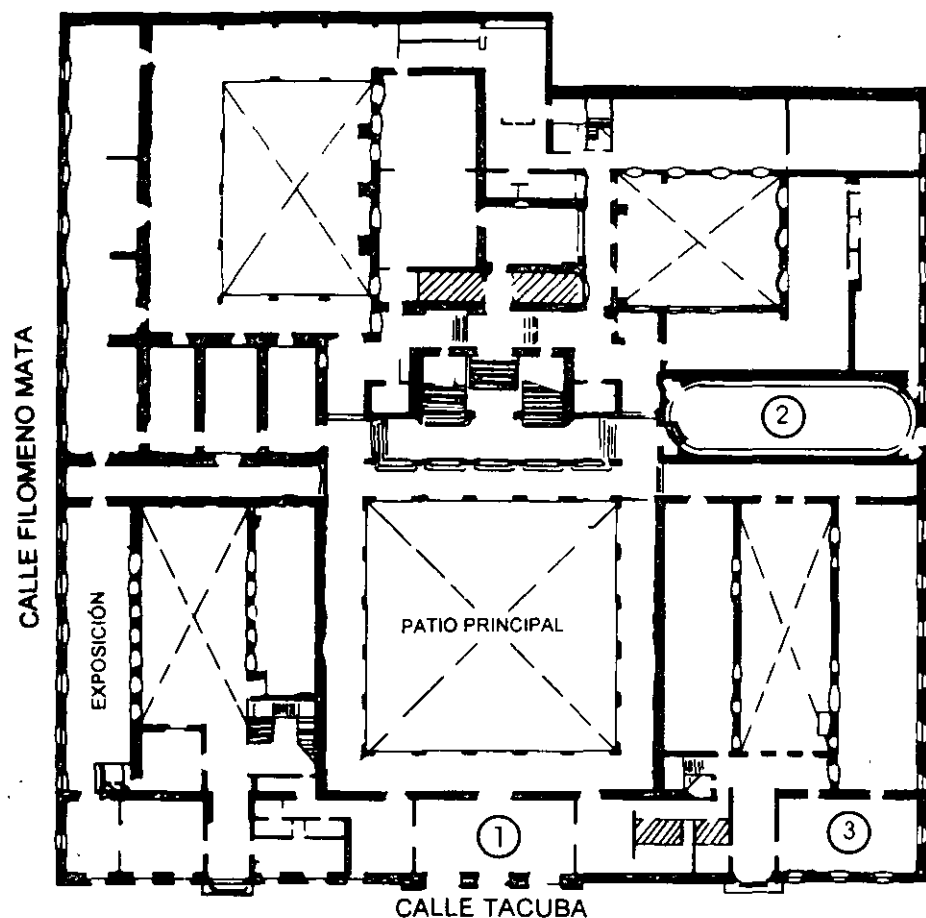
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

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.

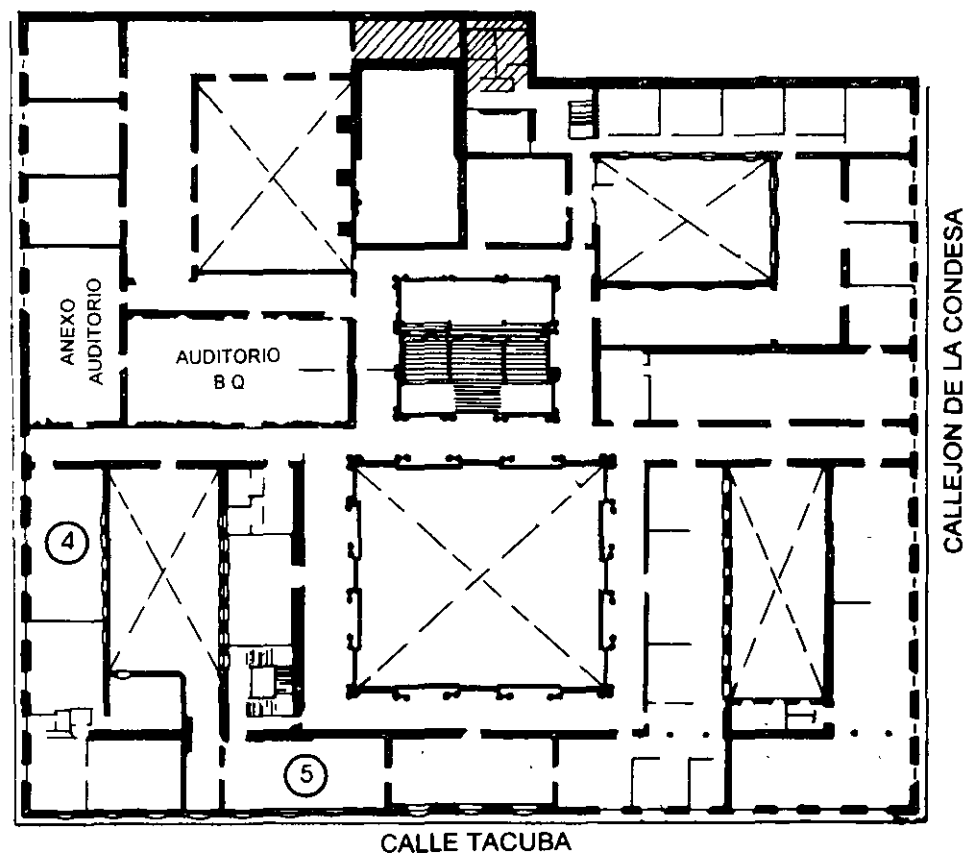
Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERIA

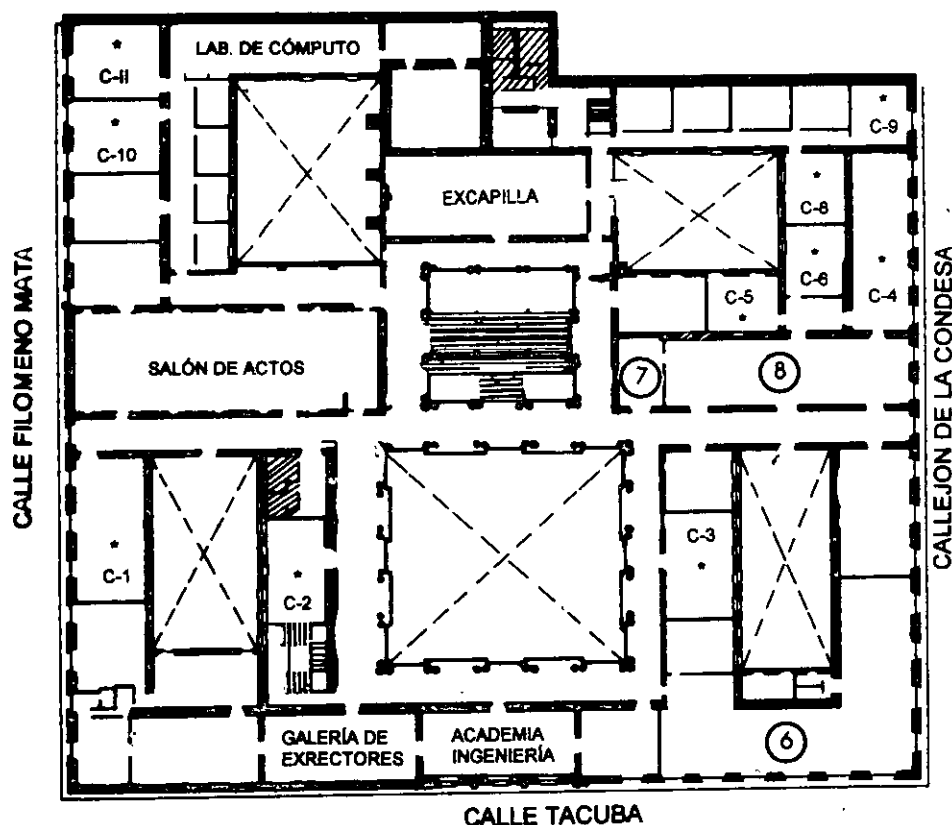


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

PALACIO DE MINERIA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

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

SANITARIOS

* AULAS

1er. PISO



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

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



**XIII CURSO INTERNACIONAL SOBRE CONTAMINACIÓN
DE SUELOS Y ACUÍFEROS**

**MÓDULO 2.- RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS
CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS**

DEL 17 AL 20 DE SEPTIEMBRE DEL 2001

DIA	HORA	TEMA	PROFESOR
LUNES 17	9:00 A 11:00	INTRODUCCIÓN	DR. RAMIRO RODRIGUEZ CASTILLO
	11:00 A 14:00	CALIDAD DEL AGUA	DRA. BLANCA JIMENEZ
	16:00 A 19:00	CONTAMINANTES ORGÁNICOS: CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO	DRA. SUSANA SAVAL
MARTES 18	9:00 A 14:00 Y	CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS MTBE Y RELLENOS SANITARIOS	ING. JUAN MANUEL LESSER I.
	16:00 A 19:00	PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO	
MIÉRCOLES 19	9:00 A 11:00	IMPACTO AMBIENTAL Y AUDITORÍAS AMBIENTALES	BIOL. HECTOR LESSER
	11:00 A 14:00	EXPERIENCIA EN MÉXICO PARA DEFINIR CRITERIOS DE LIMPIEZA EN SUELOS	ING. JUAN M. MUÑOZ
	16:00 A 19:00	EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA	M. EN I. HECTOR ZEGARRA
JUEVES 20	9:00 A 14:00	BIORREMEDIACIÓN	DRA. SUSANA SAVAL
	16:00 A 19:00	BASES PARA LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS	ING. GILBERTO JACOME
VIERNES 21	9:00 A 11:30	EXTRACCIÓN DE VOLÁTILES Y PRODUCTO LIBRE	ING. JUAN M. NIETO
	11:30 A 14:00	RIESGO Y ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN	DRA. SUSANA SAVAL
	16:00 A 18:00	MESA REDONDA	DRA. SUSANA SAVAL



DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM
CURSOS ABIERTOS



CURSO: XIII CURSOS INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS
FECHA: MODULO II: RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUIFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS
Del 17 al 21 de septiembre del 2001 CA 087

EVALUACIÓN DEL PERSONAL DOCENTE

(ESCALA DE EVALUACION. 1 A 10)

CONFERENCISTA	DOMINIO DEL TEMA	USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	COMUNICACIÓN CON EL ASISTENTE	PUNTUALIDAD
Dr. Ramiro Rodríguez Castillo				
Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros				
Dra. Susana Saval Bohórquez				
Ing. Juan Manuel Lesser Illades				
Bio. Hector Lesser Hiriart				
Ing. Juan M. Muñoz				
M. en I. Héctor Zegarra				
Ing. Gilberto Jácome				
Ing. Juan M. Nieto				

Promedio _____

EVALUACIÓN DE LA ENSEÑANZA

CONCEPTO	CALIF.
ORGANIZACIÓN Y DESARROLLO DEL CURSO	
GRADO DE PROFUNDIDAD DEL CURSO	
ACTUALIZACIÓN DEL CURSO	
APLICACIÓN PRÁCTICA DEL CURSO	

Promedio _____

EVALUACIÓN DEL CURSO

CONCEPTO	CALIF.
CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
CONTINUIDAD EN LOS TEMAS	
CALIDAD DEL MATERIAL DIDÁCTICO UTILIZADO	

Promedio _____

Evaluación total del curso _____

Continúa...2

1. ¿Le agradó su estancia en la División de Educación Continua?

SI

☐

NO

☐

Si indica que "NO" diga porqué:

2. Medio a través del cual se enteró del curso:

Periódico <i>La Jornada</i>	
Folleto anual	
Folleto del curso	
Gaceta UNAM	
Revistas técnicas	
Otro medio (Indique cuál)	

3. ¿Qué cambios sugeriría al curso para mejorarlo?

4. ¿Recomendaría el curso a otra(s) persona(s) ?

SI

☐

NO

☐

5. ¿Qué cursos sugiere que imparta la División de Educación Continua?

6. Otras sugerencias



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

CONTAMINANTES ORGANICOS

**EXPOSITOR: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Módulo: Orgánicos

Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros
GRUPO: TRATAMIENTO Y REUSO
Instituto de Ingeniería, UNAM

1. CONTAMINANTES ORGÁNICOS

Actualmente, existe una importante polémica sobre el agua generada en la década de los setenta cuando se descubrió en el agua potable la existencia de compuestos orgánicos subproductos de la cloración, denominados trihalometanos. Este suceso dio origen a una continua búsqueda de compuestos. Para 1980, eran setecientos compuestos los detectados, mismos que supuestamente no deberían de estar en el agua potable. De ellos sólo 458 fueron identificados. Un año después, el número detectado aumentó a 1,200 debido al desarrollo de una técnica de concentración basada en la ósmosis inversa que permitió mejorar la sensibilidad de los análisis (Rogers *et al.*, 1987). Más de 600 de éstos son sustancias orgánicas, muchas de ellas biológicamente activas, varias reconocidas como carcinogénicas o promotoras de sustancias carcinogénicas y algunas con propiedades mutagénicas. La Tabla 1 muestra algunas de ellas. Aunque algunas de estas sustancias carecen de efectos, para otras se desconoce si los tienen.

Tabla 1' Compuestos orgánicos que se pueden encontrar en el agua potable

a) De la fuente de abastecimiento	<ul style="list-style-type: none">- Sustancias húmicas- Alcanos y alquenos clorados- Nitrosaminas- Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP)- Ácido nitrotriacético- Fenoles- Detergentes sintéticos- Plaguicidas- Bifenilos policlorados- Esteres de ftalatos- Aceites de petróleo incluida la gasolina- Clorobenceno- Fenoles clorados- Benceno y alquil aromático- Tetracloruro de carbono
b) Introducidos durante el tratamiento	<ul style="list-style-type: none">- Tetracloruro de carbono- Polielecrolitos (Ej: acrilamida)- Trihalometanos
c) Introducidos durante la distribución y transporte	<ul style="list-style-type: none">- Monomero de cloruro de vinilo- Plaguicidas, herbicidas y acaricidas- Fertilizantes- Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP)

Adaptado de OMS, 1985

Los contaminantes orgánicos se dividen en cuatro categorías:

- Compuestos naturales que producen olor y sabor

- Compuestos sintéticos de origen industrial que causan olor y sabor o son tóxicos
- Precursores naturales para la formación de subproductos durante la desinfección
- Subproductos generados por la desinfección

Los compuestos orgánicos presentes en el agua comúnmente son los ácidos húmicos que existen tanto en forma natural como por la creciente descarga de compuestos orgánicos sintéticos que actúan como precursores, como son los compuestos para la limpieza de textiles y de componentes electrónicos (solventes). Los ácidos húmicos se dividen en dos grandes grupos: fúlvico y húmico. Las fracciones que componen estos grupos son químicamente similares y su clasificación se basa en la diferencia de peso molecular. Los fúlvicos tienen un peso molecular más bajo (200 a 1,000 g/mol) mientras que el de los húmicos es superior (200,000 g/mol). La separación en ambos grupos es arbitraria y no siempre consistente por lo que es común denominarlas en forma global.

Entre los compuestos orgánicos problemáticos se encuentran los trihalometanos y los halógenos orgánicos que se forman mediante reacciones de oxidación y sustitución entre el cloro y los ácidos húmicos. El ozono también produce compuestos secundarios como son los aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y ftalatos. Durante la desinfección con dióxido de cloro existe el riesgo de formar compuestos orgánicos clorados. Entre los compuestos orgánicos de origen sintético que se encuentran en el agua están los herbicidas, plaguicidas, el queroseno y los derivados del benceno.

A continuación se describen algunas características de los grupos de compuestos orgánicos que han sido encontrados en agua con mayor frecuencia.

1.1. Ácidos fúlvicos y húmicos

La materia orgánica que proviene de los organismos vivos realiza una contribución importante a la calidad natural de las aguas superficiales. La composición de este tipo de materia es muy diversa y los compuestos naturales no son usualmente tóxicos, pero ejercen un mayor control sobre los procesos hidroquímicos y bioquímicos del agua. Algunos compuestos naturales afectan en forma significativa la calidad para ciertos usos, especialmente aquellos que dependen de las propiedades organolépticas (sabor y olor). Durante la cloración del agua de bebida, los ácidos fúlvicos y húmicos actúan como precursores de trihalometanos (como el cloroformo). Además, ciertas sustancias del humus acuático determinan la especiación de ciertos metales pesados y otros contaminantes debido a su alta capacidad complejante.

1.2. Bifenilos policlorados, PCBs

Los bifenilos policlorados (PCBs) son arocloros que difieren entre sí por el contenido promedio de cloro y en los tipos de PCBs que componen la mezcla (la numeración que los acompaña se refiere a la proporción de cloro que contiene: 1016, 1221, 1232, 1242, 1248, 1254, y 1260). Por ser estables y termoplásticos, los PCBs líquidos se usan como dieléctricos en fluidos hidráulicos y como medio de transferencia de calor en turbinas y bombas de vacío. Los PCBs sólidos se usan para impregnar resistencias de carbono y como selladores en aparatos eléctricos.

La máxima producción de PCBs ocurrió en Estados Unidos en 1970 cuando se produjeron 64,000 toneladas. Antes de 1971, los PCBs eran utilizados como fluidos dieléctricos en transformadores y capacitores (75% del total). Su uso como fluido en equipo de transferencia de calor ascendió al 10% y el restante se ocupó en papel copiator, sin carbón, plastificante,

compuestos epóxicos resinas sintéticas, aceites puros para máquinas de alto vacío, compresores, tintes para textiles, ceras y pesticidas. Posterior a esta fecha su uso en Estados Unidos se restringió a los fines eléctricos (aislantes, refrigerantes y dieléctricos) y en 1979 quedaron restringidos a un permiso especial. Cabe mencionar, que la exportación no fue prohibida y actualmente lo producen 115 compañías de un total de 1988 que lo empleaban

En Canadá, nunca se produjo PCBs pero se importaban 40.000 toneladas de Askarel (que contienen entre 40 y 70% de PCBs). En 1991 aún se empleaban 13.000 ton en transformadores y capacitores

Se estima que entre 70.000 y 200.000 ton de PCBs han sido desechadas y existe evidencia de la migración de estos compuestos a todo el medio ambiente. La concentración frecuente en la atmósfera es de 0.1 a 1.0 ng/m³ (*International Joint Commission*, 1993).

El grado de biodegradabilidad individual de los diversos PCBs varía ampliamente. En general, son de degradación muy lenta y tienden a acumularse en peces. Las especies mono, di, y tricloradas son significativamente biodegradables o biotransformadas, así como volatilizadas. En cambio, los bifenilos policlorados presentan una tendencia a adsorberse en materiales suspendidos y sedimentos, son bioacumulados, poco solubles y se fotodisocian.

Los PCBs se encuentran en fuentes de abastecimiento contaminadas con lubricantes de transformadores, en los cuales se emplea como intercambiador de calor.

1.3. Aceites minerales y productos del petróleo

Estos son los principales contaminantes responsables de los daños ecológicos, generalmente en cuerpos de agua superficiales. A la fecha, más de 800 compuestos han sido identificados como aceites minerales, entre ellos hay compuestos alifáticos de bajo y alto peso molecular, hidrocarburos aromáticos y nafténicos (o productos del petróleo), compuestos heterocíclicos no saturados de alto peso molecular (resinas y asfaltenos) y un numeroso grupo de compuestos del O, N y S. La distribución de los aceites en los cuerpos de agua es diversa, ya que pueden estar disueltos, como películas finas, emulsionados, entre otras. Las interacciones entre estas fracciones son complicadas y diversas, dependen de diversas características fisicoquímicas como la gravedad específica, la tensión superficial, la viscosidad, los puntos de ebullición, etc., además la transformación de los compuestos del petróleo por procesos bioquímicos, microbiológicos, químicos y fotoquímicos ocurre simultáneamente. Debido al alto riesgo ecológico asociado con las actividades de la explotación del petróleo, así como con su uso, se les considera como contaminantes prioritarios.

1.4. Hidrocarburos alifáticos halogenados

Se caracterizan por ser muy volátiles (el 90% se volatiliza en un tiempo de 60 a 110 minutos de agitación) y poco adsorbibles. Los principales son los trihalometanos como el cloroformo, bromo diclorometano, dibromo clorometano y tribromometano (bromoformo) que se asocian con la cloración de agua que contiene materia orgánica. Una lista más amplia se presenta en la Tabla 2

...Tabla 2 Características de los compuestos alifáticos halogenados

COMPUESTO	USO	COMENTARIO
Diclorometano	Disolvente principalmente para descafeinar el café y decapar pinturas	Toxicidad aguda reducida, el valor guía proporcionado por la OMS es de 20 mg/L
1,2,2-tetracloroetano	Agente de lavado en seco. Componente de cementos y lacas. En la fabricación del tetracloroetileno	Uso como disolvente en disminución por su toxicidad
1,1,1-Tricloroetano (Metil cloriformo)	Sustituto del tetracloruro de carbono. Plaguicida, solvente de limpieza de instrumentos delicados, propulsor de aerosoles y desengrasante de metales	No tiene uso autorizado como plaguicida en México
1,1,2-tricloroetano	En reacciones de síntesis. Solvente	
1,1-Dicloroetano	Solvente y agente desengrasante. Participa en las síntesis orgánicas. Aromatizante	
1,1-dicloroetileno	Intermediario en la producción del polivinilideno	
1,2-dicloropropano	Disolvente de grasas, aceites, ceras, gomas y resinas. Agente fumigante para nematodos	
1,3-Dicloropropeno	Como plaguicida junto con el dicloropropano	Uso restringido en México como plaguicida
1,2-trans-dicloroetileno	Solvente de materia orgánica, extractor de colorantes. Se emplea en perfumería, termoplastia, medicina y síntesis orgánica	
Bromoformo (tribromometano)	Intermediario en reacciones orgánicas, solvente de grasas, ceras y aceites	Es uno de los cuatro halometanos para el cual la EPA ha fijado como nivel máximo en agua potable 0.1 mg/L
Bromuro de metilo (Bromometano)	Fumigante de insectos en granos. Es agente metilante, refrigerante, herbicida, extinguidor de incendios, desengrasante y extractor de aceites esenciales naturales. Participa en la producción de muchos fármacos	
Cloro-dibromometano	Se usa en síntesis orgánica como componente de aerosoles, en la fabricación de extinguidores, refrigerantes y plaguicidas	La EPA lo reglamenta como parte de los 4 organoclorados principales
Cloroetano (Cloruro de etilo)	Se usa como reactivo en la fabricación del tetraetilo de plomo y como refrigerante y anestésico local. Fue uno de los primeros anestésicos abandonado debido a su toxicidad	
Cloroformo (Triclorometano)	Es ampliamente usado como disolvente, principalmente en la industria del lacado. Participa en la purificación y extracción de penicilina y otros fármacos y en la producción de seda artificial, plásticos y fluorocarbonos	
Cloruro de metileno	Se usa como eliminador de pintura, fumigante, desengrasante, disolvente para ésteres y éteres de celulosa. En la industria de la refrigeración, en la de síntesis química y como componente de aerosoles. Es anestésico	
Bromodiclorometano	En síntesis orgánica	Forma parte de los 4 organoclorados reglamentados en agua potable por la EPA
Hexacloro-1,1-butadieno (Hexaclorobutadieno)	Solvente de elastómeros. Líquido transmisor del calor y fluido hidráulico	
Hexacloro ciclohexadieno	Intermediario en resinas no inflamables, colorantes, plaguicidas fungicidas y productos farmacéuticos	No tiene uso autorizado en México como plaguicida
Hexacloroetano	Se usa en síntesis orgánica. Como agente retardante de la fermentación, sustituto del alcanfor en la fabricación de nitrocelulosa y del caucho. En la protección y medicina	
Tetracloruro de etileno	Se usa ampliamente en el lavado en seco como agente desengrasante. Es intermediario químico y fumigante. Se usa en medicina como antihelmíntico	
Tetracloruro de carbono (Tetraclorometano)	Se usa en refrigerantes y propulsores. Es desengrasante de metales, fumigante en agricultura y participa en la producción de semiconductores	No tiene uso autorizado en México como plaguicida. Amplia efectos toxicológicos: carcinógenosis y daños al hígado y riñones, el valor guía de la OMS es de 2 µg/L
Tricloroetileno	Se usa como desengrasante de metales. Es solvente de grasas, aceites, ceras, colorantes. En la limpieza en seco. Es líquido intercambiador de calor (refrigerante). Participa en la síntesis orgánica de fumigantes y medicamentos	No tiene uso autorizado en México como plaguicida

1.5. Hidrocarburos aromáticos monocíclicos

Se encuentran en concentraciones importantes tanto en agua superficial como subterránea debido a que no se evaporan. En acuíferos se han detectado estos compuestos hasta valores del orden de mg/L y en agua potable de 1 mg/L. La Tabla 3 resume sus principales características.

Tabla 3 Características de los hidrocarburos aromáticos monocíclicos

COMPUESTO	USO/FUENTE	COMENTARIO
Benceno	Componente de combustible para motores, solvente de grasas, tintas, aceites, pinturas, plásticos y caucho. Sirve en la extracción de aceites de semillas. Se usa como intermediario químico en la fabricación de estireno, fenoles, ciclohexano, anhídrido maleico, detergentes, explosivos y fármacos.	Contaminante del agua y del aire. El agua pasa por lavado de la atmósfera. Valor guía OMS de 10 mg/L.
Clorobenceno	Se usa en obtención de anilina, fenol, cloronitrobenceno y muchos plaguicidas.	Toxicidad relativamente baja, afectando al hígado, los riñones y el sistema hematopoyético. El valor guía preconizado por la OMS es de 300 µg/L.
1,2-Dicloro benceno	El principal uso es como solvente en la obtención de tolueno. Es intermediario en síntesis orgánica, herbicida y desengrasante de cuero y lana. Fumigante e insecticida.	No tiene uso autorizado en México como plaguicida. Es contaminante del aire, alimentos y agua. El valor guía OMS es de 1000 µg/L.
1,4-Dicloro benceno	Es insecticida (polilla) y germicida. Es desodorante. Interviene en la fabricación de colorantes y fármacos.	No tiene uso autorizado en México como plaguicida. El valor guía OMS es de 300 µg/L.
1,3-Dicloro benceno	Fumigante e insecticida.	No tiene uso autorizado en México como plaguicida.
Etilbenceno	Intermediario en la producción de estireno. Solvente. Presente en la industria del petróleo y sus derivados.	Se absorbe fácilmente por vía oral o cutánea y por inhalación. No ha y datos sobre la toxicidad, teratogenicidad o carcinogenicidad a largo plazo. Valor guía OMS de 300 µg/L.
Tolueno	Se usa en la gasolina para aviación y mezclas de alto octanaje. Solvente de pinturas, grasas, resinas, aceites, caucho, lacas de nitrocelulosa, adhesivos plásticos, explosivos y detergentes.	El valor guía OMS es de 70 µg/L.
1,2,4-triclorobenceno	Se usa como medio de transferencia de calor, fluido eléctrico en transformadores y lubricante. Es agente desengrasante. Es un insecticida potencial contra termitas.	El valor guía OMS (en agua potable) es de 20 µg/L.
2,4-Dinitrotolueno	Se usan en la fabricación de explosivos (trinitrotolueno) y en síntesis orgánica.	
Nitrobenceno	El uso principal es la fabricación de anilina. Solvente de éteres de celulosa. Ingrediente de bruñidores de metales y crema para calzado. Materia prima en la fabricación de bendicida, quinoleína y azobenceno.	
Hexaclorobenceno	Se usa en síntesis orgánica. Es fungicida para el tratamiento de semillas.	No tiene uso autorizado en México como plaguicida.

1.6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAP

Se componen de dos o más anillos de benceno con anillos adyacentes que comparten dos átomos de carbono. Se encuentran con frecuencia en el medio ambiente y se ha detectado su presencia ocasional en agua potable. Entre estos compuestos se encuentran el fluoranteno, 3,4-benzfluoranteno, 11,12-benzfluoranteno; 3,4-benzopireno, que se sabe son carcinogénicos y potencialmente dañinos al hombre.

Los niveles "normales" de HAP en aguas subterráneas son de 10 a 50 µg/L y de 50 a 250 µg/L en aguas pluviales relativamente no contaminadas. Se estima que la exposición del hombre a los HAP es de

- 0.1 al 3 % por agua
- 0.9 % aire
- 99% alimentos

El comportamiento de estos compuestos depende en gran medida de su número de anillos y de hecho, se agrupan de acuerdo con este factor. Presentan una fuerte adsorción en materia orgánica y pueden ser biodegradados.

Se ha detectado en el medio ambiente un gran número de hidrocarburos aromáticos polinucleares resultantes de diversos procesos de combustión y pirólisis. El revestimiento de tubería con carbón y brea puede ocasionar aumento significativo de la concentración de éstos compuestos.

Se dispone de escasa información sobre la toxicidad de los HAP por vía oral, especialmente después de una exposición prolongada. Se ha confirmado que algunos HAP, entre ellos el benzo[α]pireno, el indeno [1,2,3 Cd] pireno y el benzo [] fluoranteno son carcinógenos en animales de laboratorio y pueden serlo en el hombre. Sólo se cuenta con datos suficientes para realizar una estimación cuantitativa de la carcinogenicidad de los HAP ingeridos en el caso del benzo[α]pireno que parece ser un carcinógeno local.

Ya que no se dispone de datos suficientes para calcular guías para los demás HAP, la OMS formuló las siguientes recomendaciones para agua potable.

- Debido a la estrecha asociación de los HAP con los sólidos en suspensión, se propone una turbiedad mínima para asegurar la reducción de los HAP.
- Evitar la contaminación con HAP dejando de usar materiales de alquitrán mineral y similares para el revestimiento de las tuberías y depósitos de almacenamiento.
- Cuando se haya producido la contaminación del agua corriente por HAP deberán identificarse los compuestos presentes y la fuente de la contaminación ya que el potencial carcinógeno de los HAP es variable.

Los HAP se eliminan en gran parte mediante los métodos convencionales de tratamiento de agua (p. ej. coagulación y filtración).

Para protección de la salud humana, el criterio está establecido como hidrocarburos aromáticos policíclicos y es de 0.028 $\mu\text{g/L}$ para un riesgo de 1 en 100.000. Otros compuestos de los HAP se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Características de los hidrocarburos aromáticos policíclicos

COMPUESTO	USO/FUENTE
1,2-difenilhidrazina	Es precursor en la obtención de bendidina y colorantes. Se usa en la síntesis de fenilbutazona.
2-Cloronaftaleno	Es un potente antiinflamatorio. Se usa en la producción de condensadores eléctricos. Es un medio de transmisión de calor.
3,3-diclorobendidina	Es plastificante, disolvente de caucho, colorantes (anilina), aceites minerales y vegetales, barnices, gomas, resinas y ceras. Es separador y ablandador de carbón.
Acenafteño	El principal uso es la obtención de pigmentos para tintas de impresión. Participa en la fabricación de textiles, plásticos de uretano, crayones.
Antraceno	No tiene sustituto en muchos de sus usos. Es intermediario en la elaboración de colorantes, productos farmacéuticos, insecticidas, fungicidas y plásticos. Interviene en la fabricación de colorantes (alizarina, fenantreno, carbazol, y antraquinona). Se encuentra como componente de cortinas de humo, cristales para contadores de escintilación.

Tabla 4 Características de los hidrocarburos aromáticos policíclicos

COMPUESTO	USO/FUENTE
Bencidina	Se emplea en síntesis orgánica, fabricación de colorantes, especialmente el rojo Congo y como reforzante del caucho
Criseno	Se emplea en síntesis orgánica
Dibenz(a,b)antraceno	Es un fotoconductor orgánico (en vez de selenio) en sistemas de copiado y reproducción.
Fluoranteno	Se produce en el proceso pirolítico de materia orgánica verde, hulla y petróleo a altas temperaturas
Fluoreno	Se produce en la biosíntesis de plantas Se emplea en productos resinosos, insecticidas y colorantes
Naftaleno	Se emplea para combatir la polilla Interviene en la preparación de fungicidas, explosivos, aceites colorantes, lubricantes, resinas sintéticas, taninos sintéticos, disolventes, rompecorros de emulsiones, contadores de centelleo y textiles.
Pireno	Se emplea en investigación bioquímica

1.7. Plaguicidas

Es una sustancia o mezcla de ellas que se destina para controlar cualquier especie no deseada (incluidos los vectores de enfermedades humanas y de animales) que causen perjuicio o que interfieren con el mejor aprovechamiento de la producción agropecuaria y forestal que afecten bienes materiales durante el almacenamiento y transporte, así como las que interfieren con el bienestar del hombre y los animales (Diario Oficial, 14 de marzo de 1988). Muchos plaguicidas han ayudado a la humanidad en el control de plagas, pero también han causado un gran número de alteraciones como son cáncer, mutaciones, y abortos espontáneos. Los pesticidas y productos químicos agrícolas no son constituyentes comunes de las fuentes puntuales de contaminación, sino que suelen incorporarse como consecuencia de escurrimientos de parques, campos agrícolas y tierras abandonadas. Las concentraciones de estos productos químicos pueden dar como resultado la muerte de peces, contaminación de la carne del pescado y el deterioro del suministro de agua.

Los plaguicidas son productos muy diversos y la mayor parte de las veces, artificiales. Como ejemplo se tiene los organoclorados (DDT, HCH, lindano, clordano, heptacloro, aldrin y dieldrin), organofosforados (malatión y paratión), carbamatos y organometálicos que son muy difíciles de biodegradar.

Los plaguicidas organoclorados son compuestos orgánicos de origen sintético que se caracterizan por poseer uno o varios átomos de cloro en su estructura química. Son compuestos muy poco solubles en agua y poco volátiles. Son muy persistentes, se les puede encontrar hasta 52 semanas después del momento de su aplicación, son de difícil descomposición y se integran fácilmente a las cadenas alimenticias. Se absorben por la piel, el tubo digestivo o el aparato respiratorio, y se acumulan en el tejido graso y se eliminan por el riñón. La intoxicación aguda se caracteriza por náuseas, vómito, dolor gástrico y manifestaciones neurológicas que incluyen dolor de cabeza, temblor y mareos.

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

- Reglamentación de plaguicidas en México

En México no existen normas para el control de los agroquímicos en las descargas por fuentes dispersas. La Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST) se limita al control y normalización de la comercialización de estos productos con la finalidad de evitar que su aplicación indiscriminada ocasione daños al ambiente y a la salud del hombre.

En 1978, se publicó el primer *Catálogo Oficial de Plaguicidas*, el cual se actualiza anualmente. En el Catálogo de 1995 se establece la prohibición y el uso restringido bajo supervisión de personal autorizado y capacitado de los plaguicidas listados en la Tabla 5.

Tabla 5 Plaguicidas prohibidos y de uso restringido en México

PLAGUICIDAS PROHIBIDOS	PLAGUICIDAS RESTRINGIDOS
Acetato o propionato de fenil mercurio	1,3-Dicloropropeno
Ácido 2,4,5-T	Alaclor
Aldrin	Aldicarb
BHC ^a	Bromuro de metilo
Cianofos	Clordano
Cloranil	Cloropicrina
DBCP	Dicofol
Dialiafor	Forato
Dieldrin	Fosfuro de aluminio
Dinoseb	Isotiocianato de metilo
Endrin	Lindano
EPN ^a	Metam sodio
Erbon	Metoxicloro
Formotión	Mevinfos
Fluoracetato de sodio (1080)	Paraquat
Fumisel	Pentaclorofenol
Kepon/Clordecone	Quintozeno
Mirex	DDT por su alto riesgo para la salud del humana, su elevada persistencia y sus propiedades de bioacumulación, este plaguicida sólo podrá ser utilizado en campañas fitosanitarias por las dependencias del Ejecutivo
Monuron	
Nitrofen	
Paratión etílico ^a	
Schradan	
Sulfato de Talio ^a	
Toxafeno ^a	
Tnamifos	

^a Plaguicidas de los que sólo se prohíbe su comercialización y uso; del resto se prohíbe la importación, fabricación, formulación, comercialización y uso.

Se entiende por plaguicidas restringidos aquellos que sólo podrán ser adquiridos en las comercializadoras mediante la presentación de una recomendación escrita de un técnico oficial o privado que haya sido autorizado por el gobierno federal, por lo cual, su manejo y aplicación se efectuarán bajo responsabilidad del técnico autorizado que lo recomendó. Al comparar con la normatividad referente a plaguicidas en otros países, encontramos que en México están autorizados y se comercializa con 7 insecticidas/acaricidas, 4 herbicidas y 3 fungicidas prohibidos, retirados o de uso muy restringido en otros países y se clasifican como de uso restringido en México, 6 insecticidas/acaricidas, 1 herbicida y 2 fungicidas, como se muestra en la Tabla 6. Cabe señalar que el endosulfán, insecticida prohibido al menos en 10 países y que se había considerado en el Catálogo de 1991 como de uso restringido, a partir del Catálogo de 1994 fue autorizado.

Tabla 6 Plaguicidas autorizados o de uso restringido en México pero que han sido prohibidos, retirados o muy restringidos en otros países

NOMBRE	TIPO	PAÍSES EN LOS QUE SE ENCUENTRA PROHIBIDO, RETIRADO O MUY RESTRINGIDO
2,4-D	Herbicida	Guatemala, EUA
Aldicarb *	Insecticida o acaricida	Austria, Bélgica, Alemania, Israel, Noruega y Filipinas
Captofol	Fungicida	España
Carbanil	Insecticida o acaricida	Alemania
Clordano *	Insecticida o acaricida	España
Diclorvos	Insecticida o acaricida	Reino Unido
Dicofol *	Insecticida o acaricida	España
Dimetoato	Insecticida o acaricida	Chipre, EUA
Endosulfan	Insecticida o acaricida	Argentina, Dinamarca, Filipinas, Finlandia, Hungría, Noruega, Portugal, Reino Unido, Singapur, Yugoslavia
EPN *	Insecticida o acaricida	Alemania, India, Malasia, Nueva Zelanda, Filipinas
Fenitrothion	Insecticida o acaricida	Reino Unido
Folpet	Fungicida	Finlandia
Forato *	Insecticida o acaricida	Malasia
Lindano *	Insecticida o acaricida	Argentina, Bélgica, Bulgaria, Canadá, Colombia, Chipre, Ecuador, Alemania, Filipinas, Hungría, Israel, Japón, Nueva Zelanda, Singapur, EUA, URSS, Yugoslavia
Malation	Insecticida o acaricida	Reino Unido
Maneb	Fungicida	URSS
Metomilo	Insecticida o acaricida	Malasia
MSMA	Herbicida	Argentina
Paraquat *	Herbicida	Finlandia, Hungría, Israel, Nueva Zelanda, Noruega, Portugal, Suecia
Pentacloro-fenol *	Fungicida	Reino Unido
Quintozeno *	Fungicida	España
Simazina	Herbicida	Reino Unido
Trifluralina	Herbicida	Guatemala, EUA

* Uso restringido en México

- Evaluación del problema de agroquímicos empleados en México

Los agroquímicos que se emplean en la República Mexicana (Figura 1), de acuerdo con CONADE, (1989) son clasificados en 3 grupos

- Insecticidas y acaricidas
- Fungicidas
- Herbicidas

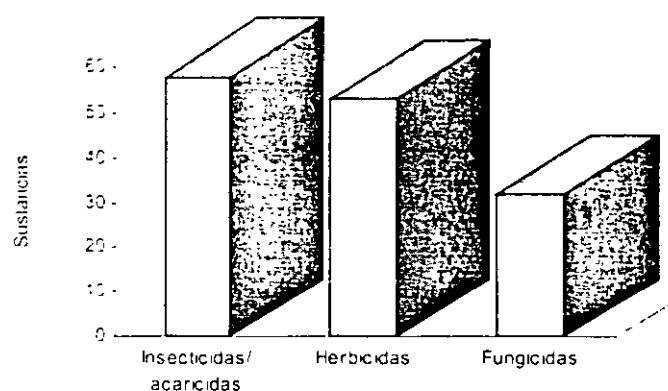


Figura 1 Plaguicidas empleados en México

En total se aplican 143 sustancias. De los productos prohibidos en forma total o parcial en México destacan el paratión etílico que se aplica en 15 estados (en casi 50% del territorio), el BHC en 13, seguidos del EPN en 6 y el Toxafeno en 2 (Figura 2). Entre los estados que se caracterizan por emplear con mayor frecuencia estos productos destacan Tamaulipas con 4, seguido de varios estados con 2 localizados principalmente en el Norte y Centro de la República (Figura 3).

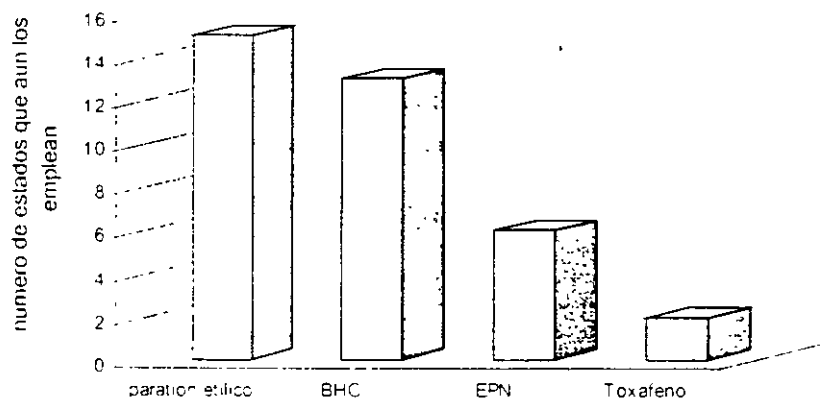


Figura 2 Plaguicidas prohibidos totalmente o sólo su comercialización en México

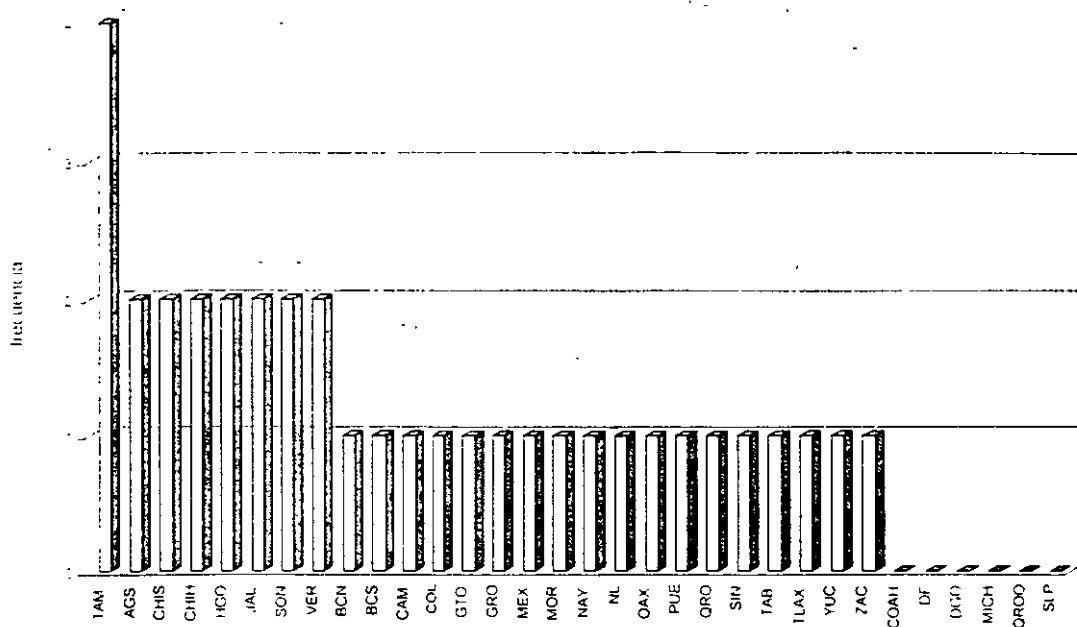


Figura 3 Estados que emplean el mayor número de productos prohibidos (comercialización y uso) en México

En cuanto a los productos catalogados como restringidos (Figura 4) en México sobresale el metoxicloro que se aplica en 22 estados (69% del territorio), el paratión etílico en 15, el aldicarb en 8, el clordano y el paraquat en 7, y por último el dicofol, quitoceno, lindano, mevinfos, aiacolor y forato en menor frecuencia. Los estados que emplean el mayor número de productos restringidos en México son Aguascalientes con 8, Baja California Norte con 6, e Hidalgo, Baja California Sur, Chihuahua, Colima y D F con 4

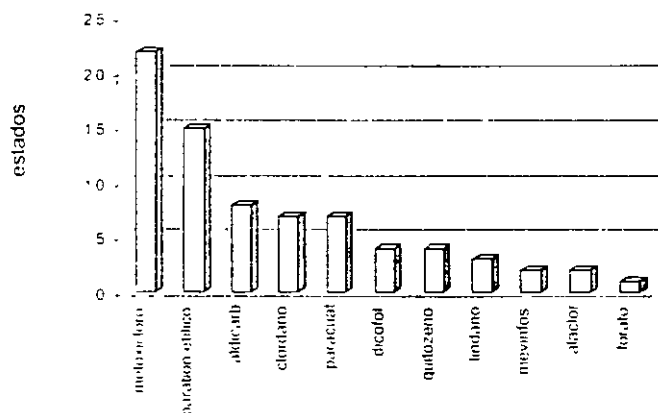


Figura 4 Número de estados de la República en los cuales se emplean plaguicidas restringidos

Ahora bien, si se consideran los agroquímicos que otras legislaciones han marcado como prohibidos ó estrictamente restringidos, resalta el empleo del paratión metílico en todo el territorio, la del carbarilo y el metomilo en el 81% del mismo, así como el dimetoato, maneb y 2,4-D en más del 50% del territorio. La frecuencia de estos productos se muestra en la Figura 5 se observa que en los

estados de Baja California Norte y Chiapas, se emplean hasta 10 de estos productos y 9 en Baja California Sur, Chihuahua, Jalisco y Nuevo León.

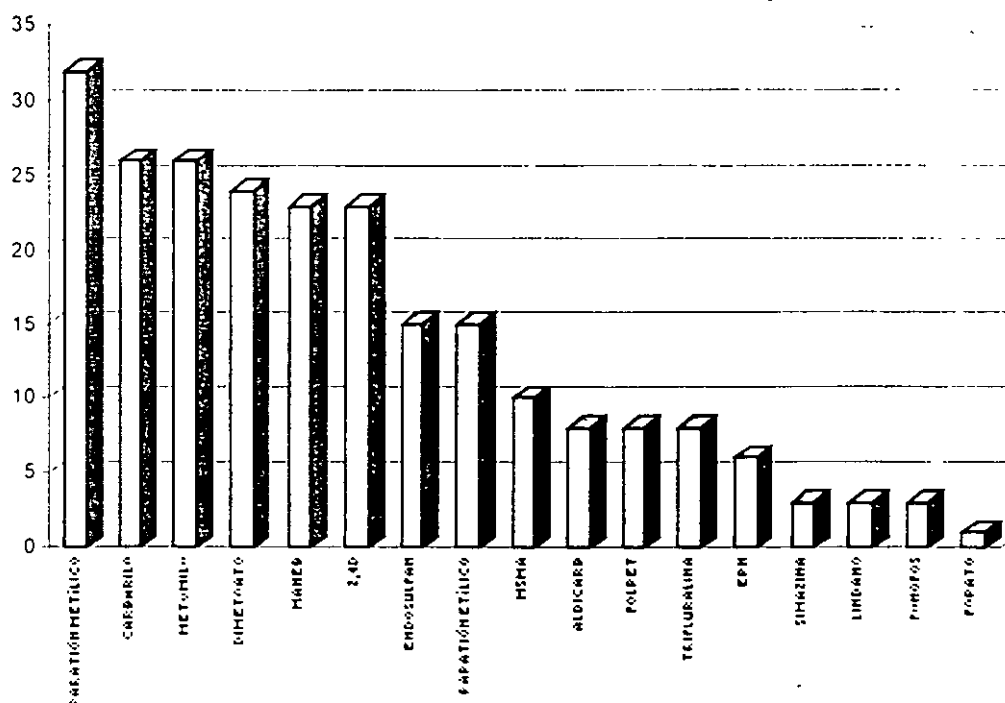


Figura 5 Número de estados de la República en los cuales se emplean plaguicidas - prohibidos en otros países

La distribución geográfica de estos productos se muestra en las Tablas 7 y 8. Es aparente que este es un problema expandido a lo largo del país, pero cuya prioridad de atención debe ser diferente si se combina la distribución del problema con la información de los balances por región hidrológica: en zonas de escasez, la protección del suministro de agua (principalmente acuíferos) es relevante. Esta información deberá ser afinada considerando las regiones donde el suministro de agua por acuíferos es importante

Tabla 7 Comparación del número de plaguicidas de uso restringido en México o prohibidos otros países

PLAGUICIDAS	ESTADOS DE LA REPUBLICA DONDE SE APLICAN
Restringidos en México y otros países	
1 a 3 plaguicidas	Aguascalientes, Baja California Sur, Baja California Norte, Campeche, Chihuahua, Chiapas, Coahuila, Colima, D.F., Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, San Luis Potosí, Sonora, Tabasco, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán, Zacatecas
4 a 7 plaguicidas	Tamaulipas
De 8 en adelante	
Prohibidos en México y en otros países	
1 a 3 plaguicidas	Colima, Quintana Roo, Yucatán.
4 a 7 plaguicidas	Aguascalientes, Campeche, Coahuila, D.F., Durango, Hidalgo, Guanajuato, Guerrero, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas.
De 8 en adelante	Baja California Sur, Baja California Norte, Chiapas, Chihuahua, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Sinaloa, Sonora

ADAPTADO DE Jiménez y Ramos, 1995

Tabla 8 Estados de la República donde se localiza el mayor número de plaguicidas prohibidos nacional e internacionalmente

NÚMERO DE PLAGUICIDAS PROHIBIDOS	ESTADOS DE LA REPÚBLICA DONDE SE APLICAN
0	Durango y Guanajuato
1 a 3	Aguascalientes, Campeche, Coahuila, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Estado de México, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán
4 a 7	Baja California Sur, Baja California Norte, Colima, Chiapas, D.F., Chihuahua, Guanajuato , Hidalgo, Oaxaca,
De 8 en adelante	Zacatecas

ADAPTADO DE: Jiménez y Ramos, 1995

A continuación se resumen las propiedades de los plaguicidas más utilizados en el control de plagas.

1.7.1. Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D)

Se usa como herbicida para combatir hierbas latifoliadas de hoja ancha y como regulador en el desarrollo de plantas. Su presentación comercial es en forma de sales ó ésteres del ácido. El 2,4-D es químicamente estable pero sus ésteres liberan al ácido por hidrólisis. Su vida media es de unos días a 6 semanas en el suelo, mientras que en agua, oscila entre una y varias semanas.

El 2,4-D rara vez se encuentra en los alimentos y en escasas concentraciones en el agua. Existen indicios de que el 2,4-D puede ser carcinogénico y se ha reportado que provoca fatiga, dolores de cabeza y hepáticos así como pérdida del apetito. El hombre detecta y rechaza su sabor y olor en concentraciones de 0.05 µg/L. El herbicida se degrada fácilmente.

1.7.2. Alacloro

Se utiliza para controlar malezas de hoja ancha principalmente en los cultivos de maíz. Desaparece del suelo por volatilización, fotodegradación y biodegradación. Se ha detectado su presencia en aguas subterráneas y superficiales así como en el agua de bebida, en concentraciones inferiores a 2 µg/L. Se considera carcinogénico.

1.7.3. Aldicarb

Es un plaguicida sistémico utilizado para controlar los nemátodos en el suelo y a los ácaros que infestan diversos cultivos. Es muy soluble en el agua y muy móvil en el suelo. Se descompone por biodegradación e hidrólisis, persistiendo durante semanas a meses. Se halla con frecuencia como contaminante de las aguas subterráneas.

El aldicarb es uno de los plaguicidas en uso con mayor toxicidad aguda. Inhibe la acetilcolinesterasa. Se metaboliza produciendo sulfoxido y sulfona. El conjunto de los datos disponibles indica que el aldicarb no es genotóxico ni carcinogénico.

1.7.4. Aldrina y dieldrina

En la actualidad se emplean principalmente para combatir termitas. La aldrina y la dieldrina son plaguicidas clorados que se utilizan contra plagas que viven en el suelo, en semillas o cultivos.

para la protección de la madera y, en el caso de la dieldrina, contra insectos de importancia para la salud pública. La aldrina se convierte rápidamente en dieldrina en la mayor parte de las situaciones ambientales y en los organismos por oxidación. Son insecticidas de acción prolongada que se acumulan en la cadena alimentaria.

Ambos compuestos guardan una estrecha relación por su toxicología y modo de acción. La dieldrina es un compuesto orgánico del cloro muy persistente, de movilidad reducida en el suelo y que se libera en la atmósfera. Se encuentra ocasionalmente en el agua. La exposición a aldrina y dieldrina contenidas en los alimentos es muy reducida y está disminuyendo. Desde principios de los años 70, varios países han prohibido o limitado su uso en la agricultura.

El dieldrin afecta el sistema nervioso central, su teratogenicidad y mutagenicidad no han sido demostrados y al parecer no son carcinógenos. La aldrina y la dieldrina son muy tóxicas para los animales de experimentación y se han producido casos de envenenamiento de seres humanos. Los órganos más afectados son el sistema nervioso central y el hígado.

1.7.5. Atrazina

Es un herbicida selectivo que se utiliza antes de la aparición de las malezas. Se ha hallado en aguas superficiales y subterráneas debido a su movilidad en el suelo. Es relativamente estable, tanto en suelo como en agua, con una vida media de meses, pero se degrada en el suelo por fotólisis y acción microbiana. No es genotóxica y la información sobre la carcinogenicidad es insuficiente.

1.7.6. Clordano

Es un insecticida de amplio espectro, que se utiliza desde 1947. Perteneció al grupo de los hidrocarburos clorados policíclicos llamados insecticidas con ciclodieno. Se usa para combatir termitas, es insecticida en hogares y jardines y sirve para el control de insectos en suelos. Su producción y empleo ha decrecido. El clordano es una mezcla de estereoisómeros, con predominio de las formas *cis* y *trans*. Es muy resistente a la degradación, muy inmóvil en el suelo y sólo se le ha encontrado en raras ocasiones en el agua. Desaparece fácilmente por liberación en la atmósfera.

Aunque las concentraciones de clordano en los alimentos han ido disminuyendo, la sustancia es muy persistente y muestra gran potencial de bioacumulación. Es tóxico y existen indicios de que es mutagenico. Se llegó a la conclusión de que su carcinogenicidad no está suficientemente demostrada en los seres humanos pero sí en los animales.

1.7.7. Clortalurón

Es un herbicida utilizado antes de la aparición de las malezas, poco biodegradable y móvil en el suelo. Se ha detectado en el agua de bebida en concentraciones inferiores a 1 µg/litro. La exposición a este compuesto a través de los alimentos es muy limitada. Se caracteriza por su baja toxicidad para los animales pero con efectos a dosis altas.

1.7.8. 1,2-dibromo-3-cloropropano (DBCP)

Es un fumigante para suelos muy soluble en el agua. Este compuesto se ha detectado en hortalizas cultivadas en suelos tratados, en el aire en concentraciones bajas, y en el agua (unos cuantos µg/L). Su umbral de sabor y olor es de 10 µg/L.

Es tóxico para la función reproductora en los seres humanos y en varias especies de animales. Es genotóxico en la mayoría de las valoraciones realizadas *in vitro* e *in vivo* y hay pruebas suficientes de su carcinogenicidad para los animales. Información epidemiológica reciente parece indicar un aumento de la mortalidad por cáncer en las personas expuestas a la DBCP en grandes concentraciones.

1.7.9. Diclorodifeniltricloroetano, DDT o 4,4-DDT

El DDT puro es estable al calor, no se descompone abajo de los 195°C pero el DDT comercial se descompone fácilmente a 100°C. La estructura del DDT permite varias formas isoméricas distintas, y los productos comerciales están constituidos principalmente por *p,p*-DDT.

El DDT es el más permanente de todos los insecticidas comúnmente usados, debido a su insolubilidad en el agua, baja presión de vapor, y resistencia por la luz y la oxidación. Es un insecticida de acción prolongada, estable en la mayoría de las condiciones ambientales y con metabolitos resistentes a la acción microbiana. También es el más importante de los plaguicidas, detuvo la epidemia del tifo en 1944 en Nápoles y limpió la isla de Cerdeña de los mosquitos de malaria. A finales de la década de los 40 se llegó a creer que erradicaría las moscas pero se descubrió entonces que los insectos desarrollaban resistencia al producto. Como resultado se aumentaron las dosis aplicadas y se crearon programas de investigación para buscar otros compuestos. Se sintetizó entonces el lindano, clordano y el dieldrin. Pero, el problema de la adaptación no fue remediado por lo que se recurrió a otras familias, mucho más tóxicas, como las de los organofosforados y los carbamatos. A pesar de ello, los organoclorados y en especial el DDT siguen siendo usados para combatir la malaria, la fiebre amarilla y el mal de Chagas. En agricultura, se emplean para el control de plagas de algodón, maíz, cacahuete y tabaco.

El DDT puede acumularse en los peces en cantidades 10,000 veces superiores a las concentraciones presentes en el agua circundante. A pesar de que está prohibido en algunos países, en los tropicales aún se emplea no sólo en agricultura sino también en la lucha antivectorial. En México es de uso restringido.

La ingesta diaria aportada por los alimentos puede llegar a 0.286 mg/persona, la mayor parte proviene de alimentos de origen animal. En dosis pequeñas, el DDT se absorbe casi totalmente después de la ingestión o inhalación y se almacena en el tejido adiposo. Las concentraciones de DDT en la sangre de la población en general de distintos países, fluctúa entre 0.01 y 0.07 µg/L y se han observado concentraciones en la leche materna de 0.01 a 0.1 µg/L.

Afecta al sistema nervioso central y periférico así como al hígado. Es tóxico para mamíferos, muy persistente y se acumula en las cadenas alimenticias. Es carcinógeno.

El DDT se trata por dehidrocloración en solución alcalina con trazas de Fe, Al o Cr para formar un producto no insecticida 1,1-dicloro-2,2-bis(p-clorofenil) etileno. Puede ser oxidado a *p,p'*-diclorobenzofenona en una reacción que es catalizada por la luz ultravioleta.

1.7.10. Heptacloro y heptaclorepóxido

Es un insecticida de amplio espectro, cuyo uso se ha prohibido o restringido en muchos países. En la actualidad, aún se utiliza para la lucha contra las termitas mediante inyección subsuperficial en el suelo.

El heptacloro es bastante persistente en el suelo, donde se transforma principalmente en su epóxido, que es muy resistente a la degradación y altamente tóxico. El heptacloro y el heptaclorepóxido se unen a las partículas del suelo y se mueven muy lentamente. Se considera que la principal fuente de exposición al heptacloro son los alimentos. Ambos se han encontrado en agua de bebida en concentraciones de nanogramos por litro.

La exposición prolongada al heptacloro se ha asociado con lesiones hepáticas y efectos tóxicos en el sistema nervioso central. Ha demostrado ser teratogénico, mutagénico y carcinogénico en animales.

1.7.11. Lindano

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

Es un insecticida de amplio espectro perteneciente al grupo de hidrocarburos clorados policíclicos. Se usa para el tratamiento de animales en edificios (contra ectoparásitos), ropa, agua (contra los mosquitos), plantas y suelo. Se degrada lentamente produciendo isómeros alfa o delta. La principal fuente de contaminación del agua es su aplicación directa para el control de mosquitos, seguido de su empleo en actividades agrícolas, forestales y, en menor grado, el vertido de descargas industriales.

El lindano es un compuesto persistente con una afinidad por el agua relativamente baja y una reducida movilidad en el suelo, se volatiliza lentamente en la atmósfera. La exposición de los seres humanos, que tiene lugar principalmente a través de los alimentos, está disminuyendo.

Después de un empleo prolongado e inapropiado para tratar la sarna en el hombre, se ha observado la irritación del sistema nervioso central así como de efectos tóxicos secundarios (náuseas, vómitos, espasmos, respiración superficial acompañada de cianosis y discrasia sanguínea). Su teratogenicidad, mutagenicidad y cancerogenicidad no están bien definidos.

1.7.12. Metoxicloro

El metoxicloro es un insecticida utilizado en las hortalizas, las frutas, los árboles, el forraje y los animales de granja. Se disuelve mal en el agua y es sumamente inmóvil en la mayor parte de los suelos agrícolas.

Es un compuesto cuya toxicidad aguda es relativamente baja y que no provoca efectos teratogénicos en ratas ni mutagénicos en bacterias. En condiciones normales de uso el metoxicloro no parece ser perjudicial para el medio ambiente. No obstante, se ha detectado ocasionalmente en el agua de bebida. Se cree que la ingesta diaria a través de los alimentos y el agua de bebida es inferior a 1 μg por persona.

1.7.13. Pentaclorofenol (PCF)

El pentaclorofenol (PCF) se utiliza principalmente como conservador de madera. En las zonas en que se lleva a cabo el tratamiento de ésta, pueden hallarse altas concentraciones en aguas subterráneas y superficiales. La población en general se ve expuesta a este compuesto a través

del agua de bebida y los alimentos y de la exposición a artículos tratados con él (por ejemplo, textiles o productos del cuero y el papel) y, ante todo, por la inhalación de aire contaminado con PCF en interiores.

El PCF de calidad técnica no purificado contiene varios microcontaminantes, en particular dibenzo-*p*-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados, cuyo congénere más relevante desde el punto de vista toxicológico es la hexaclorodibenzo-*p*-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados. Los microcontaminantes parecen ser las partes activas principales que determinan la toxicidad no aguda del PCF que se encuentra en el comercio

La toxicidad aguda en el hombre se manifiesta por un aumento de temperatura, respiración acelerada y, finalmente paro cardíaco. Se absorbe tanto en el tracto intestinal como a través de la piel y se excreta sin modificaciones en la orina

1.7.14. Permetrina

Es un insecticida piretroide sintético, ampliamente utilizado para la protección de cultivos y en salud pública. Se emplea para la lucha contra las larvas de mosquito en los depósitos de agua y para el control de la infestación de tuberías maestras por invertebrados acuáticos.

La permetrina se caracteriza por su acentuada afinidad con el suelo y los sedimentos y su reducida afinidad con el agua, y es poco probable que desaparezca por liberación en la atmósfera. Puede ser objeto de fotodegradación y biodegradación y puede persistir durante días o durante semanas. Por lo general, se utiliza en forma de mezcla de isómeros *cis* y *trans*, el isómero *cis*, que es el componente activo, es más tóxico que el *trans*.

Este insecticida no se acumula en los mamíferos debido a su rápida metabolización. La exposición a él a través de los alimentos y de los usos domésticos y de salud pública es probablemente elevada. La permetrina es poco tóxica para los mamíferos y no es genotóxica

A continuación se presenta la Tabla 9 con los plaguicidas que no se encuentran comúnmente en el agua, pero que si hay valor guía (OMS 1995).

Tabla 9 Plaguicidas poco frecuentes en el agua pero existe valor guía

NOMBRE	USO	EFEECTO	VALOR GUÍA (OMS, 1995)
MCPA	Herbicida utilizado después de la aparición de las malezas	No hay información suficiente sobre su carcinogenicidad en seres humanos	2 µg/L
Pendimetalina	Herbicida utilizado antes de la aparición de malezas, poco móvil y persistente en el suelo	No tiene una actividad mutagénica importante así como su carcinogenicidad	20 µg/L
Pridato	Herbicida por contacto utilizado con cereales (maíz, arroz, etc.)	No es genotóxico y al parecer tampoco carcinógeno	100 µg/L

Los valores guía para plaguicidas se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Valores guía de los plaguicidas en agua potable

COMPUESTO	VALOR GUÍA (µg/L)	OBSERVACIONES
Alacloro	20.0 ^a	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
Aldicarb	10.0	
Aldrina/ dieldrina	0.03	
Atrazina	2.0	
Bentazona	30.0	
Carbofurano	5.0	
Clordano	0.2	
Clortoluron	30.0	
DDT	2.0	
1,2-dibromo-3-cloropropano	1.0 ^a	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
2,4-D	30.0	
1,2-dicloropropano	20.0 (P)	
1,3-dicloropropano		NDS
1,3-dicloropropeno	20.0 ^a	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
Dibromuro de etileno (DBE)		NDS
Heptacloro y Heptacloroepóxido	0.03	
Hexaclorobenceno	1.0 ^a	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
Isoproturon	9.0	
Lindano	2.0	
MCPA	2.0	
Metoxicloro	20.0	
Metolacloro	10.0	
Molinate	6.0	
Pendimetalina	20.0	
Pentaclorofenol	9.0 (P)	
Permetrina	20.0	
Propanil	20.0	
Pindato	100.0	
Simazina	2.0	
Herbicidas clorofenoxidos distintos del 2,4-D y el MCPA		
2,4-DB	90.0	
Dicloroprop	100.0	
Fenoprop	9.0	
MCPB		NDS
Mecoprop	10.0	
2,4,5-T	9.0	

NDS: No hay datos suficientes para recomendar un valor guía basado en criterios sanitarios

ADAPTADO DE OMS, 1995

1.8. Éteres

Se hidrolizan lentamente, algunos pueden ser adsorbidos en materia orgánica. Casi no se volatilizan y la fotólisis no los destruye. Se recomienda como valor guía para protección de la vida acuática 238.000 µg/L como cloroalquileteres. La Tabla 11 presenta los principales contaminantes de este grupo.

Tabla 11 Características de los éteres prioritarios

COMPUESTO	USO/FUENTE
2,3,7,8-tetraclorodibenceno-p-dioxina	Poco usual. Se considera precursor de herbicidas.
2-Cloro etil vinil éter	Se usa en la obtención de anestésicos, sedantes y en la elaboración de éteres de celulosa.
4-Bromofenil feniléter	Existe muy poca información sobre este compuesto. Se ha identificado en diferentes tipos de aguas.
bis (2-cloro etil) éter	Se usa en la manufactura de pinturas, barnices, lacas, jabones y removedores. Es solvente de ésteres de celulosa, naftalenos, aceites, grasas, pectinas y gomas.
Bis(2-cloro etoximetano)	Se usa como fumigante y en el lavado en seco. No tiene uso autorizado en México como plaguicida.
Bis(2-cloro isopropil)éter	Se usa ampliamente en síntesis orgánica, en la industria textil, en la producción de polímeros e insecticidas como agente desengrasante y solvente. Participa en la preparación de resinas de intercambio iónico.
	Se usa como disolvente de ceras, grasas, pinturas y barnices. Es quitamanchas.

1.9. Ésteres del ácido ftálico

Los ésteres del ácido ftálico (Tabla 12) se norman como grupo para protección de la vida acuática en agua dulce en 940 µg/L y 3 µg/L para toxicidad aguda y crónica, respectivamente. En agua salada se establece 2.9 mg/L y para salud humana, 313 mg/L.

Tabla 12 Características de los ésteres del ácido ftálico

COMPUESTO	USO/FUENTE
Butilbencil ftalato	Plastificante para resinas polivinílicas y celulósicas, intermediario orgánico.
di-n-butil ftalato	Se usa como plastificante en los sistemas de emulsión del acetato de vinilo y de los ésteres de celulosa. También se usa como repelente de insectos.
di-n-octil ftalato	Se usa en la fabricación de plásticos.
Dietilftalato	Solvente de ésteres de celulosa. Vehículo para los plaguicidas en aerosol, como fijador y disolvente en perfumería.
Dimetilftalato	Se usa en la fabricación de plásticos de ésteres de celulosa y como repelente de insectos.

1.10. Fenoles

Son un grupo de compuestos orgánicos subproducto de la manufactura del acero, la destilación del coque, refinación del petróleo y de operaciones químicas. Deben ser removidos antes de descargarse a las fuentes de agua. Los fenoles también son asociados con el decaimiento de los productos de la madera, biocidas y las descargas de aguas municipales. La presencia de los fenoles en procesos de la industria alimenticia, donde se utiliza en grandes cantidades el agua, puede contaminar los alimentos y las bebidas.

1.10.1. Clorofenoles

Los clorofenoles presentes en el agua de bebida son resultado de la cloración de los fenoles, productos secundarios de la reacción del hipoclorito con ácidos fenólicos, biocidas o productos de la degradación de herbicidas fenotóxicos. Los clorofenoles que con mayor frecuencia se hallan en el agua de bebida como productos secundarios de la cloración son el 2-clorofenol (2-CF), el 2,4-diclorofenol (2,4-DCF) y el 2,4,6-triclorofenol (2,4,6-TCF) y por lo común son inferiores a 1 µg/L. Información de cada uno de ellos se encuentra en la Tabla 13.

1.10.2. 2,4,6-triclorofenol

Se forma durante la cloración en aguas que contienen fenol u otras sustancias orgánicas de origen natural. En agua potable es común encontrar entre 0.003 µg/L y 1 µg/L (OMS, 1985). Dosis elevadas incrementan la temperatura del cuerpo y producen convulsiones. Pero el principal problema comprobado es que ese compuesto provoca leucemia y carcinomas hepatocelulares en ratas, y es mutagénico. Es eliminado del cuerpo con rapidez.

Tabla 13 Características de los fenoles

COMPUESTO	USO/FUENTE	COMENTARIO
2,4,6-triclorofenol	Se usa para producir 2,3,4,6-tetrafenol y pentaclorofenol Es germicida, bactericida, conservador de madera y defoliante	
2,4-Diclorofenol	En síntesis orgánica es un intermedio frecuente	
2,4-Dimetilfenol (2,4-Xilenol)	Se usa en la producción de antioxidantes fenólicos, desinfectantes, solventes, fármacos, insecticidas, fungicidas, plastificantes, óxido de polifenileno, lubricantes y gasolina	
2,4-Dinitrofenol	Se usa en la obtención de colorantes, especialmente colores de azufre, ácido picrico y ácido picramico. En la conservación de tablonés y en la fabricación del revelador fotográfico amidol	
2-Clorofenol	Se usa en síntesis orgánica para la obtención de colorantes	
2-Nitrofenol	Se usa en síntesis orgánica y en la elaboración de plaguicidas	
4,6-Dinitro-o-cresol	Es ampliamente usado en la agricultura como herbicida y plaguicida. En la industria de colorantes	No se produce en los Estados Unidos.
4-Nitrofenol	Se usa en la síntesis de materia colorante y plaguicidas	
Fenol	Se usa en la fabricación de explosivos, fertilizantes, pinturas, removedores de pinturas, caucho, asbesto, conservador de madera, resinas sintéticas, textiles, drogas, fármacos, perfumes, baquelita y otros plásticos Es desinfectante de petróleo, piel, papel, jabón, juguetes y agricultura	La concentración de fenol en agua potable no debe exceder de 300 mg/L.
p-Cloro-m-cresol	Se usa como un germicida externo y conservador de pinturas, tintes, textiles, pieles y cosméticos	No existen criterios
Pentaclorofenol	Es comercialmente producido como bactericida, herbicida, molusquicida y fungicida Su uso principal es para conservar la madera y sus derivados	No tiene uso autorizado en México como plaguicida

1.11. Nitrosaminas

Las nitrosaminas son compuestos tóxicos cuyo uso como plaguicidas en México es muy limitado. Sin embargo, son productos presentes en las descargas industriales. La Tabla 14 presenta sus características.

Tabla 14 Características de las nitrosaminas

COMPUESTO	USO/FUENTE	COMENTARIO
n-nitroso-di-n-propilamina (Di-n-propilnitrosamina)	Se emplea como retardador de la vulcanización del caucho Es plaguicida	Como plaguicida no tiene uso autorizado en México
N-nitroso-di-n-fenilamina (difenilnitrosamina)	Se usa en la elaboración de dimetilhidrazina. Se usa también en la industria como disolvente y como nematocida en la inhibición de acrilonitrilo en la elaboración de plásticos de caucho	No tiene uso autorizado en México como plaguicida

1.12. Ácido nitrilotriacético, ANA

Se utiliza principalmente en los detergentes para lavar la ropa como sustituto de los fosfatos y en el tratamiento del agua de las calderas para evitar la acumulación de incrustaciones minerales. Las concentraciones en el agua de bebida no sobrepasan, por lo común, unos pocos microgramos por litro.

Los animales no metabolizan el ANA, que se elimina con rapidez, aunque se puede retener brevemente una cierta cantidad en los huesos. La toxicidad aguda de este compuesto para los animales es baja, aunque se ha demostrado que produce tumores renales en los roedores tras exposición prolongada a dosis altas. Este compuesto no es genotóxico, y se cree que los tumores notificados se deben a citotoxicidad resultante de la quelación de cationes divalentes como el zinc y el calcio en el tracto urinario.

1.13. Acrilamida

El monómero residual acrilamida está presente en coagulantes que se utilizan para el tratamiento del agua de bebida. En general, la dosis máxima autorizada del polímero es de 1 mg/L. Con un contenido máximo del monómero de 0.05%. En la práctica, las concentraciones son de 2 a 3 veces menores. Las poliacrilamidas se usan también como recubrimiento de depósitos y pozos de agua potable. Debido a la utilización de poliacrilamida en la elaboración de los alimentos, éstos pueden ser una fuente adicional de exposición.

Tras su ingestión, la acrilamida se absorbe fácilmente a través del tracto gastrointestinal. La acrilamida puede atravesar la placenta. Es neurotóxica, afecta a las células germinales y da lugar a un deterioro de la función reproductora.

A partir de la información disponible, se llegó a la conclusión de que la acrilamida es un carcinógeno genotóxico.

1.14. Ftalato de di(2-etilhexilo), FEDH

Se utiliza principalmente como plastificante. Se encuentra en las aguas superficiales y subterráneas y en el agua de bebida en concentraciones de unos pocos microgramos por litro. En las aguas superficiales y subterráneas contaminadas, se han notificado concentraciones de centenares de microgramos por litro. La exposición individual puede variar considerablemente debido a la amplia gama de productos que lo contienen siendo los alimentos la principal vía de exposición.

1.15. Compuestos orgánicos del estaño

El grupo de las sustancias químicas denominadas compuestos orgánicos del estaño está integrado por un gran número de sustancias con distintas propiedades y aplicaciones. Los más utilizados son los compuestos disustituidos que se usan como estabilizantes de los plásticos, en particular de las tuberías de agua de cloruro de polivinilo (PVC), y los trisustituidos, que se utilizan ampliamente como biocidas.

En especial, los dialquilos del estaño son compuestos disustituidos que se liberan por lixiviación de las tuberías de agua de PVC durante un breve periodo después de su instalación. Son inmunotoxinas de toxicidad baja

El óxido de tributilestaño (OTBE) se utiliza ampliamente como biocida en los conservantes de la madera y las pinturas protectoras. Es extremadamente tóxico para la vida acuática y su uso se está reduciendo en algunos países. Sólo se dispone de datos limitados sobre la exposición a él

1.16. Acrilonitrilo

Se usa en la industria de fibras sintéticas, acrilostireno, plásticos, butadieno estireno, y adhesivos. También se usa como plaguicida y fumigante para cereales. No tiene uso autorizado en México como plaguicida.

1.17. Acroleína

Se usa como intermediario en la producción de glicerina y en la producción de metionina y sus derivados. Se usa en la síntesis química de 1,3,6 hexanetriol y glutaraldehído. Es agente antimicrobiano en la manufactura del papel.

1.18. Isoforona

Se usa comercialmente como disolvente de lacas, polivinilo, resinas de nitrocelulosa, plaguicidas, herbicidas, aceites, grasas y gomas. También se usa en la síntesis de 3,5-xilenol, 2,3,5 trimetilciclohexanol y 3,5-dimetilanilina.

A continuación se presenta la Tabla 15 que resume los valores guía de componentes orgánicos diversos que contaminan el agua:

Tabla 15 Valores guía de los componentes orgánicos

COMPUESTO	VALOR GUÍA, (µg/L)	OBSERVACIONES
Alcanos clorados		
Tetracloruro de carbono	2	
Diclorometano	20	
1,1-dicloroetano		NDS
1,2-dicloroetano	30 ^c	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
1,1,1-tricloroetano	2000 (P)	
Etenos clorados		
Cloruro de vinilo	5 ^c	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
1,1-dicloroetano	30	
1,2-dicloroetano	50	
tricloroetano	70 (P)	
tetracloroetano	40	
Hidrocarburos aromaticos		
Benceno	10 ^c	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
Tolueno	700	ASO
Xilenos	500	ASO
Etilbenceno	300	ASO
Estireno	20	ASO
Benzo(a)pireno	0.7	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
Bencenos clorados		
monoclorobenceno	300	ASO
1,2-diclorobenceno	1000	ASO

Tabla 15 Valores guía de los componentes orgánicos

COMPUESTO	VALOR GUÍA, (µg/L)	OBSERVACIONES
1,3-diclorobenceno		NDS
1,4-diclorobenceno	300	ASO
Triclorobencenos (total)	20	ASO
Diversos		
Adipato de di(2-etilhexilo)	80	
ftalato de di(2-etilhexilo)	8	
Acilamida	0.5 ^b	Para un riesgo adicional de 10 ⁻⁵
Epiclorhidrina	0.4 (P)	
Hexaclorobutadieno	0.6	
Ácido edético (EDTA)	200 (P)	
Ácido nitrotriacético	200	
Dialquilo de estaño		NDS
Óxido de tributilestaño	2	

NDS: No hay datos suficientes para recomendar un valor guía basado en criterios sanitarios.

ASO: Concentraciones de la sustancia iguales o inferiores al valor guía basado en criterios sanitarios pueden influir en la apariencia, el sabor o el olor del agua.

1.19. Tóxicos prioritarios

Un tóxico es cualquier sustancia química capaz de causar daños, debilitar o matar a cualquier organismo vivo. Los efectos que producen son función del tipo de sustancia, concentración y metabolismo. En general son teratogénicas (que produce anomalías durante el periodo de gestación que producen monstruosidades en animales o plantas), mutagénicas (produce cambios genéticos), carcinogénicas o venenosas. Una característica relevante es que son acumulables, es decir, su efecto se manifiesta sólo después de un cierto periodo de exposición. Entre una concentración tolerable y letal hay un nivel intermedio donde se presentan efectos secundarios. Este valor inferior corresponde al umbral del valor límite (UVL) y representa la máxima concentración a la cual un organismo puede ser expuesto continuamente sin sufrir trastornos. El UVL se utiliza para definir los estándares de contaminación.

El concepto de tóxico prioritario nació por un conocido episodio ambiental a finales del siglo XIX, cuando William T. Love inició la construcción de un canal para unir el río Niágara con las cataratas del mismo nombre. Por diversas razones no se concluyó la obra y quedó una zanja de 1.6 km de largo que fue llamada "El Canal del Amor". Poco a poco, las industrias químicas emplearon el canal para la disposición de sus desechos y, en una década, el canal recibió aproximadamente 20,000 toneladas de compuestos peligrosos. En febrero de 1978 la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) encontró la presencia de 27 compuestos orgánicos sintéticos y 10 metales. Paralelamente se detectaron muchos casos de intoxicación por lo que se declaró la zona como de desastre y se evacuaron 949 familias. Este incidente inició el interés por el control de los tóxicos sintéticos, un nuevo grupo de contaminantes.

Actualmente, existe una lista bien definida de compuestos que constituyen una prioridad de control en la estrategia del agua en Estados Unidos, toda vez que éste país ha superado aceptablemente los problemas de contaminación biodegradable y microbiológica. La lista fue establecida al considerar que el hombre sintetiza comúnmente más de 80,000 sustancias y ante la imposibilidad de controlarlas todas se efectúa una selección para determinar cuáles son de mayor interés. La diferencia de criterios ha llevado a que se definan diferentes números y tipos de compuestos en diversas regiones. La Comunidad Europea ha identificado 1,500 sustancias que son susceptibles de incluirse en la lista de tóxicos, de las cuales 1,000 son producidas en cantidades inferiores a 100 ton/año; 186 mayores de 100 ton/año; 44 mayores de 10,000 ton/año y 25 exceden las 100,000 ton/año. La EPA seleccionó 126 (Tabla 16), la Comunidad Europea menciona 129 ("Lista negra I")

Tabla 17 Contaminantes críticos del agua de los Grandes Lagos

- Bifenilos policlorados totales (PBC)
- DDT y sus metabolitos
- Dieldrin
- Toxafeno
- 2,3,7-8 Tetraclorodibenceno -p- dioxina (2,3,7,8. -TCDD)
- 2,3,7,8. -Tetraclorodibenzo furano (2,3,7,8-TDF)
- Mirex
- Mercurio
- Alcanos de plomo
- Benzo (a) pireno
- Hexaclorobenceno

En México, no ha sido definida una lista a este respecto; sin embargo con el objeto de que cuente con una lista de sustancias tóxicas de atención prioritaria en sus cuerpos de agua, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a partir de un estudio bibliográfico, propuso un total de 52 sustancias, de las cuales el 77% corresponden a plaguicidas y el 23% son de origen industrial (Tabla 18) Esta selección tiene como fundamento su frecuencia a escala nacional, la persistencia en zonas agrícolas, su toxicidad, la bioacumulación, la bioconcentración y la movilidad de los contaminantes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Asimismo, México tiene un acuerdo en el marco del Tratado de Libre Comercio (TLC) para la reducción de ciertas sustancias tóxicas como los BPC, el clordano, el DDT y el Hg, así como un compromiso de vigilancia y reducción del Pb y el Cd con la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE).

Tabla 18 Sustancias tóxicas prioritarias en agua propuestas para México

COMPUESTO TOXICO	
1. 1,1,1-Tricloroetano	27. Forato
2. 2,4-D	28. Fosetil-al
3. Aldicarb	29. Imazapir
4. Benceno	30. Imazetapir
5. Captofol	31. Isoforona
6. Carbanil	32. Lindano
7. Cianuros	33. Maneb
8. Clordano	34. Metomilo
9. Cloroformo	35. MSMA
10. Clorotalonil	36. Naftaleno
11. Clorotoluron	37. Oxadiazon
12. Cloruro de metileno	38. Paraquat
13. Cobre(compuestos de)	39. Pentaclorofenol
14. Dalapon	40. Prometrina
15. Dazomet	41. Quinometionato
16. Diclorvos	42. Quitozeno
17. Dicofof	43. Setoxidin
18. Dietilftalato	44. Simazina
19. Diflubenzuron	45. Terbutrina
20. Dimetoato	46. Tetracloruro de carbono
21. Endosulfan	47. Thiabendazol
22. EPN	48. Tolueno
23. Fenitrothion	49. Tricloroetileno
24. Fenol	50. Triflurana
25. Fluometuron	51. Triforina
26. Folpet	52. Vinclozolin

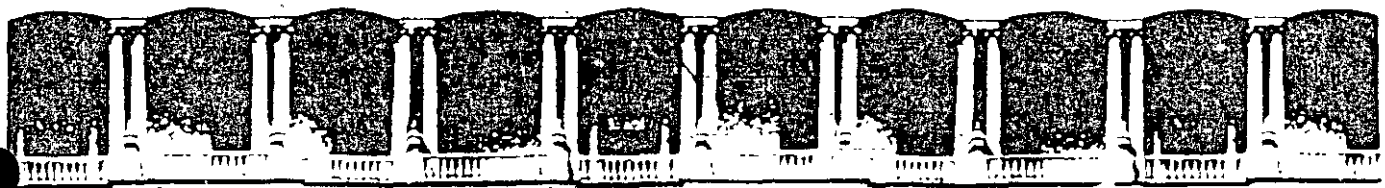
FUENTE: Arévalo, Ramos y Jiménez, 1996

Otro problema que presentan los contaminantes tóxicos es la complejidad para analizarlos así como la valoración de peligrosidad. Las técnicas de análisis son sofisticadas y particularmente caras. En la Tabla 19 se resumen las técnicas por aplicar a cada grupo analítico en función del grado de información requerida.

Tabla 19 Métodos de análisis y detección para los contaminantes tóxicos prioritarios

CONTAMINANTE	METODO ESPECÍFICO
PLAGUICIDAS (4,4'-DDD, 4,4'-DDE, 4,4'-DDT, Aldrin, Alfa-BHC, Alfa-endosulfano, Beta-BHC, Beta-endosulfano, Clordano, Delta-BHC, Dieldrin, Endosulfano sulfato, Endrin, Endrin aldehído, Gama-BHC, Heptacloro, Heptacloro hepóxido, Toxafeno)	Cromatografía de gases
METALES (Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio, Zinc)	Absorción atómica
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS (1,2-Diclorobenceno, 1,3-Diclorobenceno, 1,4-Diclorobenceno, 1,2,4-Triclorobenceno, Clorobenceno, Hexaclorobenceno, 2,4-Dinitrotolueno, 2,6-Dinitrotolueno, Nitroaromáticos, Nitrobenceno)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
AROMÁTICOS PURGABLES (Benceno, Etilbenceno, Tolueno)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS (1,1,2,2-Tetracloroetano, 1,1,1-Tricloroetano, 1,1,2-Tricloroetano, 1,1-Dicloroetano, 1,1-Dicloroetileno, 1,2-Dicloroetano, 1,2-Dicloropropano, 1,2-Dicloropropileno, 1,2-trans-Dicloroetileno, Bromoformo, Clorodibromometano, Cloroetano, Cloroformo, Cloruro de metileno, Cloruro de vinilo, Diclorobromometano, Tetracloroetileno, Tetracloruro de carbono, Tricloroetileno, Hexaclorobutadieno, Hexaclorociclopentadieno, Hexacloroetano, Hidrocarburos clorados)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
ÉTERES (2,3,7,8-Tetraclorodibenceno-p-dioxina, Pesticidas, PCB's, 2-Cloroetil vinil éter, 4-Bromofenil fenil éter, 4-Clorofenil fenil éter, Bis(2-cloroetil) éter, Bis(2-cloroetoxi)metano, Bis(2-clonsopropil)éter, Halocarburos purgables, Haloéteres)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
ÉSTERES DEL ÁCIDO FTÁLICO (Bis(2-etilhexil-ftalato, Butilbencilftalato, Di-n-butilftalato, Di-n-octilftalato, Dietilftalato, Dimetilftalato)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
FENOLES (2,4,6-Triclorofenol, 2,4-Diclorofenol, 2,4-Dimetil fenol, 2,4-Dinitrofenol, 2-Clorofenol, 2-Nitrofenol, 4,6-Dinitro-o-cresol, Fenol, Pentaclorofenol)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (1,2-Difenilhidrazina, 2-Cloronaftaleno, 3,3'-Diclorobencidina, Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Bencidina, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoroanteno, Benzo(ghi)perileno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-cd)pireno, Naftaleno, Pireno)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
NITROSAMINAS (N-nitroso-di-n-propilamina, N-Nitrosodifenilamina, N-Nitrosodimetilamina)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones
OTROS COMPUESTOS (Acrlonitrilo, Acroleína, Isoforona)	Detección con cromatografía de gases y espectrofotometría de iones

FUENTE: EPA, 1980



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

IDENTIFICACIÓN DE HIDROCARBUROS DERRAMADOS AL SUBSUELO Y ESTUDIO DE RIESGO EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial

SUSANA SAVAL¹, JUAN MANUEL LESSER²

¹Instituto de Ingeniería, UNAM ²Lesser y Asociados, S.A.

RESUMEN

Con la finalidad de identificar el tipo y concentración de los hidrocarburos derramados en el subsuelo de una instalación industrial, se realizaron análisis por cromatografía de gases a muestras de suelo, combustibles en fase libre y aguas freáticas. En la mayoría de las muestras de producto libre se encontró diesel y en algunas más, mezclas de diesel con gasolina. En las muestras de suelo provenientes de diferentes profundidades hasta 10 metros, se encontró acumulación de hidrocarburos contaminantes en varios estratos, que podrían ser el resultado de diferentes eventos de derrame, del tipo de material geológico, o bien, de las fluctuaciones del nivel freático. En algunos puntos la concentración de diesel fue cercana a los 20 mil mg/Kg., mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a mil mg/Kg. También se detectó metilterbutiléter (MTBE) como parámetro indicador de la presencia de gasolinas oxigenadas, así como plomo orgánico, que es un constituyente de gasolinas antiguas. Respecto a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTEX), los xilenos se detectaron con mayor frecuencia, además de los hidrocarburos poliaromáticos cuya presencia se hizo evidente en casi todos los casos. A pesar de que el sitio está muy afectado, el hecho de que el principal combustible contaminante sea diesel y que este se encuentra "confinado" en el acuitado por debajo de la losa de concreto, reduce los riesgos toxicológicos, geohidrológico y de explosividad bajo las condiciones actuales del sitio.

PALABRAS CLAVE: acuífero, acuitado, análisis de contaminantes, diesel, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos monoaromáticos volátiles, riesgo

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones destinadas al almacenamiento y distribución de combustibles destilados están constantemente expuestas a derrames, los cuales pueden suceder accidentalmente o por malas prácticas de operación. La infiltración de los combustibles al subsuelo, así como su distribución en los diferentes estratos y su destino, están función de las condiciones del sitio y de las características propias 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. 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 contaminante en el suelo. Para entender este compor-

tamiento, 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 remedio (Saval, 1998).

En este trabajo se presentan los resultados de análisis y la distribución de hidrocarburos en el subsuelo de un sitio contaminado, se discute su comportamiento en función de las características del subsuelo y se analiza el riesgo de la contaminación con tres enfoques diferentes: toxicológico, geohidrológico y de explosividad.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de

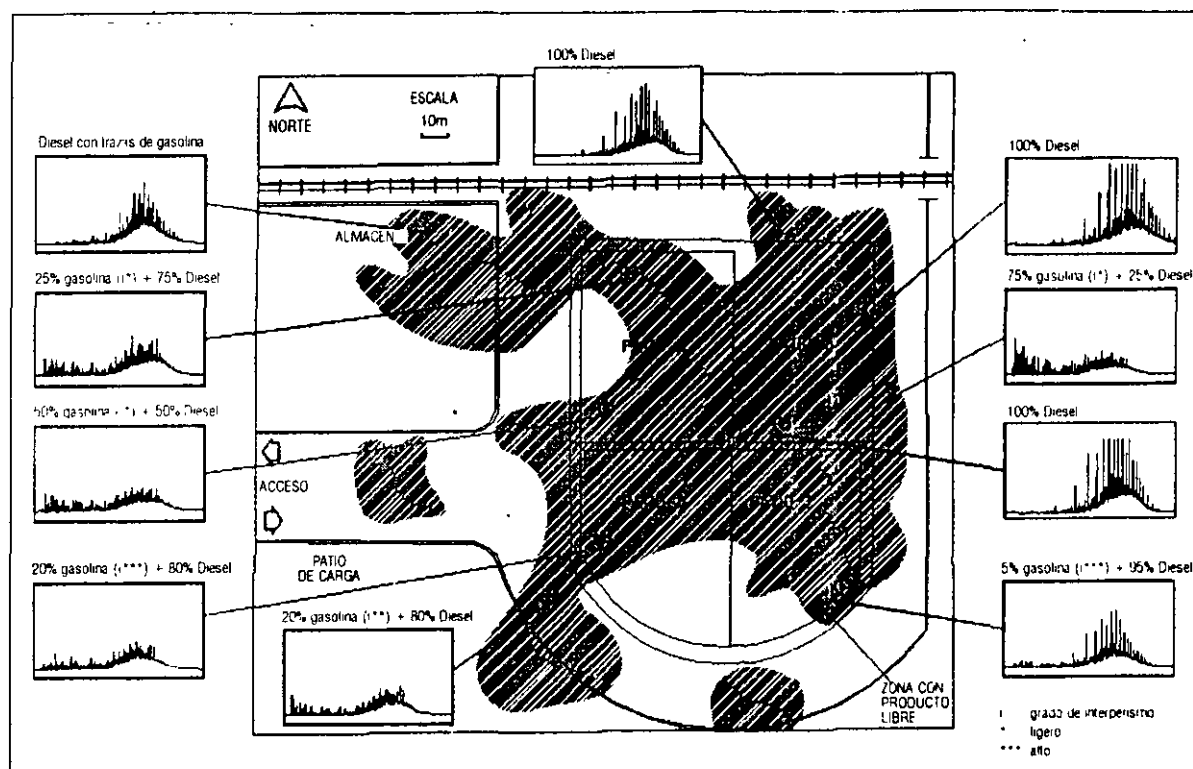


Figura 2. Identificación de combustibles acumulados en el subsuelo

clas de gasolina y diesel en proporciones de 25-75, 50-50 y 75-25 cuyos perfiles sirvieron como referencia para establecer una proporción aproximada de los combustibles en las muestras de producto libre. En la figura 1 se presentan los 5 perfiles de referencia.

El perfil típico de gasolina presenta picos con tiempos de retención del orden de segundos hasta aproximadamente 15 minutos, mientras que el perfil típico de diesel se aprecia entre los 11 y 23 minutos. Los perfiles de las mezclas de gasolina y diesel presentan un gran número de picos que dan continuidad desde el inicio hasta los 23 minutos, pero se puede apreciar claramente la densidad de los picos que corresponden a la gasolina y al diesel. Por tratarse de una gasolina fresca en todos los casos están presentes los hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular, que son los picos que sobresalen a tiempos de retención cortos, la presencia de éstos se detecta a pesar de que la proporción de gasolina en la mezcla sea baja.

En la figura 2 se ilustra la localización de las muestras de producto libre y el perfil cromatográfico correspondiente. En el caso de gasolinas, se estimó el grado de intemperismo o antigüedad (indicado con la letra *i*) por comparación con los perfiles estándar de la figura 1. La presencia de picos con tiempo de retención corto indicó una gasolina ligeramente intemperizada (*i*), mientras que la ausencia de picos indicó alto grado de intemperismo o antigüedad (*i****). Si bien esta estimación es imprecisa, sí da una idea del grado de intemperización de la gasolina. Lo ideal hubiera sido complementar éstos con otro tipo de análisis, sin embargo, no se tuvo esa oportunidad al momento de realizar el estudio.

HIDROCARBUROS Y PLOMO ORGÁNICO EN SUELO

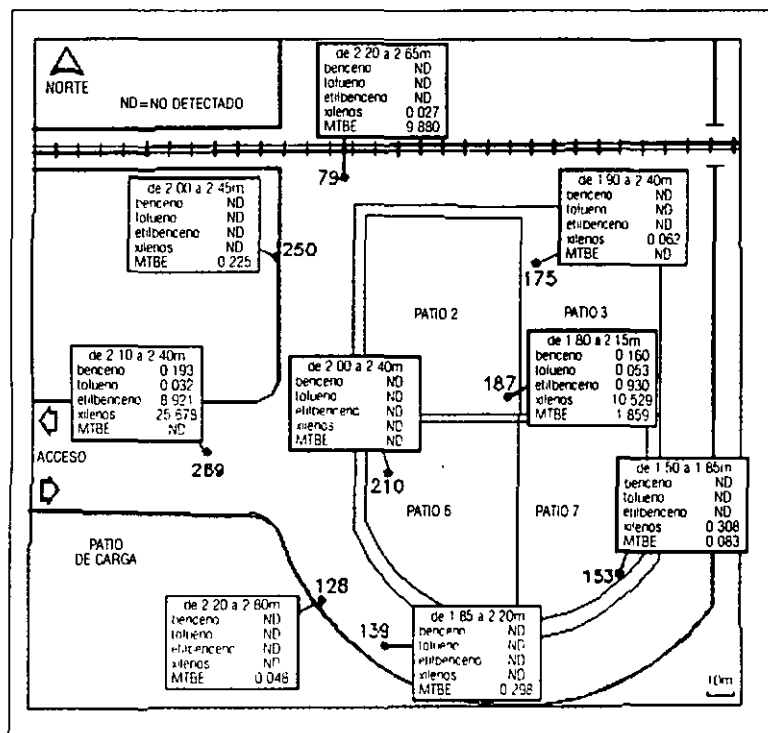
Las muestras de suelo fueron seleccionadas por su localización con respecto a la mancha de producto libre. La profundidad analizada se determinó previamente en función de su cercanía al nivel freático. Uno de los sondeos que se localizó fuera de la zona contaminada, se eligió como un punto blanco. Las muestras de los pozos 153 y 187, se analizaron desde la superficie hasta 3 metros de profundidad, con el fin de conocer la distribución de los contaminantes adsorbidos. Las concentraciones fueron expresadas en mg/Kg. Base seca.

En la figura 3 se presentan las concentraciones de gasolina, diesel y plomo orgánico obtenidas en muestras cercanas al nivel freático. Las concentraciones más altas que se encontraron corresponden a diesel, especialmente en el punto 250 con 9579 mg/Kg., en ese punto también se encontró la más alta concentración de plomo orgánico, de 1512 mg/kg. El perfil de diesel obtenido en el pozo 153 indica que la más alta concentración de diesel se alcanzó a los 2 m, mientras que para el pozo 187 fue a 1.40 m. El plomo orgánico mostró una distribución irregular en los dos sondeos.

En la figura 4 se presentan los resultados de análisis de hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTX) y metilterbutiléter (MTBE). La presencia de benceno, tolueno y etilbenceno (BTE) en su mayoría fue no detectable, con excepción de los puntos 187 y 269 que sí estuvieron presentes aunque en bajas concentraciones. Los xilenos fueron los que se presentaron con mayor frecuencia, la más alta concentración se encontró en el pozo 269 con 25 678 mg/Kg. Estos resultados son típicos cuan-

El sitio referido en este estudio se caracteriza por haber sido

El sitio referido en este estudio se caracteriza por haber sido



parte de antiguos lagos, consisten en arcillas desarrolladas a partir de lobas y cenizas volcánicas con espesor de 40 m que forman un acuitardo, o sea, un material que permite la entrada de agua, pero que la libera muy lentamente. Bajo las arcillas lacustres se encuentran depósitos aluviales con un espesor aproximado de 200 metros, donde se aloja el acuífero de la región. El nivel estático se encuentra a más de 45 m de profundidad, la recarga neta es de 25 mm, prácticamente no hay pendiente y la permeabilidad es muy baja. Lo anterior, permite establecer que el sitio presenta un bajo riesgo geohidrológico

Para analizar el riesgo de explosividad, se tomaron como referencia las lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10 mil ppm (1% v/v) y de explosividad de 100% LEL (Lower Explosion Limit) obtenidas en un estudio previo (Lesser y Saval, 1999). De acuerdo a la NFPA (1999) el diesel registra los siguientes índices: NFPA_{H₂, OH} = 1; NFPA_{FLAMMABIL} = 2 y NFPA_{REACTIV} = 0, su temperatura de inflamación es de 52°C a 1 atm de presión y su volatilidad es baja. A partir de esta información se puede establecer que el riesgo de explosividad en el sitio es reducido, si se toma en cuenta que el problema de contaminación se encuentra "confinado" en el nivel freático y aislamiento del ambiente por una losa de concreto.

La heterogeneidad en la concentración de contaminantes en el subsuelo, refleja su distribución o acumulación en los diferentes estratos, que podrían corresponder ya sea a diferentes eventos de derrame, a los diferentes tipos de material geológico existente, al resultado del movimiento vertical del nivel freático, o bien, a una combinación de todos estos. Este último aspecto es importante, ya que representa un comportamiento cíclico, esto es, cuando el nivel freático se eleva durante la temporada de lluvias, la mayor parte de los hidrocarburos permanece en fase libre y sube junto con el nivel, mientras que otra parte se queda adsorbida en el suelo, posteriormente, cuando el nivel freático baja en la temporada de estiaje, los hidro-

carburos ocupan el espacio liberado por el agua, permitiendo así su adsorción en el suelo. A diferencia del proceso anterior que es dinámico, la baja permeabilidad de las arcillas ha limitado el movimiento horizontal de los hidrocarburos en fase libre, por lo que éstos aún se encuentran dentro del predio.

El metilterbutiléter (MTBE) que es un parámetro indicador de la presencia de gasolinas oxigenadas, se detectó en la mayoría de las muestras analizadas, mientras que el plomo orgánico que es un constituyente de gasolinas tipo Nova, se detectó en muy pocos puntos. Lo anterior podría sugerir que el mayor volumen de gasolina derramada ha ocurrido dentro de los diez últimos años, a partir de la comercialización de la gasolina Magna. La presencia de xilenos, además de los hidrocarburos poliaromáticos, es consecuencia de

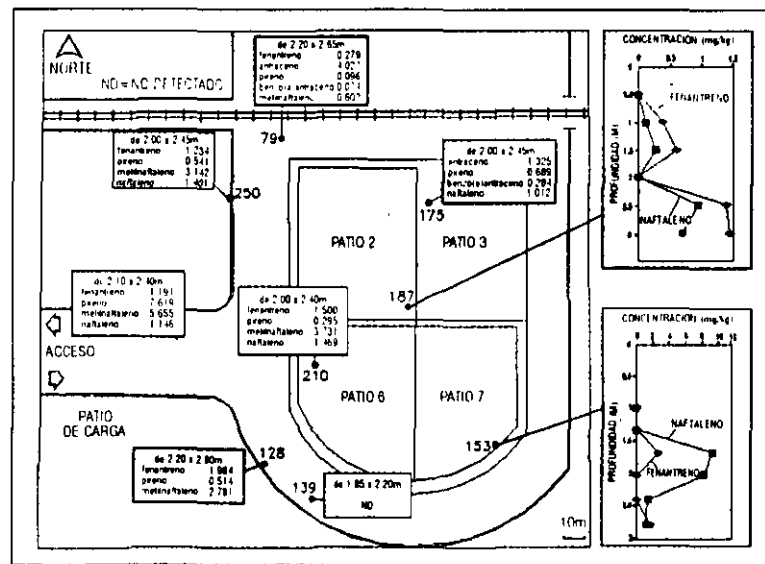


Figura 5. Hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) en muestras de suelo mol/kg, base seca

Intemperismo, efectos de hidrocarburos en suelos y acuíferos

Juan Manuel Lesser* y Susana Saval**

En el subsuelo de instalaciones industriales es común encontrar hidrocarburos contaminantes de suelo y aguas subterráneas, cuya composición se modifica en gran parte por la exposición a la intemperie.

Con la finalidad de conocer algunas de estas modificaciones se obtuvieron muestras frescas de gasolina, diesel y petróleo crudo a las cuales se les sometió a un proceso de intemperización natural, al mantenerlas en un lugar abierto y ventilado. Se tomaron muestras periódicas de cada producto y se analizaron por cromatografía de gases, en los perfiles cromatográficos obtenidos se confirmó la pérdida de los hidrocarburos volátiles. Los resultados obtenidos resaltan la importancia de conocer el efecto de la intemperie sobre cualquier tipo de contaminante.

Cuando ocurre un derrame de combustibles al suelo, una parte de los hidrocarburos se volatiliza, otros migran hacia el subsuelo y se disuelven en el agua subterránea, mientras que otros permanecen en fase libre flotando sobre el nivel del agua. Durante los estudios de prospección del subsuelo, uno de los objetivos que se persiguen es la caracterización de los hidrocarburos contaminantes, para ello se obtienen muestras de suelo, agua y de hidrocarburos en fase líquida, las cuales se pueden analizar en el laboratorio mediante cromatografía de gases con la finalidad de identificar el tipo y concentración de los combustibles presentes (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993) y también se puede establecer si su composición ha sufrido cambios por efecto de la intemperie.

La gasolina y el diesel son mezclas complejas de hidrocarburos destilados del petróleo, que

contienen alrededor de 150 compuestos diferentes (Riser-Roberts, 1992; Mattney, 1994). La gasolina se caracteriza por contener hidrocarburos con bajo peso molecular que son muy volátiles, en comparación con los que están presentes en el diesel. La pérdida de los componentes volátiles en un combustible permite diferenciar un producto fresco de otro antiguo.

Cuando un combustible en fase líquida o adsorbido en el suelo permanece expuesto a la intemperie, el viento ocasiona la pérdida de los hidrocarburos volátiles, mientras que los rayos solares pueden provocar reacciones fotoquímicas en todos sus componentes. La combinación del viento y de la exposición al sol, ocasiona modificaciones químicas, descomposición o incluso la degradación total de los hidrocar-

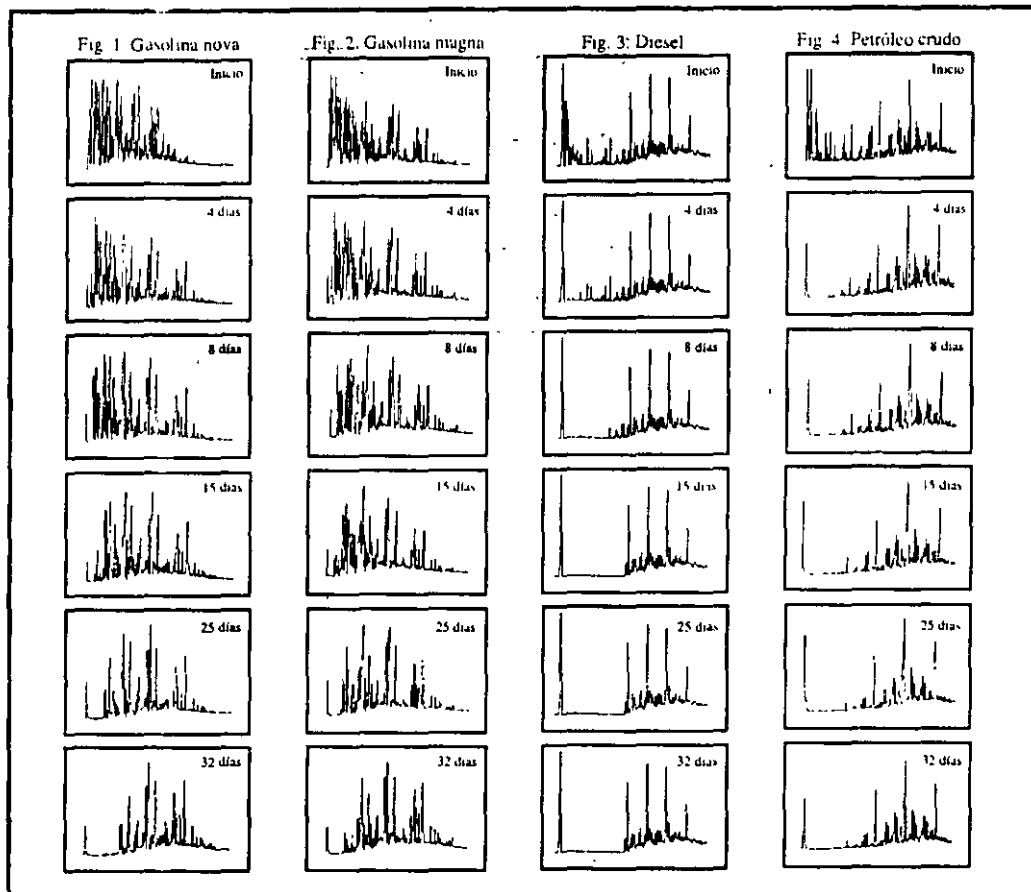
buros, efecto que se conoce como intemperismo.

En este artículo se presentan algunas experiencias obtenidas al someter a la intemperie por volatilización natural, muestras de gasolina, diesel y petróleo crudo a las cuales se les dio seguimiento mediante análisis cromatográficos.

Estrategia. Muestras frescas de gasolina Nova, gasolina Magna, diesel y petróleo crudo se sometieron a análisis de acuerdo con el método EPA 8015 (USEPA, 1996), con lo cual se obtuvieron los perfiles cromatográficos típicos para cada producto. Estos mismos productos se expusieron a la intemperie en un espacio abierto y ventilado de manera natural durante un mes. En forma periódica se tomaron muestras que se analizaron de la misma forma para obtener los perfiles

cromatográficos correspondientes. También se cuantificó el contenido de hidrocarburos volátiles residuales en cada producto.

Resultados. Los perfiles cromatográficos obtenidos para los productos frescos y para las muestras expuestas a la intemperie se presentan en las figuras 1 a 4. Los perfiles típicos de las gasolinas Nova (fig. 1, inicio) y Magna (fig. 2, inicio), presentan picos con tiempos de retención hasta los 16 minutos. La gasolina contiene más de 150 hidrocarburos con estructuras químicamente diferentes entre 3 y 12 átomos de carbono, pero que comparten algunas características, por lo que una mayoría de picos aparecen encimados. A partir de los 4 días de estar expuestos a la intemperie, ya están ausentes aquellos hidrocarburos que tienen menor tiempo de retención,



que corresponden a aquellos con menor peso molecular y más volátiles. La ausencia de estos se va haciendo más marcada con el paso del tiempo, de tal forma que a los 30 días han perdido todos los hidrocarburos que aparecían en los primeros minutos, tanto para la gasolina Nova (fig. 1), como para la gasolina Magna (fig. 2).

En el caso del diesel y del petróleo crudo, los perfiles cromatográficos presentan una mayor diversidad de picos que abarcan tiempos de retención cortos y largos (figs. 3 y 4). La mayor parte de las entidades químicas contenidas en el diesel van de 10 a 30 átomos de carbono, aunque también contiene pequeñas cantidades de hidrocarburos con un menor número de átomos de carbono. En el caso del petróleo ocurre algo similar, aunque aquí se pueden encontrar entidades químicas mucho más complejas y con un mayor número de átomos de carbono que las contenidas en el diesel, las cuales son más estables y sufren menos cam-
biantes la intemperización

Los perfiles cromatográficos obtenidos para el diesel (fig. 3) se observó pérdida de volátiles solamente los primeros 15 días y 8 días para el caso del petróleo crudo (fig. 4), después, los cromatogramas permanecen prácticamente sin cambio hasta los 30 días que duró el experimento.

Por otra parte, con la información obtenida a lo largo del seguimiento de las pruebas, se construyó la gráfica que se presenta en la figura 5, donde se aprecia claramente el porcentaje de pérdida de los hidrocarburos volátiles con respecto al tiempo, referida a la concentración inicial en cada producto. En todos los casos, la disminución fue gradual con respecto al tiempo y acorde con las observaciones de los perfiles cromatográficos. Los dos tipos de gasolina perdieron aproximadamente 60 por ciento de sus hidrocarburos volátiles, mientras el diesel dejó escapar 70

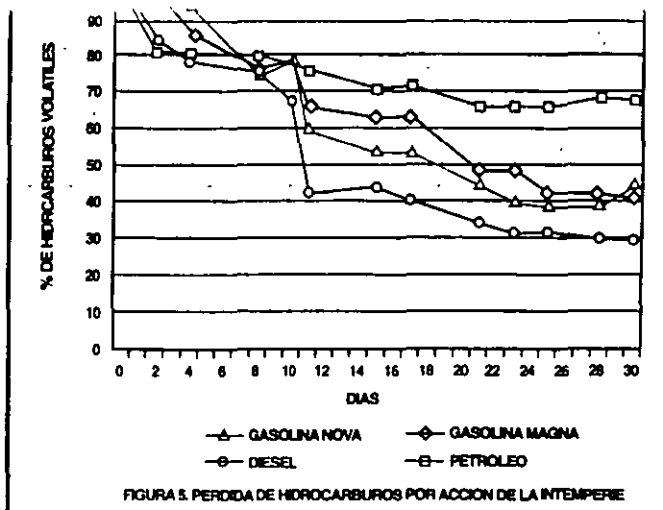


FIGURA 5. PÉRDIDA DE HIDROCARBUROS POR ACCIÓN DE LA INTemperIE

por ciento. El petróleo crudo perdió solamente 25 por ciento de sus hidrocarburos volátiles, quizá debido a su elevada viscosidad.

Discusión. El perfil cromatográfico de cualquier combustible fresco puede ser considerado como una huella digital característica, por lo que puede servir como base para la identificación de hidrocarburos de origen desconocido, como es el caso de aquellos que contaminan suelos y aguas subterráneas. La pérdida de los componentes volátiles durante la intemperización hace que el perfil cromatográfico obtenido no tenga similitud con el combustible de origen, tal como ocurre en los perfiles a 30 días de intemperización, cuando se comparan con aquellos que se obtuvieron al inicio del experimento (figs. 1 a 4).

Lo anterior es de fundamental importancia cuando el objetivo principal de un análisis es la identificación de los combustibles contaminantes. También es importante tomarlo en consideración, cuando se está aplicando una remediación a suelo o agua subterránea contaminados, ya que muchos componentes se pierden por volatilización y no por el efecto de la propia técnica de remediación, principalmente en aquellas que están basadas en la degradación de los hidrocarburos contaminantes, por ejemplo, la biorremediación.

Si este experimento se hubiera realizado con ventilación forzada,

seguramente la pérdida de volátiles hubiera sido mayor y más rápida, sin embargo, el objetivo que se persiguió en este caso particular fue observar los cambios que ocurren en los hidrocarburos contaminantes en el caso más sencillo de intemperismo que es la ventilación natural y en ausencia de los rayos solares.

Respecto de los análisis, en el caso de combustibles ligeros existen otras pruebas complementarias como pueden ser la destilación y la

cuantificación de componentes volátiles específicos; sin embargo, estas pruebas presentan ciertas limitantes, por lo que la cromatografía es y seguirá siendo una herramienta de gran utilidad para identificar combustibles contaminantes en cualquier tipo de matriz, también para determinar su concentración en muestras de suelo y agua subterránea, así como para calcular el grado de intemperización, aunque en algunos casos sea con cierta imprecisión.

Conclusiones. Los resultados obtenidos confirman que la intemperie tiene una función importante en la composición de los combustibles y que esto debe ser tomado en consideración durante la identificación y cuantificación de hidrocarburos contaminantes presentes en suelos o agua subterránea contaminados, o bien, en aquellos que están siendo sometidos a un proceso de remediación.

* Lesser y Asociados, SA.
** Instituto de Ingeniería, UNAM.

CAMPUS IPN

Centro de Manejo y Protección del Ambiente

Preservando el Medio Ambiente

Mejor Productividad
Menos Recursos
Mas Unidades

Atendemos a:

- Evaluación ambiental preventiva
- Diagnóstico ambiental
- Impacto ambiental
- Estudios de contaminación
- Auditorías ambientales
- Monitoreo ambiental
- Gestión ambiental
- Asesoría ambiental
- Capacitación ambiental
- Investigación ambiental
- Consultoría ambiental
- Servicios ambientales

CAMPUS IPN - Unidad de Investigación y Desarrollo Ambiental

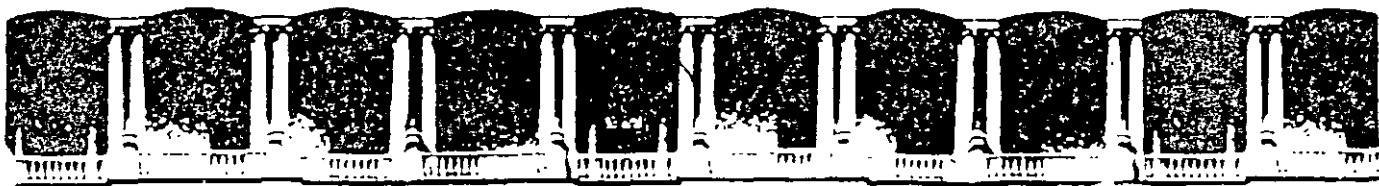
Carretera México-Toluca, km. 12.5, Col. San Mateo Atenco, Estado de México

Tel: 01 (55) 57 00 00, 57 00 01, 57 00 02, 57 00 03, 57 00 04, 57 00 05, 57 00 06, 57 00 07, 57 00 08, 57 00 09, 57 00 10, 57 00 11, 57 00 12, 57 00 13, 57 00 14, 57 00 15, 57 00 16, 57 00 17, 57 00 18, 57 00 19, 57 00 20, 57 00 21, 57 00 22, 57 00 23, 57 00 24, 57 00 25, 57 00 26, 57 00 27, 57 00 28, 57 00 29, 57 00 30, 57 00 31, 57 00 32, 57 00 33, 57 00 34, 57 00 35, 57 00 36, 57 00 37, 57 00 38, 57 00 39, 57 00 40, 57 00 41, 57 00 42, 57 00 43, 57 00 44, 57 00 45, 57 00 46, 57 00 47, 57 00 48, 57 00 49, 57 00 50, 57 00 51, 57 00 52, 57 00 53, 57 00 54, 57 00 55, 57 00 56, 57 00 57, 57 00 58, 57 00 59, 57 00 60, 57 00 61, 57 00 62, 57 00 63, 57 00 64, 57 00 65, 57 00 66, 57 00 67, 57 00 68, 57 00 69, 57 00 70, 57 00 71, 57 00 72, 57 00 73, 57 00 74, 57 00 75, 57 00 76, 57 00 77, 57 00 78, 57 00 79, 57 00 80, 57 00 81, 57 00 82, 57 00 83, 57 00 84, 57 00 85, 57 00 86, 57 00 87, 57 00 88, 57 00 89, 57 00 90, 57 00 91, 57 00 92, 57 00 93, 57 00 94, 57 00 95, 57 00 96, 57 00 97, 57 00 98, 57 00 99, 57 00 00

E-mail: cmpl@redipn.ipn.mx <http://www.cmpl.ipn.mx>

cmpl@correo.cmpl.ipn.mx

En la edición 19, en el artículo "En busca de criterios de limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos", de la doctora Susana Saval, las unidades de medida correctas de las tablas 1, 11, 13 y 14 son µg/l, en vez de mg/l.



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

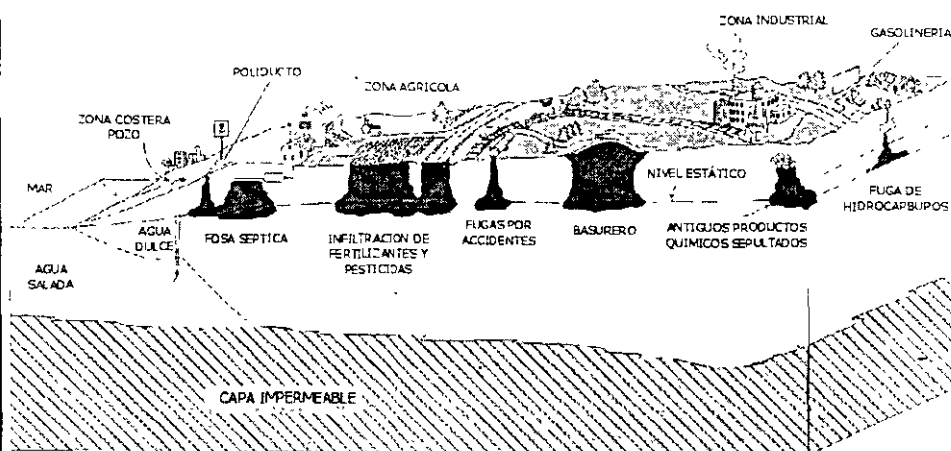
LA CONTAMINACION

**EXPOSITOR: ING. JUAN MAUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

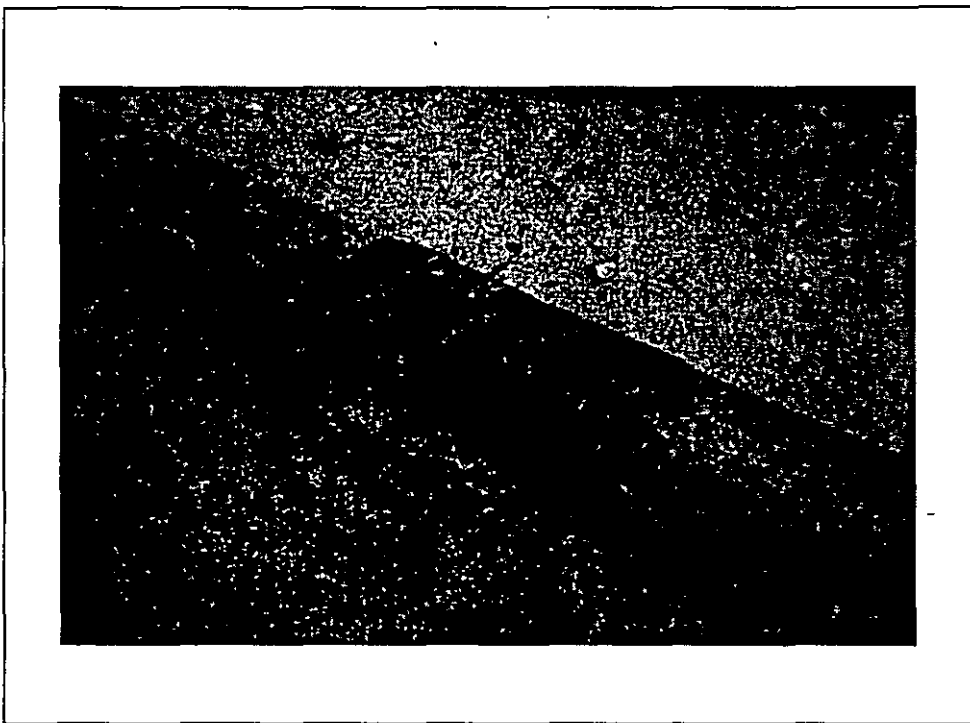
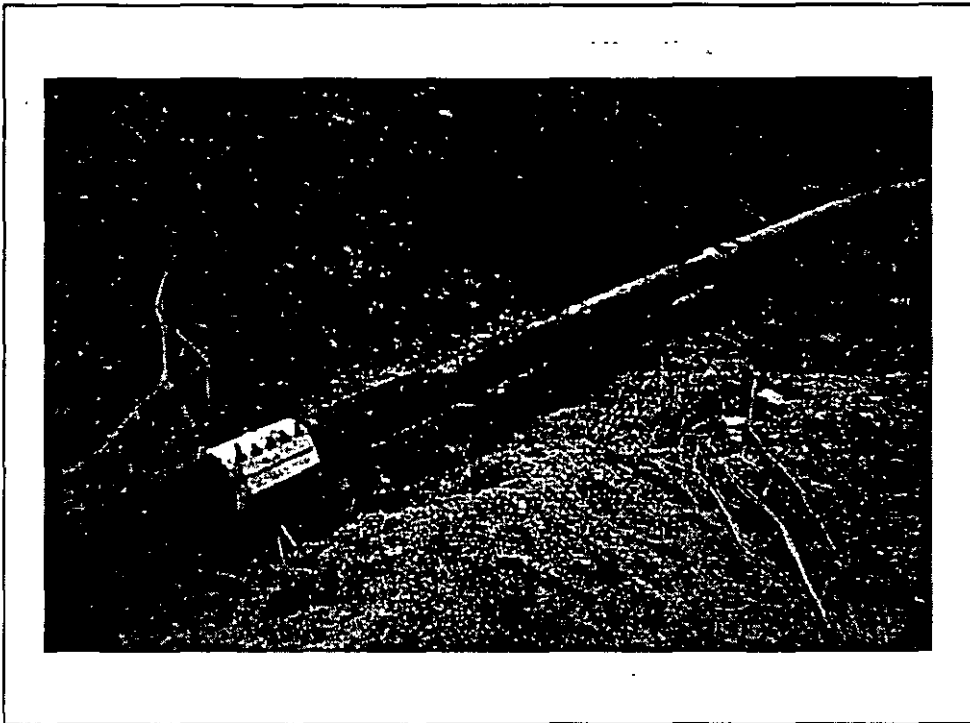
La contaminación

■ Por: Ing. Juan Manuel Lesser

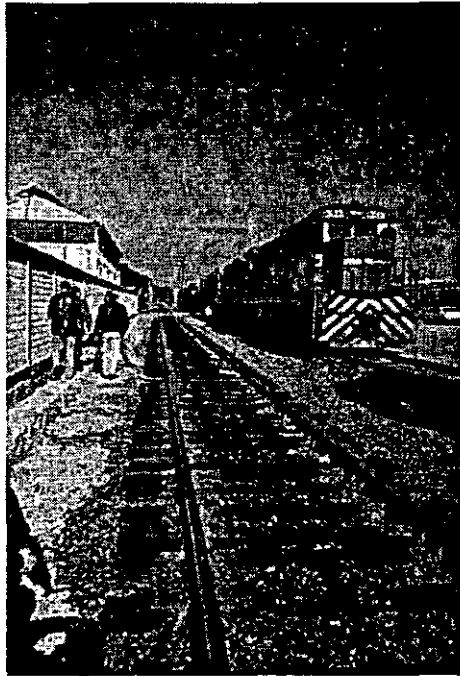
Fuentes comunes de contaminación

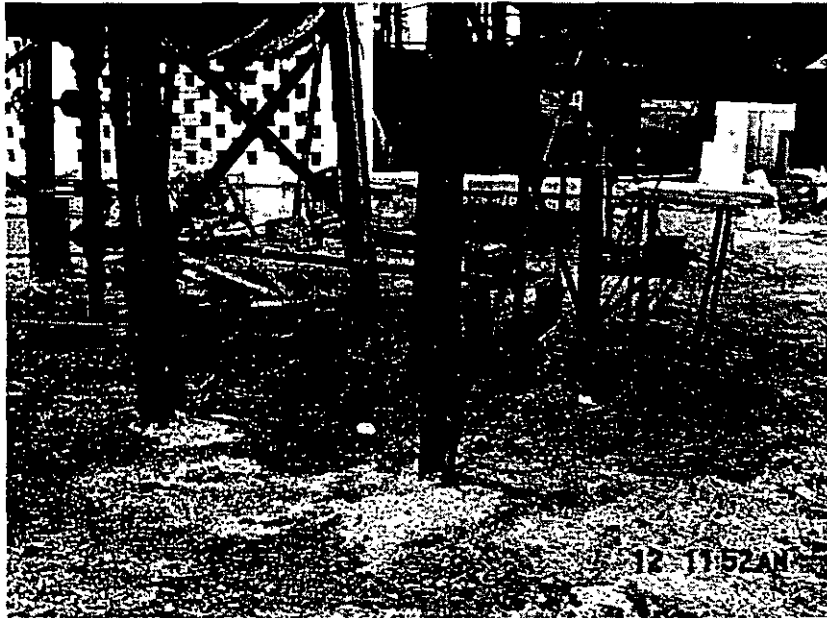


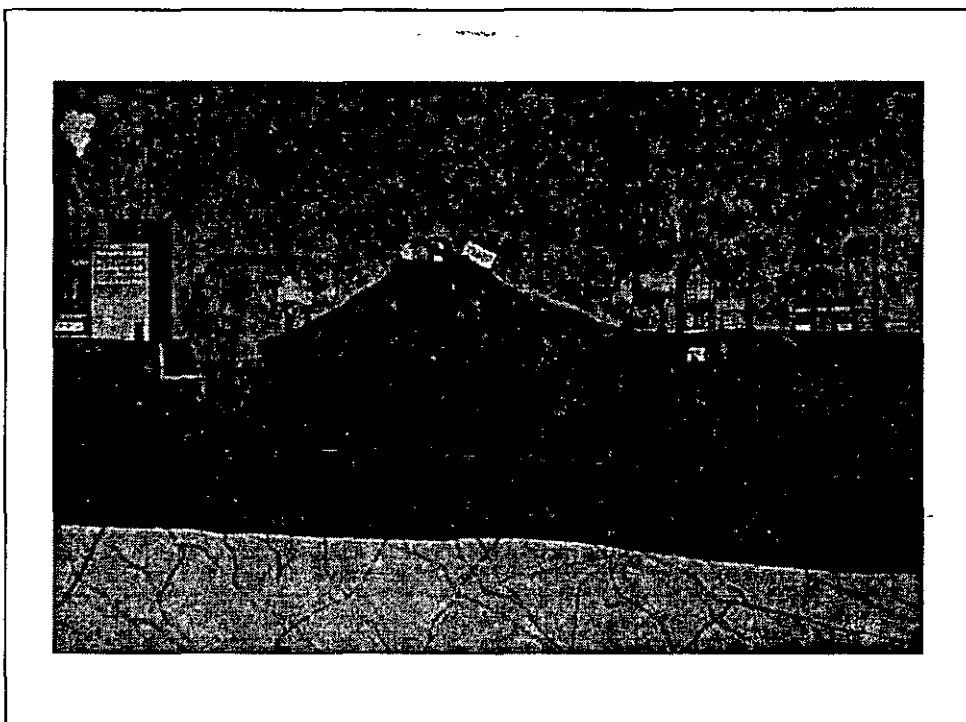
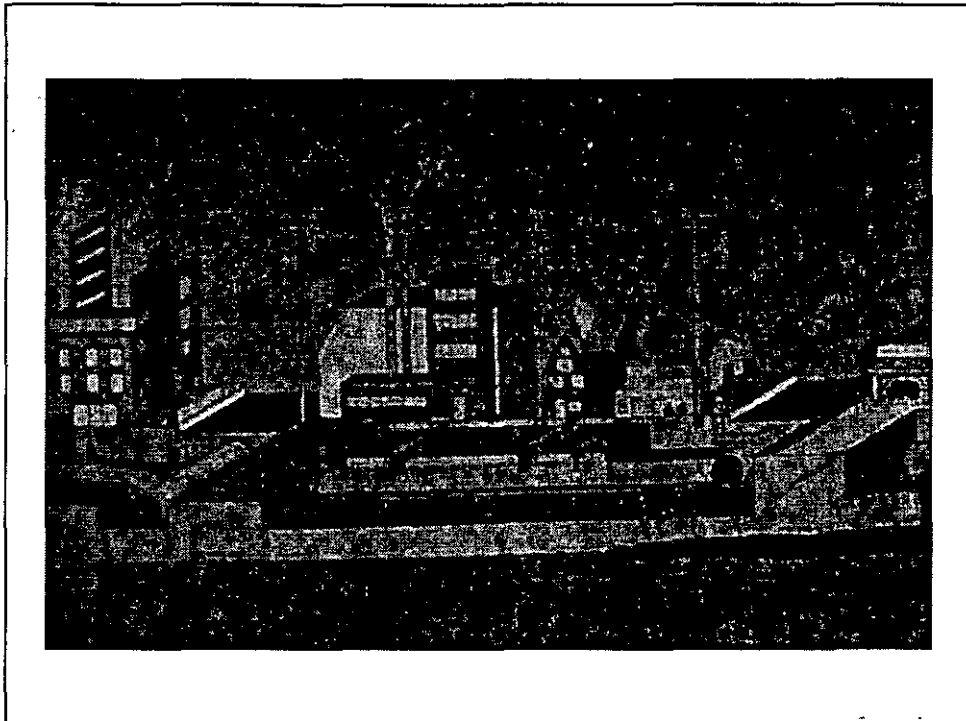
MODIFICADA DE Fetter, 1993











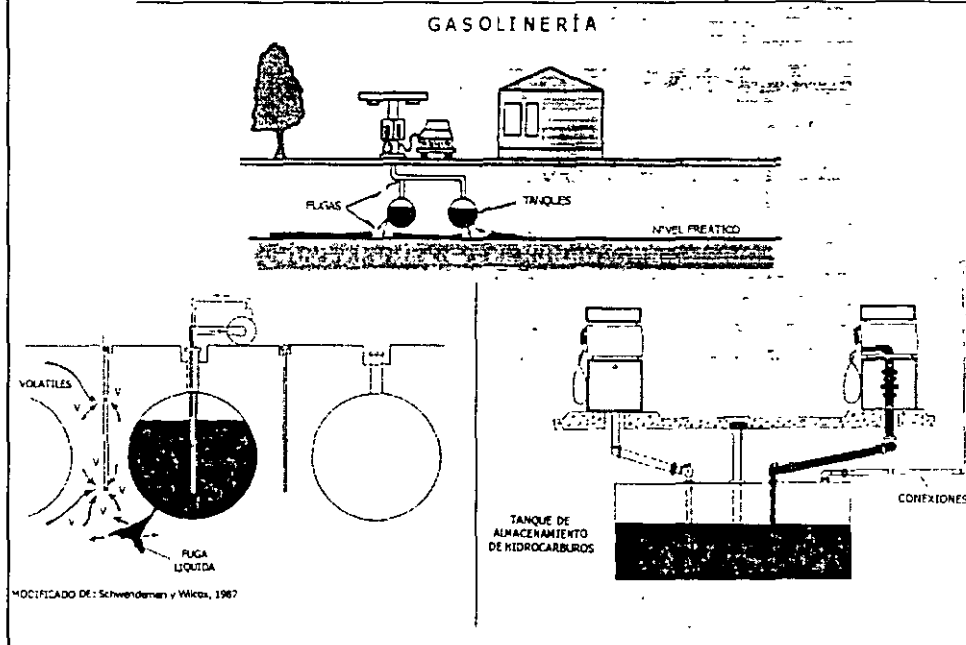


Hidrocarburos

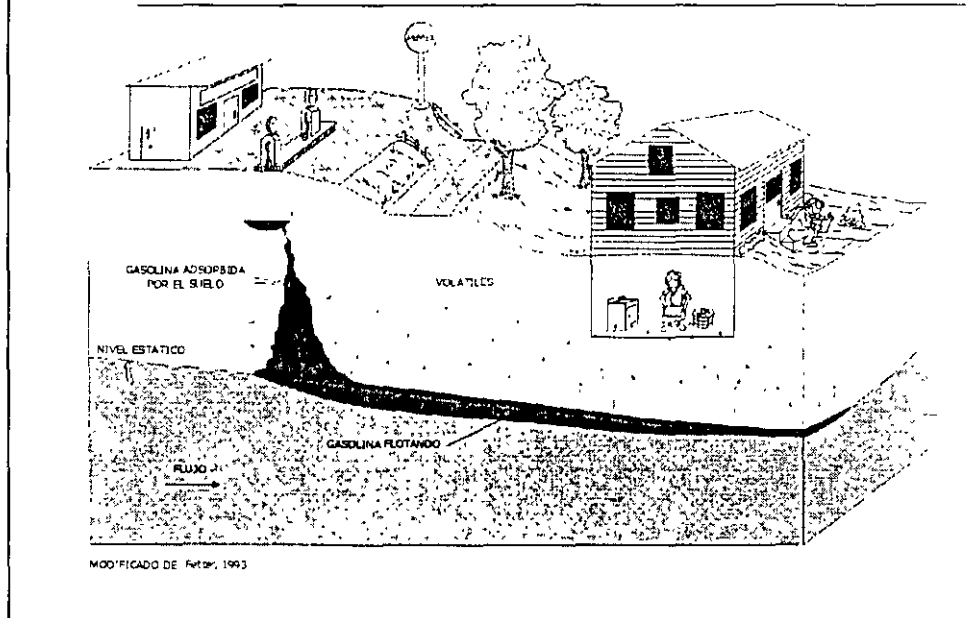
- Contaminación de acuíferos por hidrocarburos
- Detección de zonas contaminadas por hidrocarburos
- Análisis para identificación de hidrocarburos en agua y suelo
- Saneamiento de acuíferos contaminados por hidrocarburos
 - Remediación física
 - Remediación química
 - Biodegradación

• Por Ing. Juan Manuel Lesser

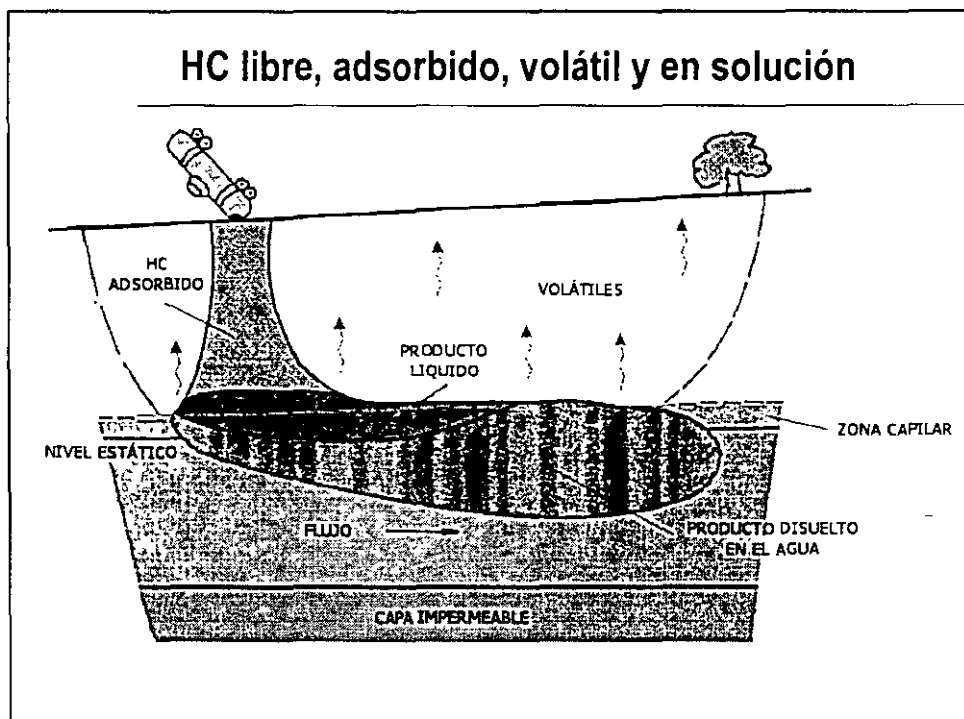
Fugas de tanques en gasolineras



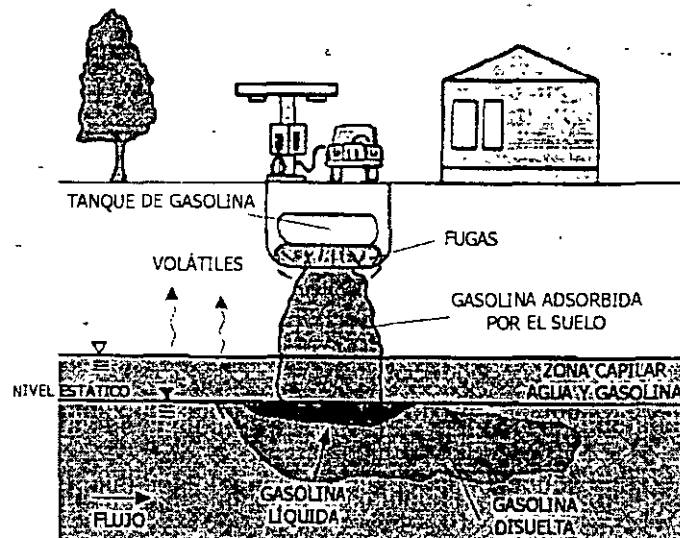
Fugas, fase libre y volátiles



- HIDROCARBUROS EN:
- fase libre
- volatil
- disuelto en agua
- adsorbido por el suelo



Contaminación de suelo y agua



Capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas

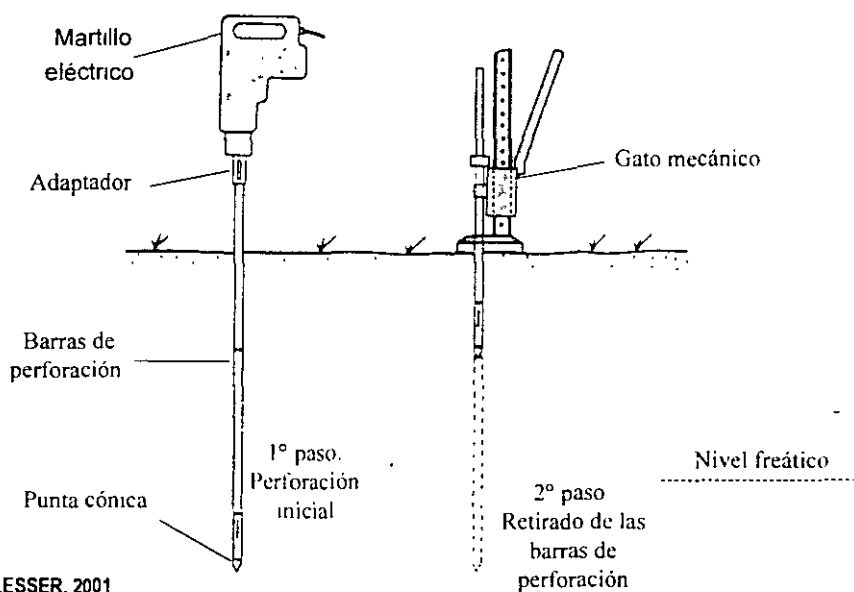
	CAPACIDAD DE		
	ADSORCIÓN POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACIÓN (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a)	100	0	0
Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	61	8	31
Naftaleno	88	2	10
Fenantreno	0.1	99.8	0.1
1 - pentano	9	0.01	91
Fenol	3	77	20
Tolueno	15	54	31
Xileno			

De Fischer et al. 1966

■ Caracterización de suelo y agua subterránea

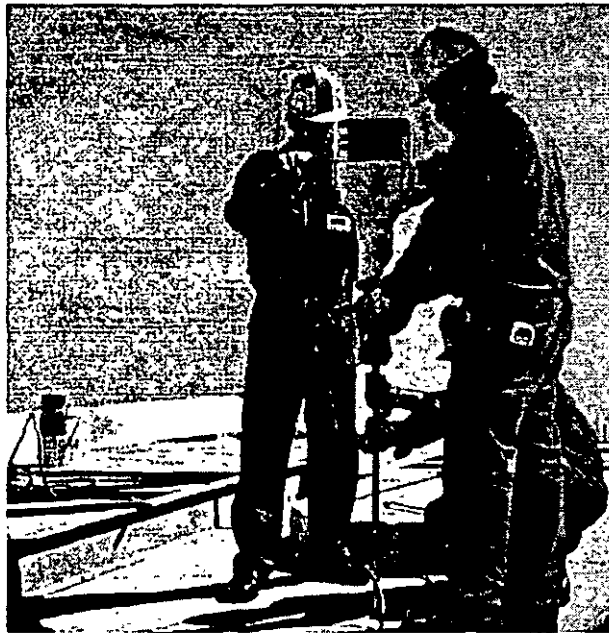
 LESSER, 2001


Perforación de pozos de medición

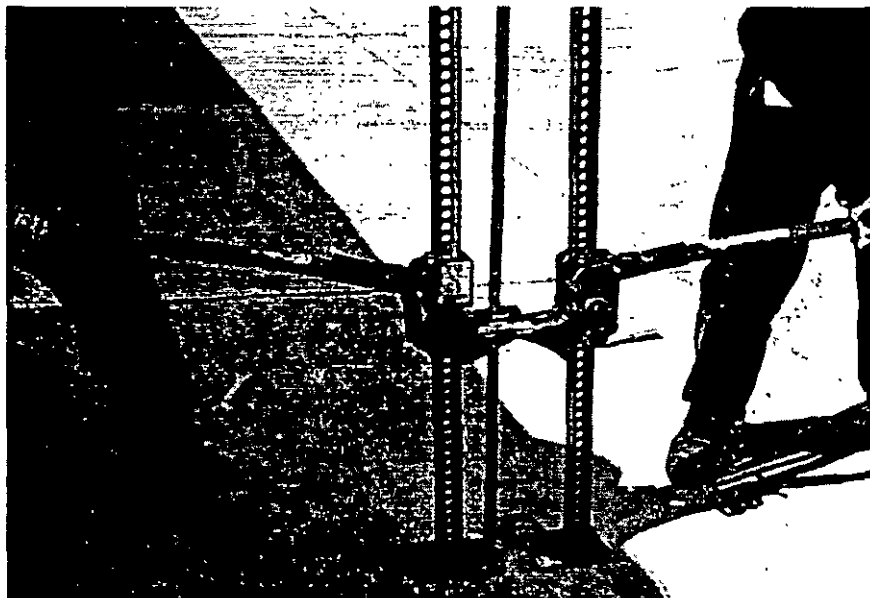


■ PERFORACION DE POZOS DE MEDICION

 LESSER, 2001



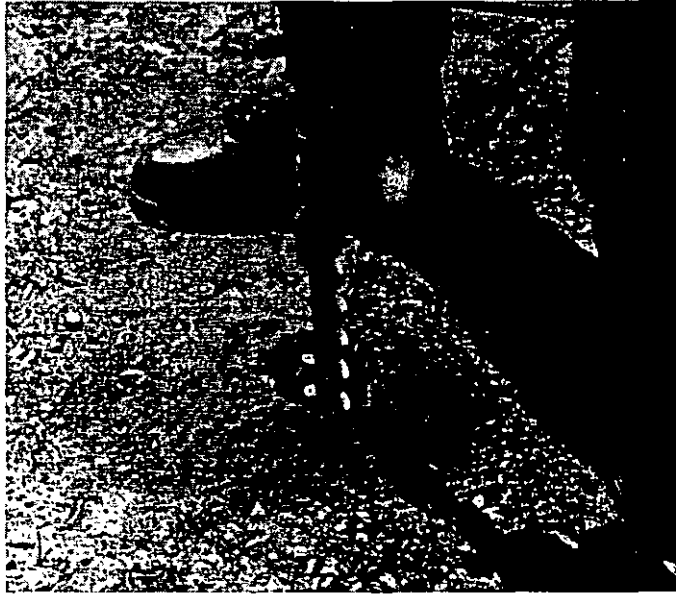
 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



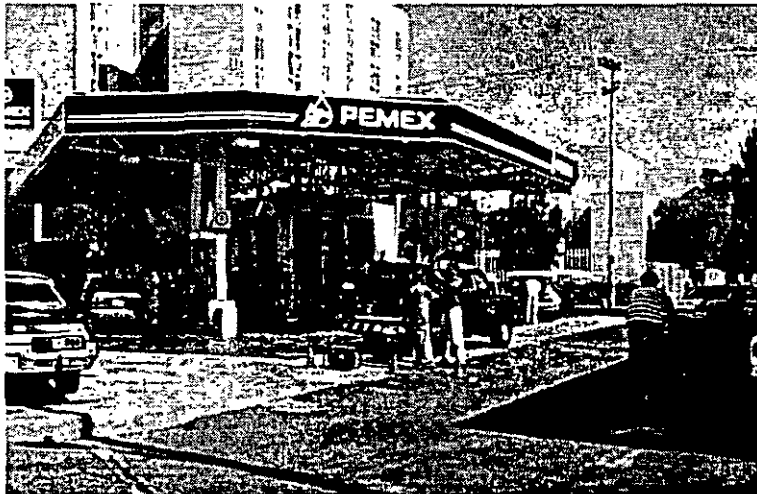
 LESSER, 2001




 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



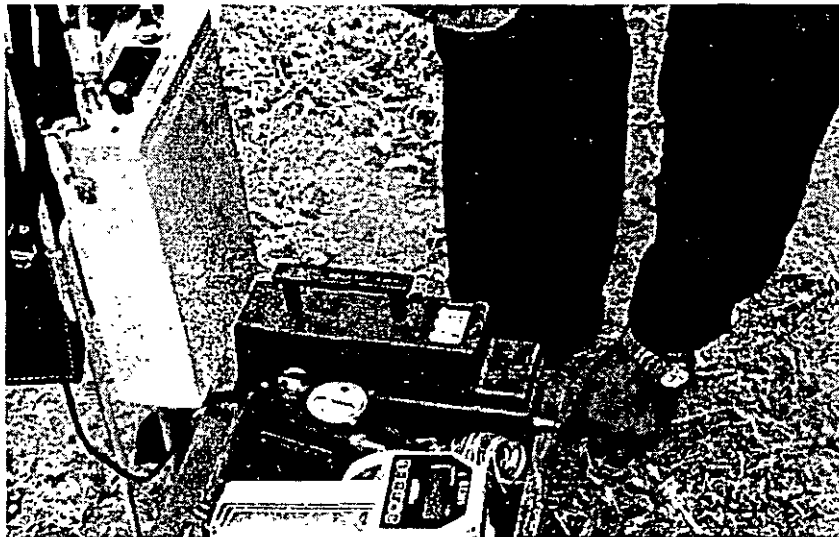
 LESSER, 2001



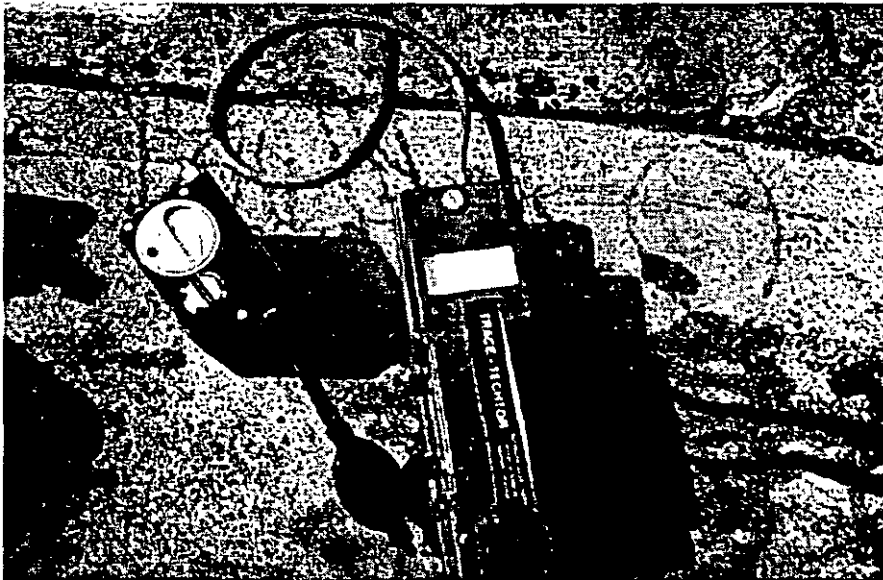
 LESSER, 2001

- MEDICION DE VOLATILES, EXPLOSIVIDAD, NIVEL ESTATICO Y ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE

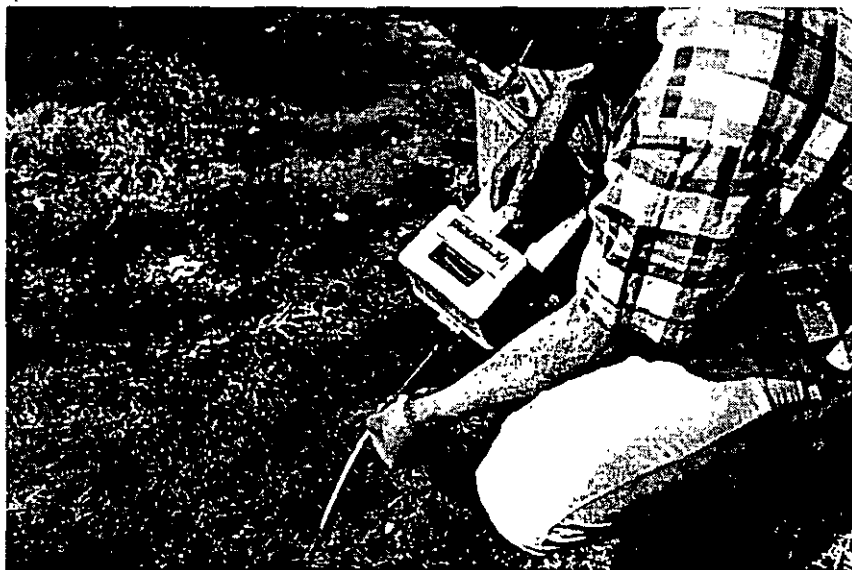
 LESSER, 2001



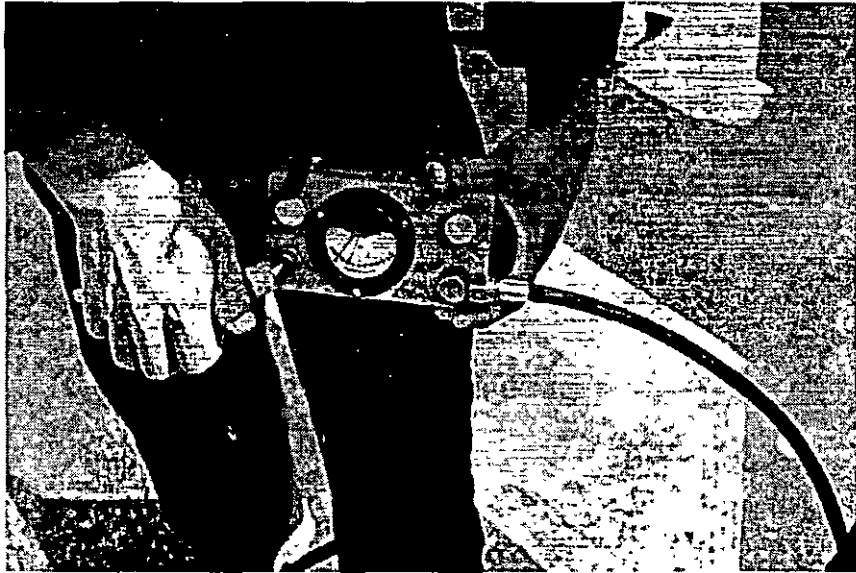
 LESSER, 2001



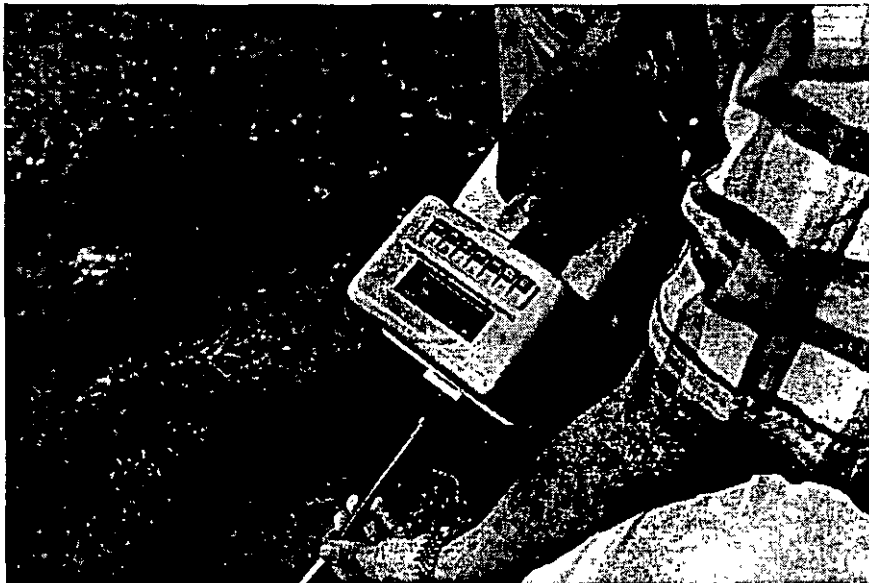
 LESSER, 2001



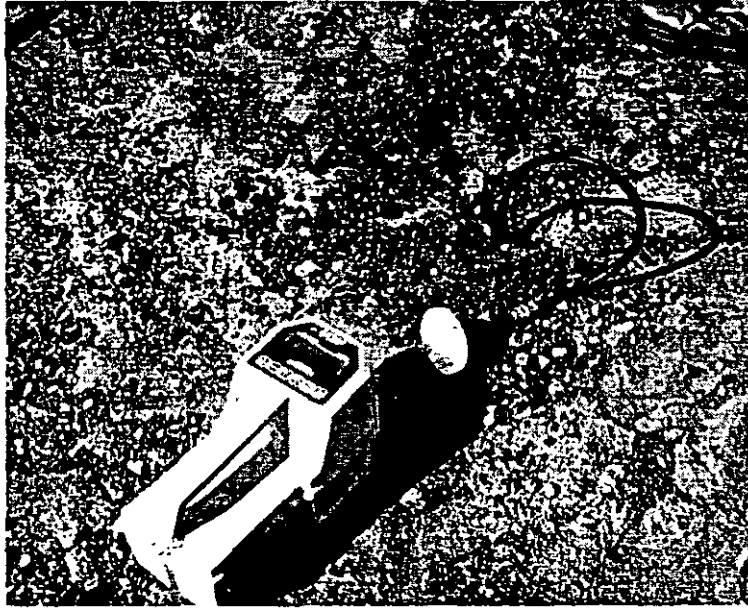
 LESSER, 2001



LESSER, 2001



LESSER, 2001



 LESSER, 2001

RESPUESTA DE LOS MEDIDORES DE VOLÁTILES

EN GASOLINA

RESPUESTA FRANCA,
CLARA

EN DIESEL

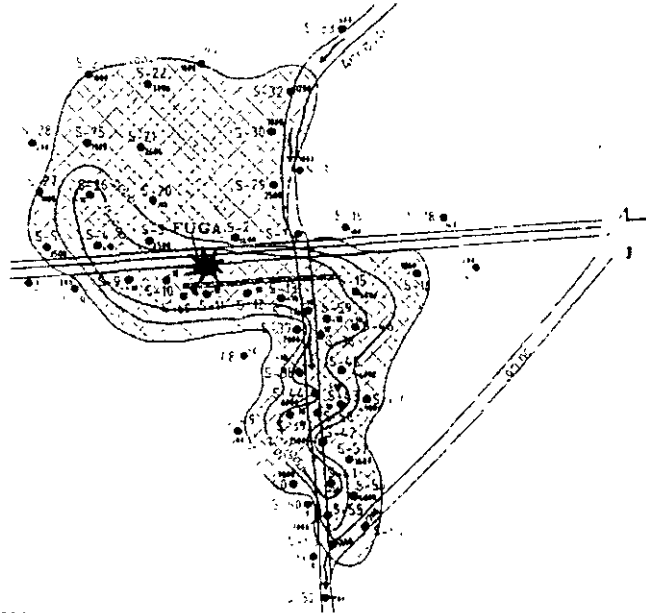
RESPUESTA LENTA,
SE MUEVE EL
MARCADOR

 LESSER, 2001

■ Delimitacion de plumas


 LESSER, 2001

Detección de pluma

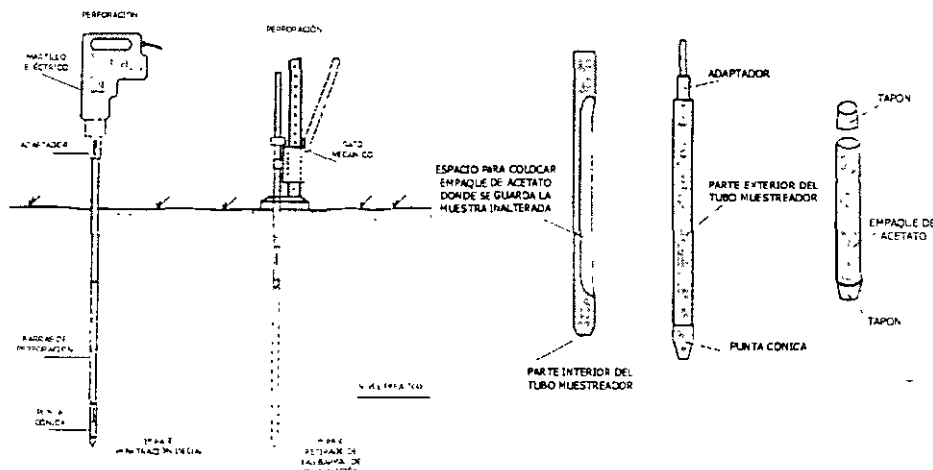


 LESSER, 2001

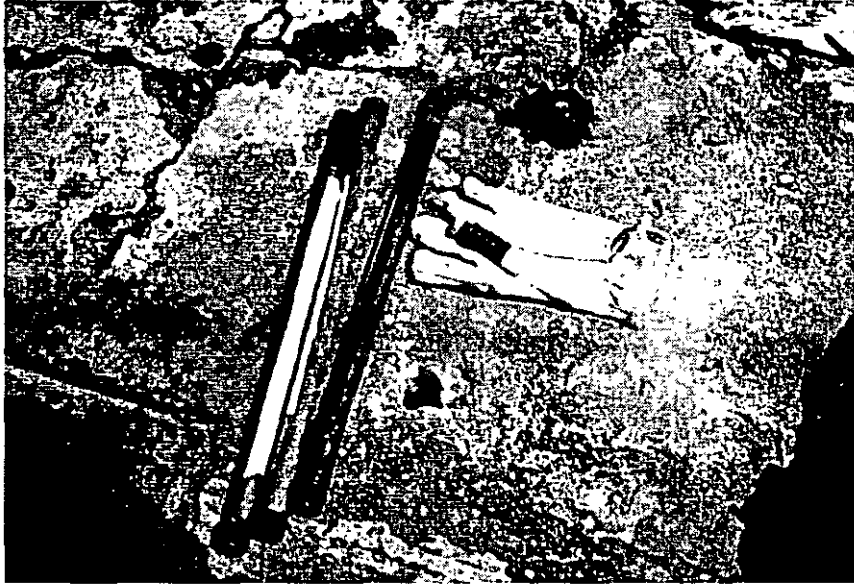
■ Muestreo de suelo inalterado

 LESSER, 2001

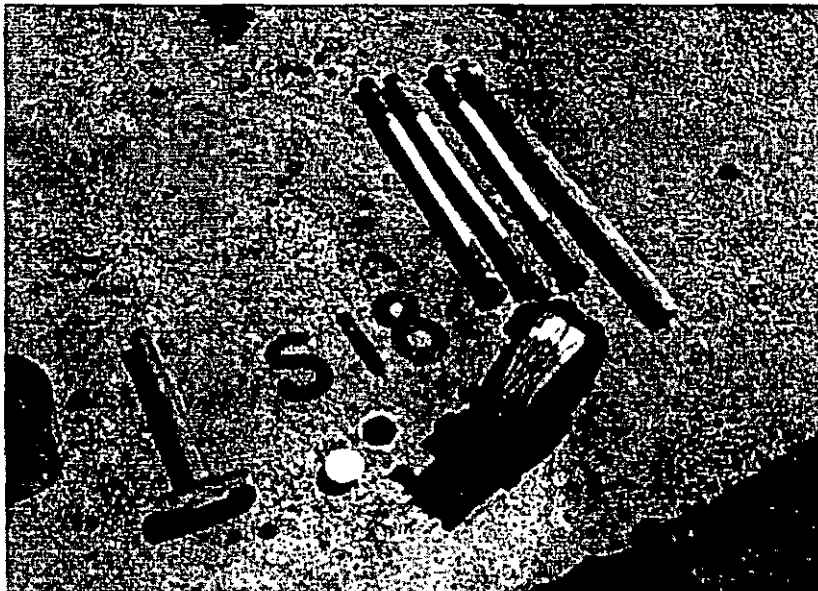
Muestreo de suelos



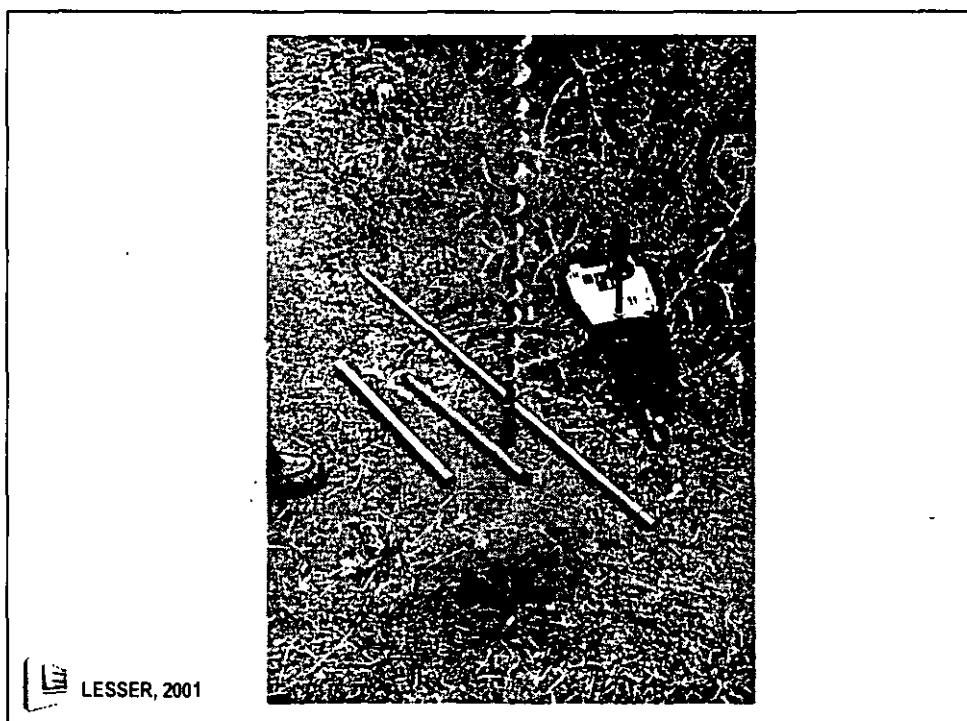
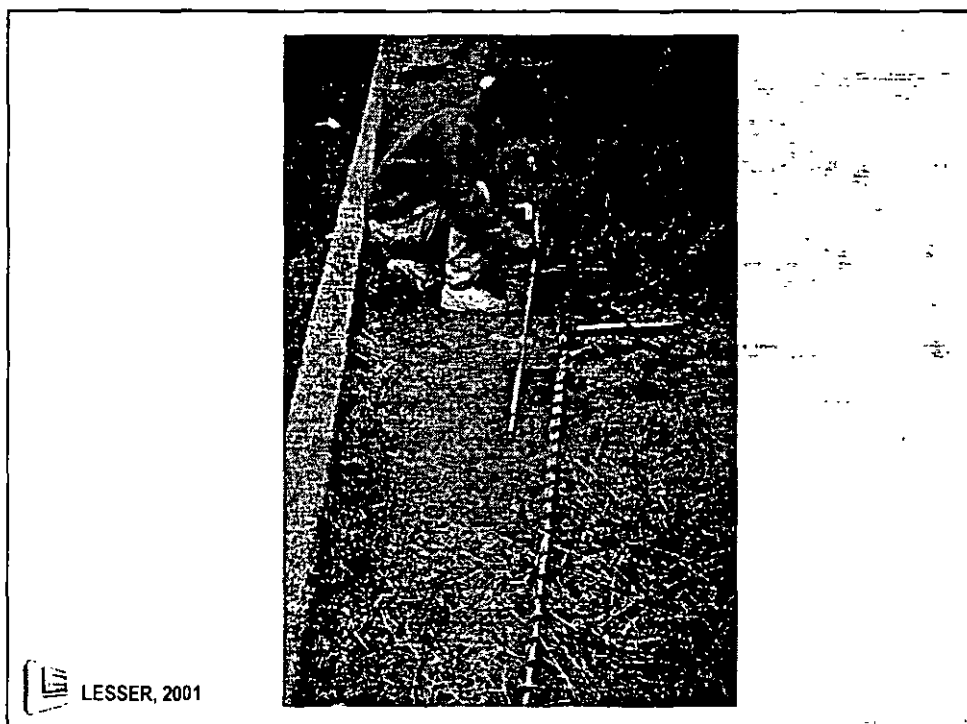
 LESSER, 2001

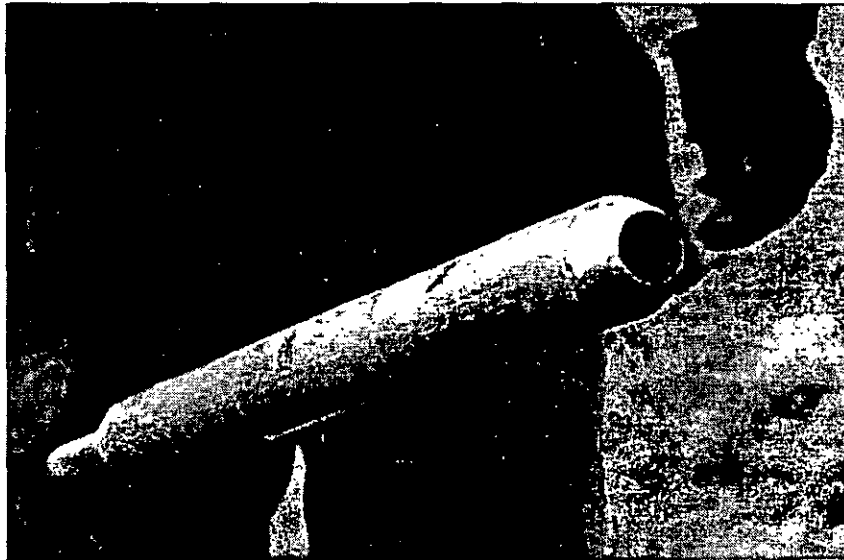


LESSER, 2001




LESSER, 2001





 LESSER, 2001

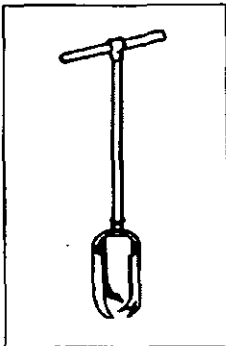


 LESSER, 2001

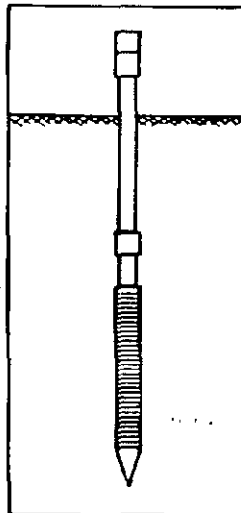


 LESSER, 2001

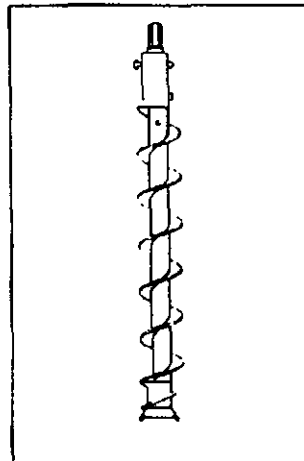
Muestreador manual



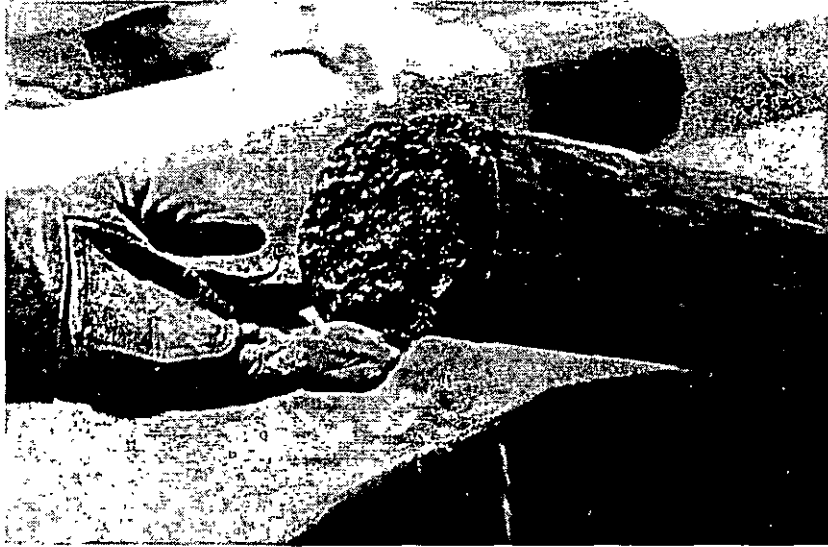
Muestreador mediante
incado de tubería



Muestreador de
máquina rotaria



 LESSER, 2001

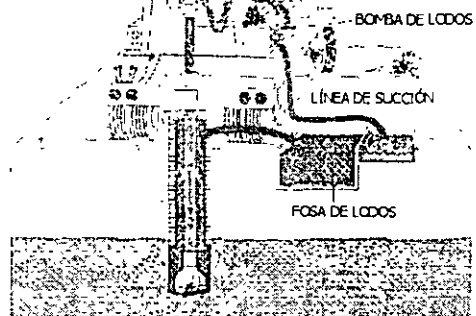


 LESSER, 2001



 LESSER, 2001

Perforación tradicional

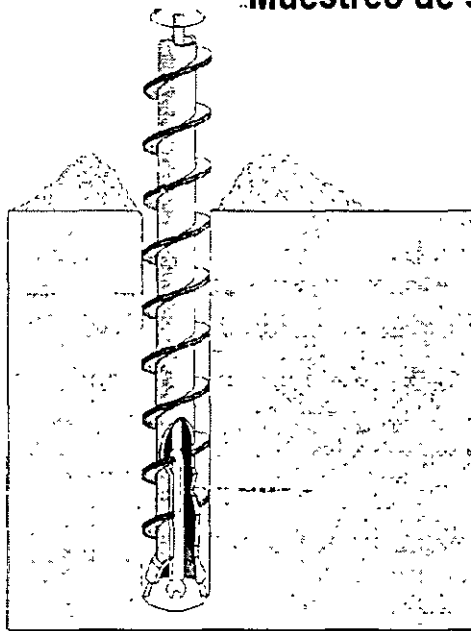


MODIFICADA DE Feller (195)



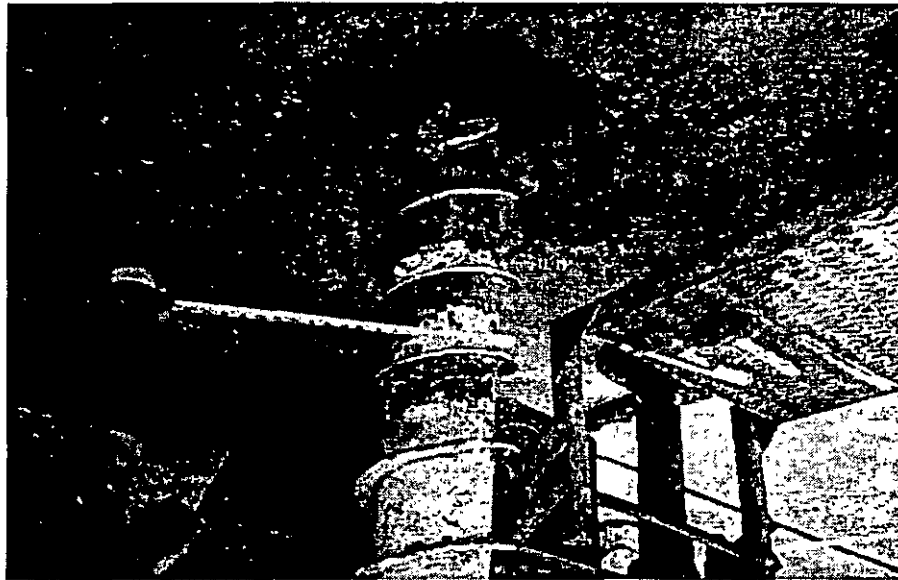
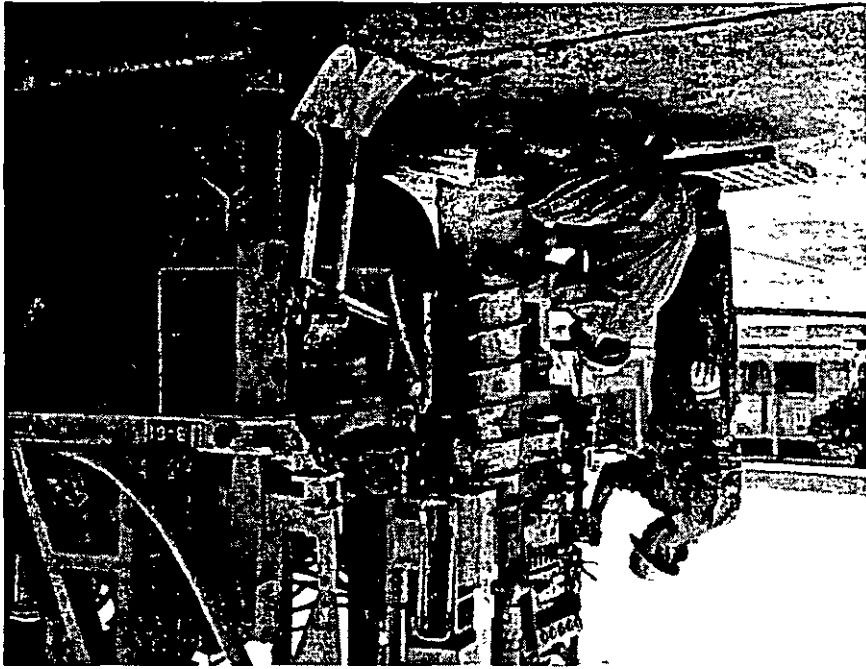
Máquina para muestreo de suelo

Muestreo de suelo con auger




MODIFICADA DE Fetter, 1993

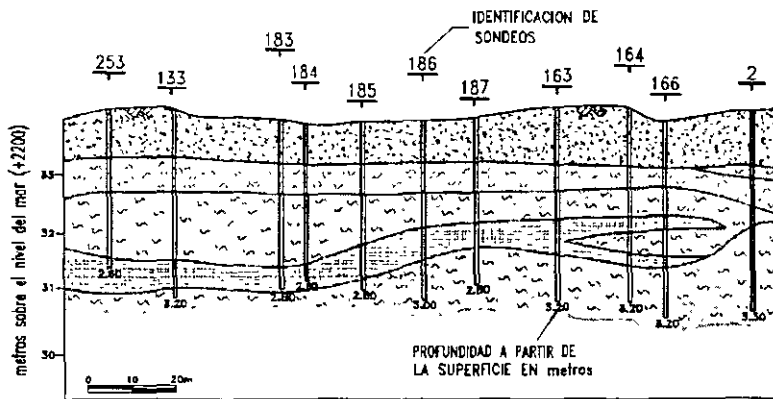




■ Construccion de secciones litologicas

 LESSER, 2001

Sección litológica



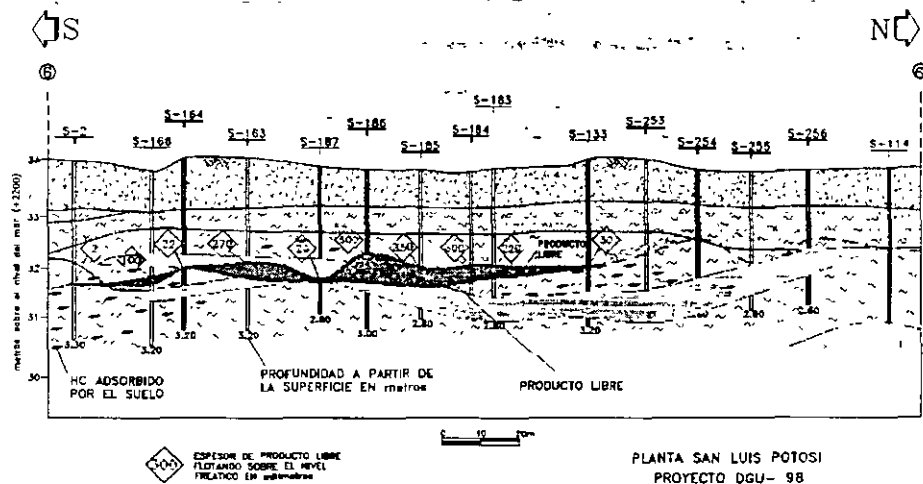
SIMBOLOGIA

 LOSA SUPERFICIAL DE CONCRETO Y/O ASFALTO	 ARENA
 ARENA Y ARCILLA	 ARCILLA

UBICACION: SECCION ESTE-OESTE AL CENTRO DEL PREDIO

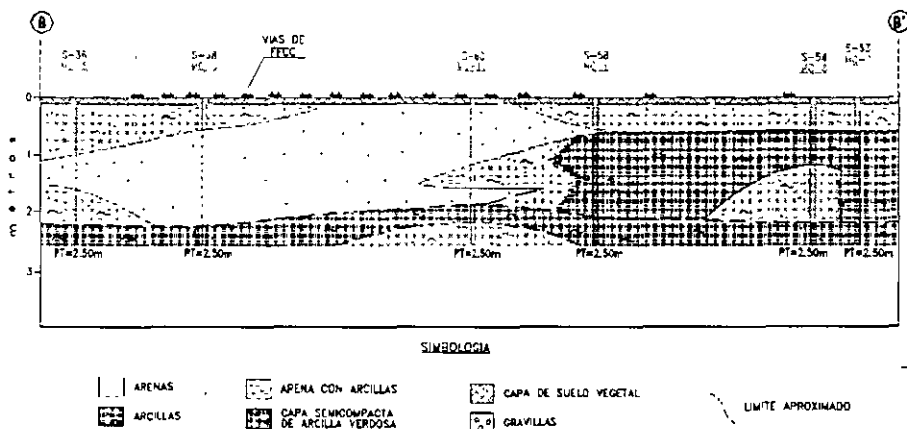
LESSER Y SAVAL, 2000

Producto libre flotando sobre el nivel freático



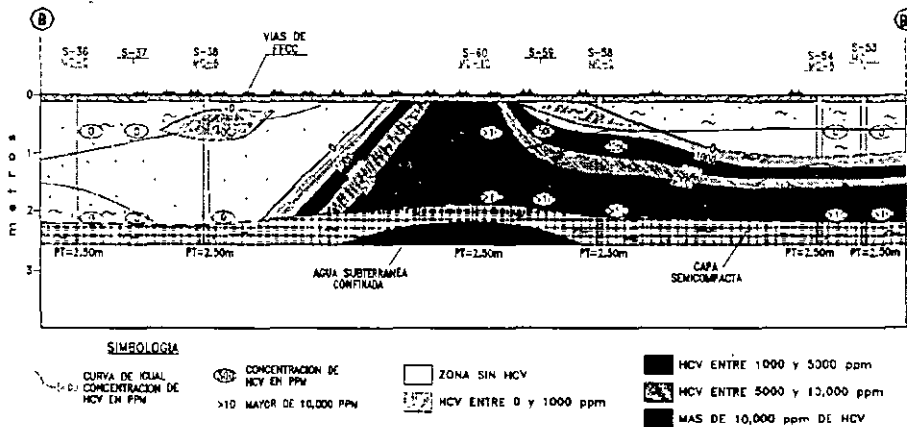
LESSER, 2001

Sección litológica



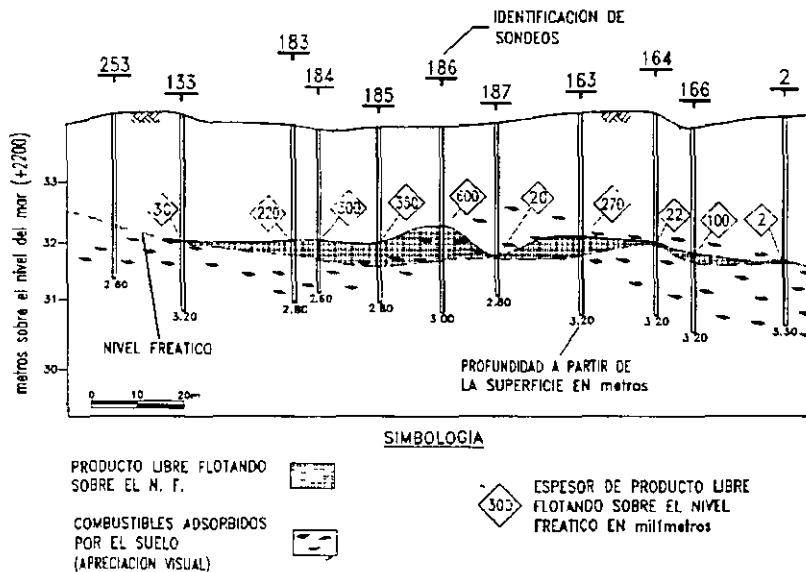
LESSER, 2001

HCs volátiles en el subsuelo



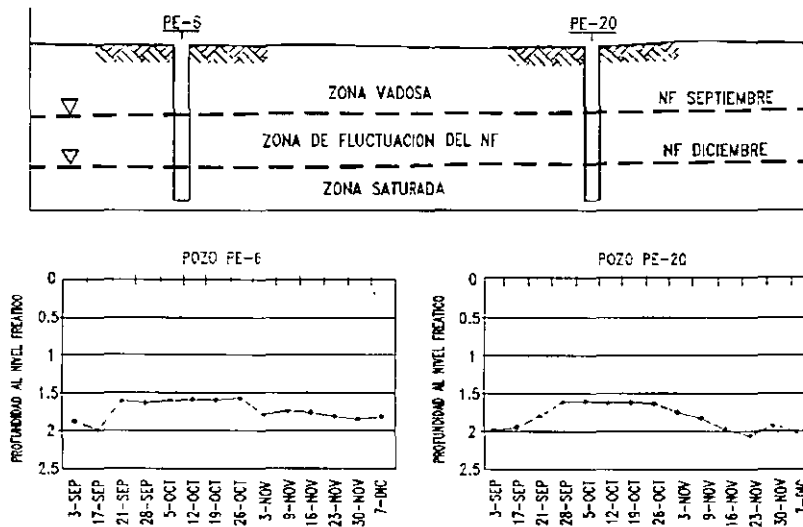
LESSER, 2001

Sección mostrando el espesor de producto libre flotando sobre el nivel freático y horizonte con hidrocarburos adsorbidos en el suelo



LESSER Y SAVAL, 2000

Variación de la profundidad al nivel freático (NF) en pozos de extracción



■ Ejemplos de plumas de contaminación

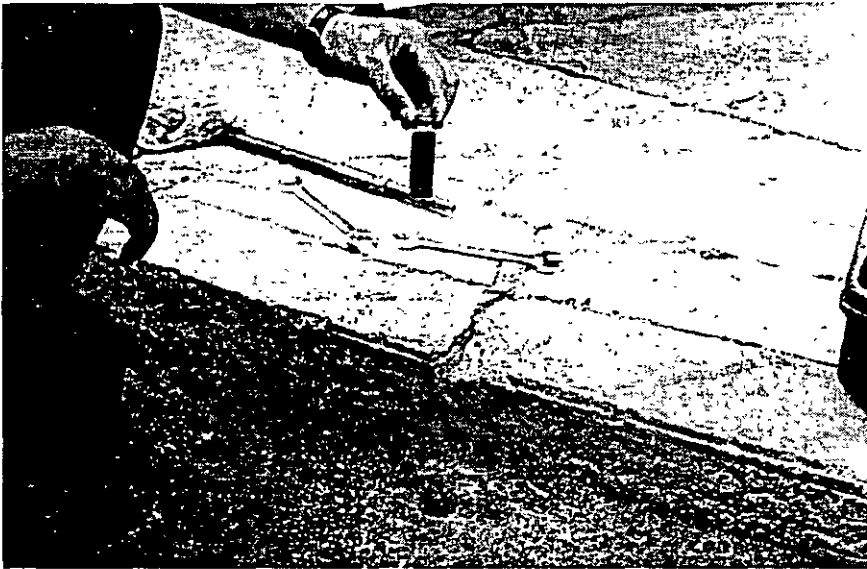


LESSER, 2001

■ Muestreo de producto libre



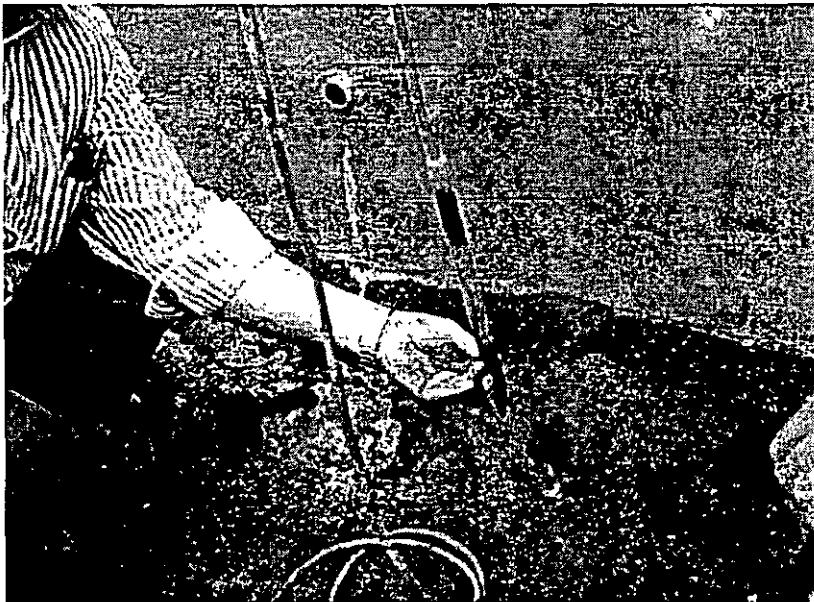
LESSER, 2001



LESSER, 2001



 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



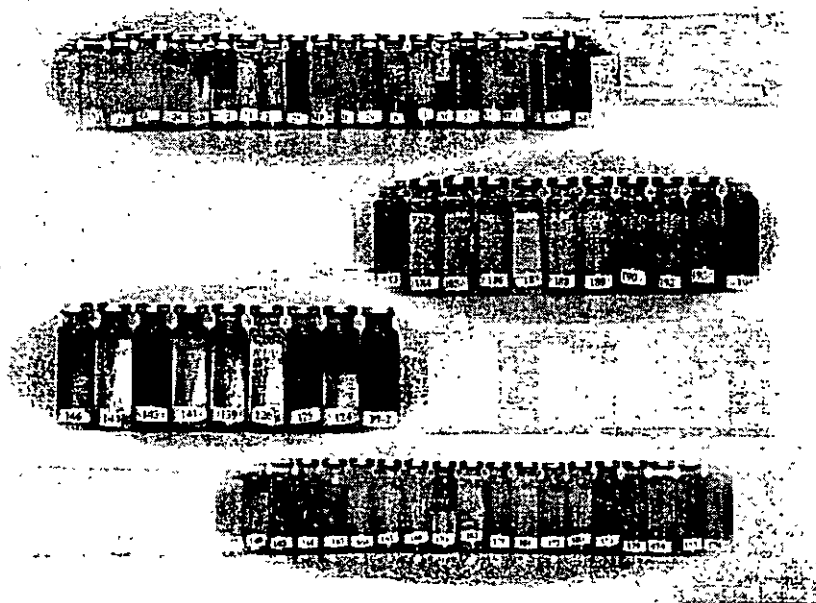
 LESSER, 2001



 LESSER, 2001

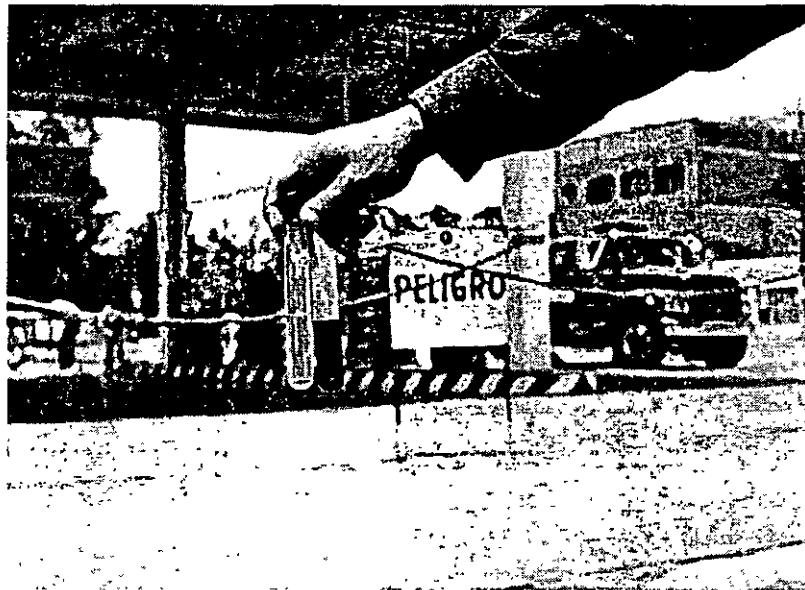
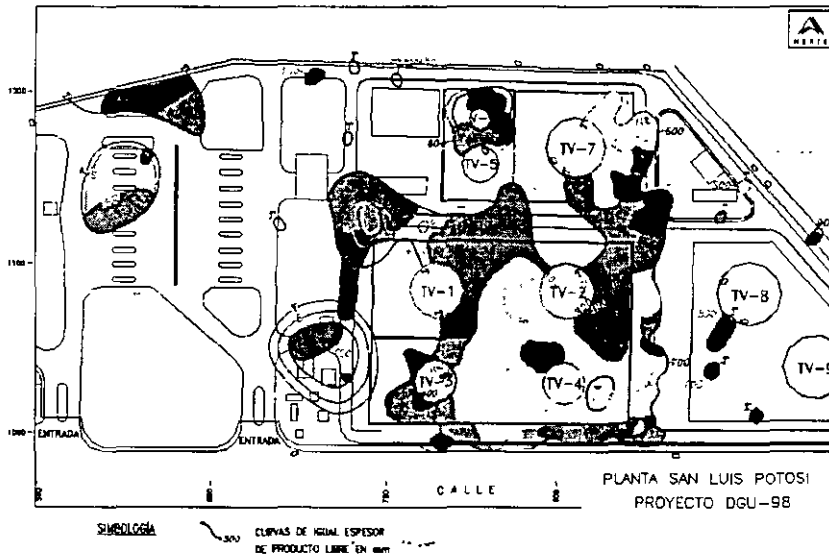


 LESSER, 2001



Muestreo de agua y producto libre

Color del producto libre



LESSER, 2001



 LESSER, 2001



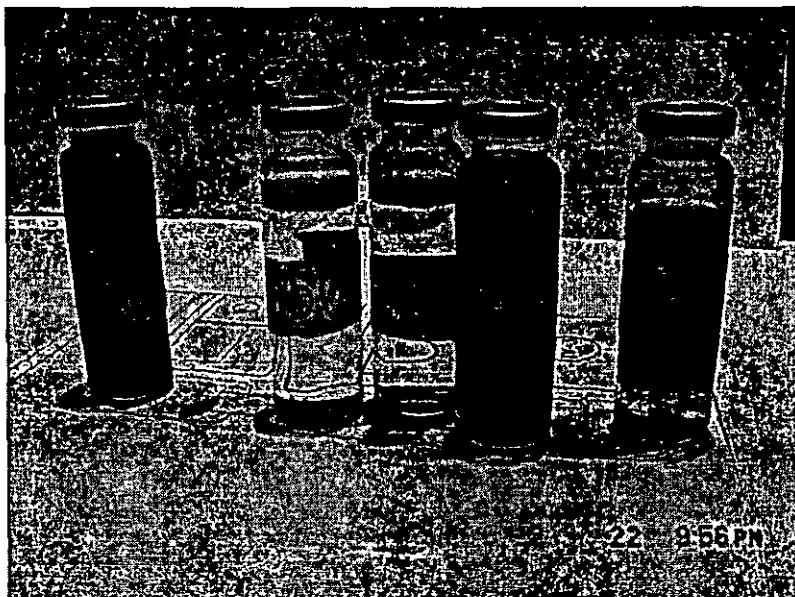
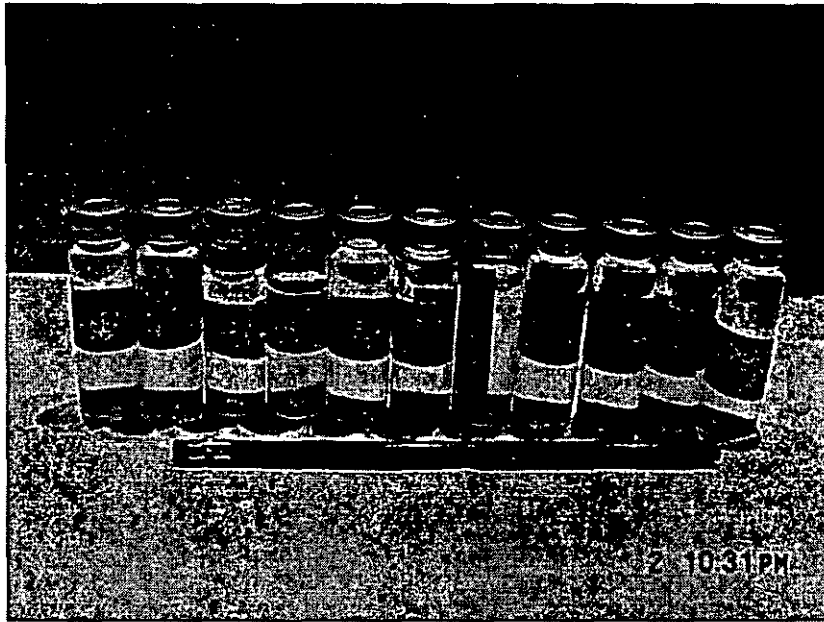
 LESSER, 2001

- Análisis para determinación de hidrocarburos en agua y suelo



Muestras de agua y producto libre

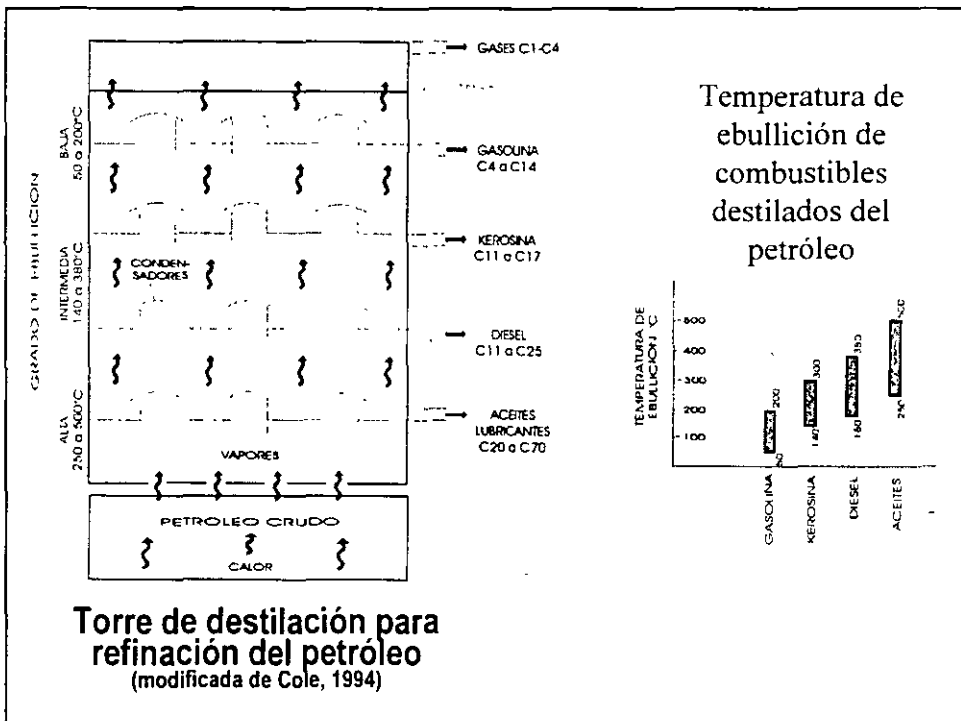




 LESSER, 2001

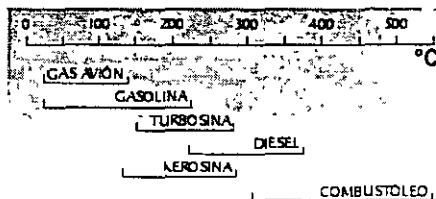
■ Destilación del petróleo

 LESSER, 2001



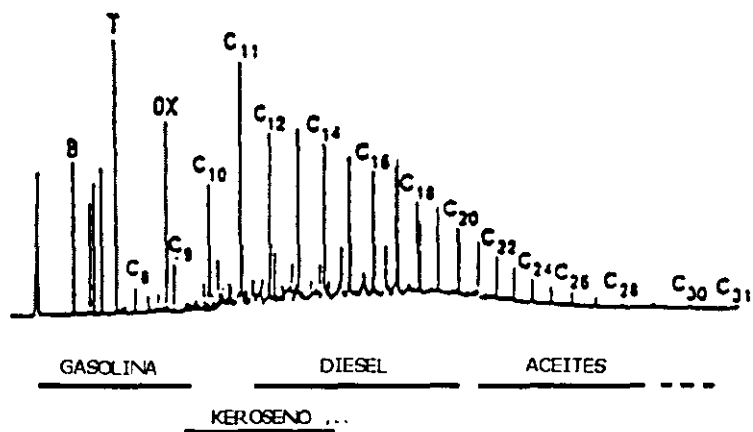
TEMPERATURA DE DESTILACION
DE LOS HIDROCARBUROS
COMERCIALES MÁS COMUNES

GAS AVION	27-135° C
GASOLINA	27-225° C
TURBOSINA	149-288° C
DIESEL	216-370° C
DIAFANO O KEROSINA	130-288° C
COMBUSTÓLEO Y ASFALTO	315-545° C*



LESSER, 2001

Cromatograma de mezcla de hidrocarburos



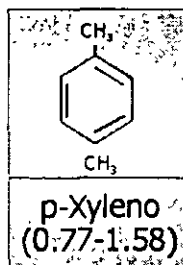
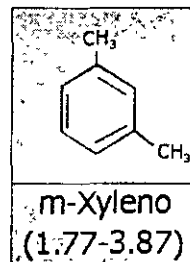
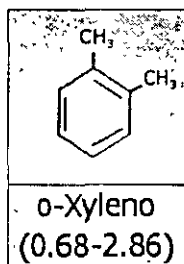
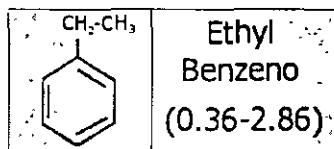
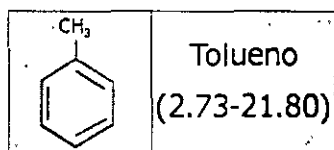
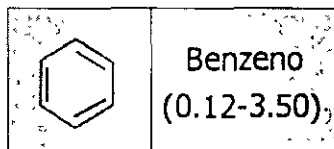
CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE
HIDROCARBUROS (MODIFICADA
DE SENN AND JOHNSON, 1995)

■ Hidrocarburos Aromaticos

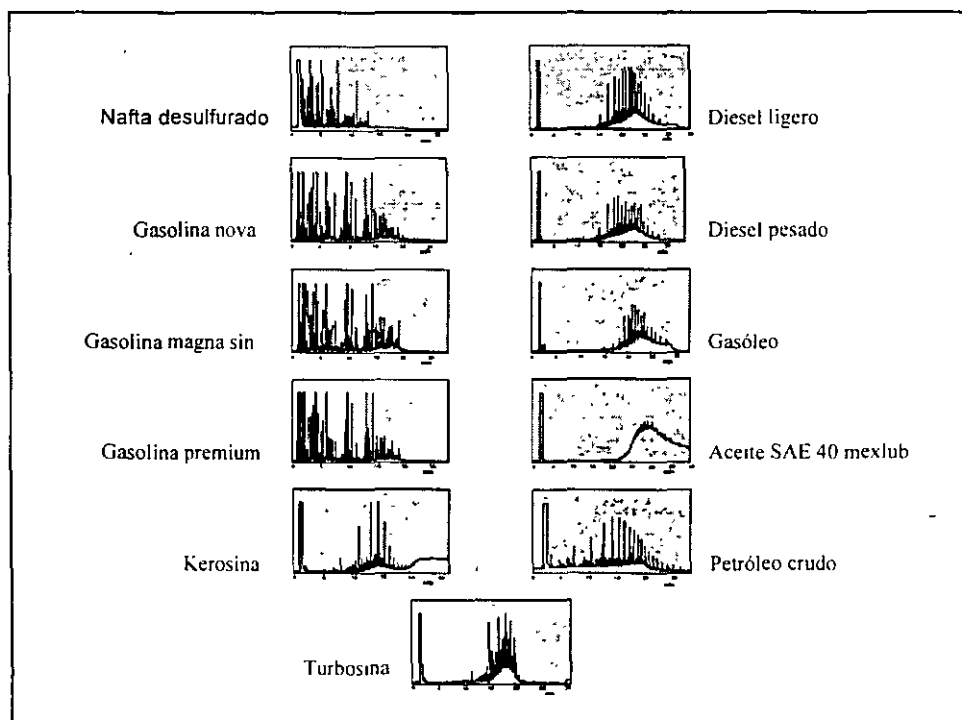
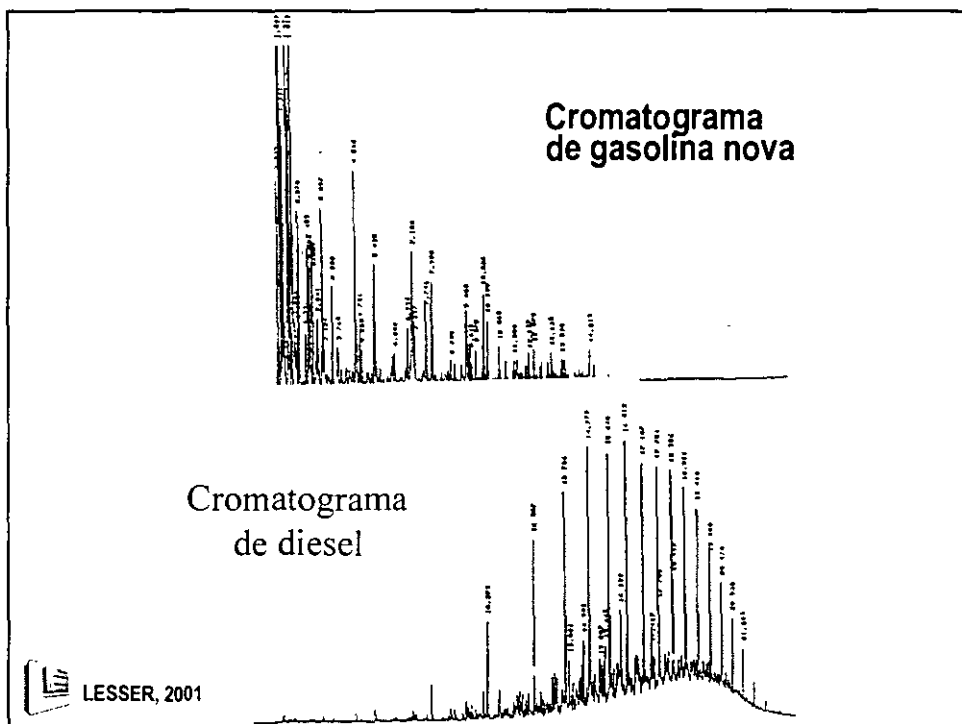


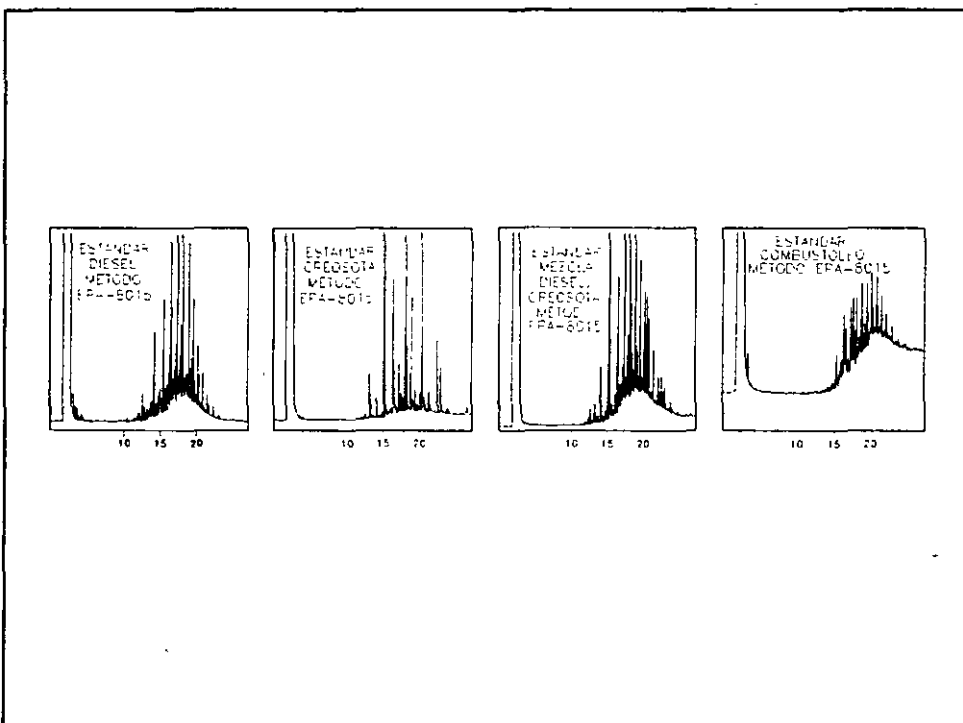
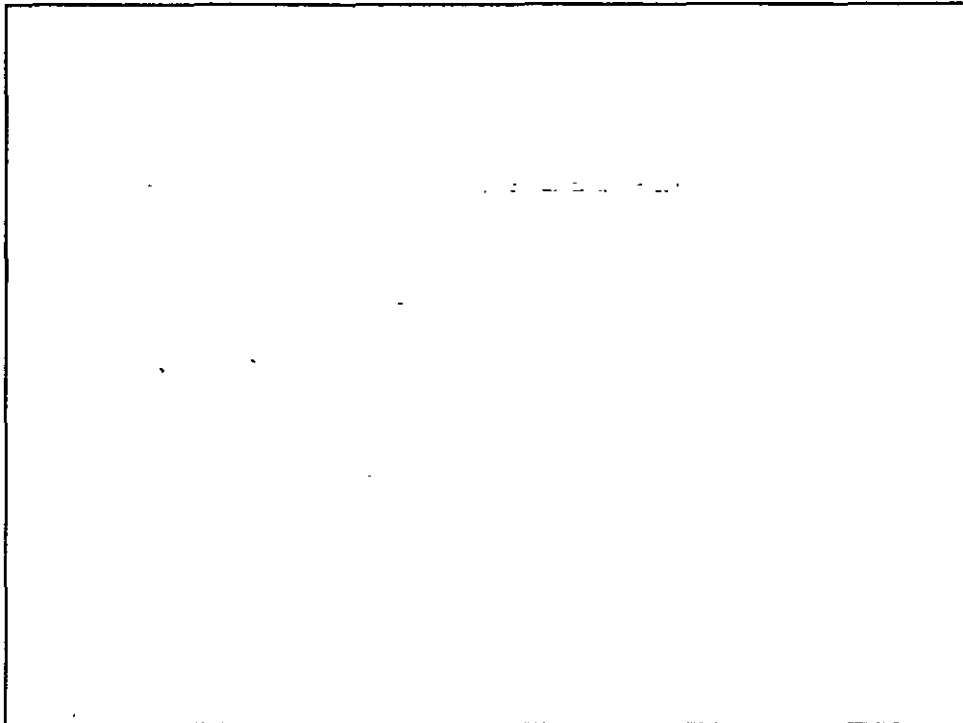
LESSER, 2001

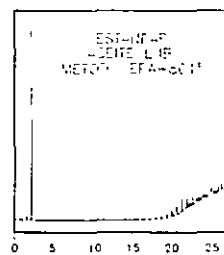
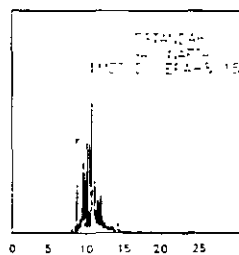
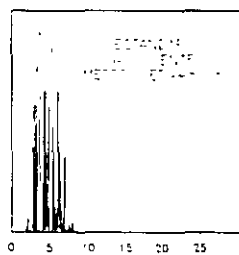
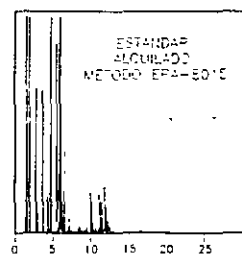
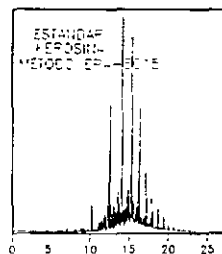
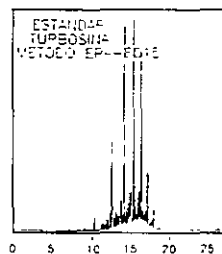
BTEX

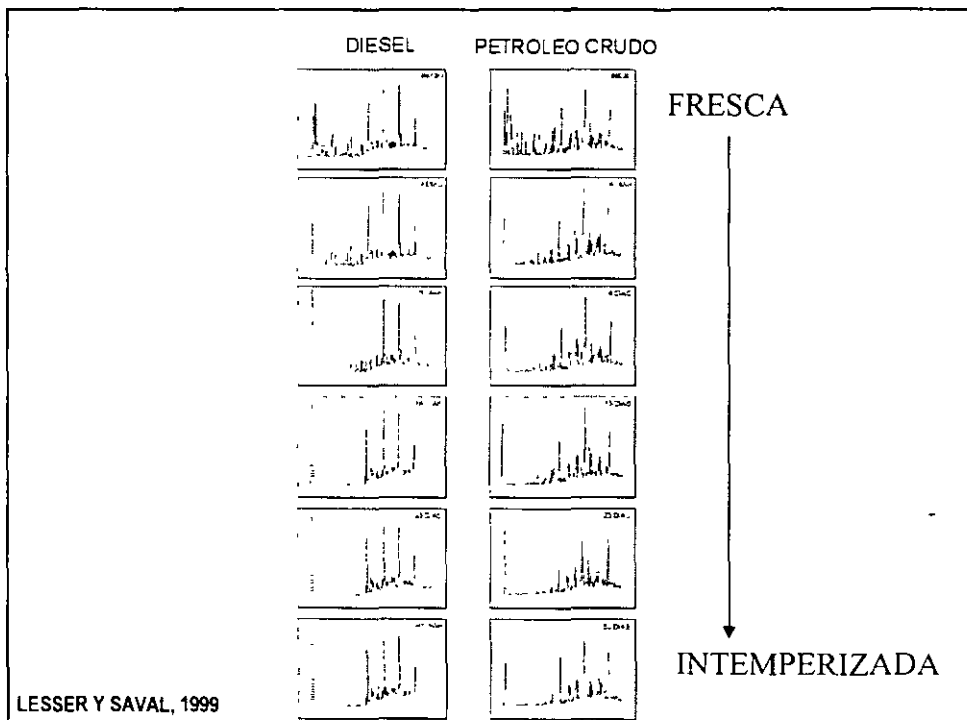
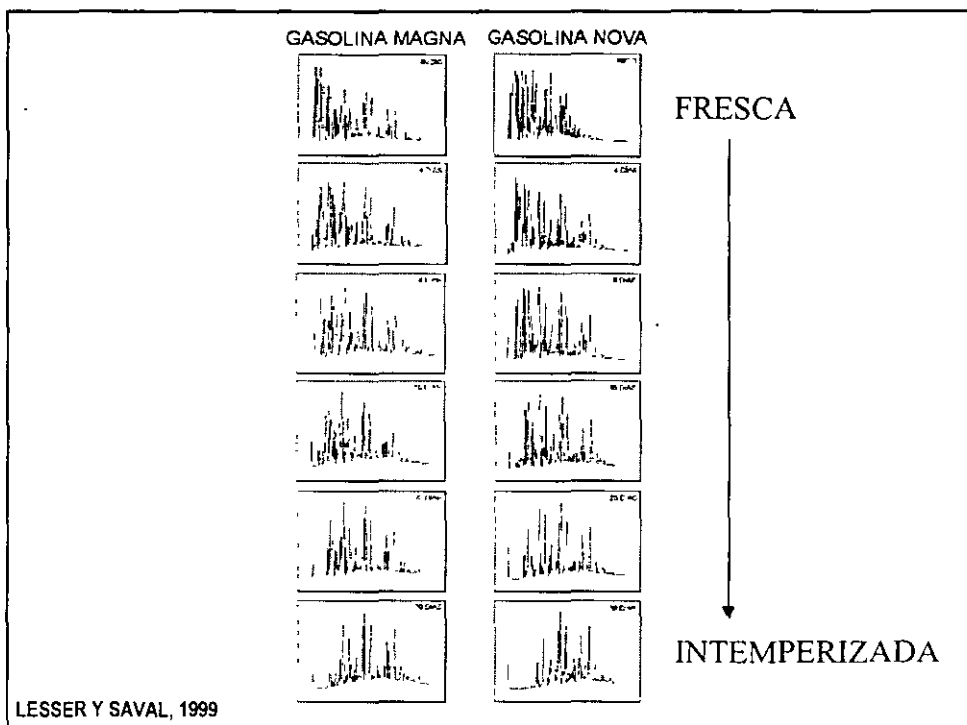


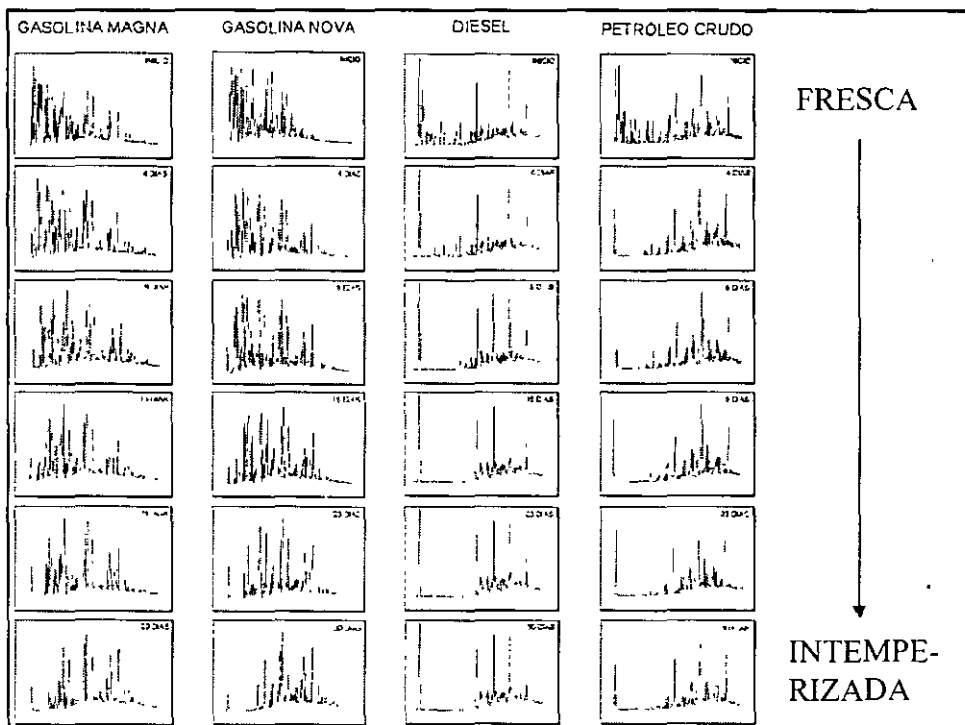
LESSER, 2001



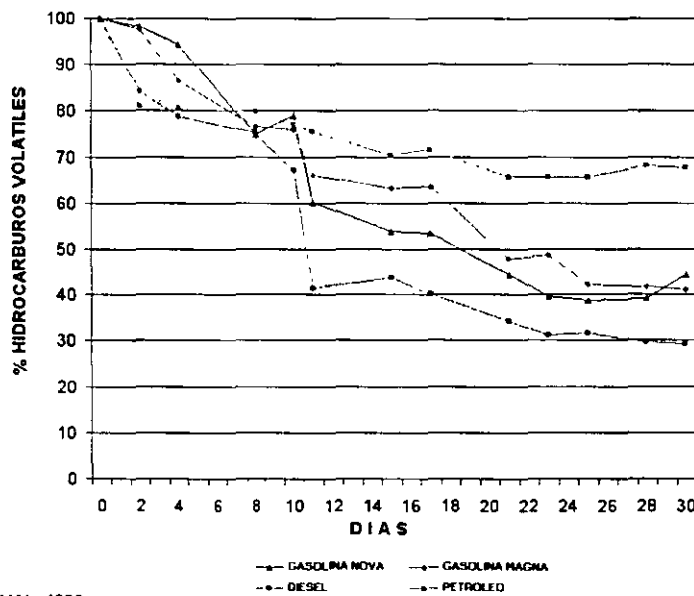








Pérdida de hidrocarburos por acción de la intemperie



LESSER Y SAVAL, 1999

■ Estandares (Huellas digitales)



LESSER, 2001

MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA DETERMINACIÓN DE HIDROCARBUROS Y PLOMO ORGÁNICO EN MUESTRAS DE SUELO Y AGUA		
HRPs (HTPs)		EPA-418-1
HC-GASOLINA, HC-TURBOSINA/KEROSINA, HC-DIESEL		EPA-8015-B
MONOAROMÁTICOS BTX, MTBE, TAME (HC LIGEROS)		EPA-8240
HPAs DIESEL (HC PESADOS)		EPA-8310 EPA-8100
PLOMO ORGÁNICO		LM-EST-2024-D
PLOMO TOTAL		EPA-7420

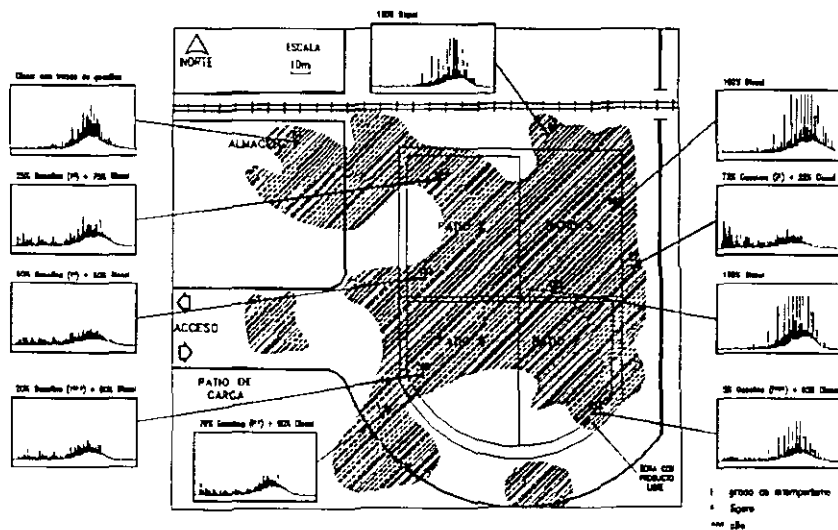


LESSER, 2001

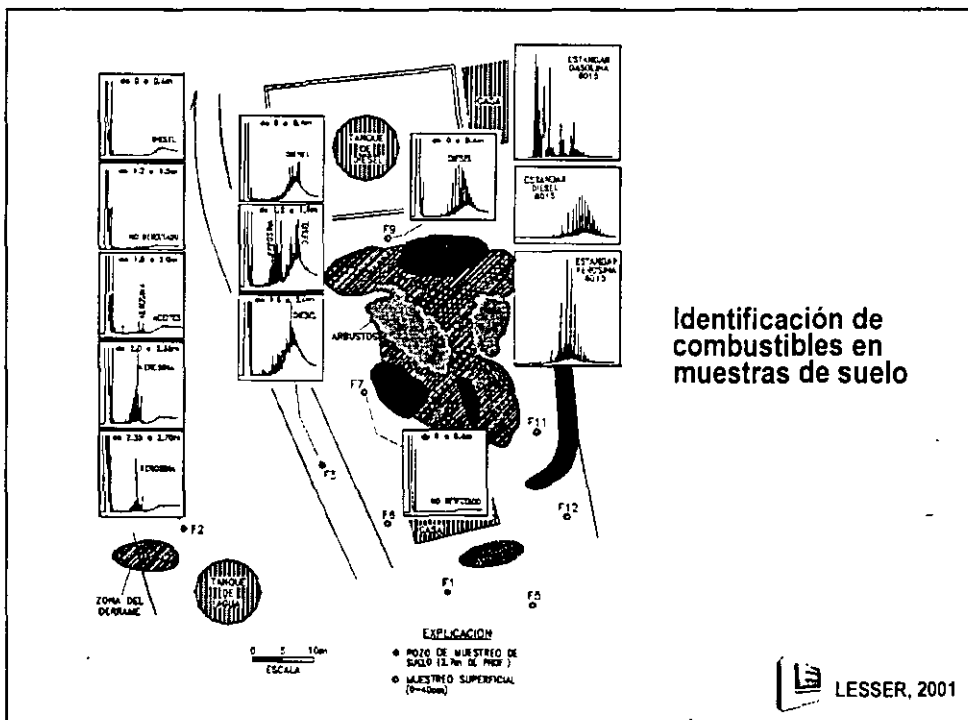
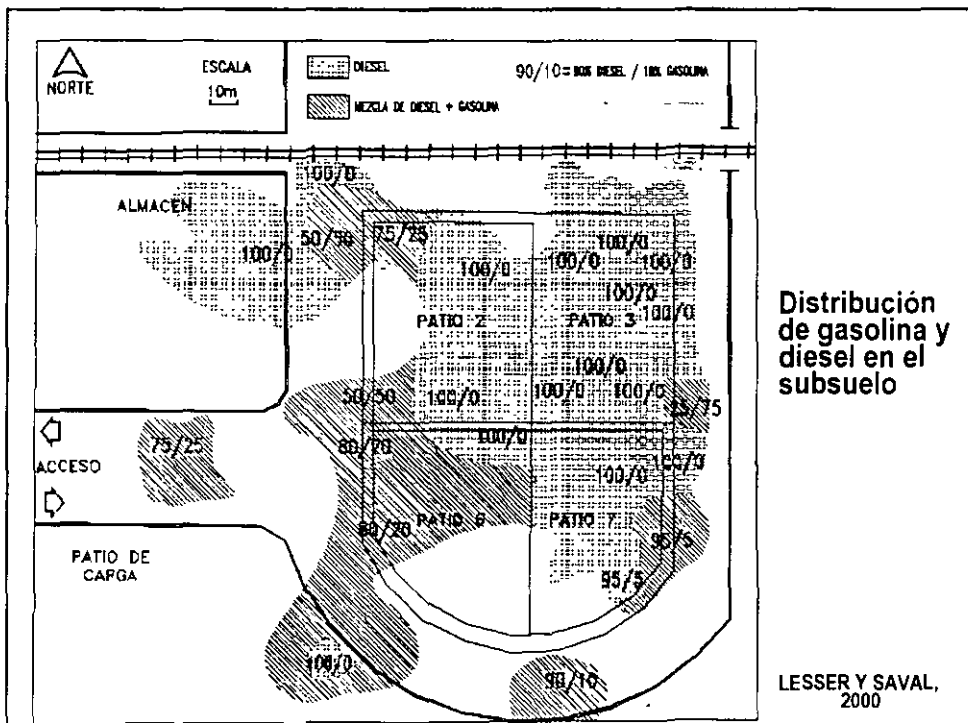
■ Identificación de hidrocarburos mediante cromatografía

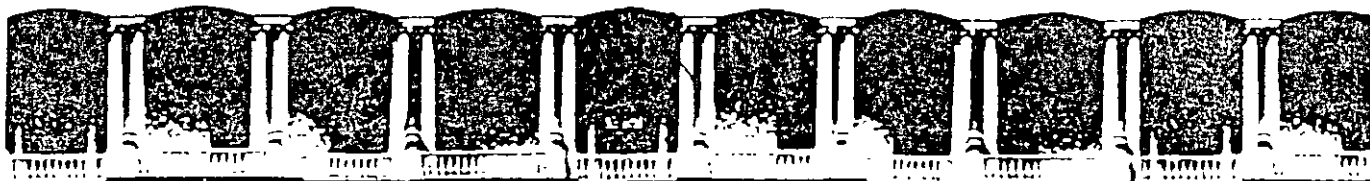
LESSER, 2001

Identificación de combustibles acumulados en el subsuelo



SAVAL Y LESSER, 2000





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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

PRINCIPALES HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUÍFEROS: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERISTICAS

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

PRINCIPALES HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUÍFEROS: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS

*Por: Ing. Juan Manuel Lesser Illades**

*Dra. Susana Saval Bohórquez***

RESUMEN

La contaminación de acuíferos con hidrocarburos es un problema que se ha vuelto común en nuestros días, debido principalmente al extensivo uso de los combustibles derivados del petróleo, los cuales se manejan y consumen a todo lo largo del país. La química de los hidrocarburos es bien conocida, sin embargo, su estudio como contaminantes de suelos y agua subterránea se ha desarrollado hasta las últimas décadas. Entre los combustibles destilados del petróleo más comunes, se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina. La gasolina esta formada por hidrocarburos monoaromáticos que tienen bajo punto de ebullición donde predomina el intervalo C3-C12; sus constituyentes más importantes son el benceno, el tolueno, el etilbenceno y los xilenos (BTEX). Las nuevas formulaciones de gasolinas oxigenadas incluyen además, aditivos como el metilterbutileter (MTBE) y el teramilmetileter (TAME). El diesel y la kerosina presentan hidrocarburos entre C11-C25 y C11-C17, respectivamente, con puntos de ebullición medios. Sus componentes más comunes son los hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) naftaleno, antraceno y fenantreno. Los aceites y el combustóleo son productos con altas temperaturas de ebullición. Los BTEX, MTBE y TAME presentan alta solubilidad en agua y por lo tanto mayor riesgo a la salud. A pesar de que muchos HPAs son tóxicos, presentan baja solubilidad en agua por lo que en esos casos el grado de riesgo disminuye.

Para la identificación y cuantificación de los combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases, siendo el método EPA 8015 el más común y los métodos 8020, 8240, 8260, 8100 y 8310 para la identificación de sus componentes más importantes. Con un perfil cromatográfico, que constituye una "huella digital", es posible determinar si corresponde a un producto fresco o modificado por su exposición a la intemperie y/o por el tiempo que ha permanecido en el subsuelo. En el presente trabajo se incluyen cromatogramas típicos de los principales combustibles.

Contaminación de Suelos y Acuíferos D. E. C. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2001

* Lesser y Asociados, S. A. De C. V. lesserjuanm@infosel.net.mx

** Instituto de Ingeniería, UNAM ssb@pumas.ingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

Cada vez son más comunes los trabajos para la caracterización y remediación de sitios contaminados por fugas de hidrocarburos. Como parte de esos trabajos, una de las herramientas más útiles en la prospección y monitoreo del suelo y agua subterránea, es la interpretación de perfiles cromatográficos. A partir de ellos se identifican los tipos de combustibles y se cuantifican sus componentes, como un valioso apoyo en la definición de la fuente de contaminación y en la determinación del grado de toxicidad y riesgo a la salud.

HIDROCARBUROS DEL PETRÓLEO

Los hidrocarburos del petróleo son cadenas de carbonos. El petróleo crudo incluye compuestos que van del metano (C1) a cadenas complejas arriba del C100. Se clasifican en dos grandes grupos con base en los enlaces químicos que conforman su estructura molecular: alcanos y alquenos.

Los alcanos son los principales constituyentes del petróleo crudo. Su toxicidad es reducida y tienen muy baja solubilidad. Entre los alquenos están los aromáticos que son los compuestos más tóxicos, éstos pueden ser mononucleares y polinucleares. Los monoaromáticos como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y los xilenos (BTEX), tienen la propiedad de ser muy solubles en agua en comparación con los alcanos.

El metilterbutiléter MTBE y el teramilmetiléter (TAME), son aditivos que en los últimos años se han incorporado a las gasolinas de nueva generación, en substitución del tetraetilo de plomo.

Los hidrocarburos polinucleoaromáticos (HPAs) son los más importantes constituyentes del diesel. Varían entre moderadamente solubles en agua, como el naftaleno a los muy poco solubles como el benzo(a)antraceno y el benzo(a)pireno.

En las refinerías, el petróleo crudo es sometido a altas temperaturas provocando la separación de los compuestos que lo constituyen, algunos productos gaseosos se volatilizan y capturan, mientras que los diferentes combustibles son separados en torres de destilación. En la figura 1 se muestra un esquema que ilustra la destilación de los diferentes

Contaminación de Suelos y Acuíferos. D. E. C. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2001

* Lesser y Asociados, S. A. De C. V. lessertjuanin@infosel.net.mx

** Instituto de Ingeniería, UNAM ssb@pumas.ingen.unam.mx

combustibles. A temperaturas entre 27 y 225°C destila la gasolina (C3 a C12), entre 180 y 380°C destilan la kerosina (C11 a C17) y el diesel (C11 a C25); mientras que entre 300 y 500°C se obtienen los aceites (C30 a C70).

Como se observa en las figuras 1 y 2 la gasolina se caracteriza por tener baja temperaturas de ebullición, mientras que en el diesel la temperatura de ebullición es de intermedia a alta y para los aceites es alta.

CROMATOGRAFÍA

A partir de los análisis por cromatografía de gases (GC), se obtienen gráficas denominadas perfiles cromatográficos o “huellas digitales” que son líneas en forma de picos, cada uno de los cuales pertenece a un compuesto en particular. El eje de las abscisas corresponde a los tiempos de retención en minutos, mientras que el eje de las ordenadas tiene relación con la concentración de cada compuesto.

La identificación de combustibles por cromatografía de gases, permite separar los hidrocarburos de baja temperatura de ebullición como son las gasolinas, de aquellos de mayor temperatura de ebullición. El tiempo de retención en un perfil cromatográfico, corresponde prácticamente al número de carbonos, cuando para el análisis se utiliza el método EPA 8015, por ejemplo.

Un cromatograma o huella digital del petróleo crudo incluye picos desde el C1 hasta el C70. En la figura 3 se muestra en forma general el intervalo que abarcan los principales combustibles refinados del petróleo crudo, como son la gasolina, la kerosina, el diesel y los aceites lubricantes. Los picos iniciales corresponden a compuestos más sencillos, mientras que los finales son hidrocarburos con mayor número de átomos de carbono.

Para la cuantificación de los hidrocarburos monoaromáticos como los BTEX, MTBE y TAME, generalmente se realizan análisis más específicos aplicando los métodos EPA 8240 y EPA 8260. Mientras que para los hidrocarburos poliaromáticos (HPAs), constituyentes principales del diesel, se utilizan los métodos EPA 8100 y EPA 8310.

En la figura 4 se muestra el perfil cromatográfico de la gasolina con tiempos de retención que corresponden a hidrocarburos entre C3 y C12 donde están incluidos los BTEX. En la figura 5 se muestra el cromatograma del diesel que incluye hidrocarburos entre C11 y C25 formando una “campana” que es típica de este combustible. El perfil de la kerosina se presenta en la figura 6, mientras que el de un aceite lubricante en la figura 7. En todos estos casos se utilizó el método EPA 8015.

También son comunes los solventes, usados como desengrasadores, los cuales se caracterizan por estar en el intervalo de (C7 a C12). Estos solventes prácticamente no contienen compuestos ligeros para disminuir el riesgo de inflamabilidad, además, es deseable que éstos no contengan compuestos de alta temperatura de ebullición para evitar residuos aceitosos durante su uso. Estos disolventes generalmente son menos tóxicos que las gasolinas.

El intervalo de la gasolina (C3-C12) se traslapa con el del diesel (C11-C25) y ambos con el de la kerosina (C11 al C17). Sin embargo, aun mezclados los tres, pueden ser identificados en el mismo cromatograma. En las figuras 8, se muestran perfiles con diferentes mezclas de combustibles, en el primer caso (figura 8a) gasolina y diesel; en el segundo caso (figura 8b) una mezcla de kerosina y diesel.

La fabricación o destilación de combustibles puede presentar algunas variantes, pero sus rasgos básicos permanecen. La antigüedad de un combustible y el intemperismo al que están expuestos, modifican su composición y con ello se altera su huella digital. En la figura 9 se presentan combustibles frescos e intemperizados, observándose que para los segundos, los picos de menor tiempo de retención han disminuido o incluso desaparecido. Ello permite identificar derrames recientes de otros más antiguos e intemperizados.

SOLUBILIDAD DE LOS HIDROCARBUROS Y RIESGO A LA SALUD

La gasolina se caracteriza por contener BTEX, los cuales son parcialmente solubles en agua y son tóxicos, el benceno es cancerígeno por ello su presencia en agua subterránea es de preocupación. Los n-alcenos son prácticamente insolubles y también son menos tóxicos, por ello su riesgo es menor. En la Tabla 1 se presentan valores del porcentaje de solubilidad de los principales compuestos de la gasolina y el diesel.

Contaminación de Suelos y Acuíferos D E. C. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2001

* Lesser y Asociados, S. A. De C. V. lesscrjuanm@infosel.net.mx

** Instituto de Ingeniería, UNAM ssb@pumas.iingen.unam.mx

Las gasolinas fabricadas en los últimos años, llegan a incluir aditivos como el metilterbutileter (MTBE) y el teramilmetileter (TAME), caracterizados por ser aún más solubles que los BTEX, aunque menos tóxicos. El MTBE da un aspecto desagradable al agua por su olor y sabor característicos. No se ha comprobado que sea tóxico o cancerígeno, pero en mayo del 2000, el estado de California adoptó un Límite de Contaminación Máximo de 0.013 mg/l.

Es común que el agua subterránea aún y cuando se encuentre bajo una capa de hidrocarburos, presente concentraciones bajas de HCs en solución. En varios sitios del país se ha comprobado que no obstante que el agua se encuentre cubierta por una capa de varios metros de gasolina en fase libre la porción de hidrocarburos que se ha llegado a disolver y detectar mediante cromatografía es muy reducida. En contraste, en estudios de suelo, la fase volátil o adsorbida es notablemente más alta, más aún si se trata de arcillas.

CONCLUSIONES

Entre los principales combustibles contaminantes de suelos y acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y los aceites lubricantes. La gasolina contiene hidrocarburos monoaromáticos de baja temperatura de ebullición, entre los que predominan los BTEX. Entre ellos el benceno es el de mayor solubilidad y toxicidad, ya que es cancerígeno. Un perfil cromatográfico o huella digital permite identificar diferentes combustibles, además de identificar y cuantificar sus componentes más importantes. Los combustibles como gasolina, diesel, kerosina y aceites se detectan por cromatografía de gases mediante el método EPA 8015. Para los hidrocarburos monoaromáticos y aditivos de gasolinas se emplean los métodos EPA 8240 y EPA 8260, mientras que los poliaromáticos se analizan por los métodos EPA 8100 y EPA 8310. Los BTEX por ser los más solubles, son los de mayor riesgo, mientras que los poliaromáticos, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.

REFERENCIAS

Calabrese, E.J. and P.T. Kostecki. 1989. Petroleum contaminated soils. Vol. 2. Lewis Publishers. 515 p.

Contaminación de Suelos y Acuíferos. D. E. C. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2001

* Lesser y Asociados, S. A. De C V lesserjuanm@infosel.net.mx

** Instituto de Ingeniería, UNAM ssb@pumas.iingen.unam.mx

- Cole, G. Mattney, 1994. Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Lewis publishers. 360 p.
- Kostecki, P.T. and E.J. Calabrese, 1992. Contaminated soils, diesel fuel contamination. Lewis publishers. 227 p.
- Lesser, Juan M. y S. Saval, 1999. Intemperismo, efectos de hidrocarburos en suelos y acuíferos. Teorema revista técnico ambiental No. 23, Año 6, No. 23, Diciembre: 34-35.
- Nyer, E. K, 1993. Practical techniques for groundwater and soil remediation. Lewis publishers. 214 p.
- Saval S. y Lesser J. M., 1999. Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial. Ingeniería y Ciencias Ambientales (Revista de la Federación Mexicana de Ingeniería y Ciencias Ambientales. A.C.) Año 10. No. 45, Nov-Dic. 24-29.

TEMPERATURA DE EBULLICION

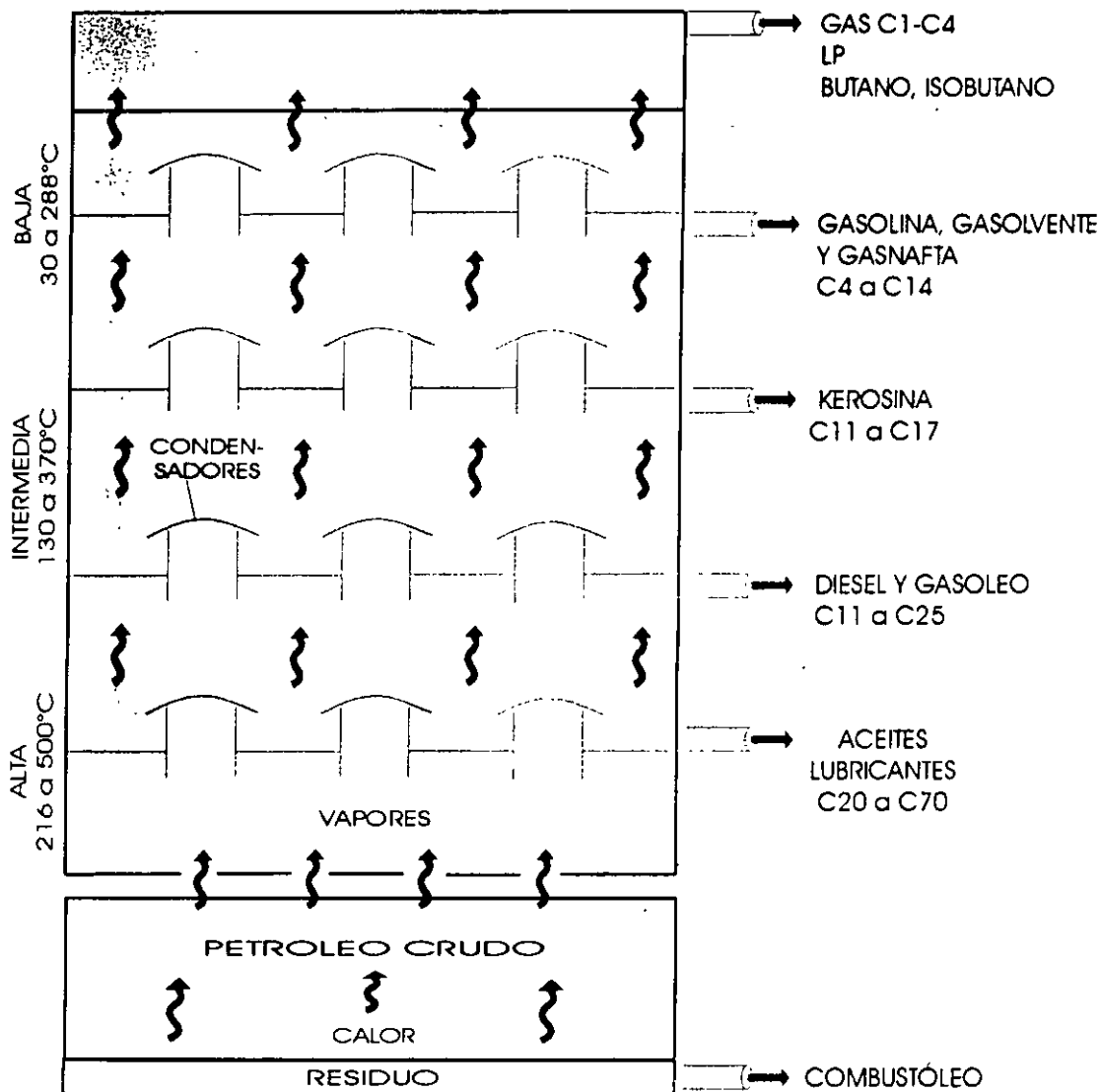


FIGURA 1.-TORRE DE DESTILACION PARA REFINACION DEL PETROLEO (MODIFICADA DE COLE, 1994)

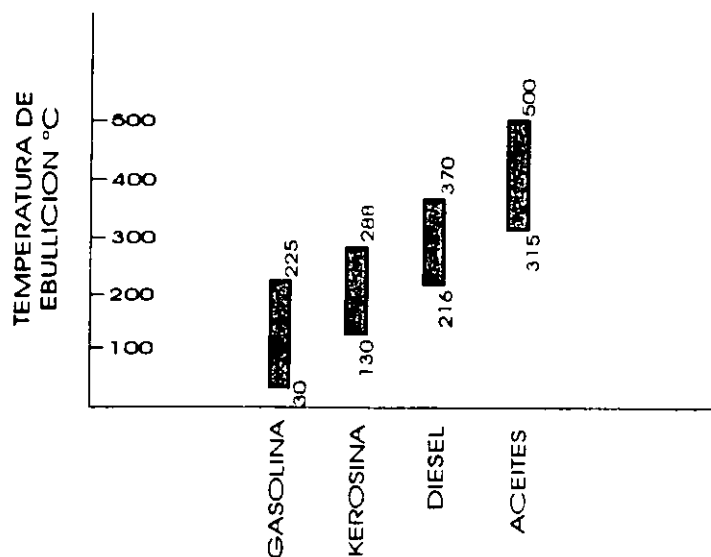


FIGURA 2.-TEMPERATURA DE EBULLICION DE COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

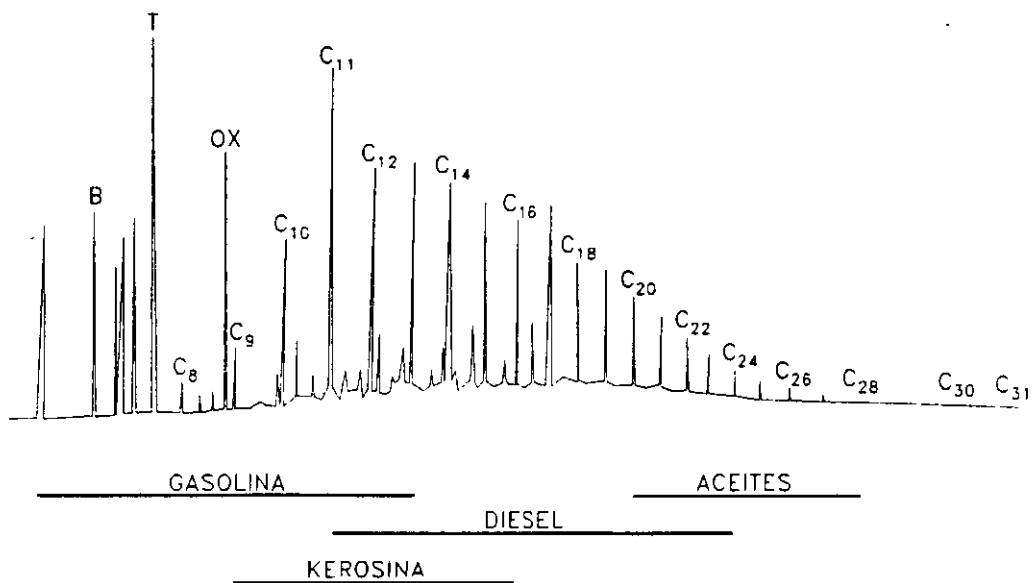


FIGURA 3 -CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE HIDROCARBUROS

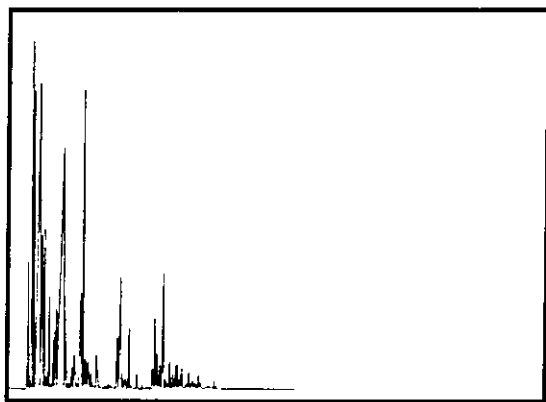


FIGURA 4.-GASOLINA

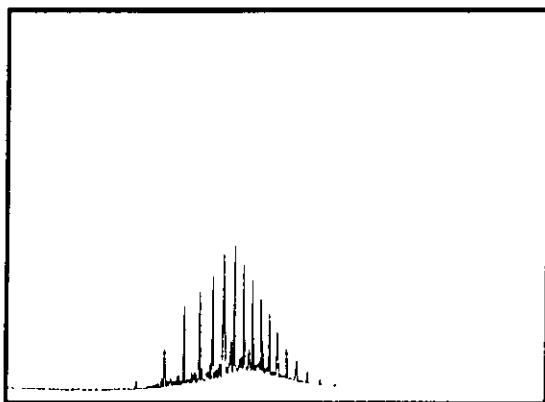


FIGURA 5.-DIESEL

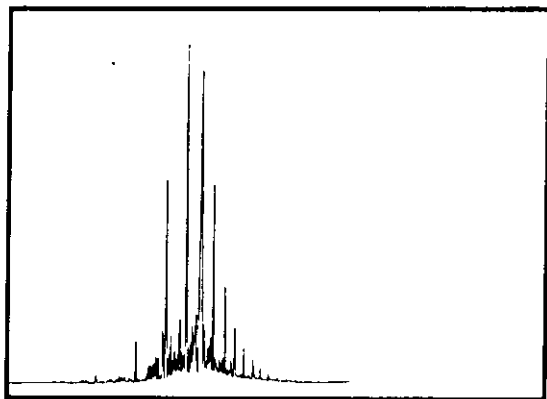


FIGURA 6.-KEROSINA

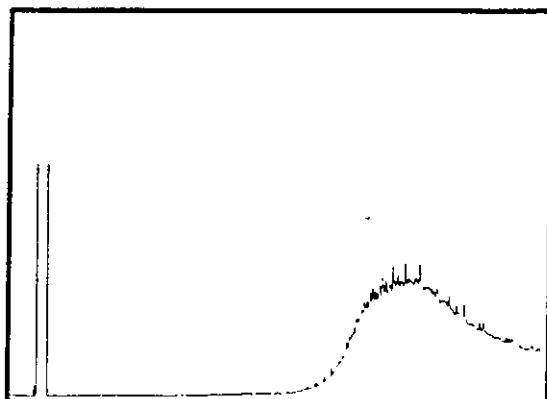


FIGURA 7.-ACEITE LUBRICANTE

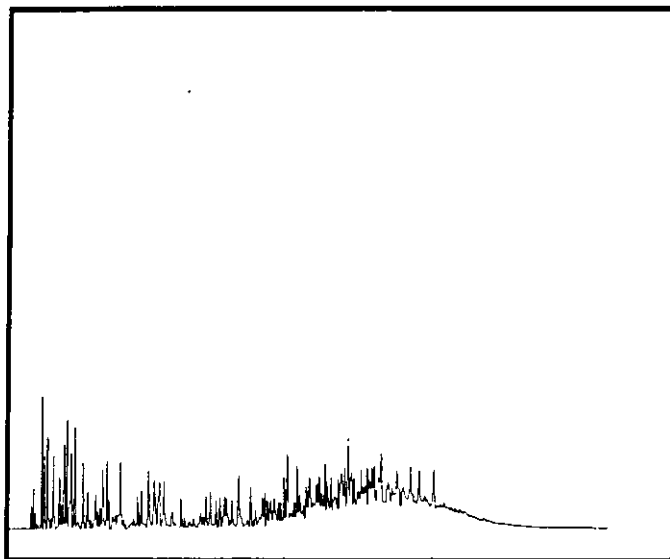


FIGURA 8a.—MEZCLA DE
GASOLINA Y DIESEL

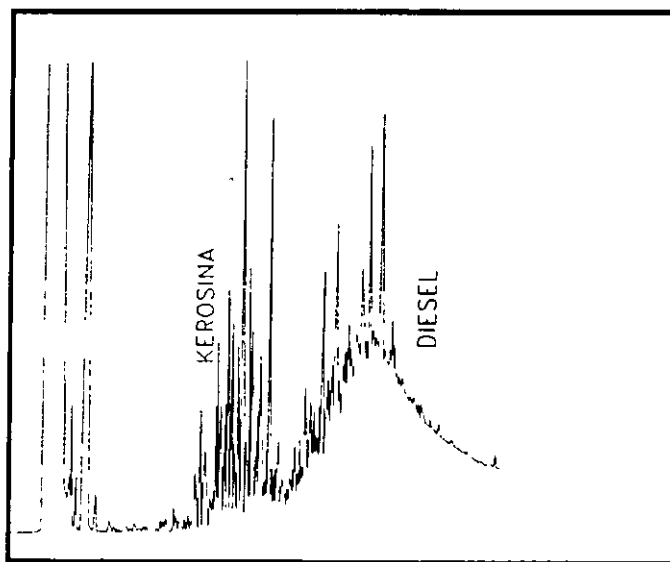
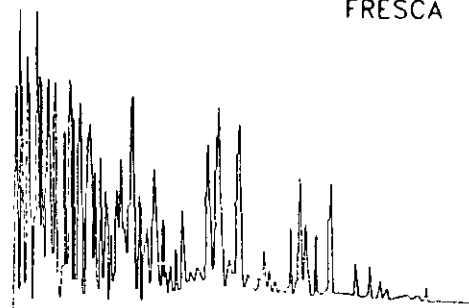
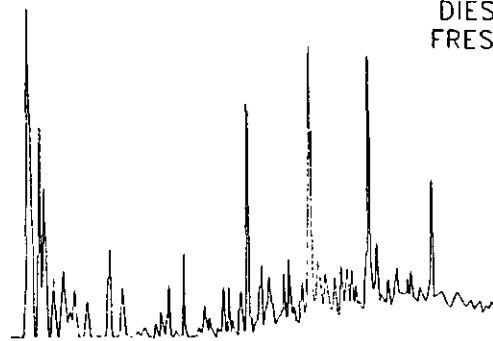


FIGURA 8b.—MEZCLA DE
KEROSINA Y DIESEL

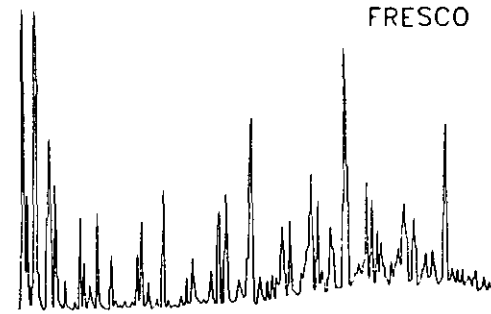
GASOLINA MAGNA
FRESCA



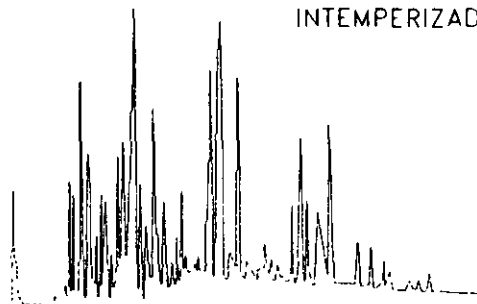
DIESEL
FRESCO



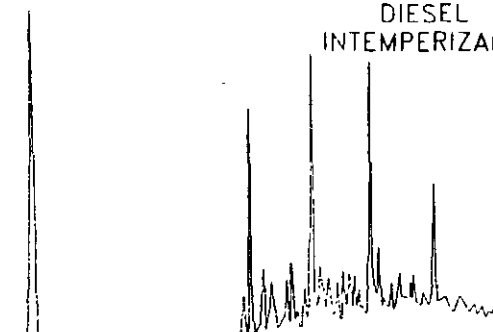
PETROLEO CRUDO
FRESCO



GASOLINA MAGNA
INTEMPERIZADA



DIESEL
INTEMPERIZADO



PETROLEO CRUDO
INTEMPERIZADO

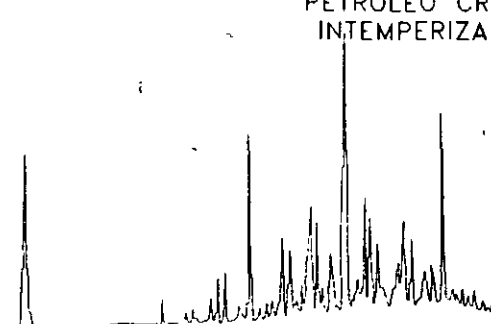


FIGURA 9.-CROMATOGRAMAS DE COMBUSTIBLES FRESCOS E INTEMPERIZADOS



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

INTEMPERISMO, EFECTOS DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y ACUIFEROS

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

Intemperismo, efectos de hidrocarburos en suelos y acuíferos

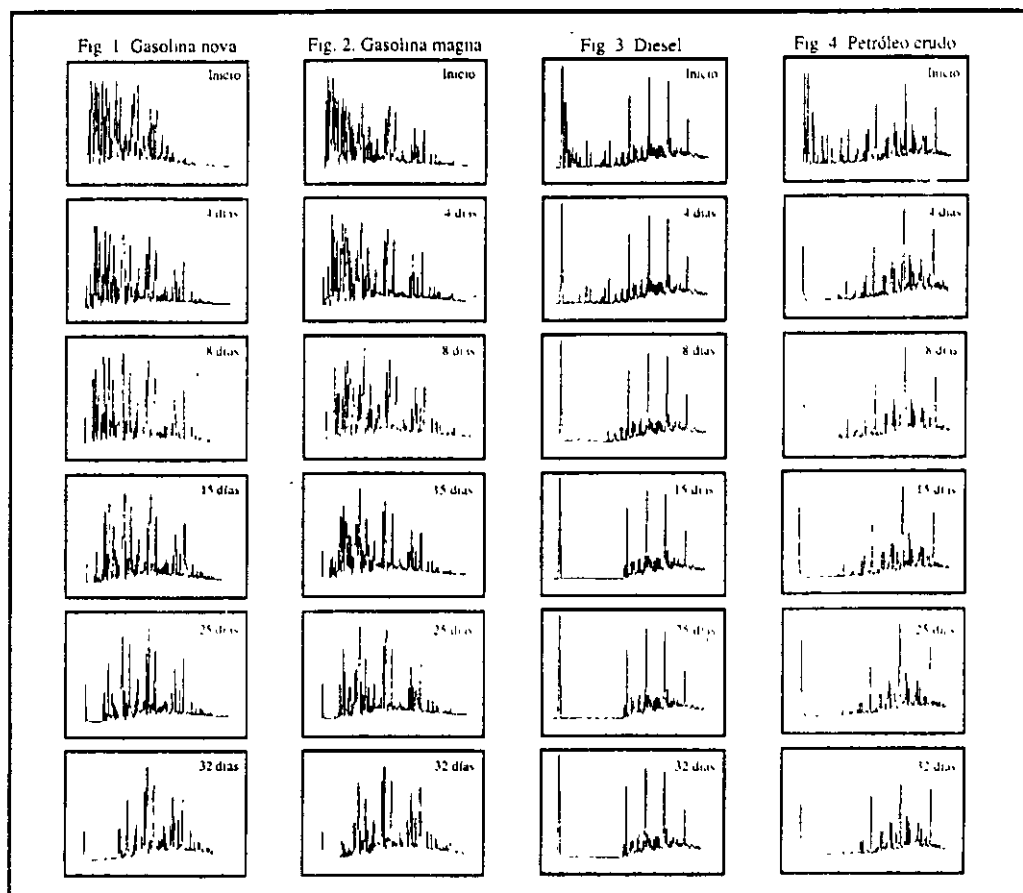
Juan Manuel Lesser* y Susana Saval**

En el subsuelo de instalaciones industriales es común encontrar hidrocarburos contaminantes de suelo y aguas subterráneas, cuya composición se modifica en gran parte por la exposición a la intemperie.

Con la finalidad de conocer algunas de estas modificaciones se obtuvieron muestras frescas de gasolina, diesel y petróleo crudo a las cuales se les sometió a un proceso de intemperización natural, al mantenerlas en un lugar abierto y ventilado. Se tomaron muestras periódicas de cada producto y se analizaron por cromatografía de gases. En los perfiles cromatográficos obtenidos se confirmó la pérdida de los hidrocarburos volátiles. Los resultados obtenidos resaltan la importancia de conocer el efecto de la intemperie sobre cualquier tipo de contaminante.

Cuando ocurre un derrame de combustibles al suelo, una parte de los hidrocarburos se volatiliza, otros migran hacia el subsuelo y se disuelven en el agua subterránea, mientras que otros permanecen en fase libre flotando sobre el nivel del agua. Durante los estudios de prospección del subsuelo, uno de los objetivos que se persiguen es la caracterización de los hidrocarburos contaminantes, para ello se obtienen muestras de suelo, agua y de hidrocarburos en fase líquida, las cuales se pueden analizar en el laboratorio mediante cromatografía de gases con la finalidad de identificar el tipo y concentración de los combustibles presentes (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993) y también se puede establecer si su composición ha sufrido cambios por efecto de la intemperie.

La gasolina y el diesel son mezclas complejas de hidrocarburos destilados del petróleo, que



contienen alrededor de 150 compuestos diferentes (Riser-Roberts, 1992; Mattney, 1994). La gasolina se caracteriza por contener hidrocarburos con bajo peso molecular que son muy volátiles, en comparación con los que están presentes en el diesel. La pérdida de los componentes volátiles en un combustible permite diferenciar un producto fresco de otro antiguo.

Cuando un combustible en fase líquida o adsorbido en el suelo permanece expuesto a la intemperie, el viento ocasiona la pérdida de los hidrocarburos volátiles, mientras que los rayos solares pueden provocar reacciones fotoquímicas en todos sus componentes. La combinación del viento y de la exposición al sol, ocasiona modificaciones químicas, descomposición o incluso la degradación total de los hidrocar-

buros, efecto que se conoce como intemperismo.

En este artículo se presentan algunas experiencias obtenidas al someter a la intemperie por volatilización natural, muestras de gasolina, diesel y petróleo crudo a las cuales se les dio seguimiento mediante análisis cromatográficos.

Estrategia. Muestras frescas de gasolina Nova, gasolina Magna, diesel y petróleo crudo se sometieron a análisis de acuerdo con el método EPA 8015 (USEPA, 1996), con lo cual se obtuvieron los perfiles cromatográficos típicos para cada producto. Estos mismos productos se expusieron a la intemperie en un espacio abierto y ventilado de manera natural durante un mes. En forma periódica se tomaron muestras que se analizaron de la misma forma para obtener los perfiles

cromatográficos correspondientes. También se cuantificó el contenido de hidrocarburos volátiles residuales en cada producto.

Resultados. Los perfiles cromatográficos obtenidos para los productos frescos y para las muestras expuestas a la intemperie se presentan en las figuras 1 a 4. Los perfiles típicos de las gasolinas Nova (fig. 1, inicio) y Magna (fig. 2, inicio), presentan picos con tiempos de retención hasta los 16 minutos. La gasolina contiene más de 150 hidrocarburos con estructuras químicamente diferentes entre 3 y 12 átomos de carbono, pero que comparten algunas características, por lo que una mayoría de picos aparecen encimados. A partir de los 4 días de estar expuestos a la intemperie, ya están ausentes aquellos hidrocarburos que tienen menor tiempo de retención,

que corresponden a aquellos con menor peso molecular y más volátiles. La ausencia de éstos se va haciendo más marcada con el paso del tiempo, de tal forma que a los 30 días se han perdido todos los hidrocarburos que aparecían en los primeros minutos, tanto para la gasolina Nova (fig. 1), como para la gasolina Magna (fig. 2).

En el caso del diesel y del petróleo crudo, los perfiles cromatográficos presentan una mayor diversidad de picos que abarcan tiempos de retención cortos y largos (figs. 3 y 4). La mayor parte de las entidades químicas contenidas en el diesel van de 10 a 30 átomos de carbono, aunque también contiene pequeñas cantidades de hidrocarburos con un menor número de átomos de carbono. En el caso del petróleo ocurre algo similar, aunque aquí se pueden encontrar entidades químicas mucho más complejas y con un mayor número de átomos de carbono que las contenidas en el diesel, las cuales son más estables y sufren menos cambios durante la intemperización.

En los perfiles cromatográficos obtenidos para el diesel (fig. 3) se observó pérdida de volátiles solamente los primeros 15 días y 8 días para el caso del petróleo crudo (fig. 4), después, los cromatogramas permanecen prácticamente sin cambio hasta los 30 días que duró el experimento.

Por otra parte, con la información obtenida a lo largo del seguimiento de las pruebas, se construyó la gráfica que se presenta en la figura 5, donde se aprecia claramente el porcentaje de pérdida de los hidrocarburos volátiles con respecto al tiempo, referida a la concentración inicial en cada producto. En todos los casos, la disminución fue gradual con respecto al tiempo y acorde con las observaciones de los perfiles cromatográficos. Los dos tipos de gasolina perdieron aproximadamente 60 por ciento de sus hidrocarburos volátiles, mientras que el diesel dejó escapar 70

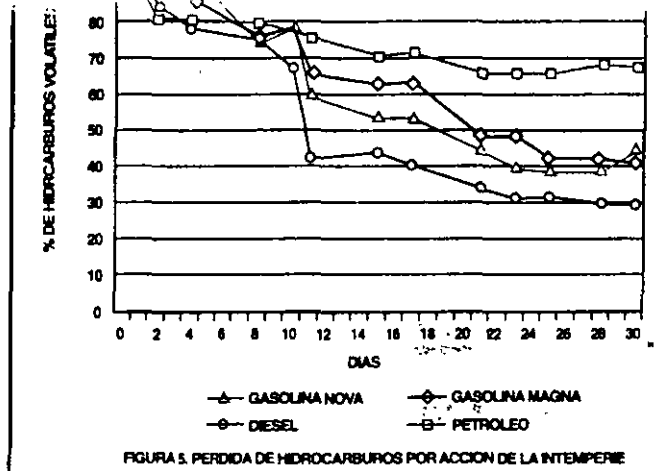


FIGURA 5. PÉRDIDA DE HIDROCARBUROS POR ACCIÓN DE LA INTemperIE

por ciento. El petróleo crudo perdió solamente 25 por ciento de sus hidrocarburos volátiles, quizá debido a su elevada viscosidad.

Discusión. El perfil cromatográfico de cualquier combustible fresco puede ser considerado como una huella digital característica, por lo que puede servir como base para la identificación de hidrocarburos de origen desconocido, como es el caso de aquellos que contaminan suelos y aguas subterráneas. La pérdida de los componentes volátiles durante la intemperización hace que el perfil cromatográfico obtenido no tenga similitud con el combustible de origen, tal como ocurre en los perfiles a 30 días de intemperización, cuando se comparan con aquellos que se obtuvieron al inicio del experimento (figs. 1 a 4).

Lo anterior es de fundamental importancia cuando el objetivo principal de un análisis es la identificación de los combustibles contaminantes. También es importante tomarlo en consideración, cuando se está aplicando una remediación a suelo o agua subterránea contaminados, ya que muchos componentes se pierden por volatilización y no por el efecto de la propia técnica de remediación, principalmente en aquellas que están basadas en la degradación de los hidrocarburos contaminantes, por ejemplo, la biorremediación.

Si este experimento se hubiera realizado con ventilación forzada,

seguramente la pérdida de volátiles hubiera sido mayor y más rápida, sin embargo, el objetivo que se persiguió en este caso particular fue observar los cambios que ocurren en los hidrocarburos contaminantes en el caso más sencillo de intemperismo que es la ventilación natural y en ausencia de los rayos solares.

Respecto de los análisis, en el caso de combustibles ligeros existen otras pruebas complementarias como pueden ser la destilación y la

cuantificación de componentes volátiles específicos; sin embargo, estas pruebas presentan ciertas limitantes, por lo que la cromatografía es y seguirá siendo una herramienta de gran utilidad para identificar combustibles contaminantes en cualquier tipo de matriz, también para determinar su concentración en muestras de suelo y agua subterránea, así como para calcular el grado de intemperización, aunque en algunos casos sea con cierta imprecisión.

Conclusiones. Los resultados obtenidos confirman que la intemperie tiene una función importante en la composición de los combustibles y que esto debe ser tomado en consideración durante la identificación y cuantificación de hidrocarburos contaminantes presentes en suelos o agua subterránea contaminados, o bien, en aquellos que están siendo sometidos a un proceso de remediación.

* Lesser y Asociados, SA.

** Instituto de Ingeniería, UNAM.

Covertech SA
 Centro de Investigación y Desarrollo
 Tecnología de Limpieza Ambiental

Se han desarrollado tecnologías para:
 - Limpieza ambiental de suelos y aguas
 - Tratamiento de residuos sólidos y líquidos
 - Eliminación de olores y humos
 - Tratamiento de aguas residuales
 - Eliminación de manchas y graffiti

**Mayor Productividad
 Menos Residuos
 Más Unidades**

Se han desarrollado tecnologías para:
 - Limpieza ambiental de suelos y aguas
 - Tratamiento de residuos sólidos y líquidos
 - Eliminación de olores y humos
 - Tratamiento de aguas residuales
 - Eliminación de manchas y graffiti

Información: cmpl@redipn.ipn.mx
<http://www.cmpl.ipn.mx>
cmpl@correo.cmpl.ipn.mx

En la edición 19, en el artículo "En busca de criterios de limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos", de la doctora Susana Savat, las unidades de medida correctas de las tablas 1, 11, 13 y 14 son µg/l, en vez de mg/l

CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS EN UN SUELO ARCILLOSO

JUAN MANUEL LESSER* Y SUSANA SAVAL**

Lesser y Asociados, S. A. de C. V. *Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Sobre la superficie del terreno de una zona industrial existieron fugas de combustibles cuya magnitud y fechas de derrame se desconocen. El subsuelo del lugar está formado por materiales arcillosos con un espesor de 40 metros, los cuales se encuentran saturados y dan origen a un acuitardo cuyo nivel freático se ubica a unos 2 metros de profundidad. Las arcillas presentan baja permeabilidad, del orden de 1×10^{-9} m/seg, lo cual impide que los hidrocarburos circulen grandes distancias, y se limita la afectación a un área relativamente reducida. La zona de estudio tiene una superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas, y sobre ellas se realizaron 274 perforaciones someras, en las cuales se tomaron lecturas de hidrocarburos volátiles, explosividad, profundidad al nivel freático y espesor de producto libre que flotaba sobre el manto freático. Prácticamente toda la zona se encontró afectada por la presencia de hidrocarburos volátiles, con más de 10000 ppm (1% v/v) medidos por arriba del nivel freático. Se delimitó la mancha de combustibles en fase libre, la cual presentó espesores de entre 10 y 30 centímetros, que en su mayoría correspondió a diesel y en menor proporción a mezclas de diesel con gasolina. Los análisis cromatográficos efectuados a las muestras del producto libre indicaron que en el sitio ocurrieron varios eventos de derrame, seguramente desde que las instalaciones entraron en operación.

Palabras clave: contaminación, hidrocarburos, acuitardo, permeabilidad, compuestos orgánicos volátiles, diesel, cromatografía

INTRODUCCION

El importante manejo de combustibles que se da durante actividades industriales y comerciales ha traído como consecuencia afectaciones al ambiente entre las cuales aquellas que impactan directamente al suelo y al subsuelo han adquirido gran interés en los últimos años en México.

Cuando ocurre un derrame de combustibles en el suelo inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio lo permite. Las características propias de los combustibles como su densidad, viscosidad y solubilidad en el agua, así como las propias del subsuelo, entre las que destaca el tamaño de partícula, su capacidad de adsorción, permeabilidad y profundidad al nivel freático determinan la acumulación, migración y distribución de estos en cada sitio en particular.

Los problemas de contaminación de suelo y subsuelo no reconocen fronteras ni límites de predios, por lo que cobra fundamental importancia dedicar esfuerzos a la realización de estudios de caracterización detallados que permitan conocer el comportamiento de la contaminación del subsuelo, tanto para

linicar responsabilidad jurídica durante la evaluación de daños ambientales como para tomar las acciones de remediación que sean necesarias y adecuadas para cada sitio en particular (Saval 1998). En este trabajo se presentan los resultados de caracterización y comportamiento de un caso particular de contaminación del subsuelo, dentro de una zona industrial del valle de México.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio ha servido durante varios años como una estación de almacenamiento y distribución de combustibles. El terreno ocupa un área aproximada de 6.5 hectáreas, cerca de la puerta de acceso existe un patio de carga y un almacén que también sirve como taller de mantenimiento. Casi en el centro se localizan cuatro tanques elevados que ocupan los patios 2, 3, 6 y 7. Prácticamente toda la superficie está pavimentada y no existen evidencias de fugas recientes, aunque la información que fue proporcionada al inicio del estudio establece que se registraron derrames cuya magnitud y fechas se

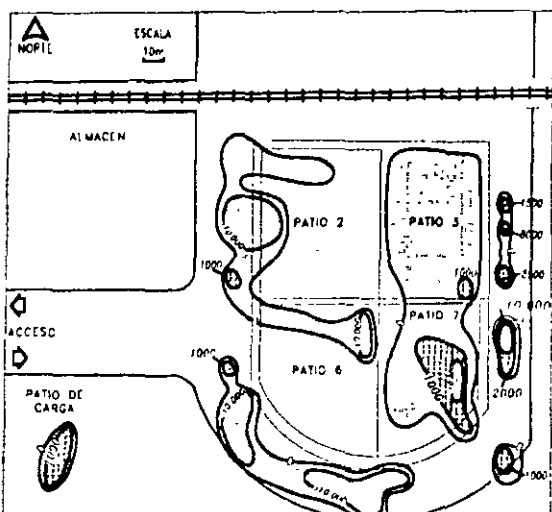
FIGURA 1A CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN PPM A 0.90 DE PROFUNDIDAD

FIGURA 1A - CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN ppm A 0.90m DE PROFUNDIDAD

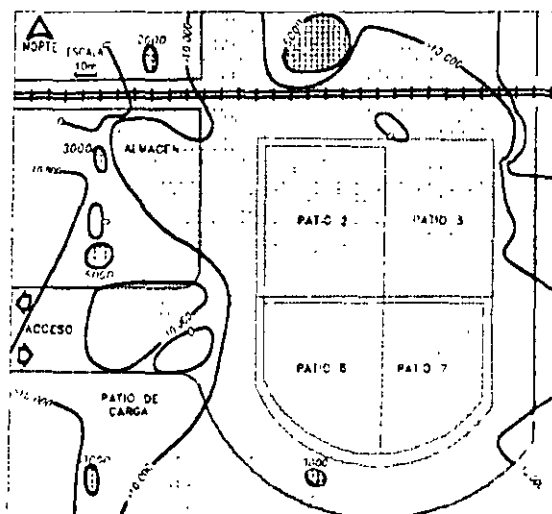
FIGURA 1B. CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN PPM MEDIDOS POR ARRIBA DEL NIVEL FREÁTICO

FIGURA 1B - CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN ppm MEDIDOS POR ARRIBA DEL NIVEL FREÁTICO

desconocen. En el lugar existe una vía de ferrocarril que atraviesa todo el predio de poniente a oriente, aunque actualmente no se utiliza.

MARCO HIDROGEOLOGICO

La zona de estudio se localiza en el valle de México, corresponde a una extensa planicie caracterizada por incluir una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de aproximadamente 40 metros. Incluye algunos horizontes de arena fina con

arcilla, así como limos en diferentes proporciones. Los materiales finos que constituyen la planicie se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad. Debido a la baja permeabilidad de las arcillas, éstas se comportan como un acuitardo, ya que absorben y almacenan agua, la cual presenta poco movimiento por la retención molecular que ejercen las partículas de la arcilla.

El nivel freático presenta fluctuaciones de la temporada de lluvias a la temporada de estiaje, cuando llega a abatirse hasta cerca de 3 metros de profundidad. Al abatirse el nivel, los combustibles se mueven para ocupar el espacio liberado por las aguas freáticas, y posteriormente, en la época de lluvias, el nivel sube y deja una parte de los combustibles en fase libre, y la otra parte adsorbidos en la estructura del suelo.

Por la característica eminentemente arcillosa y de muy baja permeabilidad de la capa de suelo de 40 m de espesor, el acuífero subterráneo que está aproximadamente a 50 m de profundidad se podría clasificar geohidrológicamente como poco vulnerable y de bajo riesgo de contaminación.

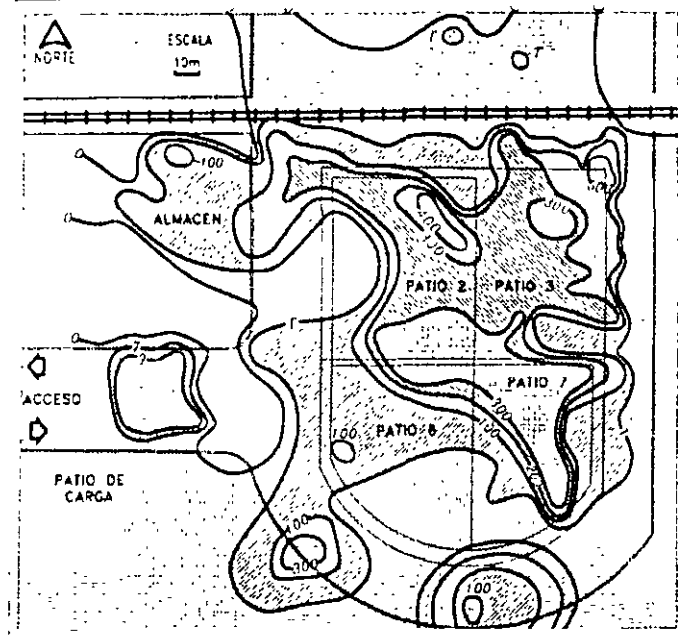
DELIMITACIÓN DE LA ZONA CONTAMINADA

Con el objeto de localizar la zona contaminada en el subsuelo, se perforaron 274 pozos someros de medición que en su mayoría alcanzaron entre 3.00 y 3.30 metros de profundidad. La perforación de los pozos se llevó a cabo mediante el hincado de barras de acero con un diámetro de 1 de pulgada, en ellos se tomaron lecturas *in-situ* de hidrocarburos volátiles, explosividad, profundidad al nivel freático y espesor del producto libre que se encontraba flotando sobre el manto freático (Lesser, 1995). Para la medición de hidrocarburos volátiles se utilizó un fotoionizador portátil marca Gastech modelo GT202 calibrado para hexano. La explosividad se midió con un explosímetro marca MSA, la profundidad al nivel freático con una sonda eléctrica y el espesor de producto libre con ayuda de una pipeta de vidrio que se llevó hasta el nivel freático. Se perforaron otros seis pozos a 10 metros de profundidad, de los cuales se obtuvieron muestras continuas de suelo para identificar la litología del material geológico. Durante las perforaciones se obtuvieron muestras de producto libre, a las cuales se les realizaron análisis por cromatografía de gases para identificar los combustibles presentes.

La medición de hidrocarburos volátiles se realizó en dos profundidades. La primera a 0.90 m, y la segunda por arriba del nivel freático. Con los resultados de la medición a 0.90 m se trazó la configuración que se muestra en la figura 1A, donde se observan varias zonas bien localizadas con concentraciones altas de hidrocarburos volátiles, hasta más de 10 000 ppm (1% v/v). Por lo que se respecta a la medición de hidrocarburos volátiles por arriba del nivel freático, se encontraron valores altos en prácticamente todo el predio (figura 1B).

La distribución del espesor de producto libre que se encontraba flotando sobre el nivel freático se muestra en la figura 2A, donde se observan espesores entre 10 y 30 centímetros, principalmente hacia la porción central de la zona de estudio.

Las muestras de producto libre presentaron diferentes coloraciones, desde el amarillo claro hasta un café verdoso muy oscuro. Inicialmente se consideró que el color tenía una

FIGURA 2A. CONFIGURACIÓN DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN MM; T= TRAZAS

relación directa con el tipo de combustible, pero después de los análisis se asumió que era una consecuencia del tiempo que los combustibles habían permanecido en el subsuelo y de los pigmentos naturales que se liberan por la presencia de los combustibles. De esta forma, los combustibles más frescos corresponden a las muestras de color más claro, mientras que los más antiguos al color más oscuro. Sin embargo, hubo casos en los que se encontraron gasolinas de color oscuro, con un alto contenido de los hidrocarburos más volátiles, seguramente debido a que la baja permeabilidad del suelo evitó su volatilización.

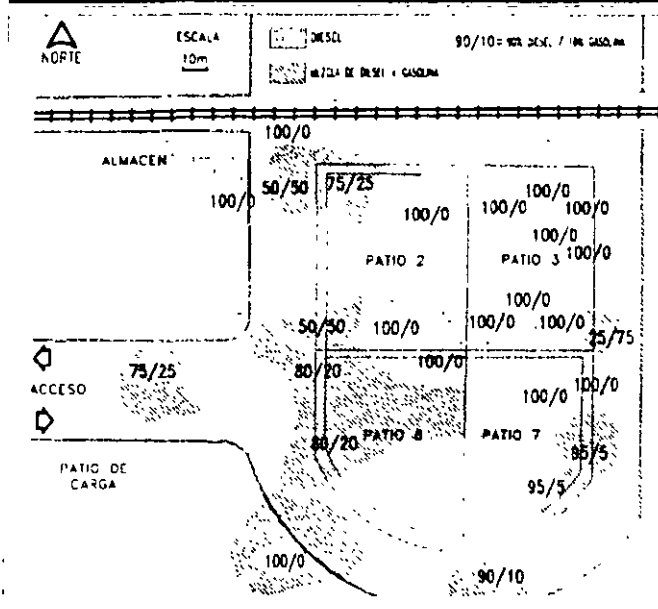
IDENTIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES CONTAMINANTES

Mediante análisis por cromatografía de gases de acuerdo con el método EPA 8015 B (USEPA, 1996), se identificó el tipo de combustibles presentes en el subsuelo, que en su mayoría fue diesel y en otros casos mezclas de diesel con gasolina. Por comparación de los perfiles cromatográficos obtenidos con mezclas de gasolina y diesel, los cuales fueron usados como estándar, se estimó la proporción de los combustibles presentes en las muestras extraídas del subsuelo (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993). Los resultados se pueden observar en la figura 2B.

MOVIMIENTO DE LAS AGUAS FREÁTICAS

Se realizó una nivelación diferencial de la superficie del terreno, a la cual se le restó la profundidad al nivel del agua subterránea; se obtuvo de esta manera la elevación del nivel freático respecto del nivel del mar.

Con los datos que se generaron se construyó la configuración que puede apreciarse en la figura 3, donde se observan valores máximos en el patio 3 a partir de donde se forma una distribución radial, la cual permite inferir la dirección de circulación de las aguas freáticas.

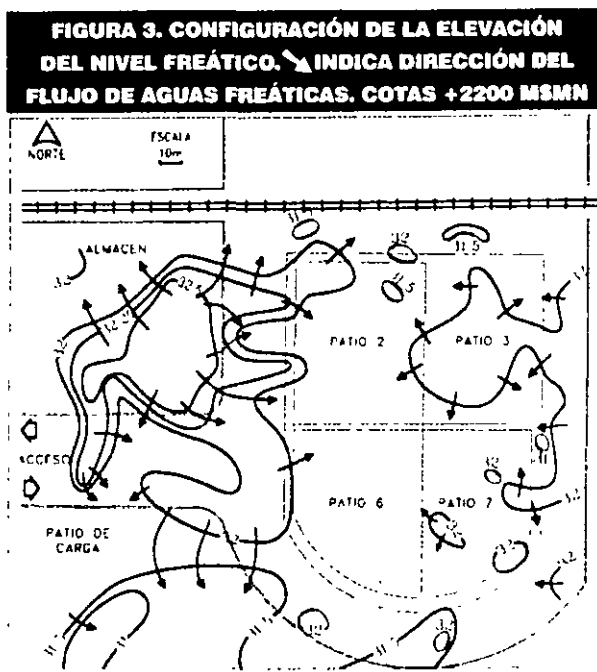
FIGURA 2B. DISTRIBUCIÓN DE GASOLINA Y DIESEL EN EL SUBSUELO

LITOLOGÍA DEL SUBSUELO

Para conocer la litología del subsuelo, se obtuvieron muestras continuas en 43 puntos distribuidos en todo el predio, el muestreo se realizó con cartuchos de acetato de 46.5 centímetros de longitud y 2.5 centímetros de diámetro, lo que permite la obtención de muestras de suelo inalteradas. En cada uno de los sondeos se obtuvieron de tres a cuatro núcleos, con los cuales se interpretó la litología. La profundidad de los pozos varió de 2.50 a 3.30 metros. Con los datos obtenidos se formó la sección geológica que se muestra en la figura 4A, donde se observa en la porción superficial, por debajo de la losa de concreto, una capa de arcilla y arena con espesor de aproximadamente 30 centímetros. A mayor profundidad se encontraron horizontes de materiales predominantemente arcillosos.

En la figura 4B se marcó la profundidad al nivel freático, que presenta ondulaciones que fluctúan alrededor de los 2 metros. En la misma figura 4B se marcó el espesor de producto libre flotando sobre el nivel freático, así como la zona donde fue evidente la presencia de hidrocarburos adsorbidos por las arcillas. Lo anterior demuestra que la heterogeneidad del subsuelo y su baja permeabilidad da como resultado la existencia de zonas de mayor acumulación, las cuales pueden estar muy cercanas a otras donde no existen rastros de contaminación. Un comportamiento similar se observó en un estudio previo realizado en otro sitio con un suelo arcilloso también localizado dentro del valle de México (Saval y Lesser, 1998).

La permeabilidad del subsuelo se determinó mediante pruebas de tipo Lefranc de carga constante, de 0 a 1 metro y de 1 a 2 metros de profundidad. De estas pruebas se obtuvo una permeabilidad del orden de 10^{-10} y 10^{-11} m/seg, lo cual confirmó la existencia de un material arcilloso, donde difícilmente puede circular un fluido. La propiedad que tienen estos materiales de adsorber agua y no cederla también ocurre con los combustibles, de aquí que las arcillas impiden que los contaminantes migren grandes distancias.



DISCUSIÓN

La baja permeabilidad de las arcillas podría considerarse una ventaja, ya que impide que los hidrocarburos en el subsuelo circulen grandes distancias. Sin embargo, esta misma baja permeabilidad es una limitante que ofrece grandes dificultades para la remediación del subsuelo (Suthersan, 1996; Nyer, 1998).

En casos de contaminación como el presentado aquí, el saneamiento debe iniciar con una remediación física enfocada básicamente a la extracción de los combustibles en fase libre mediante pozos someros con caudales reducidos (Dragun,

1989). Posteriormente, se podría continuar con un lavado de suelo conocido como *flushing*, para desorber los hidrocarburos. Éste podría aplicarse de manera simultánea o previa a una biorremediación, para lo cual se podría analizar la capacidad degradadora de las bacterias nativas. Para este último caso será también importante considerar las limitaciones que ofrece un suelo arcilloso, durante el suministro del oxígeno necesario para satisfacer los requerimientos metabólicos de las bacterias encargadas de la degradación de los hidrocarburos (Riser-Roberts, 1992).

Experiencias bien documentadas, pero pocas de ellas publicadas, indican que para sitios de características similares al que se estudió serán necesarios de cinco a 10 años para demostrar evidencias firmes que aseguren el saneamiento del sitio (NGWA, 1998).

CONCLUSIONES

A través de la estrategia de prospección fue posible delimitar la zona de afectación en el subsuelo del sitio de estudio, debido a la presencia de hidrocarburos en fase libre, así como su influencia hacia los alrededores en forma de hidrocarburos volátiles y de explosividad. A pesar de que algunos de los derrames parecen haber ocurrido hace varios años, dicha afectación permanece "confinada" dentro de los límites del predio gracias al reducido movimiento de las aguas freáticas, que es una consecuencia de la baja permeabilidad del material arcilloso.

El principal combustible contaminante en el subsuelo resultó ser diesel, aunque también se encontraron mezclas de diesel con gasolina. Su distribución es una función directa del tipo de producto derramado, aunque también tiene una importante influencia el movimiento vertical del nivel freático que se da entre las temporadas de lluvia y estiaje, así como la litología del subsuelo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial de Pemex Refinación. Los autores agradecen el apoyo de los ingenieros Florentino Montiel y de Roberto Martínez durante la ejecución de los trabajos en campo.

REFERENCIAS

- Baugh, A. L., y J. R. Lovegreen. "Differentiation of Crude Oil and Refined Petroleum Products in Soil", en Calabrese, E. J. y Kostecki, P. T. (eds.) *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*, Lewis Publishers, Boca Raton, 1993.
- Dragun, J. "Recovery Techniques and Treatment Technologies for Petroleum and Petroleum Products in Soil and Groundwater", en *Petroleum Contaminated Soils*, vol. 1, Calabrese, E. J. y Kostecki, P. T. (eds.), Lewis Publishers, Boca Raton, 1989.
- Lesser, J. M. "Prospección de contaminación por hidrocarburos", *Revista del Colegio de Ingenieros Geólogos de México*, vol. 1, núm. 6, 1989, pp. 5-8.
- National Ground Water Association (NGWA). *Proceedings of the 1998 Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water prevention, detection and remediation*, 1998.
- Nyer, E. K. *Groundwater and Soil Remediation: Practical Methods and Strategies*, Ann Harbor Press, USA, 1998.

FIGURA 4A. SECCIÓN MOSTRANDO EL TIPO Y DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES GEOLÓGICOS QUE CONSTITUYEN EL SUBSUELO

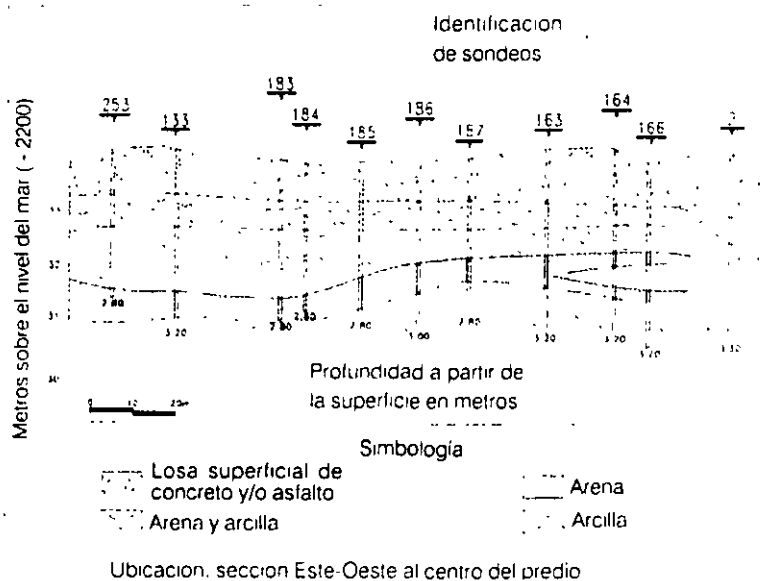


FIGURA 4B. PROFUNDIDAD AL NIVEL FREÁTICO, ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE Y ZONA DE PRESENCIA DE HIDROCARBUROS ADSORBIDOS POR LAS ARCILLAS

Potter, T.L., 'Analysis of Petroleum Contaminated Soil and Water', en Calabrese E.J. y Kostecki P.T. (eds.), *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*, Boca Raton: Lewis Publishers, 1993, pp. 1-14

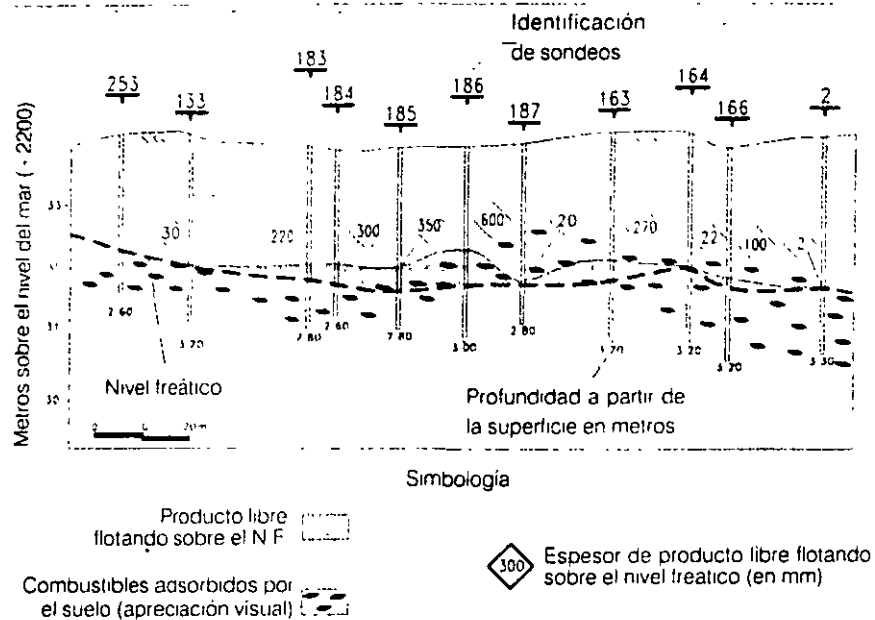
Riser-Roberts, E., *Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites*, Boca Raton: C.K. Smoley, 1992

Saval, S., 'La reparación del daño: Aspectos técnicos: remediación y restauración' en *La responsabilidad jurídica en el daño ambiental*, México: UNAM/Petroleos Mexicanos, 1998, pp. 209-235

Saval, S., y Lesser, J.M., *Behavior of Diesel Contamination in an Unconsolidated Clayey Soil*, Proceedings of 4th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Boston, Mas., 1998

Suthersan, S.S., *Remediation Engineering Design Concepts*, Boca Raton, Lewis Publishers, 1996

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *Method 8015 B: Nonhalogenated organics using GC/FID*, 1996



Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial

SUSANA SAVAL¹, JUAN MANUEL LESSER²

¹Instituto de Ingeniería, UNAM ²Lesser y Asociados, S.A.

RESUMEN

Con la finalidad de identificar el tipo y concentración de los hidrocarburos derramados en el subsuelo de una instalación industrial, se realizaron análisis por cromatografía de gases a muestras de suelo, combustibles en fase libre y aguas freáticas. En la mayoría de las muestras de producto libre se encontró diesel y en algunas más, mezclas de diesel con gasolina. En las muestras de suelo provenientes de diferentes profundidades hasta 10 metros, se encontró acumulación de hidrocarburos contaminantes en varios estratos, que podrían ser el resultado de diferentes eventos de derrame, del tipo de material geológico, o bien, de las fluctuaciones del nivel freático. En algunos puntos la concentración de diesel fue cercana a los 20 mil mg/Kg, mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a mil mg/Kg. También se detectó metilterbutiléter (MTBE) como parámetro indicador de la presencia de gasolinas oxigenadas, así como plomo orgánico, que es un constituyente de gasolinas antiguas. Respecto a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTEX), los xilenos se detectaron con mayor frecuencia, además de los hidrocarburos poliaromáticos cuya presencia se hizo evidente en casi todos los casos. A pesar de que el sitio está muy afectado, el hecho de que el principal combustible contaminante sea diesel y que este se encuentra "confinado" en el acuitardo por debajo de la losa de concreto, reduce los riesgos toxicológicos, geohidrológico y de explosividad bajo las condiciones actuales del sitio.

PALABRAS CLAVE: acuífero, acuitardo, análisis de contaminantes, diesel, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos monoaromáticos volátiles, riesgo.

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones destinadas al almacenamiento y distribución de combustibles destinados están constantemente expuestas a derrames, los cuales pueden suceder accidentalmente o por malas prácticas de operación. La infiltración de los combustibles al subsuelo, así como su distribución en los diferentes estratos y su destino, están función de las condiciones del sitio y de las características propias 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. 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 contaminante en el suelo. Para entender este compor-

tamiento, 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 remedio (Saval, 1998).

En este trabajo se presentan los resultados de análisis y la distribución de hidrocarburos en el subsuelo de un sitio contaminado, se discute su comportamiento en función de las características del subsuelo y se analiza el riesgo de la contaminación con tres enfoques diferentes: toxicológico, geohidrológico y de explosividad.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de

combustibles para abastecimiento de una zona industrial. El terreno ocupa un área de aproximadamente de 6.5 hectáreas, donde se localizan tanques elevados distribuidos en cuatro patios cuya superficie está pavimentada, y aunque no existen evidencias de derrames, en estudios previos se encontró presencia de hidrocarburos en fase libre flotando sobre el nivel freático, que ocasionan lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10 mil ppm (1% v/v) en prácticamente todo el predio. La zona corresponde a una extensa planicie caracterizada por incluir una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Existen horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones, los cuales se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad, a la cual se detectó la presencia de producto en fase libre. Las pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad en los 2 metros superficiales varía entre 10^{-9} y 10^{-10} m/seg., por lo que las arcillas se comportan como un acuitardo que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento (Lesser y Saval, 1999).

POZOS DE MUESTREO

Se perforaron pozos entre 3 y 10 metros de profundidad con ayuda de un rotomartillo que introduce cilindros para muestras, los cuales llevan acoplados cartuchos de acetato de 46.5 cm. de longitud y 2.5 de diámetro, esto permitió la obtención de muestras continuas e inalteradas de suelo para los diferentes análisis. Durante las perforaciones se obtuvieron también

muestras de aguas freáticas y de producto en fase libre. Estas últimas fueron previamente seleccionadas en función de su localización dentro de la zona afectada y su contraste de color, que varió del amarillo al café verdoso muy oscuro.

ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

Las muestras inalteradas de suelo, aguas freáticas y combustibles en fase libre se analizaron mediante métodos específicos para identificar el tipo y concentración de los contaminantes como sigue: gasolina y diesel (USEPA, 1996), hidrocarburos monoaromáticos volátiles y metilterbutiléter (USEPA, 1986a), hidrocarburos poliaromáticos (USEPA, 1986b) y plomo orgánico (USEPA, 1993). Las muestras fueron tomadas en puntos específicos y distantes entre sí, para evaluar la distribución de contaminantes en el subsuelo en el momento del estudio. Todos los análisis se realizaron bajo estrictas normas de control de calidad, por lo que los resultados presentados son confiables. Aquellos casos en los que la concentración se reporta como no detectable (ND) significa que está por debajo del límite de detección, el cual es específico para cada contaminante.

IDENTIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES EN FASE LIBRE

Se obtuvo el perfil cromatográfico típico para gasolina y diesel puros, cada perfil se considera como una "huella digital" que permite identificar la presencia de los combustibles (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993). Se incluyeron también mez-

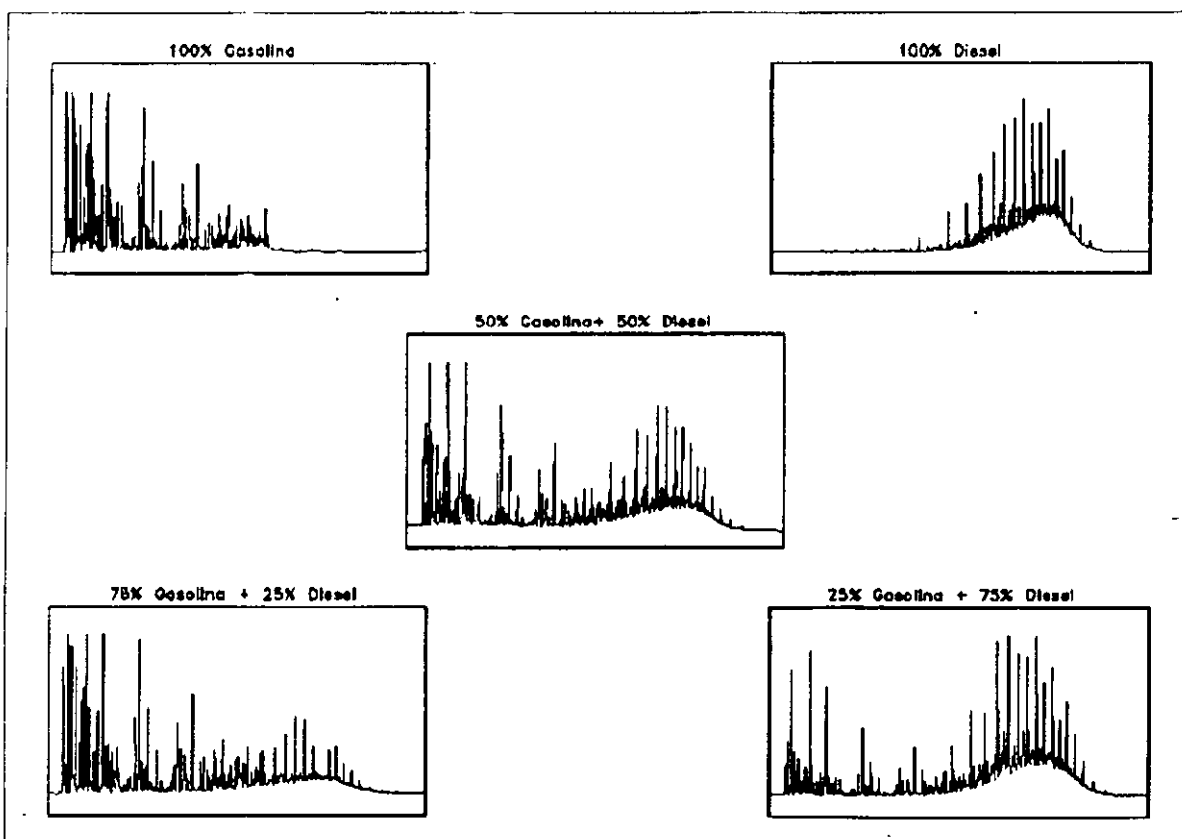


Figura 1. Perfiles cromatográficos de gasolina, diesel y mezclas de estos.

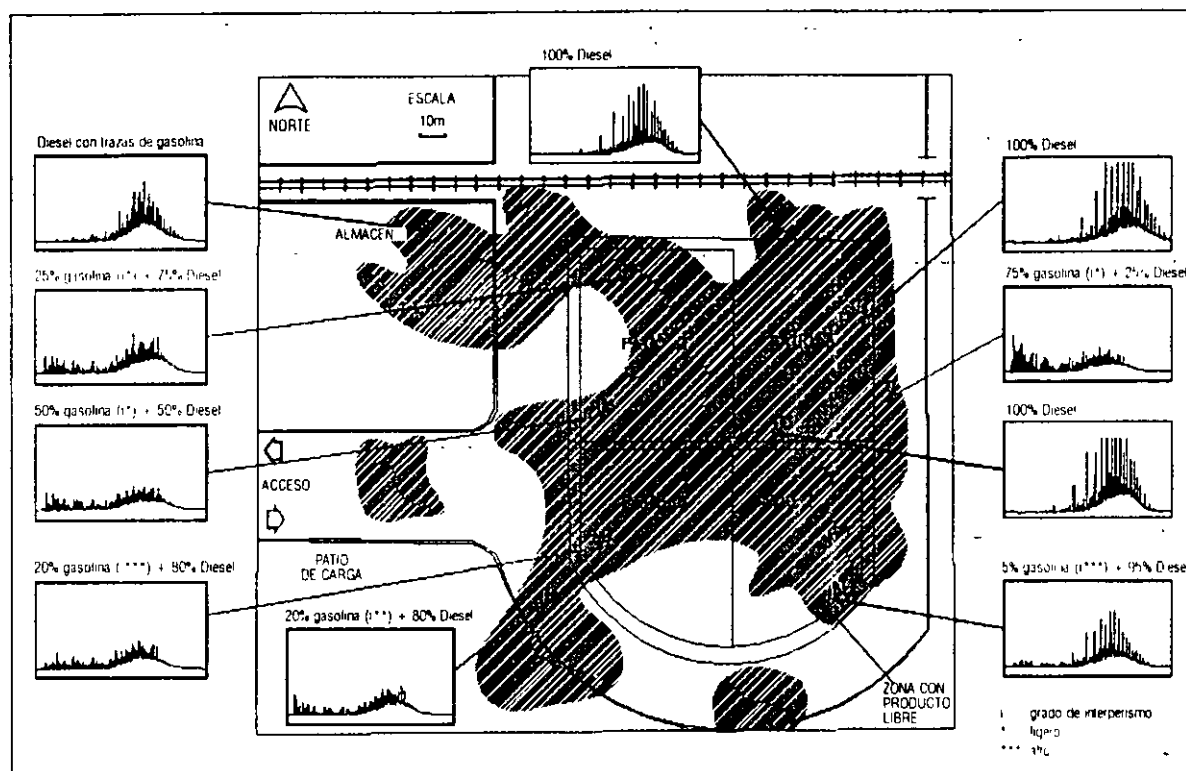


Figura 2. Identificación de combustibles acumulados en el subsuelo

clas de gasolina y diesel en proporciones de 25/75, 50/50 y 75/25, cuyos perfiles sirvieron como referencia para establecer una proporción aproximada de los combustibles en las muestras de producto libre. En la figura 1 se presentan los 5 perfiles de referencia.

El perfil típico de gasolina presenta picos con tiempos de retención del orden de segundos hasta aproximadamente 15 minutos, mientras que el perfil típico de diesel se aprecia entre los 11 y 23 minutos. Los perfiles de las mezclas de gasolina y diesel presentan un gran número de picos que dan continuidad desde el inicio hasta los 23 minutos, pero se puede apreciar claramente la densidad de los picos que corresponden a la gasolina y al diesel. Por tratarse de una gasolina fresca en todos los casos están presentes los hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular, que son los picos que sobresalen a tiempos de retención cortos, la presencia de éstos se detecta a pesar de que la proporción de gasolina en la mezcla sea baja.

En la figura 2 se ilustra la localización de las muestras de producto libre y el perfil cromatográfico correspondiente. En el caso de gasolinas, se estimó el grado de intemperismo o antigüedad (indicado con la letra i) por comparación con los perfiles estándar de la figura 1. La presencia de picos con tiempo de retención corto indicó una gasolina ligeramente intemperizada (i*), mientras que la ausencia de picos indicó alto grado de intemperismo o antigüedad (i***). Si bien esta estimación es imprecisa, sí da una idea del grado de intemperización de la gasolina. Lo ideal hubiera sido complementar éstos con otro tipo de análisis, sin embargo, no se tuvo esa oportunidad al momento de realizar el estudio.

HIDROCARBUROS Y PLOMO ORGÁNICO EN SUELO

Las muestras de suelo fueron seleccionadas por su localización con respecto a la mancha de producto libre. La profundidad analizada se determinó previamente en función de su cercanía al nivel freático. Uno de los sondeos que se localizó fuera de la zona contaminada, se eligió como un punto blanco. Las muestras de los pozos 153 y 187, se analizaron desde la superficie hasta 3 metros de profundidad, con el fin de conocer la distribución de los contaminantes adsorbidos. Las concentraciones fueron expresadas en mg/Kg. Base seca.

En la figura 3 se presentan las concentraciones de gasolina, diesel y plomo orgánico obtenidas en muestras cercanas al nivel freático. Las concentraciones más altas que se encontraron corresponden a diesel, especialmente en el punto 250 con 9579 mg/Kg, en ese punto también se encontró la más alta concentración de plomo orgánico, de 1512 mg/kg. El perfil de diesel obtenido en el pozo 153 indica que la más alta concentración de diesel se alcanzó a los 2 m, mientras que para el pozo 187 fue a 1.40 m. El plomo orgánico mostró una distribución irregular en los dos sondeos.

En la figura 4 se presentan los resultados de análisis de hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTEX) y metilterbutiléter (MTBE). La presencia de benceno, tolueno y etilbenceno (BTE) en su mayoría fue no detectable, con excepción de los puntos 187 y 269 que sí estuvieron presentes aunque en bajas concentraciones. Los xilenos fueron los que se presentaron con mayor frecuencia, la más alta concentración se encontró en el pozo 269 con 25 678 mg/Kg. Estos resultados son típicos cuan-

do el contaminante es diesel. En varios puntos se detectó la presencia de MTBE, un componente típico de las gasolinas oxigenadas que se caracteriza por su alta solubilidad en agua.

La concentración de hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) se presenta en la figura 5. Una mayor variedad de éstos se encontró en el pozo 175, donde incluso se detectó la presencia de benzo(a)antraceno a una concentración de 0.284 mg/Kg. El perfil del pozo 153 indica una mayor acumulación de fenantreno y naftaleno a 1.60 m de profundidad, mientras que para el pozo 187 la acumulación parece estar por debajo del nivel freático a 2.50 m de profundidad.

Por lo que respecta a los muestreos profundos, los resultados que se presentan en la figura 6, indican que los estratos más contaminados se encontraron entre los 6 y 10 m de profundidad, donde las concentraciones de diesel fueron superiores a los 6 mil mg/kg. Conviene mencionar aquí, que en algunos casos las características del subsuelo dificultan la obtención de muestras verdaderamente representativas debido a dos razones principales, la primera es que es necesario cruzar la capa de producto libre, y la segunda que en estratos con mayor contenido de arenas, los hidrocarburos se desorben fácilmente y pareciera que están en fase libre, aunque en el sitio mismo no ocurra así.

HIDROCARBUROS EN AGUAS FREÁTICAS

Las muestras de aguas freáticas se obtuvieron de 3 pozos localizados fuera de la mancha de producto libre, pero muy cerca de los límites de ésta. Los resultados indicaron concentraciones no detectables de BTEX y de MTBE, lo cual confirma que los hidrocarburos prácticamente no se mueven debido a la baja permeabilidad de las arcillas que conforman el subsuelo.

EVALUACIÓN DE RIESGO

Una vez que se obtuvo la distribución de los hidrocarburos se realizó la evaluación de riesgo, con tres enfoques diferentes: toxicológico, geohidrológico y de explosividad.

El riesgo toxicológico determina los posibles efectos adversos a la salud humana que puedan resultar como consecuencia de un derrame de contaminantes. En el estudio se identifican sustancias que por su naturaleza representan algún riesgo a la salud; así también se determinan los diversos mecanismos naturales de transporte por los que pueden migrar. También, es posible definir el grado de peligrosidad de la contaminación, estimar los límites máximos permisibles para sustancias específicas y determinar las acciones correctivas, a fin de disminuir o eliminar los efectos potenciales al ambiente y a la población circundante.

La metodología utilizada en este estudio se fundamentó en los estándares de la USEPA (1989), así como en la metodología establecida por la ASTM (1995) y en las concentraciones de riesgo referidas por la USEPA (1999). Como punto de partida se utilizaron los resultados de análisis presentados anteriormente y junto con la información toxicológica de cada contaminante se identificaron las sustancias de preocupación potencial (SPP). Entre ellas, el benceno que es carcinogénico a humanos por lo que pertenece a la clase A, así como el benzo(a)antraceno que es presumiblemente carcinogénico, con

una categoría B2. El metilterbutiléter (MTBE) no tiene categoría carcinogénica, ya que es un compuesto novedoso que ha sido utilizado únicamente como trazador. El antraceno no presenta movilidad, ni lixiviación, ni evaporación, se puede presumir que se queda estático en el suelo. En los casos donde la concentración de una sustancia se reportó como no detectable (ND), se consideró la mitad del límite de detección en los cálculos.

Para el estudio se establecieron 3 rutas de exposición: ingestión, contacto dérmico e inhalación de vapores por trabajadores y por residentes. A partir de la información generada se estableció que el sitio por sus características presentó un factor general de riesgo de cáncer de 3.17×10^{-3} , es decir, que uno de cada 315 residentes podría ser afectado por cáncer. El índice de riesgo por toxicidad, fue de 12.06, este valor corresponde al número de veces que está por encima de la dosis segura de exposición a los hidrocarburos analizados (ASTM, 1995). Respecto a los límites permisibles, únicamente el metilnaftaleno resultó estar en una concentración más alta que la estimada a partir de los valores de referencia (USEPA, 1999), sin embargo, no es un compuesto carcinogénico.

El límite máximo permisible para gasolina y diesel en suelo, está considerado en los Criterios Interinos de Limpieza establecidos por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Cancino y col., 1998). En suelos de uso industrial, las concentraciones máximas deberán ser: gasolina 500 mg/Kg, diesel 2000 estuvieron por encima de los límites permisibles, mientras que benceno, xilenos y benzo(a)antraceno mg/Kg: benceno 50 mg/Kg, xilenos 100 mg/Kg, y benzo(a)antraceno 8 mg/kg. Con base en esta información, gasolina y diesel por debajo.

Para evaluar el riesgo geohidrológico o vulnerabilidad del

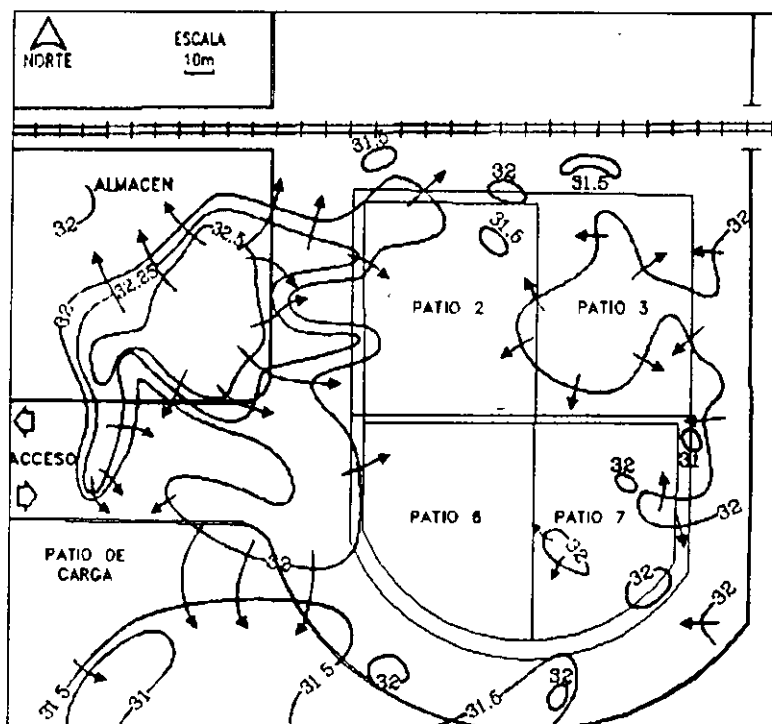


Figura 3. Contaminación de la elevación del nivel freático. → indica dirección del flujo de aguas freáticas, cotas +2200msnm.

Artículo técnico

acuífero profundo, se revisaron las características del subsuelo, como son: la profundidad al nivel estático, la recarga neta, el tipo de roca, el tipo de suelo, la pendiente del terreno, el material de la zona vadosa y su permeabilidad. De acuerdo con el programa DRASTIC, desarrollado por la USEPA, a cada una de las características anteriores se le asigna un número y un peso específico, al final se conjunta la información y se obtiene un valor que sirve como criterio para estimar el riesgo (Herr, 1987).

El sitio referido en este estudio se caracteriza por haber sido

parte de antiguos lagos, consisten en arcillas desarrolladas a partir de tobas y cenizas volcánicas con espesor de 40 m que forman un acuífero, o sea, un material que permite la entrada de agua, pero que la libera muy lentamente. Bajo las arcillas lacustres se encuentran depósitos aluviales con un espesor aproximado de 200 metros, donde se aloja el acuífero de la región. El nivel estático se encuentra a más de 45 m de profundidad, la recarga neta es de 25 mm, prácticamente no hay pendiente y la permeabilidad es muy baja. Lo anterior, permite establecer que el sitio presenta un bajo riesgo geohidrológico.

Para analizar el riesgo de explosividad, se tomaron como referencia las lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10 mil ppm (1% v/v) y de explosividad de 100% LEL (Lower Explosion Limit) obtenidas en un estudio previo (Lesser y Saval, 1999). De acuerdo a la NFPA (1999) el diesel registra los siguientes índices: $NFPA_{Health} = 1$, $NFPA_{Flammability} = 2$ y $NFPA_{Reactivity} = 0$, su temperatura de inflamación es de 52°C a 1 atm de presión y su volatilidad es baja. A partir de esta información se puede establecer que el riesgo de explosividad en el sitio es reducido, si se toma en cuenta que el problema de contaminación se encuentra "confinado" en el nivel freático y aislado del ambiente por una losa de concreto.

CONCLUSIONES

La heterogeneidad en la concentración de contaminantes en el subsuelo, refleja su distribución o acumulación en los diferentes estratos, que podrían corresponder ya sea a diferentes eventos de derrame, a los diferentes tipos de material geológico existente, al resultado del movimiento vertical del nivel freático, o bien, a una combinación de todos estos. Este último aspecto es importante, ya que representa un comportamiento cíclico, esto es, cuando el nivel freático se eleva durante la temporada de lluvias, la mayor parte de los hidrocarburos permanece en fase libre y sube junto con el nivel, mientras que otra parte se queda adsorbida en el suelo; posteriormente, cuando el nivel freático baja en la temporada de estiaje, los hidrocarburos ocupan el espacio liberado por

el agua, permitiendo así su adsorción en el suelo. A diferencia del proceso anterior que es dinámico, la baja permeabilidad de las arcillas ha limitado el movimiento horizontal de los hidrocarburos en fase libre, por lo que éstos aún se encuentran dentro del predio.

El metilterbutiléter (MTBE) que es un parámetro indicador de la presencia de gasolinas oxigenadas, se detectó en la mayoría de las muestras analizadas, mientras que el plomo orgánico que es un constituyente de gasolinas tipo Nova, se detectó en muy pocos puntos. Lo anterior podría sugerir que el mayor volumen de gasolina derramada ha ocurrido dentro de los diez últimos años, a partir de la comercialización de la gasolina Magna. La presencia de xilenos, además de los hidrocarburos poliaromáticos, es consecuencia de

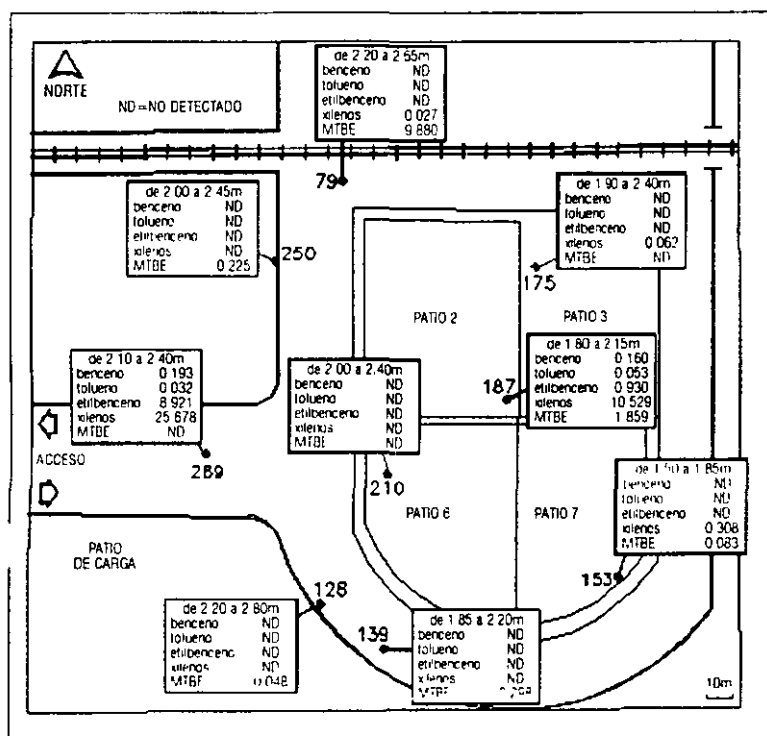


Figura 4. Hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTX) y metilterbutiléter (MTBE) en muestras de suelo mg/kg, base seca

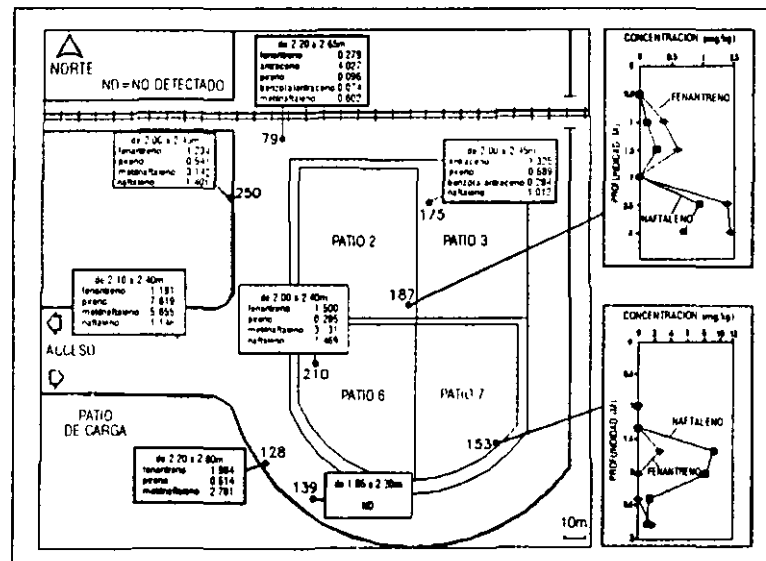


Figura 5. Hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) en muestras de suelo mg/kg, base seca

una mayor presencia de diesel, en proporción a la gasolina.

El principal problema de contaminación se refiere básicamente a la presencia de producto libre que flota sobre el manto freático y debajo de losas de concreto, por lo tanto no está expuesto a los trabajadores y mucho menos a los residentes. Los análisis químicos demostraron que la concentración de volátiles es reducida por lo que la emisión de vapores hacia los alrededores también es mínima.

A pesar de que los análisis toxicológico, geohidrológico y de explosividad obtenidos para este sitio en particular sugieren un bajo riesgo bajo las condiciones actuales, eso no significa que no deban tomarse medidas para remediar el sitio. La presencia de hidrocarburos en fase libre obliga en principio a una remediación física a través de alguna técnica de extracción, ya que de ocurrir una desestabilización del subsuelo por eventos naturales, como fracturas, o bien, por la ejecución de alguna obra civil en los alrededores, se podrían abrir caminos para facilitar la migración del producto libre hacia mayores profundidades. Si los hidrocarburos alcanzan el acuífero, el riesgo geohidrológico aumentará y esto a su vez se traducirá en un riesgo toxicológico, considerando que el agua del acuífero podría utilizarse para consumo humano. □

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial de Pemex Refinación. Los autores agradecen el apoyo de los ingenieros Florentino Montiel y Roberto Martínez durante la ejecución de los trabajos en campo, a Miguel Ángel Juárez y Eleazar Rojas durante los análisis de laboratorio y a Hector Zegarra durante la realización de los estudios de riesgo.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM), 1995. *Standard Guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites*. Designation E 1789.5, 51 pp.
- Baugh A.L. and Lovegreen J.R., 1993. Differentiation of Crude Oil and Refined Petroleum Products in Soil. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 25-47.
- Cancino M.A., Rodríguez J.D. y Muñoz J.M., 1998. Restauración de sitios contaminados, el papel de la autoridad. *Teorema*, septiembre 73-75.
- Herr R.S., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground

water pollution potential using hydrogeologic settings. *Environmental Research Laboratory National Ground Water Association*. Publisher Ada, Oklahoma.

- Lesser J.M. y Saval S., 1999. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Someterá para su publicación a la *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- National Fire Protection Association (NFPA), 1999. *Chemical Hazard Labels*. <http://www.orcbs.msu.edu/chemical/>.
- Potter T.L., 1993. Analysis of Petroleum Contaminated Soil and Water. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 1-14.
- Saval S., 1998. La reparación del daño. Aspectos técnicos. *Remediación y Restauración. La responsabilidad jurídica en el daño ambiental*. UNAM Petróleos Mexicanos, México, pp 209-235.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1986a. *Method 8240, Gas Chromatography / Mass Spectrometry for Volatile Organics*.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1986b. *Method 8100, Polynuclear Aromatic Hydrocarbons*.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund Vol. 1 Human Health Evaluation Manual (Part A)*. US Department of Commerce, Washington.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993. *Method 7240, Flame Atomic Adsorption, Organic Lead*.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1996. *Method 8015, Nonhalogenated Organics using GC/FID*.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1999. *Region III Risk-based Concentrations*, October 22, <http://www.epa.gov/reg3hwm/risk/rbcs.exe>.

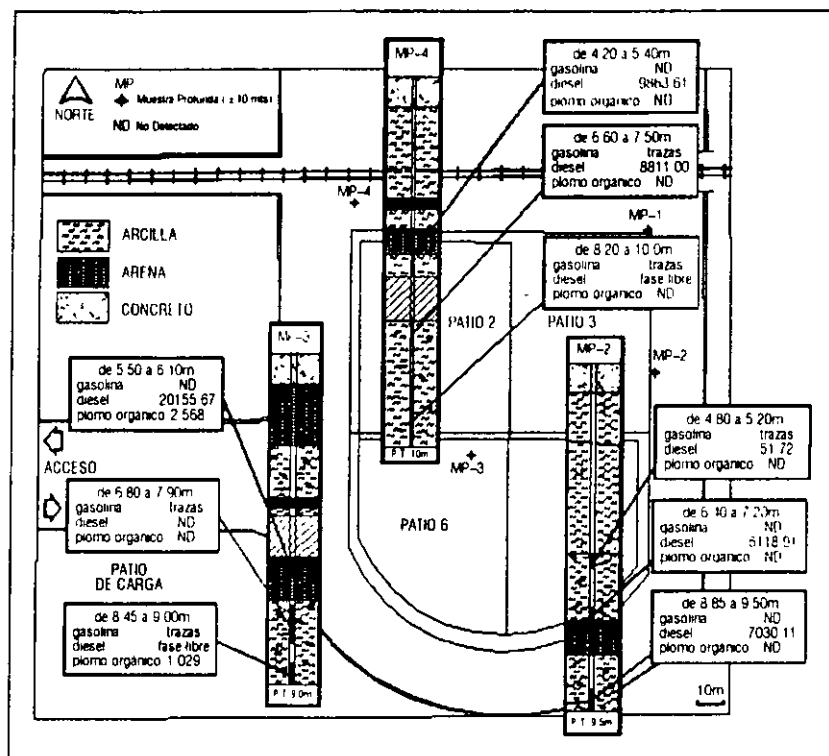


Figura 6. Gasolina, diesel y plomo orgánico en muestras profundas de suelo (mg/kg, base seca)

REMEDIACIÓN *IN SITU* DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EN FASE LÍQUIDA Y ADSORBIDOS

Juan Manuel Lesser. Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
Río Guadalquivir 3 Col. Pathé, Querétaro 76020, Qro. México
lesserjuanm@infosel.net.mx

Susana Saval*. Instituto de Ingeniería, UNAM
Apdo. Postal 70472 Cd. Universitaria 04510, D.F. México
ssb@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

El subsuelo del sitio de estudio, que corresponde a un terreno industrial, está constituido por materiales arcillosos que se encuentran saturados y dan origen a un acuitardo cuyo nivel freático se ubica a alrededor de 2 metros de profundidad. Como producto de derrames accidentales que ocurrieron en el pasado, se acumularon hidrocarburos en fase líquida con un espesor entre 10 y 30 cm. La baja permeabilidad de las arcillas, del orden de 1×10^{-9} m/seg, ha impedido que los hidrocarburos circulen grandes distancias, limitando el área de afectación a una zona relativamente reducida. Los hidrocarburos en su mayoría corresponden a diesel y en otros casos a mezclas de diesel con gasolina. Se inició la **remediación física** que consistió en la extracción del producto libre, del que se recuperaron 13,000 litros en 4 meses. Después de realizar varias pruebas en el laboratorio, se aplicó una **remediación química *in situ***, mediante la inyección de agentes tensoactivos en solución y la extracción del licor de tratamiento, es decir, la mezcla de agua subterránea, hidrocarburos disueltos y agentes tensoactivos. El suelo de la zona tratada mostró una reducción importante en la concentración de diesel y gasolina. Finalmente, el licor de tratamiento se sometió a una **biorremediación** en reactores a nivel piloto en superficie, donde se abatió la concentración de gasolina y la concentración de diesel se redujo de más de 17000 mg/l a menos de 350 mg/l.

Palabras clave. *agentes tensoactivos, desorción, remediación física, remediación química, biorremediación*

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de combustibles para abastecimiento de una zona industrial, cuya superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas, está pavimentada. En estudios previos se encontró presencia de hidrocarburos en fase libre flotando sobre el nivel freático, que ocasionan lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10000 ppm (1% v/v) en prácticamente todo el predio. La zona corresponde a una extensa planicie caracterizada por una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Existen horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones, los cuales se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad, a la cual se detectó la presencia de producto en fase libre en espesores entre 10 y 30 cm de espesor. Las pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad en los 2

m superficiales varía entre 10^{-9} y 10^{-10} m/seg, por lo que las arcillas se comportan como un acuitardo que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento (Lesser y Saval, 1999). De los resultados de análisis se obtuvo la distribución de hidrocarburos en el subsuelo, se encontró que en su mayoría fue diesel en concentraciones tan altas como 20000 mg/kg, mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a 1000 mg/kg. Se detectó la presencia de plomo orgánico y de metilterbutiléter lo cual indicó que se trata de gasolinas antiguas y oxigenadas, algunas de ellas con bajo grado de volatilización por estar confinadas en el subsuelo. Prácticamente no se detectaron benceno, tolueno y etilbenceno, pero si estuvieron presentes los xilenos, así como hidrocarburos poliaromáticos constituyentes típicos del diesel. A pesar de la presencia de producto libre en el subsuelo el riesgo a la salud y el riesgo geohidrológico resultaron ser bajos (Saval y Lesser, 1999).

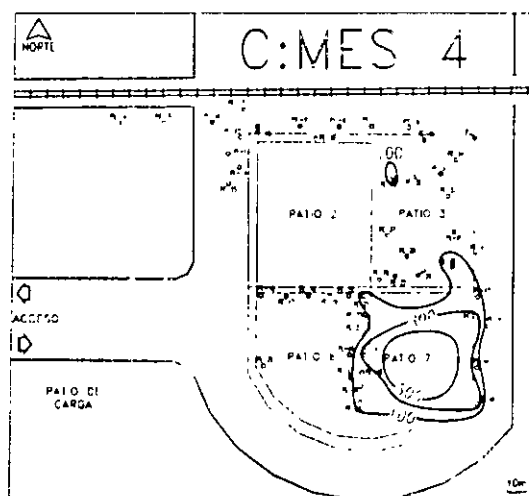
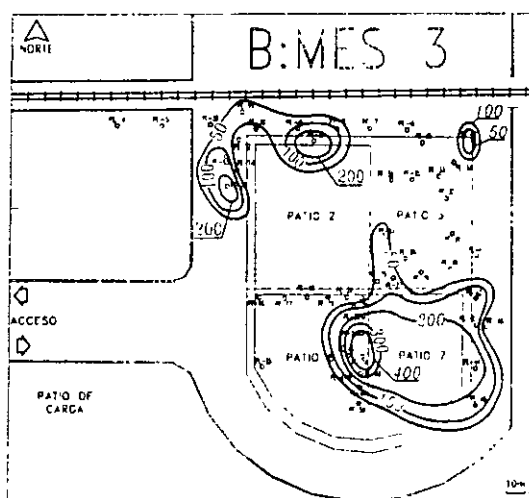
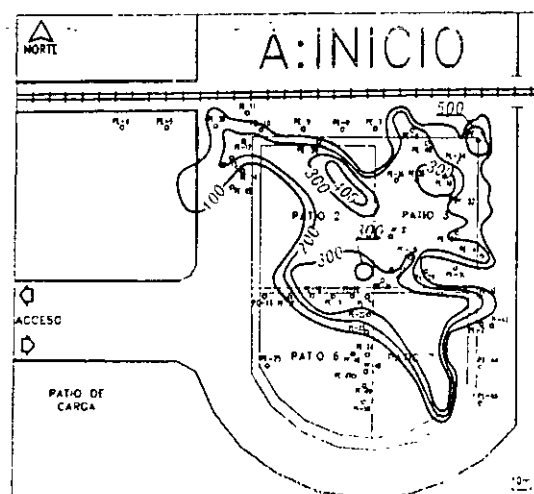


FIGURA 1.-CONFIGURACION Y EVOLUCION DE LA MANCHA DE PRODUCTO LIBRE
PE=POZO DE EXTRACCION

REMEDIACIÓN FÍSICA

La mancha de hidrocarburos en el subsuelo se delimitó mediante 274 perforaciones someras en las cuales se midió el espesor de producto libre durante la caracterización del sitio (Lesser y Saval, 1999). La configuración resultante se presenta en la Fig. 1A, en la que se observan espesores promedio entre 10 y 30 cm hacia la porción central del predio. También se presentaron algunas zonas con espesores de hasta 50 cm.

Para la remediación física se tomó como base la técnica de bombeo - tratamiento - inyección (Mackay and Cherry, 1989; Suthersan, 1997). Los componentes del sistema de remediación incluyeron: pozos de extracción, bomba, caja separadora y pozos de inyección. La bomba y la caja separadora se colocaron en un módulo metálico, que tiene ruedas giratorias para facilitar su movimiento aún en zonas de difícil acceso (figura 2).

Se perforaron 50 pozos de extracción con diámetro de 8.9 cm y 4 m de profundidad. En su interior se colocó tubería de PVC hidráulico de 6.35 cm de diámetro, liso de 0 a 1.80 m y con ranurado de 1.80 a 4.00 m. En la boca de los pozos se colocó un tapón de rosca y brocal de concreto. Se calculó el radio de influencia del bombeo en los pozos, considerando una transmisibilidad media de $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.05, con ello se obtuvo un radio de 4 metros. Los pozos de extracción se localizaron en puntos donde se permitió el acceso tratando de mantener la equidistancia entre pozos en no más de 8 metros. También se tomó en cuenta la dirección del flujo de las aguas freáticas que previamente se determinó (Lesser y Saval, 1999).

Una bomba a prueba de explosión para la extracción de producto libre, se conectó a una tubería plástica de 2.54 cm de diámetro con 5 derivaciones de 0.64 cm de diámetro interior, con lo cual se realizó el bombeo simultáneo de 5 pozos. Al reducir el caudal se evitó el agotamiento de los pozos y se logró extraer preferentemente el producto líquido localizado en la parte superficial. La mezcla agua / combustible extraída del subsuelo se envió a una caja separadora, diseñada y construida *ad hoc* donde, después de un tiempo de reposo, se permitió la separación de fases por la diferencia de densidades con lo cual se recuperaron agua y combustibles por salidas independientes. El

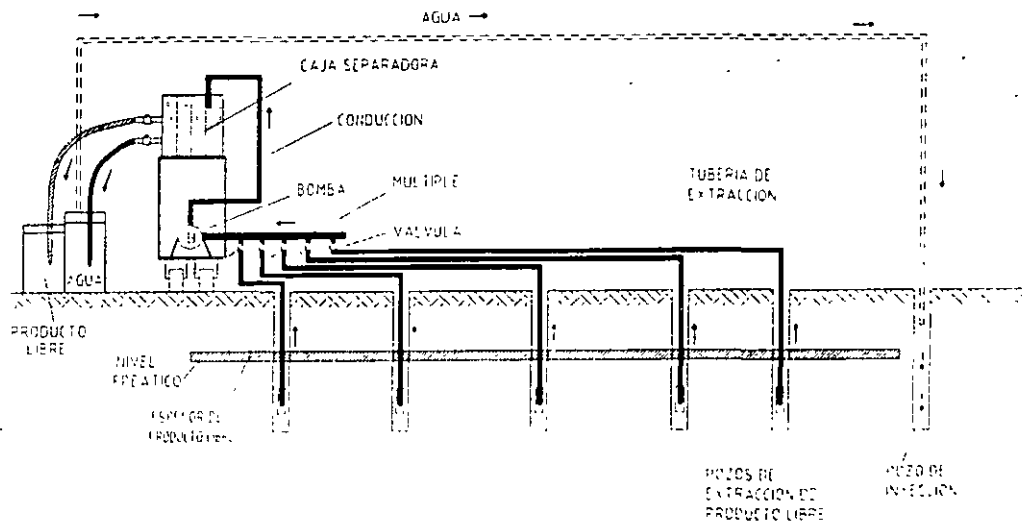


FIGURA 2.-SISTEMA DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE

agua libre de combustibles se devolvió al subsuelo inyectándola por gravedad en pozos localizados topográficamente más arriba.

Durante los trabajos de extracción se notó una mayor acumulación de producto libre hacia el patio 6, donde se localizaron un importante número de pozos, esto se tradujo en un mayor volumen de extracción en esa zona. La acumulación de producto se vió favorecida por el movimiento natural de las aguas freáticas que se dió en esa dirección. Después de 3 meses de extracción constante, la mancha de producto libre se redujo de manera importante, de tal forma que en el patio 3 prácticamente desapareció y solo se detectaban trazas, como se presenta en la figura 1B. En los patios 2 y 7, no fue posible perforar pozos de extracción debido a las actividades que ahí se realizaban, por lo que el patio 7 se convirtió en el centro de la mancha de producto libre. Esto último se confirmó en la configuración obtenida a los 4 meses (figura 1C)

El espesor de producto libre mostró una notable disminución, como ejemplo se presentan los valores obtenidos para los pozos PE-27 y PE-50. Cabe hacer notar que para estas mediciones

los pozos se dejaron reposar 3 días, con el fin de asegurar la confiabilidad de las lecturas.

Los dos primeros meses de operación fueron realmente de prueba y perforación de nuevos pozos de extracción en el patio 6, por lo que el volumen de producto libre extraído fue bajo. Entre los meses 3 y 4 la extracción aumentó notablemente. El volumen total de agua subterránea extraída, libre de combustible, fue de 332000 litros, los cuales se inyectaron al subsuelo por gravedad. En la figura 4A se presentan las cifras diarias de agua y producto libre que se extrajeron del subsuelo, aquí se puede apreciar que el ritmo de extracción se mantuvo prácticamente constante. Este comportamiento se reflejó también en la figura 4B, donde se graficaron los volúmenes acumulados y se observa una tendencia al aumento. En las dos gráficas se utilizó una escala logarítmica para facilitar la presentación de los resultados. La elevación del nivel freático, que fue también monitoreada periódicamente, mostró fluctuaciones de hasta 50 cm entre la época de lluvias y de estiaje (fig 5). Esta situación es importante, ya que al bajar el nivel, los espacios porosos son ocupados por el producto libre y al subir nuevamente el nivel una

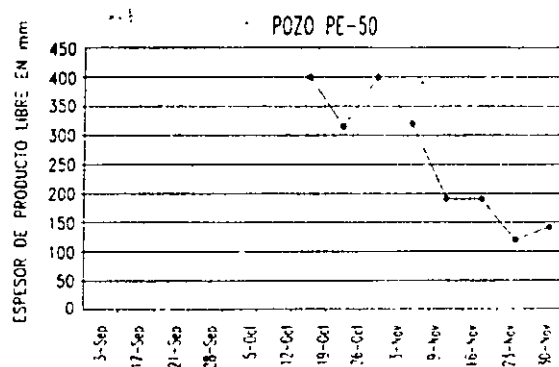
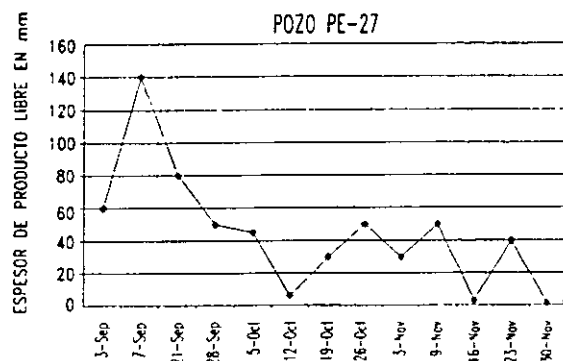


FIGURA 3.-EVOLUCION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN POZOS DE EXTRACCION

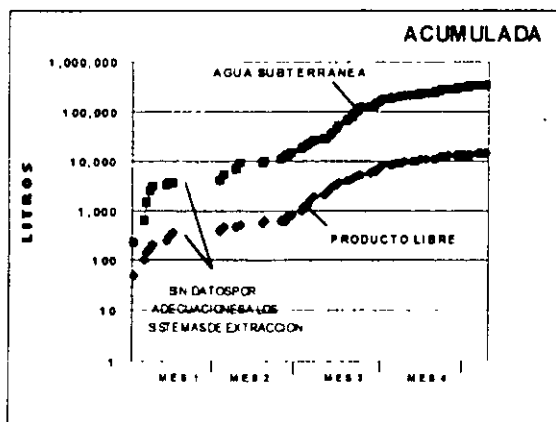
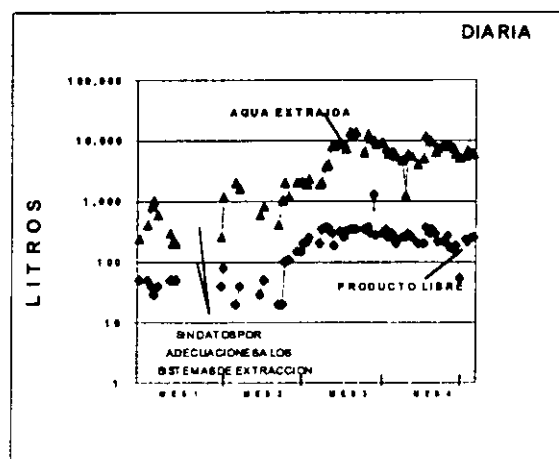


FIGURA 4.- VOLUMEN DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE Y AGUA SUBTERRANEA

parte del combustible queda adsorbido por la estructura del suelo y otra queda libre flotando sobre el nivel.

REMEDIACIÓN QUÍMICA IN SITU

La remediación química que se aplicó fue un lavado con agentes tensoactivos, que comúnmente se conoce como "flushing". Consiste en desorber los hidrocarburos que están adheridos al material geológico y combinarlos con en el agua para facilitar su extracción (Abdul *et al.*, 1990; Fortin and Anderson, 1997; Liu *et al.*, 1991; Wilson and Wyatt, 1989).

Previamente se realizaron pruebas de tratabilidad química en el laboratorio utilizando columnas de vidrio de 3 cm de diámetro y 40 cm de longitud, empacadas con suelo contaminado extraído del lugar. Las pruebas consistieron en aplicar 4 diferentes formulaciones de agentes tensoactivos, las cuales se eligieron de acuerdo a su facilidad de disolución en grandes volúmenes de agua, su biodegradabilidad, su disponibilidad en el mercado, su seguridad en el manejo y su costo. La efectividad del tratamiento en las columnas se pudo observar a simple vista, ya que la solución de tensoactivos al 5% en agua que generalmente fue incolora, cambió a un color oscuro a la salida de la columna. Esto se interpretó como una desorción de los hidrocarburos, mientras el agente tensoactivo fluye a través del suelo contaminado. Este fluido de color oscuro, que se denominó licor de tratamiento, es una sola fase que toma la coloración de los combustibles presentes. La efectividad de cada formulación se verificó al cuantificar la concentración de hidrocarburos en

el licor de tratamiento. El producto que dió los mejores resultados en columnas se utilizó para la prueba de demostración en campo.

Esta técnica de remediación química es efectiva únicamente si se mantiene una constante dinámica en el subsuelo, la cual se logró a través de la extracción e inyección de acuerdo al sentido del flujo subterráneo, con ello se promovió la movilización de los hidrocarburos que están adsorbidos en el material geológico.

Durante la remediación química se inyectaron agentes tensoactivos en pozos localizados en el patio 3, en los que ya no se detectó la presencia de producto en fase libre. Cada volumen de aplicación fue de 500 litros, se dejó fluir por gravedad y enseguida se inyectaron por lo menos 3000 litros de agua proveniente del sistema de separación, antes de una nueva inyección de tensoactivos. Se dió seguimiento al movimiento de los tensoactivos en el subsuelo, los cuales incluso sirvieron como trazadores por el color y apariencia del licor de tratamiento.

Después de un mes de haber aplicado los agentes tensoactivos se realizó un muestreo

continuo en el punto identificado como 356, el cual se localizó dentro del patio 3 muy cerca del pozo donde se inyectaron tensoactivos y en dirección a donde corre el agua subterránea (figura 6). Los resultados se presentan en forma de perfil en la misma figura, el cual se comparó con el del sondeo 187, localizado dentro del patio 2 que meses atrás se localizaba dentro de la mancha central de producto libre y contenía diesel en concentración superior a 12000 mg/kg. Como consecuencia de las acciones de remediación, la concentración de diesel se redujo a menos de 3000 mg/kg.

BIORREMEDIACIÓN

El licor de tratamiento fue sometido a pruebas piloto de biorremediación, utilizando cultivos de bacterias degradadoras de diesel y gasolina que se desarrollaron en el laboratorio. La biorremediación consistió en promover la actividad de las bacterias degradadoras por adición de sales minerales en forma de fertilizantes y suministro de oxígeno. Se llevó un registro del pH como una medida indirecta de la actividad microbiana y al final de cada lote que

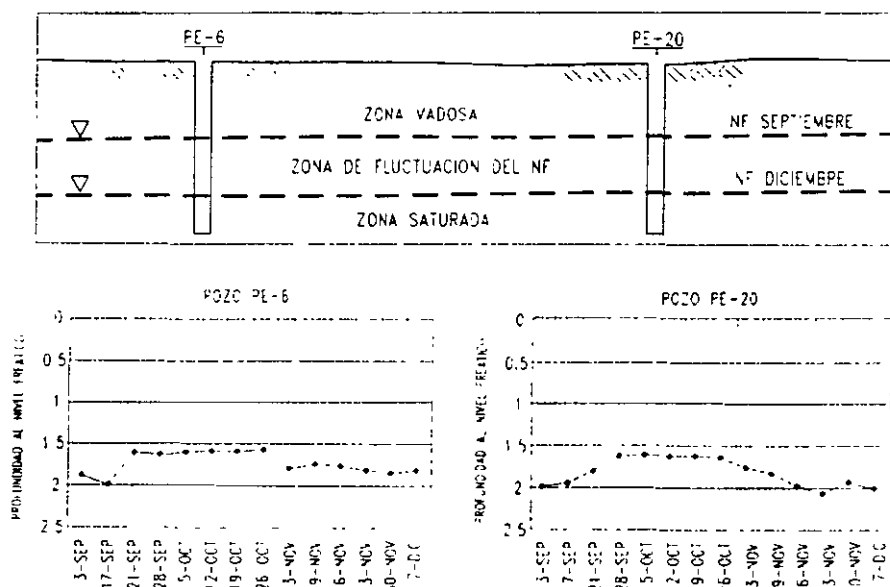


FIGURA 5.-VARIACION DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL FREATICO (NF) EN POZOS DE EXTRACCION

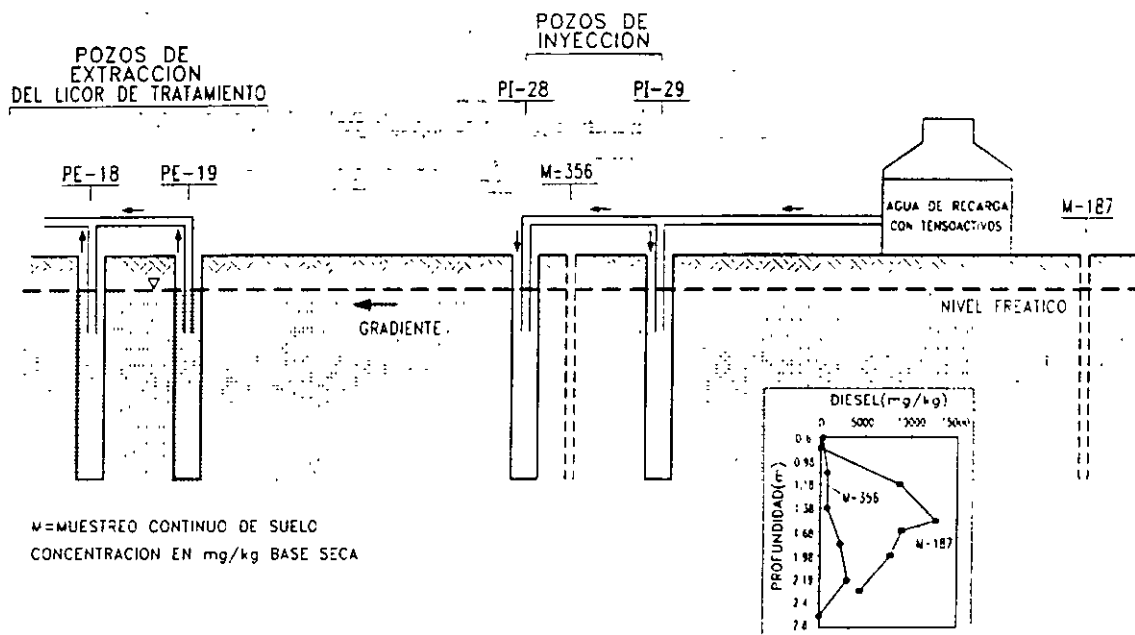


FIGURA 6.-REMEDIACION QUIMICA IN-SITU: DESORCION DE HIDROCARBUROS CON AGENTES TENSOACTIVOS

duró en promedio 8 días se cuantificó la concentración de combustibles residuales y se confirmó la presencia de bacterias degradadoras. En todas las pruebas se redujo notablemente el contenido de combustibles de 20000 mg/l a menos de 300 mg/l para diesel y el contenido de gasolina fue no detectable. Sin embargo, se hicieron evidentes el largo tiempo requerido para reducir la concentración de combustibles por esta vía, así como los altos requerimientos de oxígeno.

Los resultados de las pruebas son una evidencia de que la biorremediación del agua subterránea puede realizarse con éxito, siempre y cuando esté acoplada a la remediación química con agentes tensioactivos y a la extracción/inyección de agua subterránea.

DISCUSION

La remediación de suelos contaminados es un tema de actualidad a nivel mundial, pero pocos estudios de casos específicos en México han sido publicados. Lo presentado aquí constituye una experiencia en campo donde se acoplaron tres técnicas de remediación cuya base de funcionamiento es diferente, que visto de otra forma constituyen un tren de tratamiento en el siguiente orden: una remediación física, seguida

de una remediación química y finalmente una biorremediación.

De hecho, la remediación de suelos debe enfocarse de esa manera, dado que una sola técnica no es suficiente para remover los contaminantes de un suelo afectado.

El aspecto más importante del estudio realizado, es que se trata de un suelo arcilloso, cuya característica impermeable hace más difícil la aplicación de cualquier técnica de remediación. Por ejemplo, en la etapa inicial de extracción del producto libre, se probaron diferentes estrategias de bombeo, que no funcionaron adecuadamente debido a que el propio suelo impone un caudal de extracción bajo. Esto último se traduce en tiempos muy largos y costos muy elevados para la remediación, que se deben reducir. En el caso específico de este estudio se decidió perforar un importante número de pozos cuyo radio de influencia pudiera cubrir el área de mayor afectación, además de atender la extracción de manera simultánea en cinco pozos diferentes con cada unidad de bombeo y la inyección de agua libre de hidrocarburos en pozos aguas arriba. Con estas tres acciones se aumentó el volumen de extracción y se logró mantener a un ritmo constante.

Por lo que respecta a la remediación química, su aplicación en las zonas donde se abatió el producto en fase libre, logró desorber los hidrocarburos que se habían quedado en el material geológico. Aunque los resultados fueron evidentes a simple vista, los análisis realizados a muestras de suelo a 3 m de profundidad, comprobaron la eficiencia del tratamiento. Dos elementos fueron importantes en este caso, la elección de los agentes tensoactivos a partir de las pruebas de tratabilidad en el laboratorio y la constante inyección de agua al subsuelo después de cada aplicación. Aquí conviene mencionar, que el hecho de devolver al subsuelo el agua extraída con la finalidad de acelerar el flujo subterráneo trae una ventaja adicional, ya que si se dejara en superficie sería necesario darle algún tratamiento antes de su disposición final.

En lo que toca a la biorremediación del agua subterránea, técnicamente funcionó bastante bien, ya que se redujo de manera importante la concentración de combustibles. Sin embargo, los altos requerimientos de oxígeno hacen muy costoso el tratamiento, por lo que todavía se requiere de más trabajo para facilitar su aplicación en mayor escala.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una estrategia adecuada para la extracción de hidrocarburos en fase libre acumulados en el subsuelo de tipo arcilloso, con lo cual se avanzó de manera importante en la remediación física.

Se demostró la efectividad de la remediación química *in-situ* mediante la inyección al subsuelo de agentes tensoactivos disueltos en agua, los cuales lograron remover los hidrocarburos adsorbidos al material geológico.

La biorremediación en superficie del agua subterránea fue una técnica efectiva para la degradación de los combustibles presentes, sin embargo, aún no representa una alternativa económica para su aplicación en escala real.

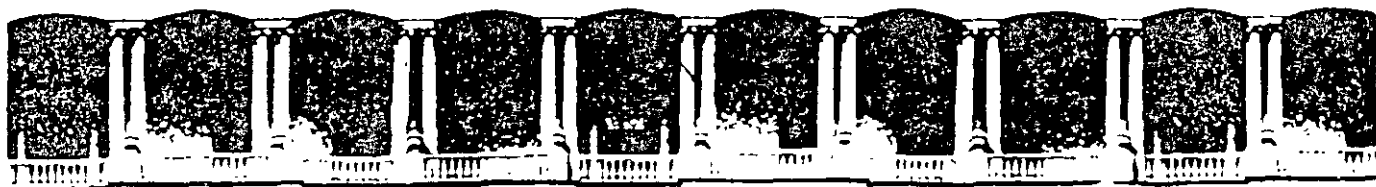
AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Salud Ocupacional de Pemex Refinación. Los autores agradecen la participación de Florentino Montiel, Roberto Martínez, Francisco Ordoñez, Héctor Zegarra,

Norma Pérez y Alma Guzmán durante la ejecución de los trabajos en campo y en el laboratorio.

REFERENCIAS

- Abdul A.S., Gibson T.L., and Rai D.N., 1990. Selection of surfactants for the removal of petroleum products from shallow sandy aquifers. *Ground Water* 28: 920-926.
- Fortin W.A. and Anderson M.A., 1997. Enhanced removal of trapped non-aqueous phase liquids from saturated soil using surfactant solutions. *J. Contam. Hydrol.* 24: 247-268.
- Lesser J.M. y Saval S., 1999. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Sometido para su publicación a la *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Liu Z., Laha S. and Luthy R.G., 1991. Surfactant solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in soil - water suspensions. *Wat. Sci. Tech.* 23: 475-485.
- Mackay D.M. and Cherry J.A., 1989. Groundwater contamination: pump - and - treat remediation. *Environ. Sci. Technol.* 23(6): 630-636.
- Saval S., 1998. Biorremediación: alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10 No. 34, enero-febrero: 6-9.
- Saval S. y Lesser J.M., 1999. Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial. Sometido para su publicación a *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Revista de la Federación Mexicana de Ingeniería y Ciencias Ambientales, A.C.
- Suthersan S.S., 1997. Remediation Engineering Design Concepts. Ed. CRC Lewis Publishers. Boca Raton.
- Wilson D.J. and Wyatt J.H., 1989. Soil clean-up by *in situ* surfactant flushing. Theory of micellar solubilization separation. *Sci. Technol.* 24: 905.



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS, AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

- Restauracion de sitios contaminados, agua subterranea y superficial

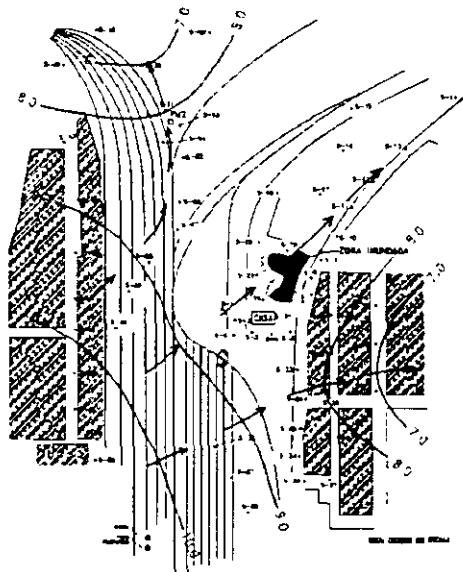
Remediación física

Remediación química

Biodegradación



LESSER, 2001



**Dirección de flujo
del agua
subterránea**

**LESSER, 2001**

REMEDIACIÓN DE SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA POR HIDROCARBUROS

REMEDIACIÓN FÍSICA	EXTRACCIÓN POR BOMBEO DE PRODUCTO LIBRE
REMEDIACIÓN QUÍMICA	INYECCIÓN DE AGENTES TENSOACTIVOS Y EXTRACCIÓN DE AGUA, HC DISUELTOS Y TENSOACTIVOS
BIORREMEDIACIÓN	ELIMINACIÓN DE HIDROCARBUROS MEDIANTE MICROORGANISMOS


■ Remediation Fisica



Extracción manual de producto libre

 LESSER, 2001

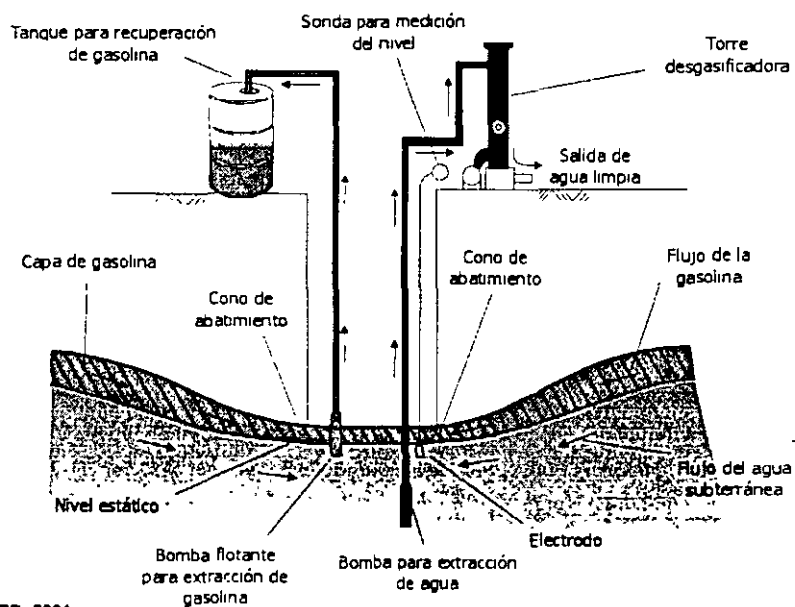


 LESSER, 2001

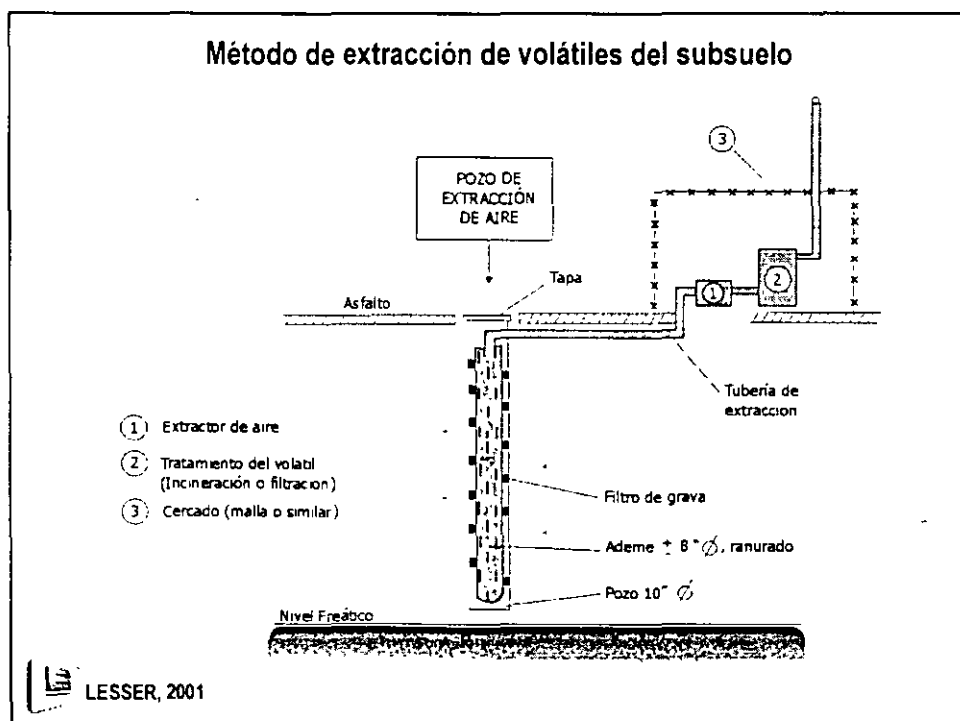
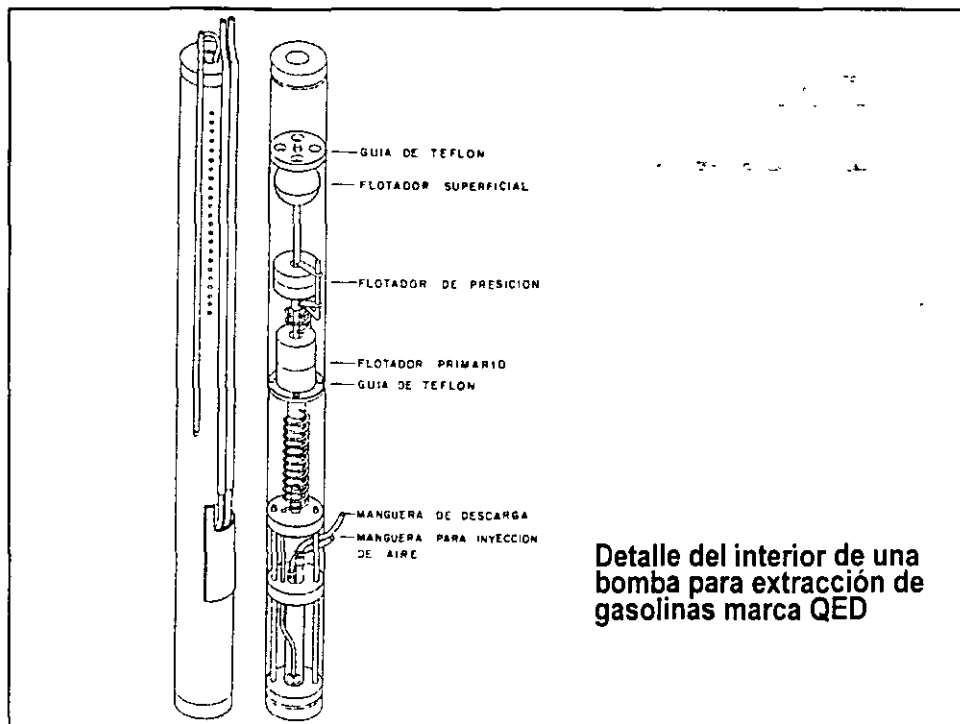


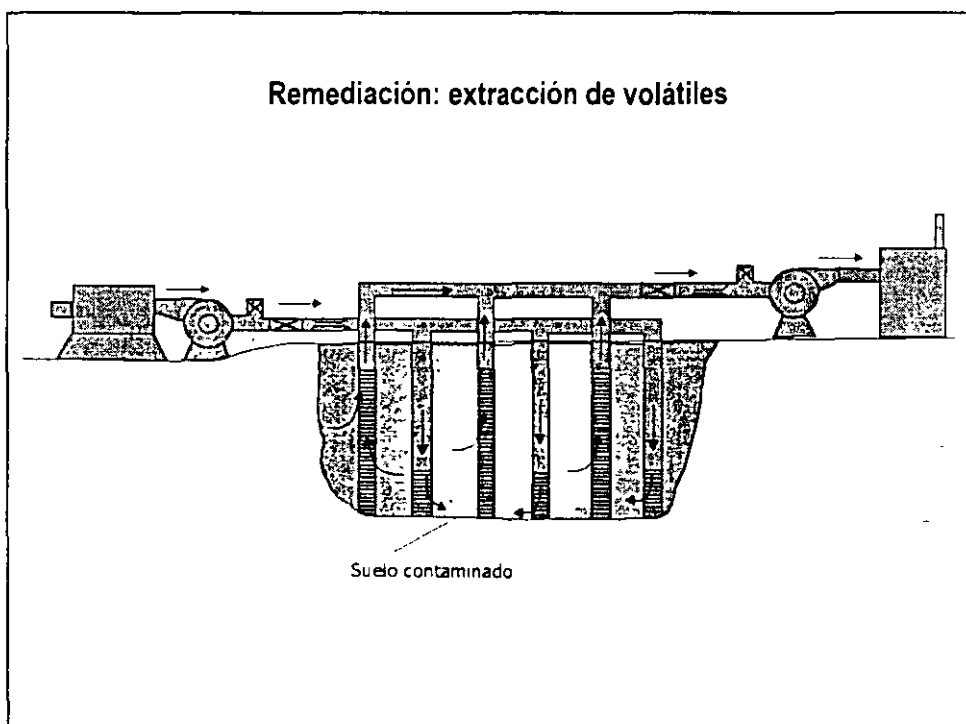
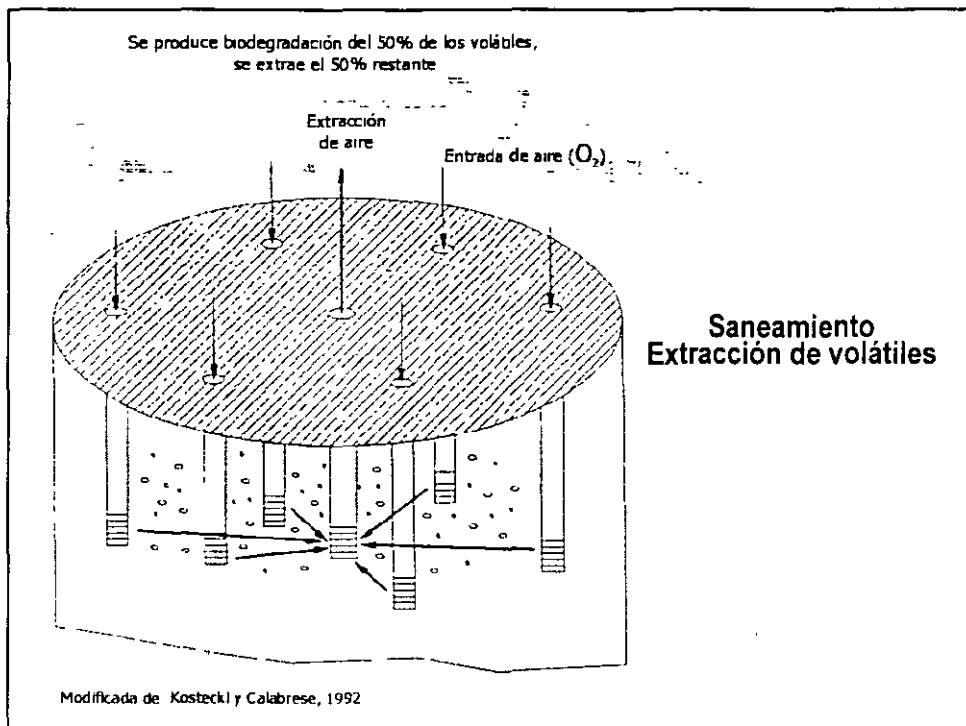
 LESSER, 2001

Extracción de hidrocarburos por bombeo y tratamiento en superficie

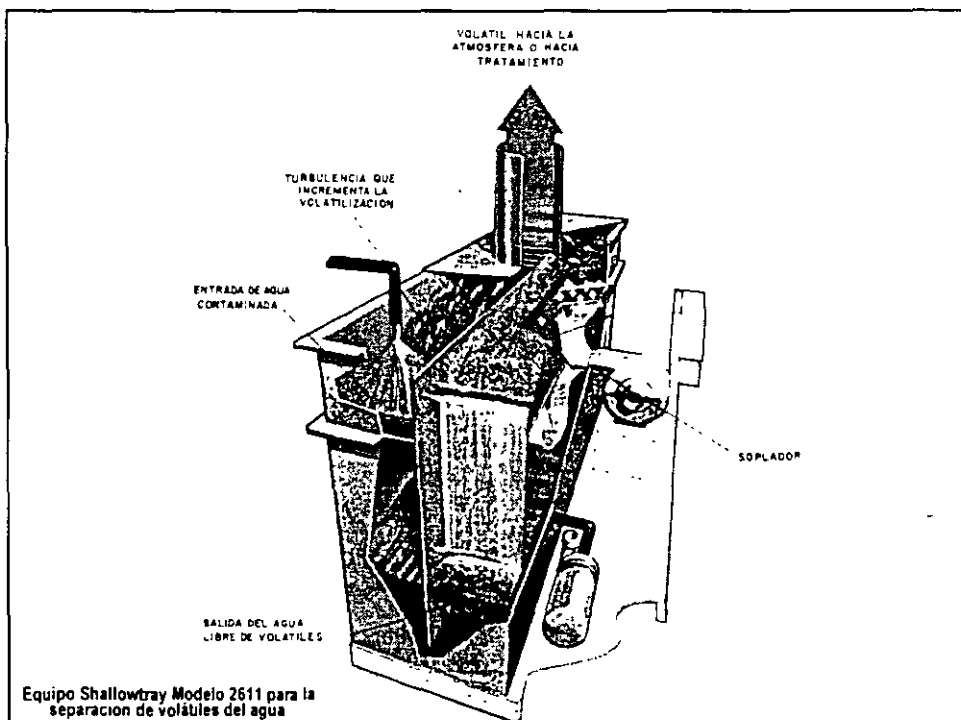
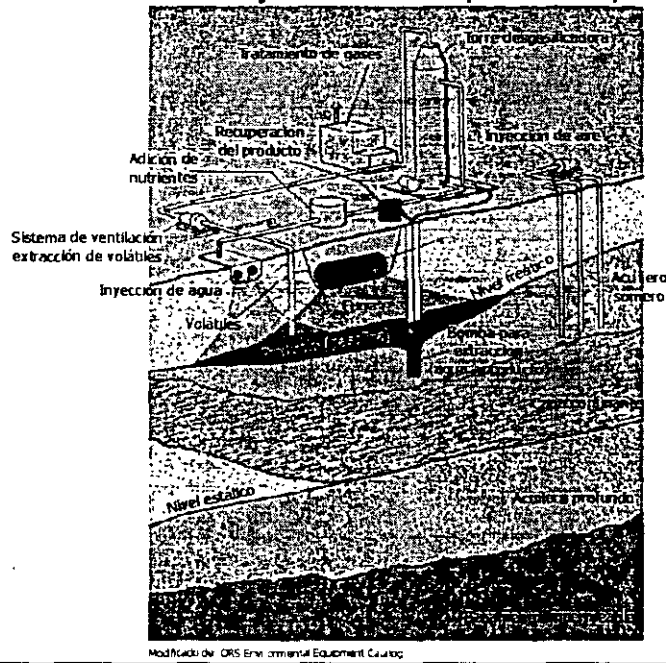


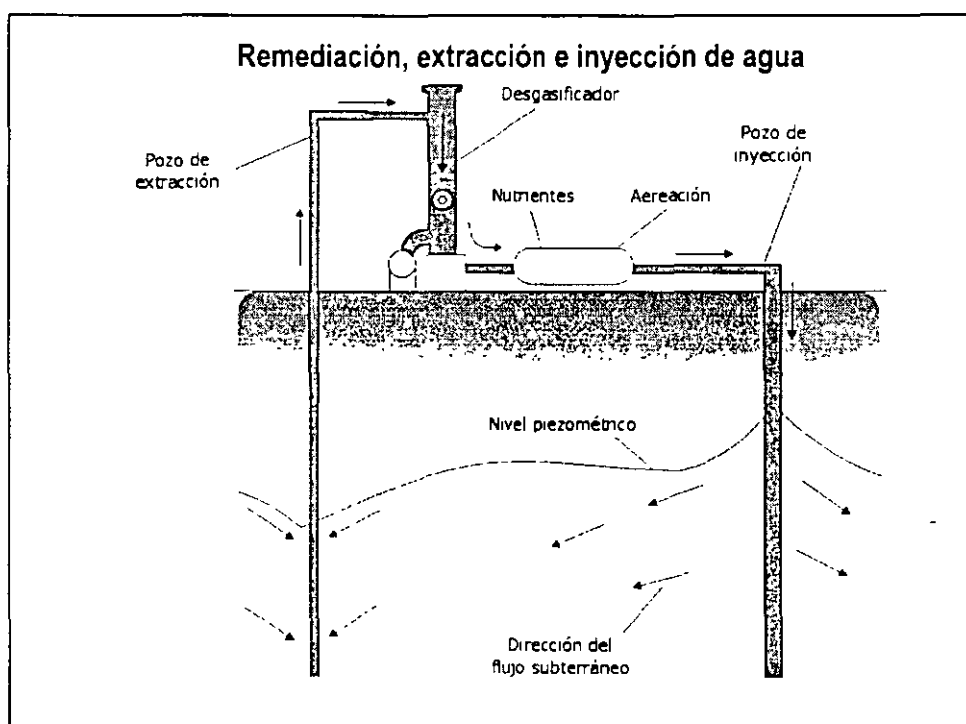
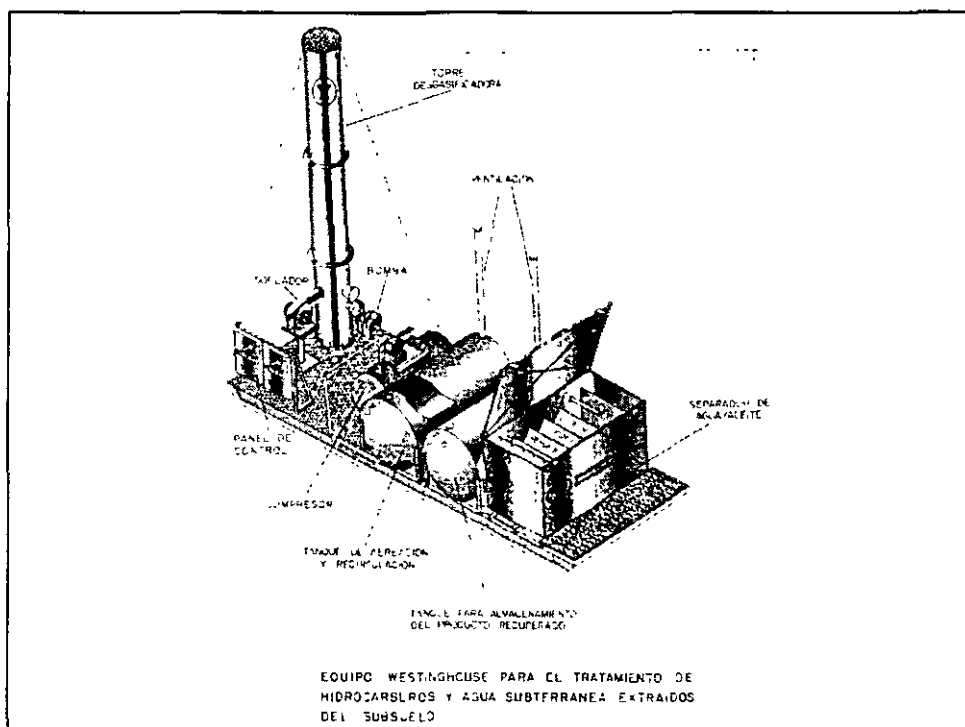
 LESSER, 2001



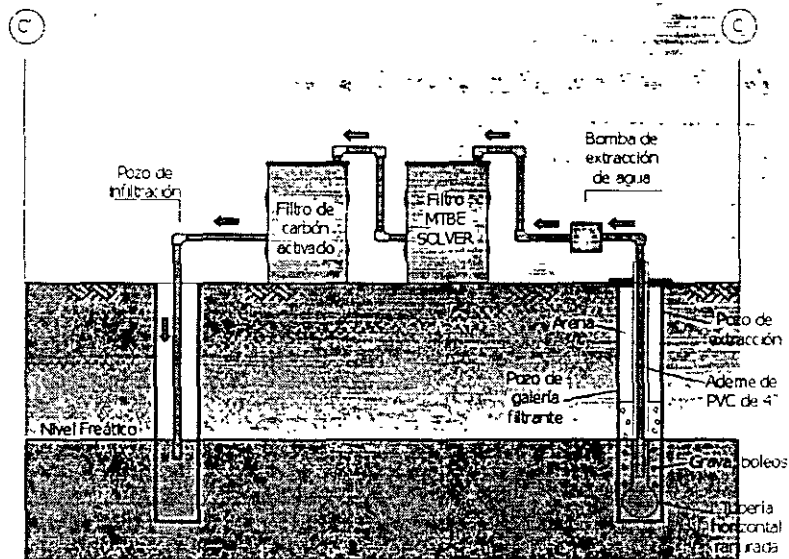


Remediación: Extracción y tratamiento de producto líquido y volátiles



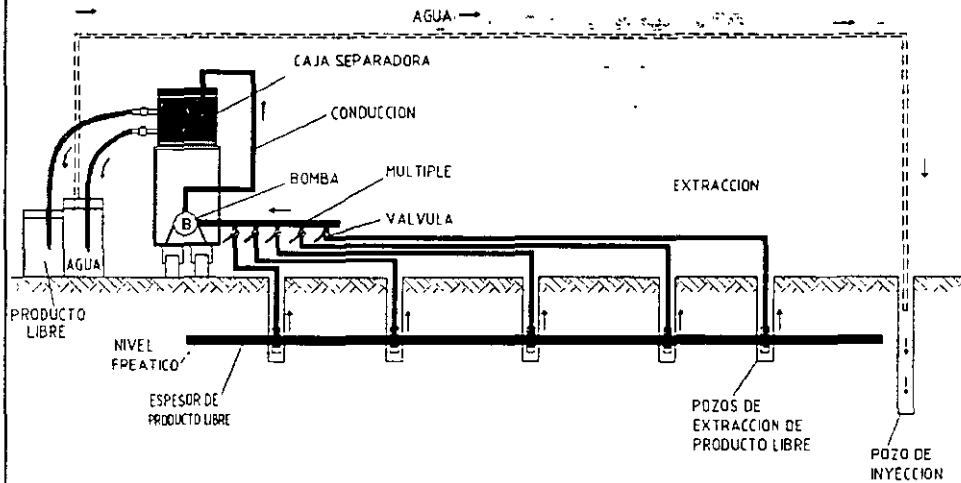


Eliminación de MTBE en el agua



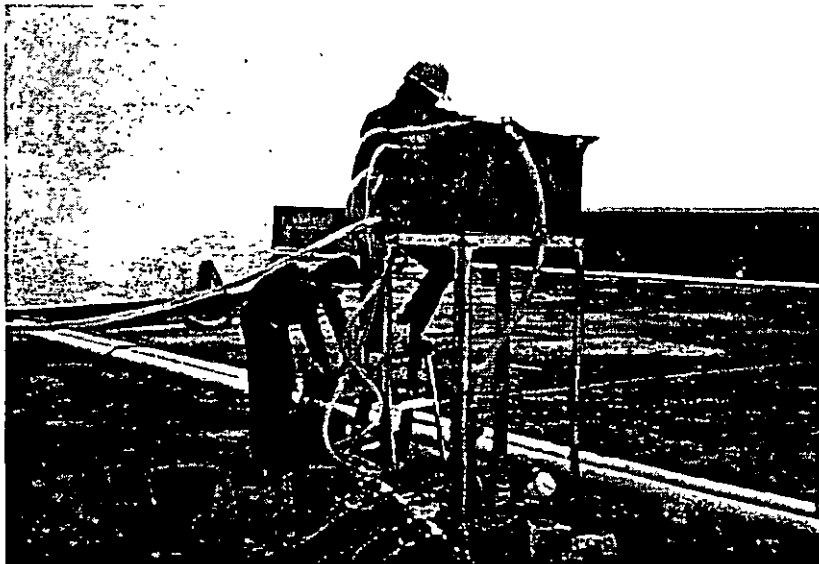
■ Ejemplo de una remediación física

Sistema de extracción de producto libre

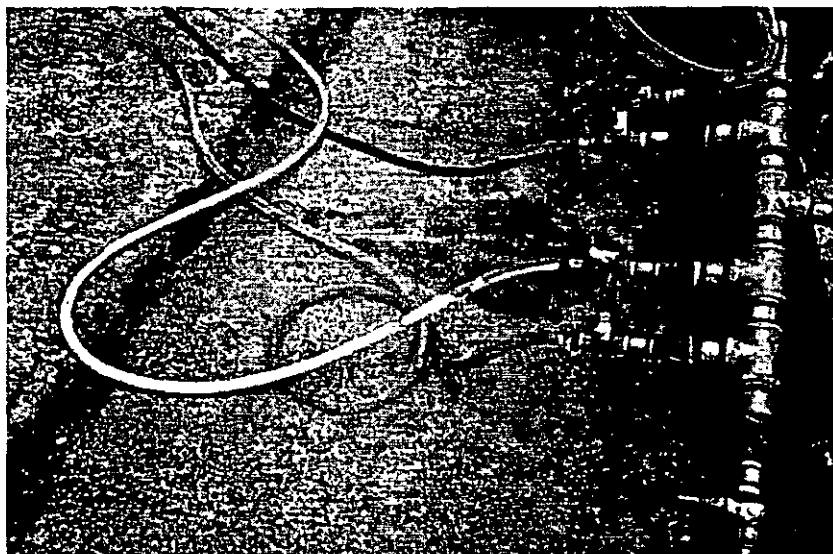


LESSER, 2001

Operación del sistema de extracción de producto libre

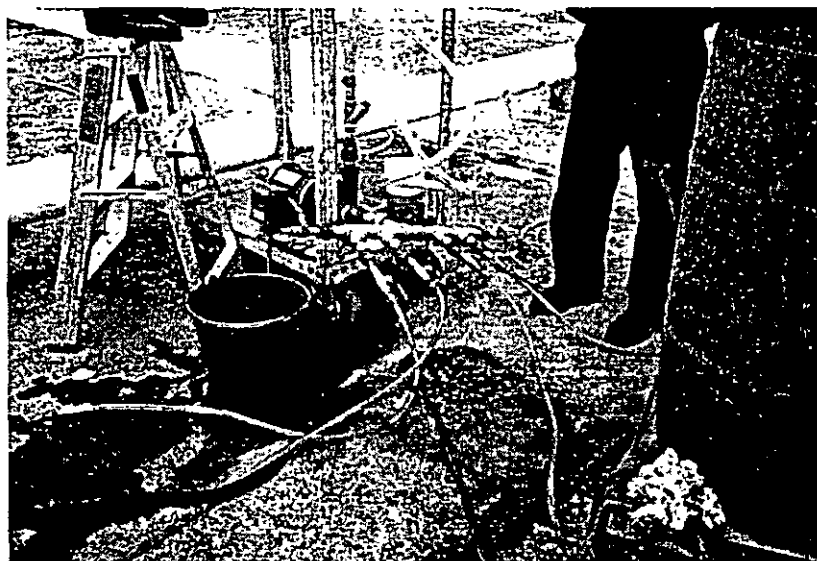


LESSER, 2001

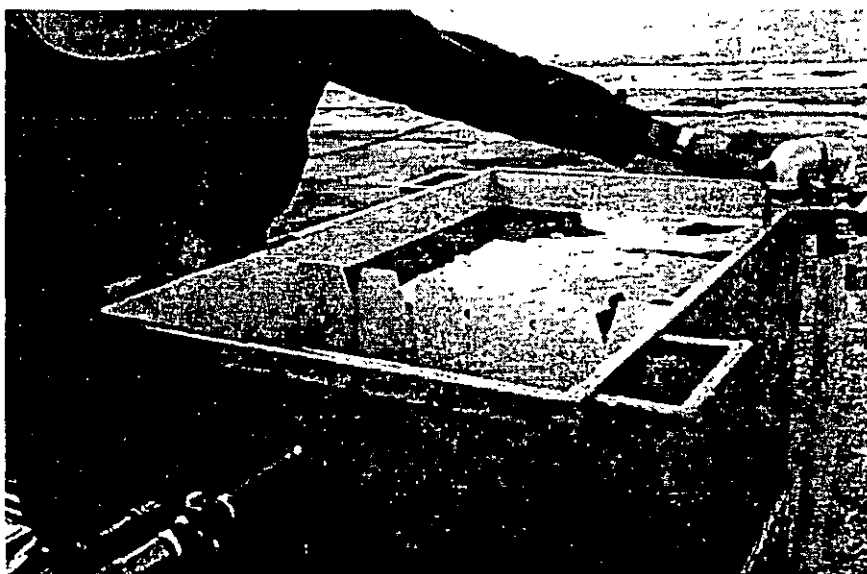


 LESSER, 2001

Múltiple, conexión hacia 5 pozos de extracción



 LESSER, 2001

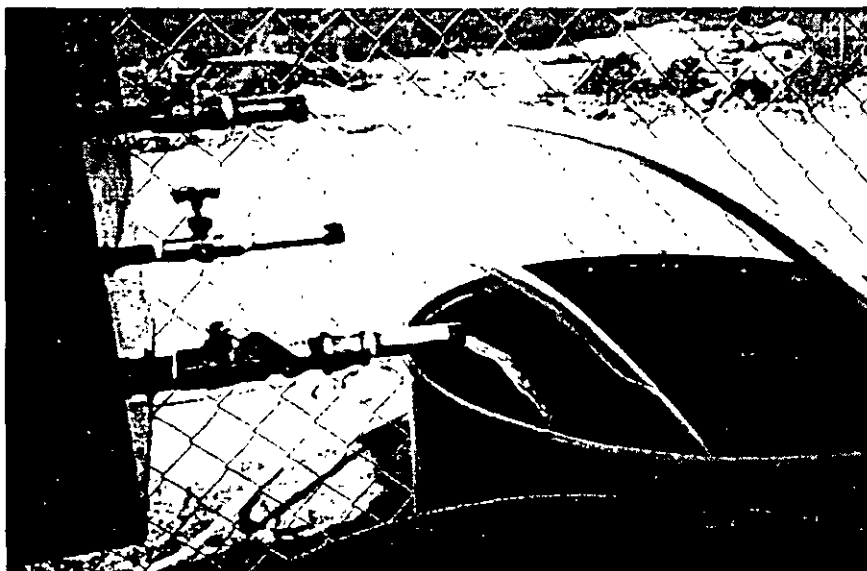


Caja separadora

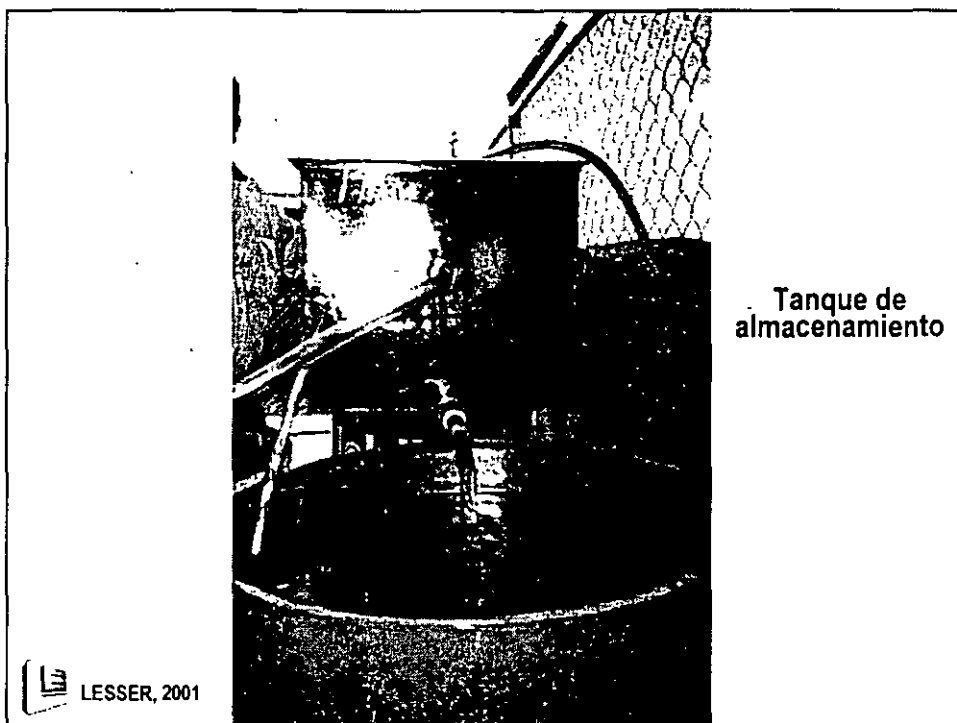


LESSER, 2001

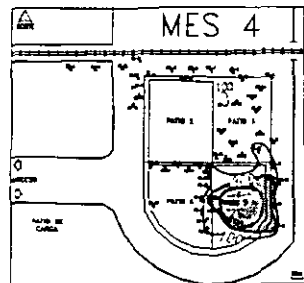
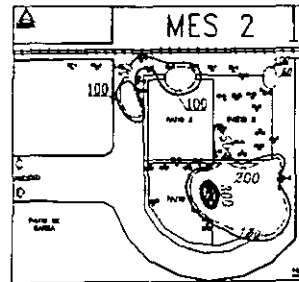
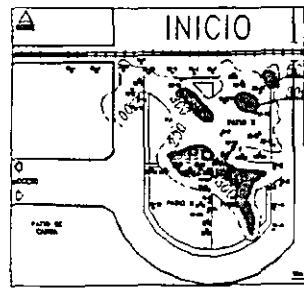
Salidas de la caja separadora



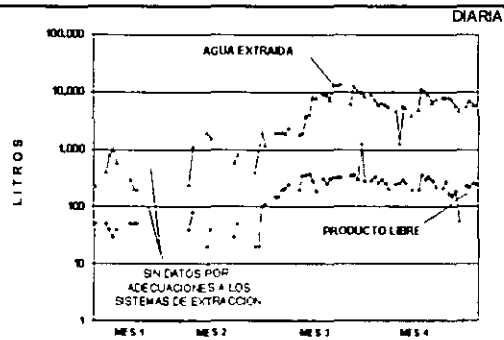
LESSER, 2001



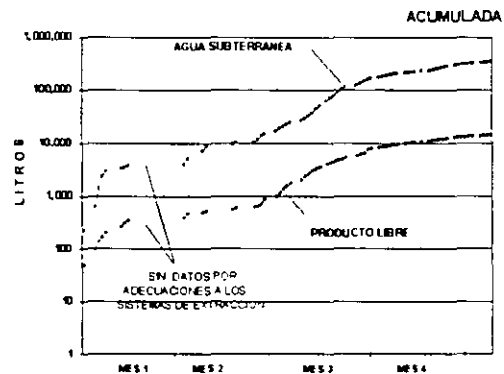
Remediación: extracción de producto libre

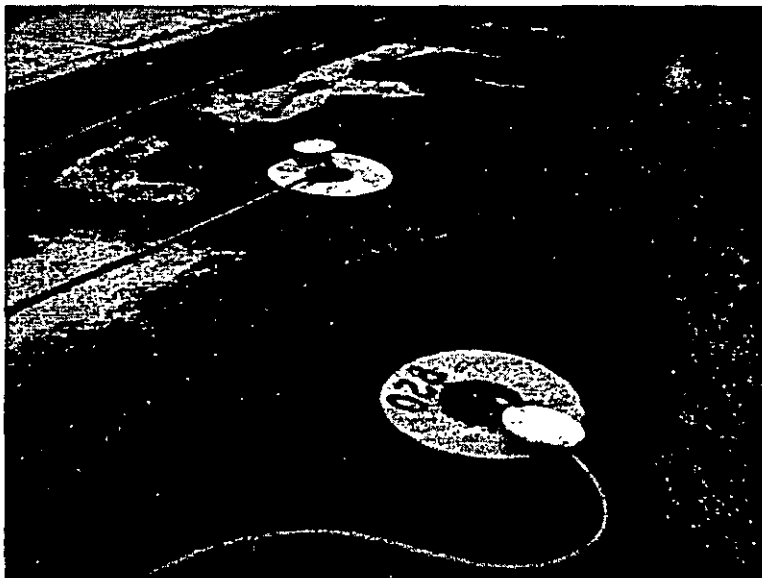



Evolución de la mancha de producto libre



Volumen de extracción de producto libre y agua subterránea





 LESSER, 2001



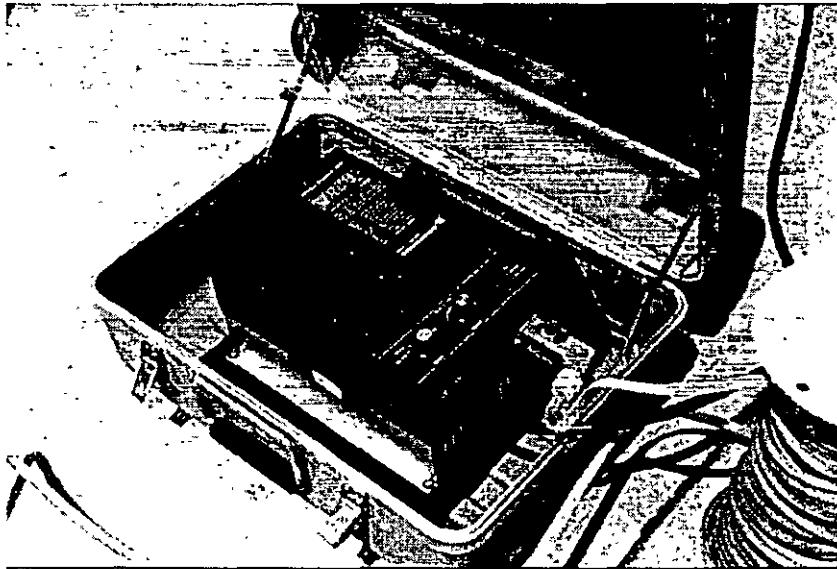
 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



 LESSER, 2001




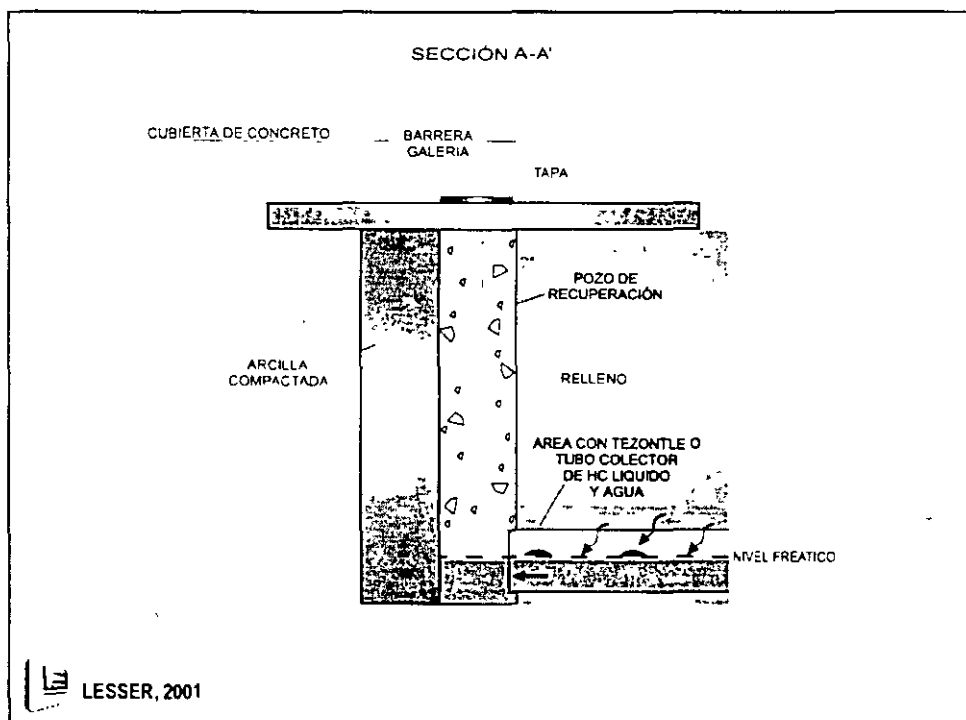
 LESSER, 2001

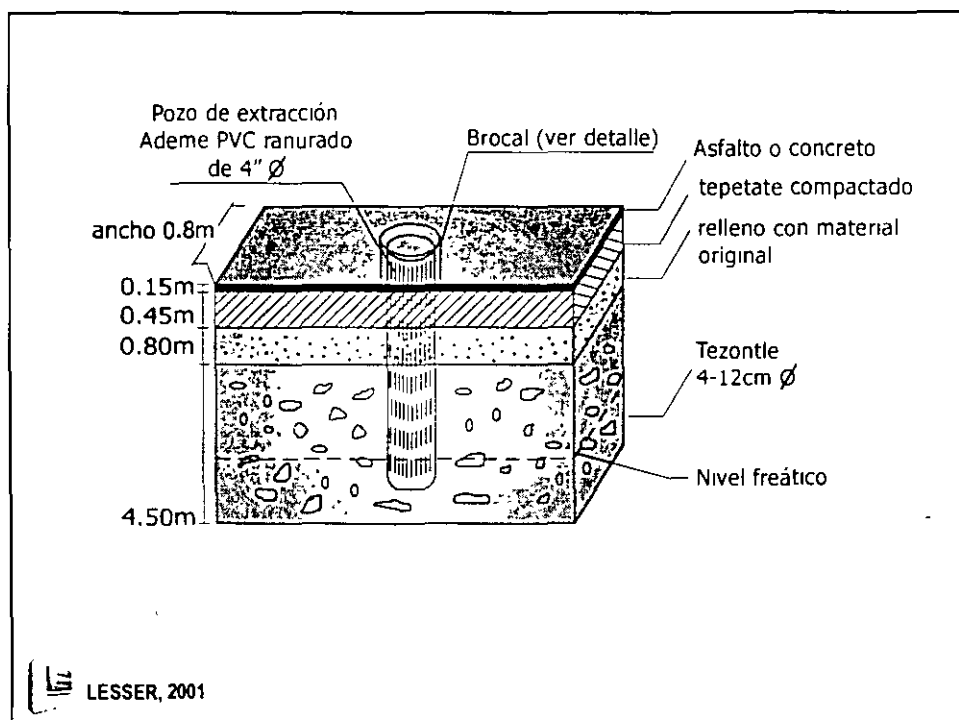
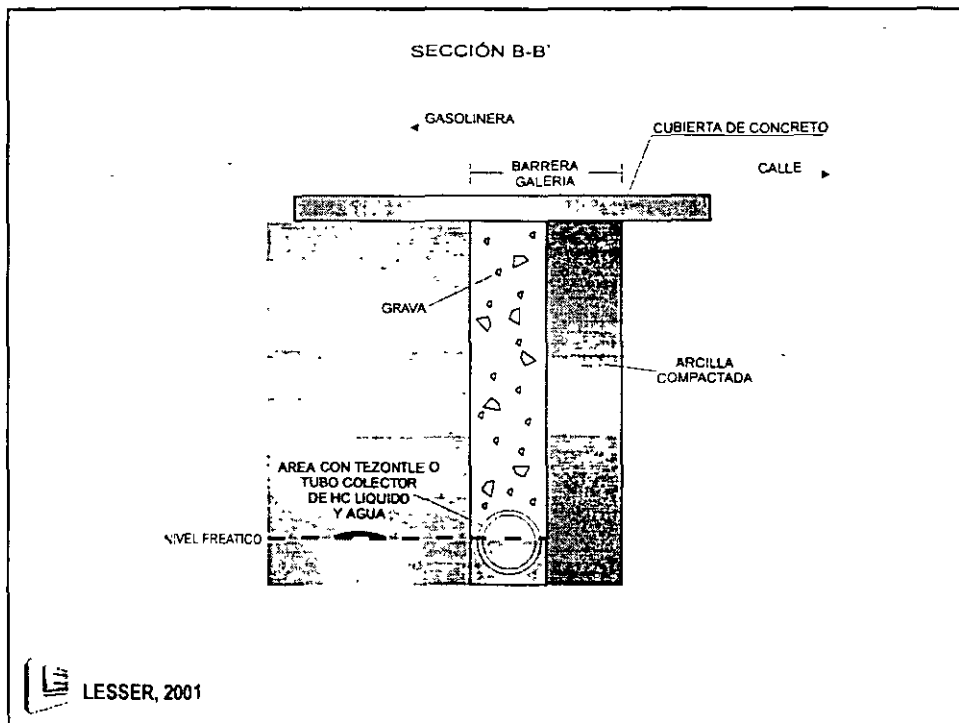


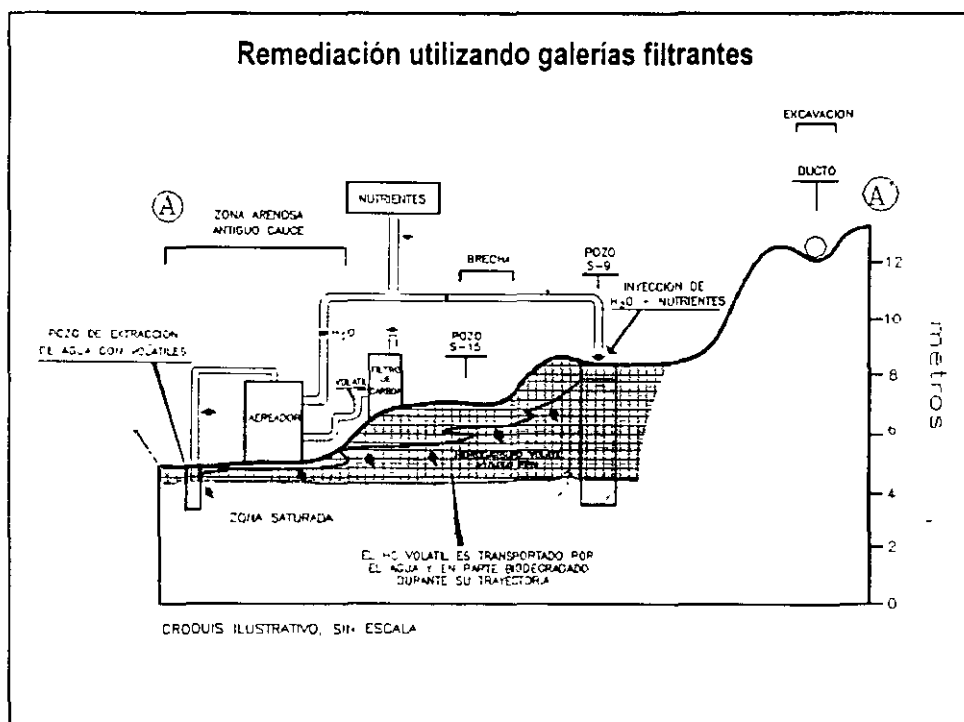
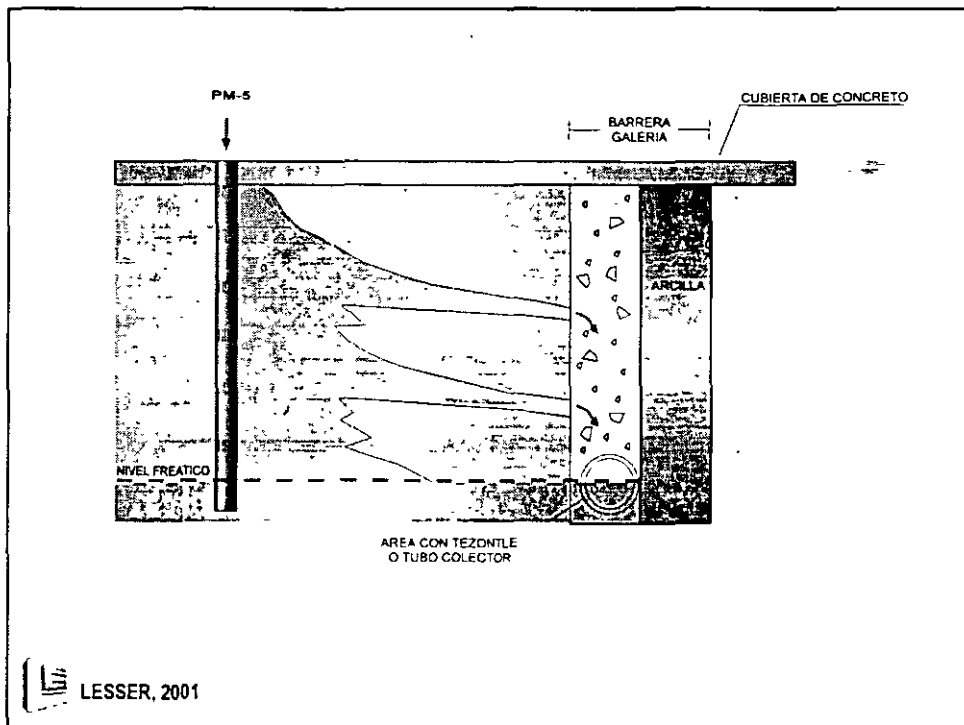
 LESSER, 2001

■ Galerías filtrantes

 LESSER, 2001









Trazo de una galería



LESSER, 2001



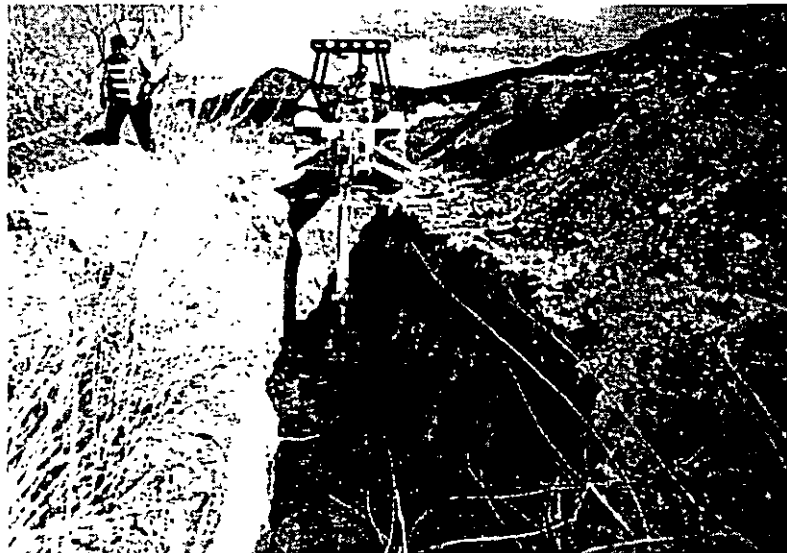
Trazo de una galería



LESSER, 2001



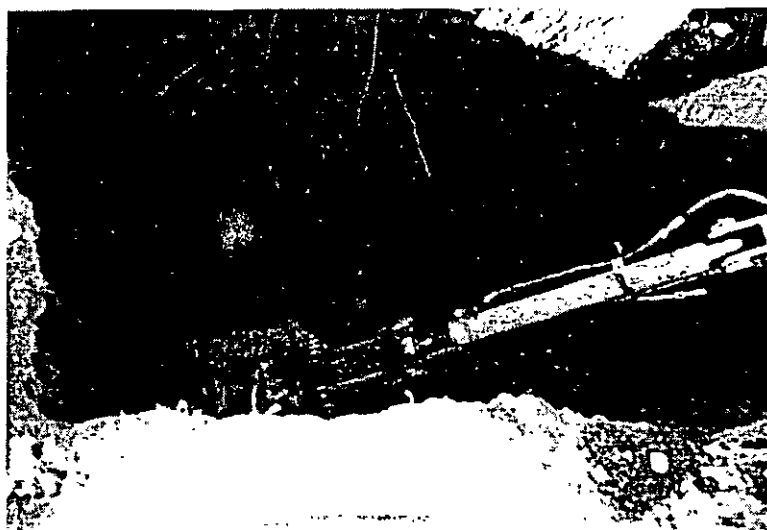
LESSER, 2001



Excavación de galería



LESSER, 2001




Excavación de galería

 LESSER, 2001



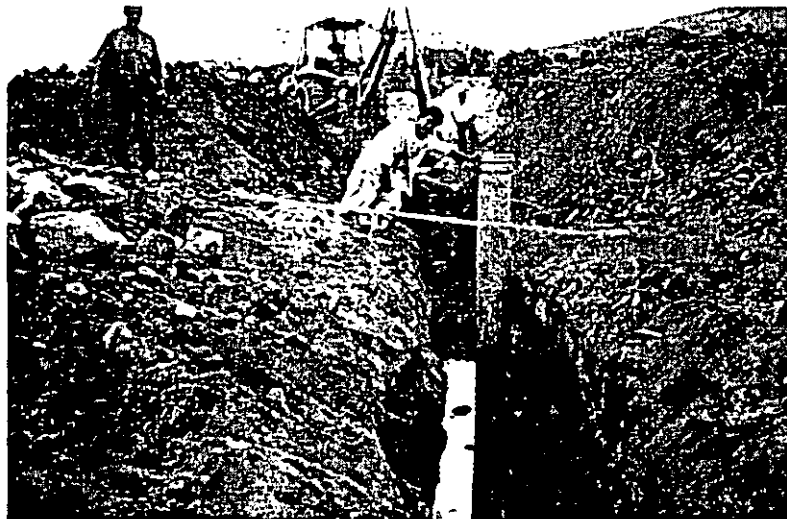
**Colocación de
ademe para
extracción de
producto, dentro
de la galería**

 LESSER, 2001



Relleno de
la galería

 LESSER, 2001



Relleno de la galería

 LESSER, 2001



Tapado de la galería



LESSER, 2001



Galería cubierta

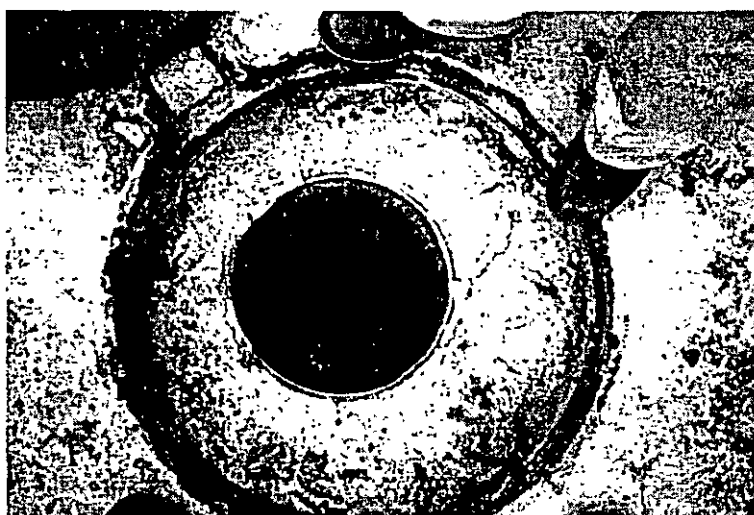


LESSER, 2001



Tapa del pozo sobre la galería

 LESSER, 2001



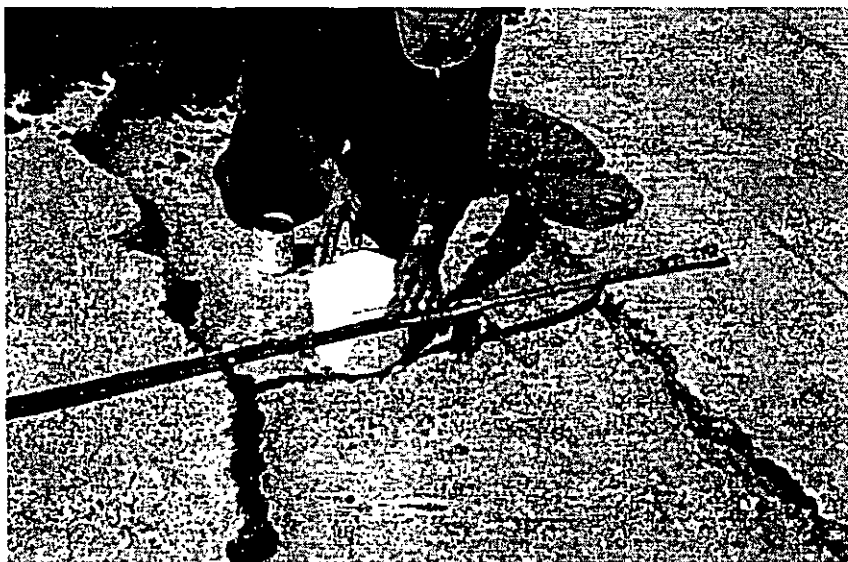
Tapa del pozo sobre la galería

 LESSER, 2001



Tapa del pozo sobre la galería

 LESSER, 2001




Tapa del pozo sobre la galería

 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



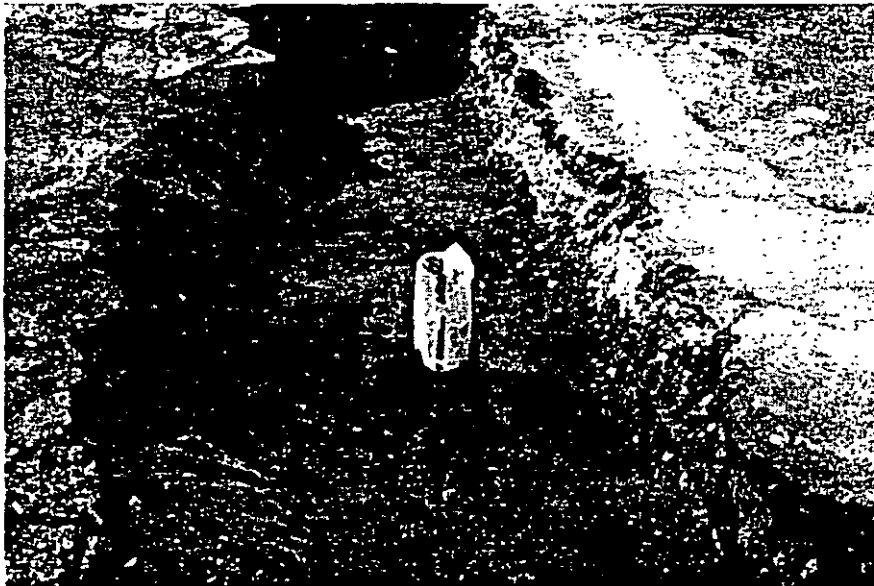
 LESSER, 2001



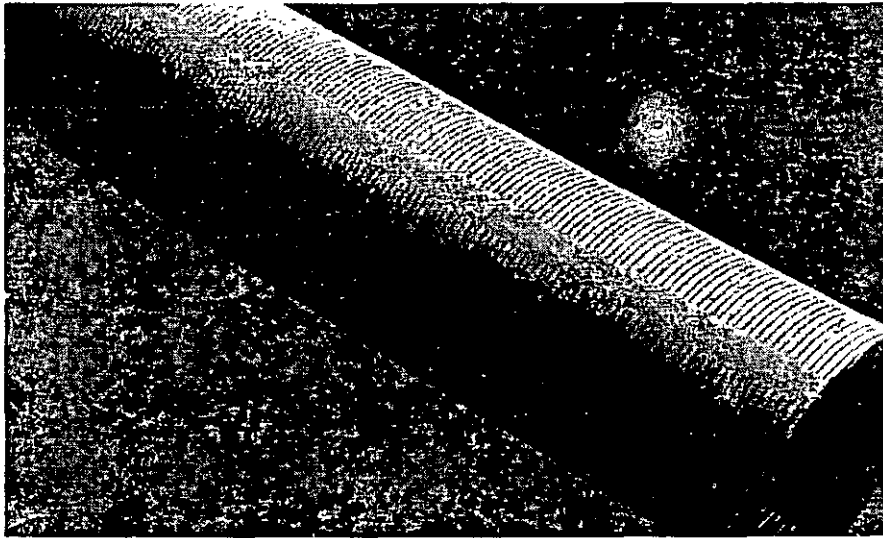
 LESSER, 2001



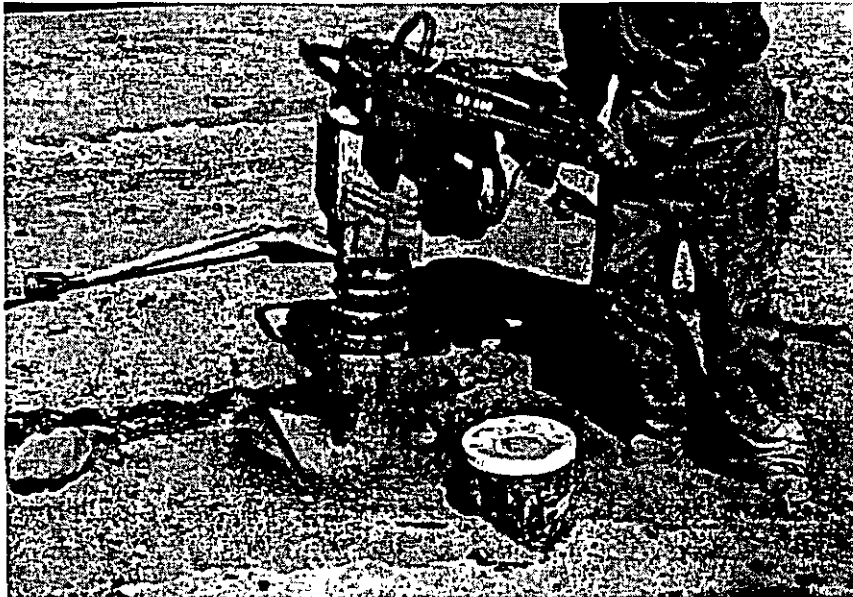
 LESSER, 2001



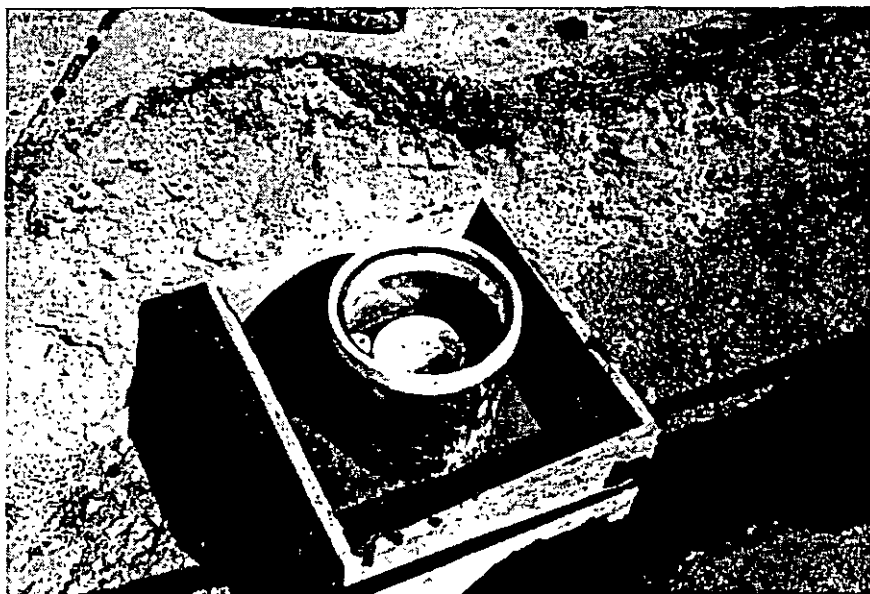
 LESSER, 2001



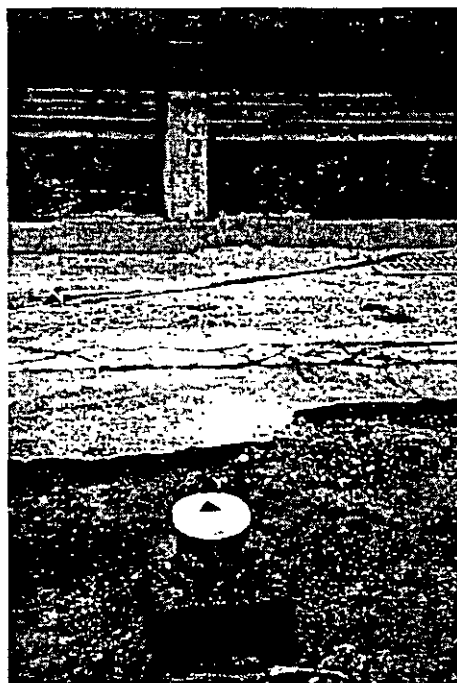
 LESSER, 2001



 LESSER, 2001



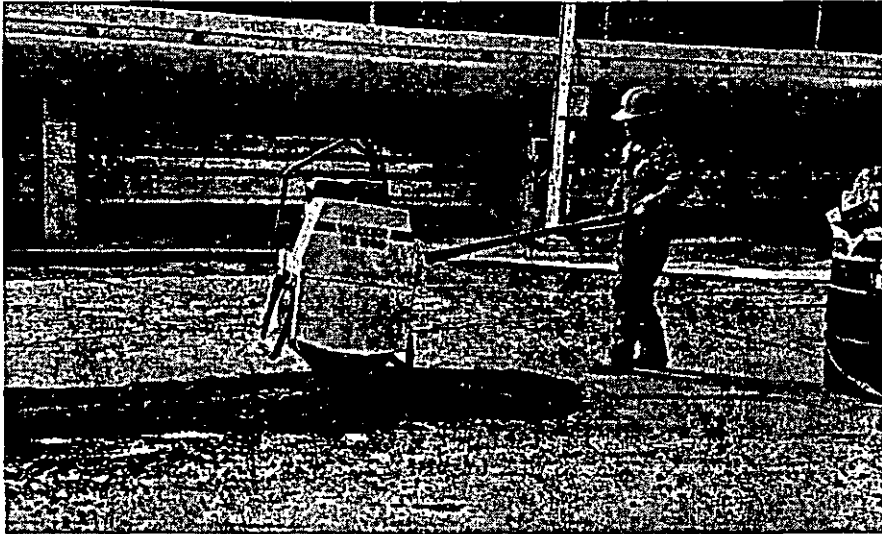
 LESSER, 2001



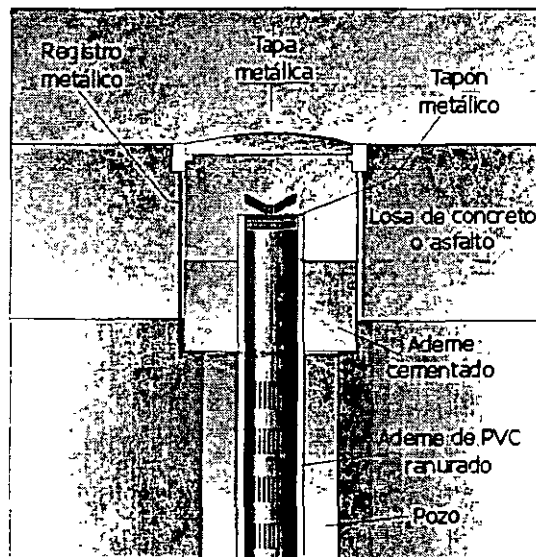
 LESSER, 2001



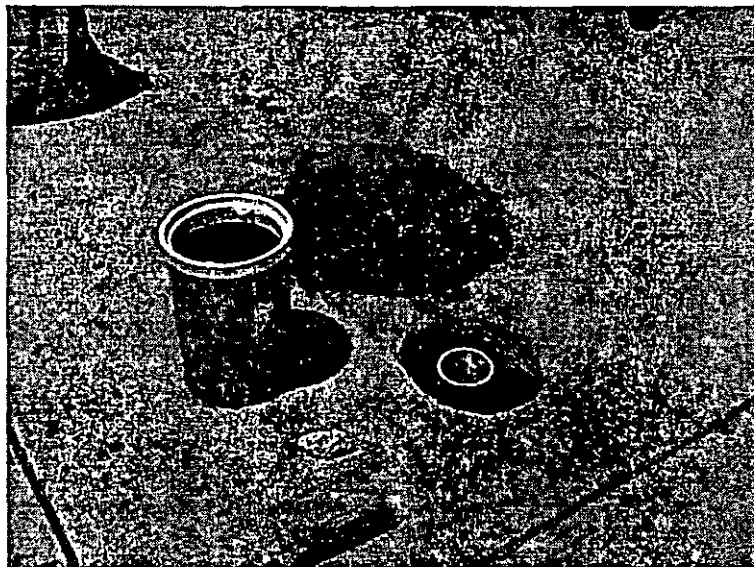
LESSER, 2001



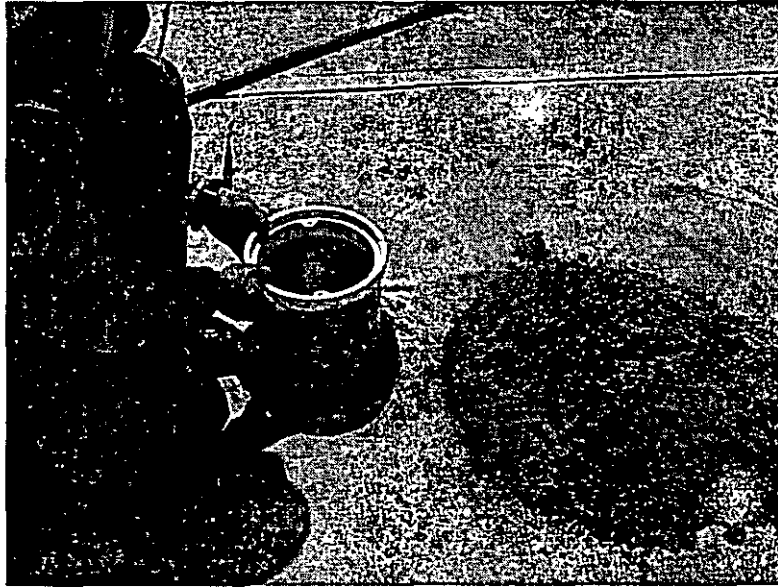
LESSER, 2001




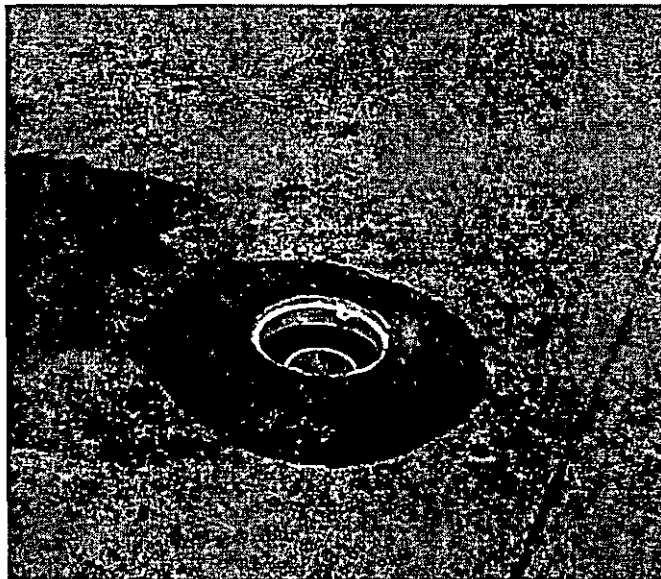
 LESSER, 2001



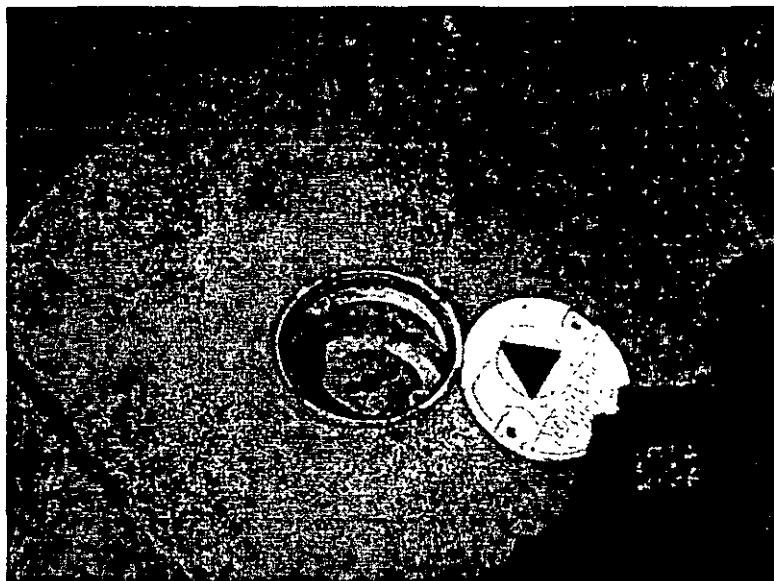
 LESSER, 2001



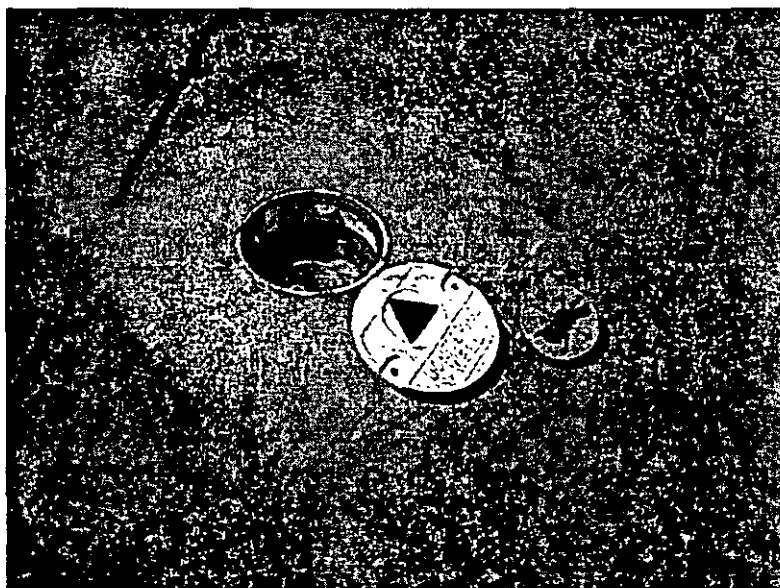
 LESSER, 2001



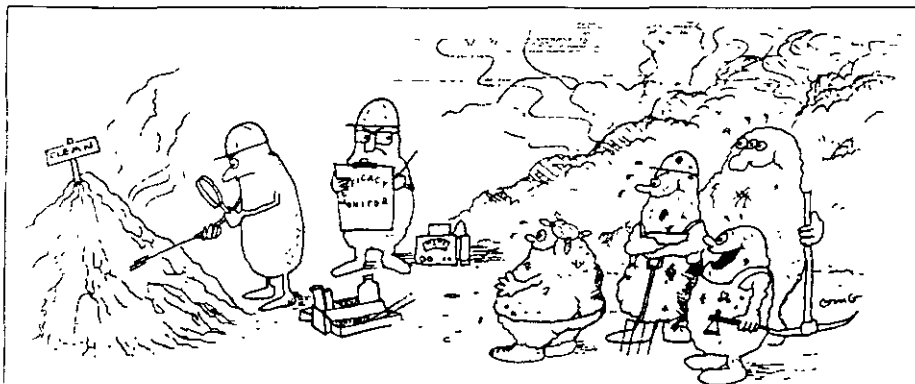
 LESSER, 2001



LESSER, 2001

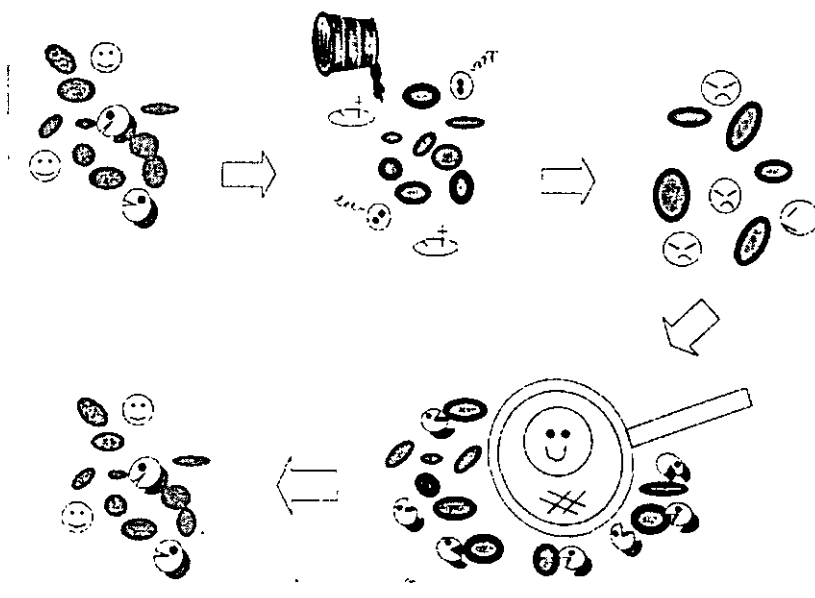


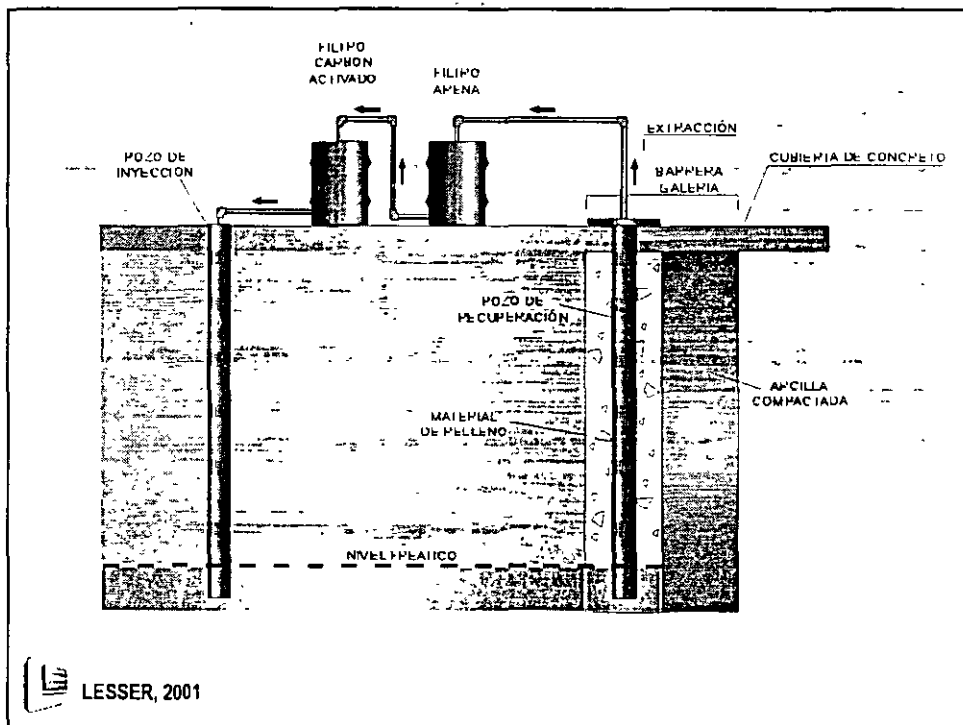
LESSER, 2001

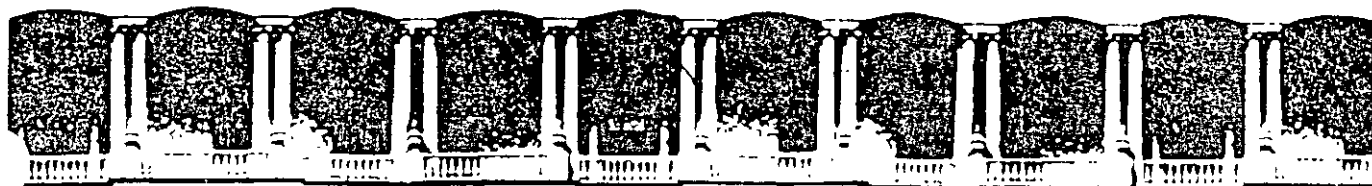


"...and the second monitors the efficacy of the first!"

Source: Heitzer and Saylor, 1993. TIBTECH 11, August: 334-343.







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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

**REMEDIACIÓN IN SITU DE UN SUELO ARCILLOSO
CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EN FASE LIQUIDA Y
ABSORBIDOS**

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

REMEDIACIÓN *IN SITU* DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EN FASE LÍQUIDA Y ADSORBIDOS

Juan Manuel Lesser. Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
Río Guadalquivir 3 Col. Pathé, Querétaro 76020, Qro. México
lesserjuanm@infosel.net.mx

Susana Saval*. Instituto de Ingeniería, UNAM
Apdo. Postal 70472 Cd. Universitaria 04510, D.F. México
ssb@pumas.ingen.unam.mx

RESUMEN

El subsuelo del sitio de estudio, que corresponde a un terreno industrial, está constituido por materiales arcillosos que se encuentran saturados y dan origen a un acuitardo cuyo nivel freático se ubica a alrededor de 2 metros de profundidad. Como producto de derrames accidentales que ocurrieron en el pasado, se acumularon hidrocarburos en fase líquida con un espesor entre 10 y 30 cm. La baja permeabilidad de las arcillas, del orden de 1×10^{-9} m/seg. ha impedido que los hidrocarburos circulen grandes distancias, limitando el área de afectación a una zona relativamente reducida. Los hidrocarburos en su mayoría corresponden a diesel y en otros casos a mezclas de diesel con gasolina. Se inició la **remediación física** que consistió en la extracción del producto libre, del que se recuperaron 13,000 litros en 4 meses. Después de realizar varias pruebas en el laboratorio, se aplicó una **remediación química *in situ***, mediante la inyección de agentes tensoactivos en solución y la extracción del licor de tratamiento, es decir, la mezcla de agua subterránea, hidrocarburos disueltos y agentes tensoactivos. El suelo de la zona tratada mostró una reducción importante en la concentración de diesel y gasolina. Finalmente, el licor de tratamiento se sometió a una **biorremediación** en reactores a nivel piloto en superficie, donde se abatió la concentración de gasolina y la concentración de diesel se redujo de más de 17000 mg/l a menos de 350 mg/l.

Palabras clave. agentes tensoactivos, desorción, remediación física, remediación química, biorremediación

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de combustibles para abastecimiento de una zona industrial, cuya superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas, está pavimentada. En estudios previos se encontró presencia de hidrocarburos en fase libre flotando sobre el nivel freático, que ocasionan lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10000 ppm (1% v/v) en prácticamente todo el predio. La zona corresponde a una extensa planicie caracterizada por una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Existen horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones, los cuales se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad, a la cual se detectó la presencia de producto en fase libre en espesores entre 10 y 30 cm de espesor. Las pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad en los 2

m superficiales varía entre 10^{-9} y 10^{-10} m/seg, por lo que las arcillas se comportan como un acuitardo que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento (Lesser y Saval, 1999). De los resultados de análisis se obtuvo la distribución de hidrocarburos en el subsuelo, se encontró que en su mayoría fue diesel en concentraciones tan altas como 20000 mg/kg, mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a 1000 mg/kg. Se detectó la presencia de plomo orgánico y de metilterbutiléter lo cual indicó que se trata de gasolinas antiguas y oxigenadas, algunas de ellas con bajo grado de volatilización por estar confinadas en el subsuelo. Prácticamente no se detectaron benceno, tolueno y etilbenceno, pero si estuvieron presentes los xilenos, así como hidrocarburos poliaromáticos constituyentes típicos del diesel. A pesar de la presencia de producto libre en el subsuelo el riesgo a la salud y el riesgo geohidrológico resultaron ser bajos (Saval y Lesser, 1999).

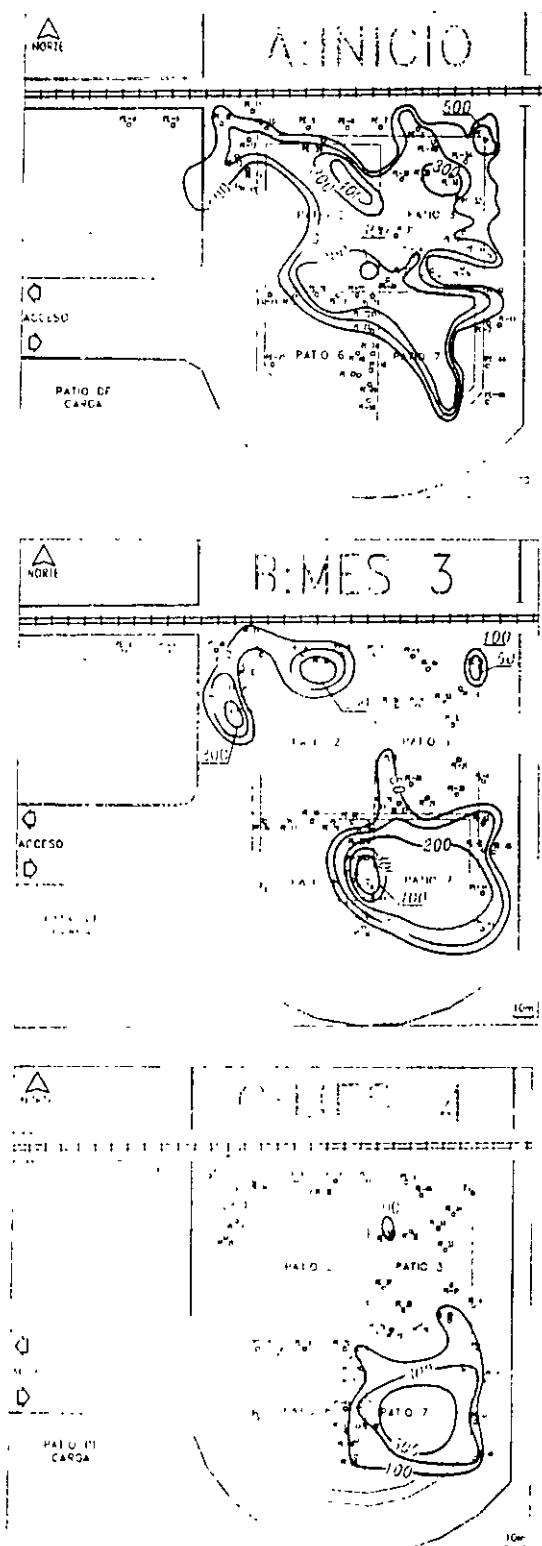


FIGURA 1 CONFIGURACION Y EVOLUCION DE LA MANCHA DE PRODUCTO LIBRE
PE=POZO DE EXTRACCION

REMEDIACIÓN FÍSICA

La mancha de hidrocarburos en el subsuelo se delimitó mediante 274 perforaciones someras en las cuales se midió el espesor de producto libre durante la caracterización del sitio (Lesser y Saval, 1999). La configuración resultante se presenta en la Fig. 1A, en la que se observan espesores promedio entre 10 y 30 cm hacia la porción central del predio. También se presentaron algunas zonas con espesores de hasta 50 cm.

Para la remediación física se tomó como base la técnica de bombeo - tratamiento - inyección (Mackay and Cherry, 1989; Suthersan, 1997). Los componentes del sistema de remediación incluyeron: pozos de extracción, bomba, caja separadora y pozos de inyección. La bomba y la caja separadora se colocaron en un módulo metálico, que tiene ruedas giratorias para facilitar su movimiento aún en zonas de difícil acceso (figura 2).

Se perforaron 50 pozos de extracción con diámetro de 8.9 cm y 4 m de profundidad. En su interior se colocó tubería de PVC hidráulica de 6.35 cm de diámetro, liso de 0 a 1.80 m y con ranurado de 1.80 a 4.00 m. En la boca de los pozos se colocó un tapón de rosca y brocal de concreto. Se calculó el radio de influencia del bombeo en los pozos, considerando una transmisibilidad media de $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.05, con ello se obtuvo un radio de 4 metros. Los pozos de extracción se localizaron en puntos donde se permitió el acceso tratando de mantener la equidistancia entre pozos en no más de 8 metros. También se tomó en cuenta la dirección del flujo de las aguas freáticas que previamente se determinó (Lesser y Saval, 1999).

Una bomba a prueba de explosión para la extracción de producto libre, se conectó a una tubería plástica de 2.54 cm de diámetro con 5 derivaciones de 0.64 cm de diámetro interior, con lo cual se realizó el bombeo simultáneo de 5 pozos. Al reducir el caudal se evitó el agotamiento de los pozos y se logró extraer preferentemente el producto líquido localizado en la parte superficial. La mezcla agua / combustible extraída del subsuelo se envió a una caja separadora, diseñada y construida *ad hoc* donde, después de un tiempo de reposo, se permitió la separación de fases por la diferencia de densidades con lo cual se recuperaron agua y combustibles por salidas independientes. El

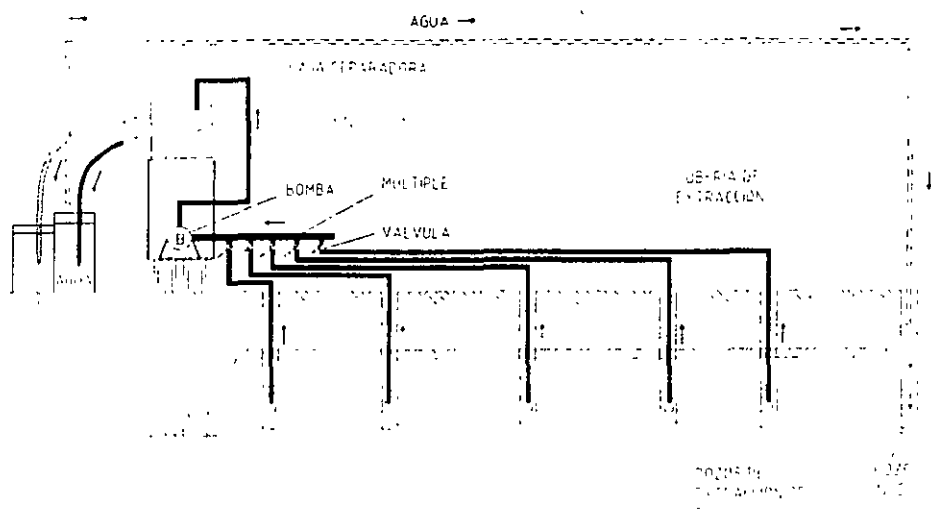


FIGURA 2 - SISTEMA DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE

agua libre de combustibles se devolvió al subsuelo inyectándola por gravedad en pozos localizados topográficamente más arriba.

Durante los trabajos de extracción se notó una mayor acumulación de producto libre hacia el patio 6, donde se localizaron un importante número de pozos, esto se tradujo en un mayor volumen de extracción en esa zona. La acumulación de producto se vió favorecida por el movimiento natural de las aguas freáticas que se dió en esa dirección. Después de 3 meses de extracción constante, la mancha de producto libre se redujo de manera importante, de tal forma que en el patio 3 prácticamente desapareció y solo se detectaban trazas, como se presenta en la figura 1B. En los patios 2 y 7, no fue posible perforar pozos de extracción debido a las actividades que ahí se realizaban, por lo que el patio 7 se convirtió en el centro de la mancha de producto libre. Esto último se confirmó en la configuración obtenida a los 4 meses (figura 1C).

El espesor de producto libre mostró una notable disminución, como ejemplo se presentan los valores obtenidos para los pozos PE-27 y PE-50. Cabe hacer notar que para estas mediciones

los pozos se dejaron reposar 3 días, con el fin de asegurar la confiabilidad de las lecturas.

Los dos primeros meses de operación fueron realmente de prueba y perforación de nuevos pozos de extracción en el patio 6, por lo que el volumen de producto libre extraído fue bajo. Entre los meses 3 y 4 la extracción aumentó notablemente. El volumen total de agua subterránea extraída, libre de combustible, fue de 332000 litros, los cuales se inyectaron al subsuelo por gravedad. En la figura 4A se presentan las cifras diarias de agua y producto libre que se extrajeron del subsuelo, aquí se puede apreciar que el ritmo de extracción se mantuvo prácticamente constante. Este comportamiento se reflejó también en la figura 4B, donde se graficaron los volúmenes acumulados y se observa una tendencia al aumento. En las dos gráficas se utilizó una escala logarítmica para facilitar la presentación de los resultados. La elevación del nivel freático, que fue también monitoreada periódicamente, mostró fluctuaciones de hasta 50 cm entre la época de lluvias y de estiaje (fig 5). Esta situación es importante, ya que al bajar el nivel, los espacios porosos son ocupados por el producto libre y al subir nuevamente el nivel una

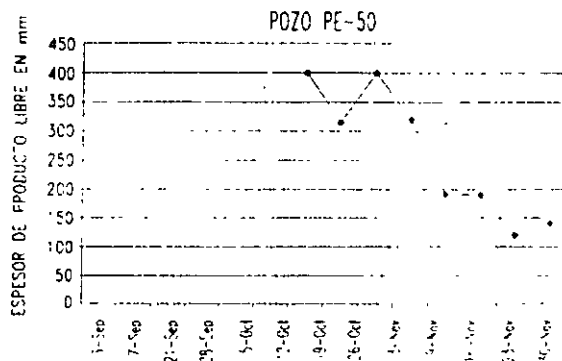
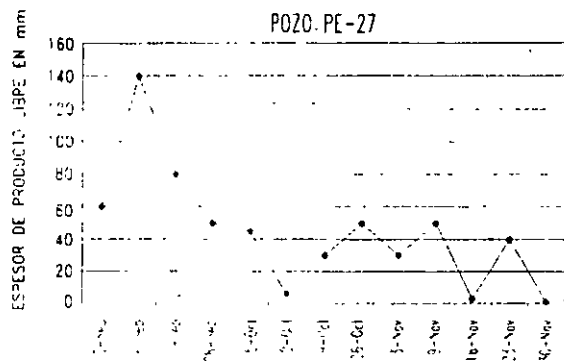
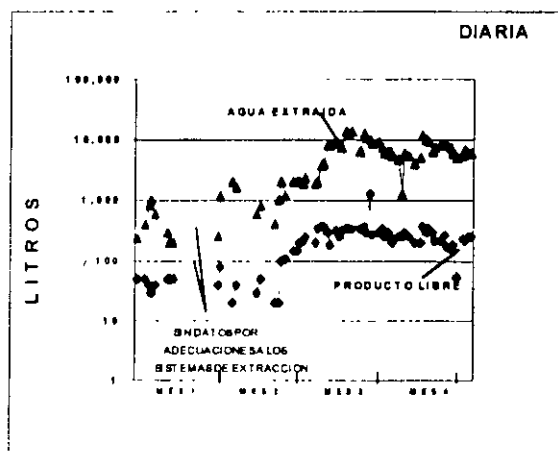


FIGURA 3.-EVOLUCION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN POZOS DE EXTRACCION



parte del combustible queda adsorbido por la estructura del suelo y otra queda libre flotando sobre el nivel.

REMEDIACIÓN QUÍMICA *IN SITU*

La remediación química que se aplicó fue un lavado con agentes tensoactivos, que comúnmente se conoce como "flushing". Consiste en desorber los hidrocarburos que están adheridos al material geológico y combinarlos con en el agua para facilitar su extracción (Abdul *et al.*, 1990; Fortin and Anderson, 1997; Liu *et al.*, 1991; Wilson and Wyatt, 1989).

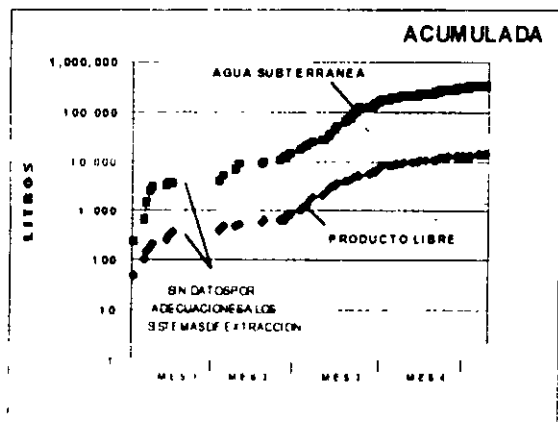


FIGURA 4.- VOLUMEN DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE Y AGUA SUBTERRANEA

Previamente se realizaron pruebas de tratabilidad química en el laboratorio utilizando columnas de vidrio de 3 cm de diámetro y 40 cm de longitud, empacadas con suelo contaminado extraído del lugar. Las pruebas consistieron en aplicar 4 diferentes formulaciones de agentes tensoactivos, las cuales se eligieron de acuerdo a su facilidad de disolución en grandes volúmenes de agua, su biodegradabilidad, su disponibilidad en el mercado, su seguridad en el manejo y su costo. La efectividad del tratamiento en las columnas se pudo observar a simple vista, ya que la solución de tensoactivos al 5% en agua que generalmente fue incolora, cambió a un color oscuro a la salida de la columna. Esto se interpretó como una desorción de los hidrocarburos, mientras el agente tensoactivo fluye a través del suelo contaminado. Este fluido de color oscuro, que se denominó licor de tratamiento, es una sola fase que toma la coloración de los combustibles presentes. La efectividad de cada formulación se verificó al cuantificar la concentración de hidrocarburos en

continuo en el punto identificado como 356, el cual se localizó dentro del patio 3 muy cerca del pozo donde se inyectaron tensoactivos y en dirección a donde corre el agua subterránea (figura 6). Los resultados se presentan en forma de perfil en la misma figura, el cual se comparó con el del sondeo 187, localizado dentro del patio 2 que meses atrás se localizaba dentro de la mancha central de producto libre y contenía diesel en concentración superior a 12000 mg/kg. Como consecuencia de las acciones de remediación, la concentración de diesel se redujo a menos de 3000 mg/kg.

Esta técnica de remediación química es efectiva únicamente si se mantiene una constante dinámica en el subsuelo, la cual se logró a través de la extracción e inyección de acuerdo al sentido del flujo subterráneo, con ello se promovió la movilización de los hidrocarburos que están adsorbidos en el material geológico.

Durante la remediación química se inyectaron agentes tensoactivos en pozos localizados en el patio 3, en los que ya no se detectó la presencia de producto en fase libre. Cada volumen de aplicación fue de 500 litros, se dejó fluir por gravedad y enseguida se inyectaron por lo menos 3000 litros de agua proveniente del sistema de separación, antes de una nueva inyección de tensoactivos. Se dió seguimiento al movimiento de los tensoactivos en el subsuelo, los cuales incluso sirvieron como trazadores por el color y apariencia del licor de tratamiento.

Después de un mes de haber aplicado los agentes tensoactivos se realizó un muestreo

El licor de tratamiento fue sometido a pruebas piloto de biorremediación, utilizando cultivos de bacterias degradadoras de diesel y gasolina que se desarrollaron en el laboratorio. La biorremediación consistió en promover la actividad de las bacterias degradadoras por adición de sales minerales en forma de fertilizantes y suministro de oxígeno. Se llevó un registro del pH como una medida indirecta de la actividad microbiana y al final de cada lote que

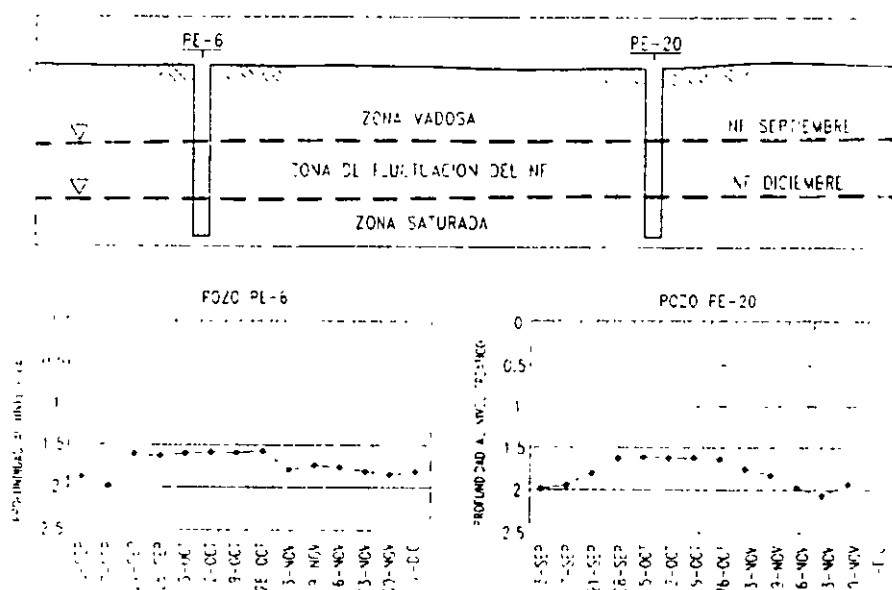


FIGURA 5.-VARIACION DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL FREATICO (NF)
EN POZOS DE EXTRACCION

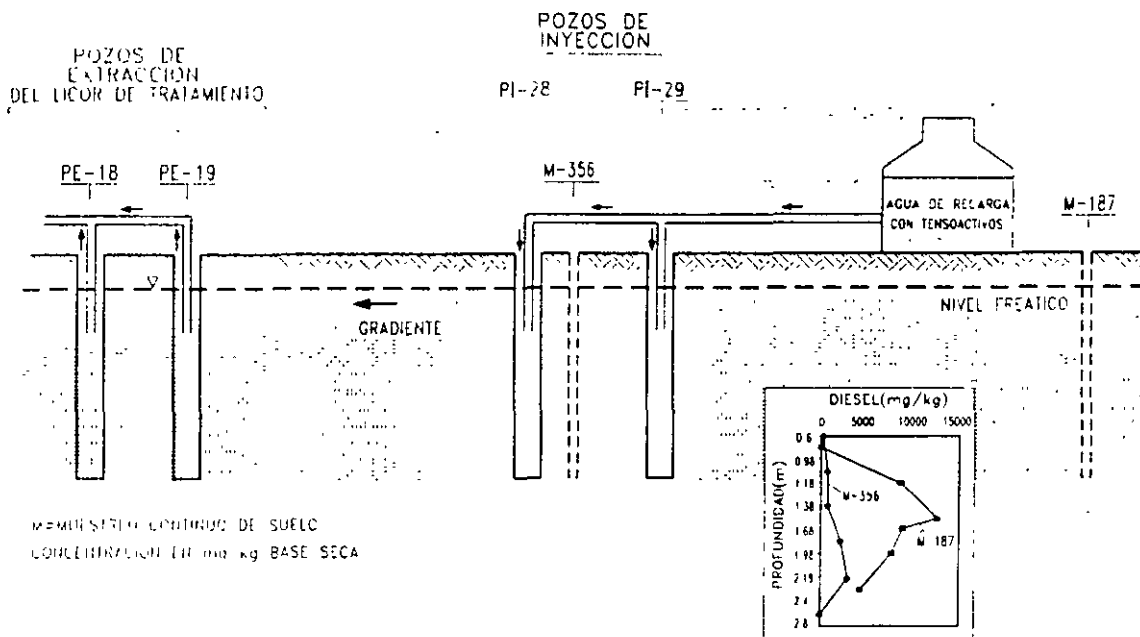


FIGURA 6.-REMEDIACION QUIMICA IN-SITU: DESORCION DE HIDROCARBUROS CON AGENTES TENSOACTIVOS

duró en promedio 8 días se cuantificó la concentración de combustibles residuales y se confirmó la presencia de bacterias degradadoras. En todas las pruebas se redujo notablemente el contenido de combustibles de 20000 mg/l a menos de 300 mg/l para diesel y el contenido de gasolina fue no detectable. Sin embargo, se hicieron evidentes el largo tiempo requerido para reducir la concentración de combustibles por esta vía, así como los altos requerimientos de oxígeno.

Los resultados de las pruebas son una evidencia de que la biorremediación del agua subterránea puede realizarse con éxito, siempre y cuando esté acoplada a la remediación química con agentes tensoactivos y a la extracción/inyección de agua subterránea.

DISCUSION

La remediación de suelos contaminados es un tema de actualidad a nivel mundial, pero pocos estudios de casos específicos en México han sido publicados. Lo presentado aquí constituye una experiencia en campo donde se acoplaron tres técnicas de remediación cuya base de funcionamiento es diferente, que visto de otra forma constituyen un tren de tratamiento en el siguiente orden: una remediación física, seguida

de una remediación química y finalmente una biorremediación.

De hecho, la remediación de suelos debe enfocarse de esa manera, dado que una sola técnica no es suficiente para remover los contaminantes de un suelo afectado.

El aspecto más importante del estudio realizado, es que se trata de un suelo arcilloso, cuya característica impermeable hace más difícil la aplicación de cualquier técnica de remediación. Por ejemplo, en la etapa inicial de extracción del producto libre, se probaron diferentes estrategias de bombeo, que no funcionaron adecuadamente debido a que el propio suelo impone un caudal de extracción bajo. Esto último se traduce en tiempos muy largos y costos muy elevados para la remediación, que se deben reducir. En el caso específico de este estudio se decidió perforar un importante número de pozos cuyo radio de influencia pudiera cubrir el área de mayor afectación, además de atender la extracción de manera simultánea en cinco pozos diferentes con cada unidad de bombeo y la inyección de agua libre de hidrocarburos en pozos aguas arriba. Con estas tres acciones se aumentó el volumen de extracción y se logró mantener a un ritmo constante.

Por lo que respecta a la remediación química, su aplicación en las zonas donde se abatió el producto en fase libre, logró desorber los hidrocarburos que se habían quedado en el material geológico. Aunque los resultados fueron evidentes a simple vista, los análisis realizados a muestras de suelo a 3 m de profundidad, comprobaron la eficiencia del tratamiento. Dos elementos fueron importantes en este caso, la elección de los agentes tensoactivos a partir de las pruebas de tratabilidad en el laboratorio y la constante inyección de agua al subsuelo después de cada aplicación. Aquí conviene mencionar, que el hecho de devolver al subsuelo el agua extraída con la finalidad de acelerar el flujo subterráneo trae una ventaja adicional, ya que si se dejara en superficie sería necesario darle algún tratamiento antes de su disposición final.

En lo que toca a la biorremediación del agua subterránea, técnicamente funcionó bastante bien, ya que se redujo de manera importante la concentración de combustibles. Sin embargo, los altos requerimientos de oxígeno hacen muy costoso el tratamiento, por lo que todavía se requiere de más trabajo para facilitar su aplicación en mayor escala.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una estrategia adecuada para la extracción de hidrocarburos en fase libre acumulados en el subsuelo de tipo arcilloso, con lo cual se avanzó de manera importante en la remediación física.

Se demostró la efectividad de la remediación química *in-situ* mediante la inyección al subsuelo de agentes tensoactivos disueltos en agua, los cuales lograron remover los hidrocarburos adsorbidos al material geológico.

La biorremediación en superficie del agua subterránea fue una técnica efectiva para la degradación de los combustibles presentes, sin embargo, aún no representa una alternativa económica para su aplicación en escala real.

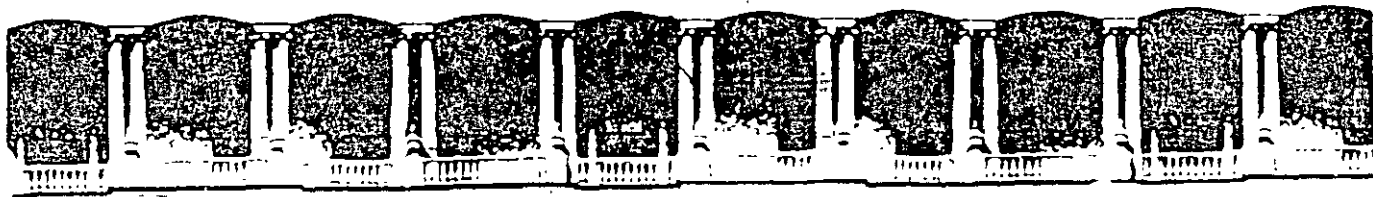
AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Salud Ocupacional de Pemex Refinación. Los autores agradecen la participación de Florentino Montiel, Roberto Martínez, Francisco Ordoñez, Héctor Zegarra,

Norma Pérez y Alma Guzmán durante la ejecución de los trabajos en campo y en el laboratorio.

REFERENCIAS

- Abdul A.S., Gibson T.L., and Rai D.N., 1990. Selection of surfactants for the removal of petroleum products from shallow sandy aquifers. *Ground Water* 28: 920-926.
- Fortin W.A. and Anderson M.A., 1997. Enhanced removal of trapped non-aqueous phase liquids from saturated soil using surfactant solutions. *J. Contam. Hydrol.* 24: 247-268.
- Lesser J.M. y Saval S., 1999. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Sometido para su publicación a la *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Liu Z., Laha S. and Luthy R.G., 1991. Surfactant solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in soil - water suspensions. *Wat. Sci. Tech.* 23: 475-485.
- Mackay D.M. and Cherry J.A., 1989. Groundwater contamination: pump - and - treat remediation. *Environ. Sci. Technol.* 23(6): 630-636.
- Saval S., 1998. Biorremediación alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10 No. 34, enero-febrero: 6-9.
- Saval S. y Lesser J.M., 1999. Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial. Sometido para su publicación a *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Revista de la Federación Mexicana de Ingeniería y Ciencias Ambientales, A.C.
- Suthersan S.S., 1997. Remediation Engineering Design Concepts. Ed. CRC Lewis Publishers. Boca Raton.
- Wilson D.J. and Wyatt J.H., 1989. Soil clean-up by *in situ* surfactant flushing. Theory of micellar solubilization separation. *Sci. Technol.* 24: 905.



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

PROSPECCIÓN DE CONTAMINACION DE ACUÍFEROS POR HIDROCARBUROS

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

RESUMEN:

En nuestros días es común la presencia de hidrocarburos en el subsuelo. Las principales fuentes de contaminación son las fugas que se generan a partir de tanques de almacenamiento y de líneas de conducción, así como en el manejo y disposición inadecuados, principalmente en patios de mantenimiento de automóviles, autobuses, ferrocarriles (Calabrese, 1989) y aeropuertos. Los tanques y conducciones llegan a ser corroídos; acomodamientos del terreno producen tensiones y dislocaciones de tuberías; roturas accidentales también son frecuentes. En terminales de diferentes medios de transporte, se manejan hidrocarburos para el lavado de motores, los que después de su utilización eran descargados al sitio más próximo. Esta práctica no se realizaba por negligencia; era el método usual. Actualmente, ante el conocimiento del problema, en algunos países se ha tomado conciencia del problema y se trabaja en la limpieza del subsuelo.

El hidrocarburo ligero, como puede ser una gasolina, se infiltra al subsuelo y tiende a avanzar hasta el nivel estático, donde por presentar una menor densidad que el agua, flota sobre ella. Parte de este hidrocarburo se volatiliza ocupando espacios porosos o fracturas arriba del nivel estático. Cuando el hidrocarburo es más pesado, tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia las partes inferiores del acuífero o permanece absorbido por retención molecular en las partículas del suelo. Una porción del hidrocarburo llega a ser diluida por el agua. La porción volátil es la que se aprovecha para su prospección, la cual se realiza a través de pozos de monitoreo someros. Práctica útil y común es la realización de análisis de cromatografía de gases, a partir de cuyos resultados se identifica el tipo de hidrocarburo y se cuantifican sus componentes.

En relación a la calidad del agua contaminada por hidrocarburos, recibe especial atención el benceno, debido al bajo límite permisible para el agua potable, el cual es de 1ppb, cancerígeno y el 35% de este compuesto es soluble en el agua. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. En zonas cubiertas por arcillas, como es el caso de la Ciudad de



México, la circulación del contaminante es restringida, en contraste, suelos de alta permeabilidad como es el caso de la Ciudad de Guadalajara, la alta permeabilidad permite la libre circulación del contaminante en el subsuelo.

ABSTRACT

Nowadays is common to find underground hydrocarbons (HC) leakages. The main pollutant sources are: leakage from underground storage tanks and pipes, and inadequate management at the maintenance yards of cars, buses, trains and airplanes. After some time storage tanks are corroded; ground movements produce accidental ruptures and dislocations of pipes. At terminals of different kind of transports, HC are used in motors cleaning and were discharged to the closest area

PROSPECCIÓN DE CONTAMINACIÓN

DE ACUÍFEROS POR HIDROCARBUROS

after being used. This was not done by negligence, it was the usual method. Nowadays several countries have realized this problem and are working at underground remediation. A light HC like gasoline, infiltrates into the ground and tends to reach the static level. Due to its lower density, gasoline floats over the water. Part of this HC is volatilized and stored at the ground porous or fractures above the static level. When the HC is heavier, it tends to infiltrate and accumulate towards the base of the aquifer, or it is absorbed by molecular retention to ground particles. The volatile portion of a HC is used for detection through shallow monitoring wells. From chromatographic analysis are determined the type of HC and amount of its components. In relation to water quality polluted by HC, benzene is special importance due to its very low permissible limit in drinking water (1 ppb). Benzene is carcinogenic and 35% of it is soluble in water.

INTRODUCCIÓN

Una fuerte transformación en la tecnología y en la vida del hombre, se produjo a partir del cambio de energía de vapor por hidrocarburo, a partir de los años 40s. El manejo y disposición de los hidrocarburos no contemplaba la repercusión de los efectos que causaría al infiltrarse al subsuelo. No fue sino hasta que se empezó a manifestar la contaminación de suelo y el agua, que se inició la cultura de la prevención de la contaminación y saneamiento del subsuelo y los acuíferos.

Por ello es común encontrar zonas contaminadas por fugas de hidrocarburos. En esta década de los 90s, se inició en México la exploración y saneamiento del subsuelo por hidrocarburos, con las limitantes que la economía del país ha permitido.

MOVIMIENTO DEL HIDROCARBURO EN EL SUBSUELO

El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. A manera de ilustración de este punto, a continuación se mencionan las características de los subsuelos de las ciudades de México y Guadalajara, ya que en la primera de ellas, la existencia de arcillas superficiales restringen la contaminación, mientras que en la otra, la alta permeabilidad del subsuelo permite la libre circulación del contaminante.

La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México se encuentra asentada sobre sedimentos arcillosos de origen lacustre, cuyo espesor varía de 20 a más de 80 metros. Estas arcillas presentan una permeabilidad reducida que las hace que funcionen como un acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita su salida por retención molecular). El flujo de agua en el acuitardo de la Ciudad de México es muy reducido; tiene una permeabilidad del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/seg. La presencia de estas arcillas en el subsuelo limita el movimiento del agua y de sus contaminantes, los que circulan en forma muy lenta, retardando la contaminación. Sin embargo, el contacto de zonas impregnadas de hidrocarburos con espacios abiertos en el subsuelo, tales como el drenaje, ductos telefónicos e infraestructura subterránea en general, pueden constituir zonas a través de las cuales pueda circular libremente el hidrocarburo en el subsuelo. También la existen-

cía de agrietamientos llega a permitir el flujo rápido de agua con hidrocarburos.

En contraste, el subsuelo de la Ciudad de Guadalajara esta constituido, en sus aproximadamente 20 metros superiores, por arenas pumíticas (llamadas localmente «jales»), las cuales presentan una alta permeabilidad que permite la libre y rápida infiltración de contaminantes al subsuelo. A profundidades de entre 5 y 15 metros se encuentra el nivel freático, sobre el cual se llegan a acumular fugas de hidrocarburos líquidos. La zona no saturada entre la superficie y el nivel freático, permite la libre circulación de volátiles, haciendo de ésta, una zona de alta vulnerabilidad.

CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Con el objeto de entender el comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo, se presentan algunas de sus características físicas y químicas.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos en una gasolina típica. Estudios efectuados por Fleischer et al (1986), enfocados a los 13 compuestos más comunes de las gasolinas, los dividió en los 4 grupos siguientes (1) Compuestos que preferentemente son absorbidos por la estructura del suelo; (2) los que se volatilizan rápidamente; (3) los que pueden causar mayor peligro; (4) los que no tienen un comportamiento de migración definido. En la tabla No. 1 se muestra la capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas.

Los hidrocarburos ligeros tienden a volatilizarse, mientras que los pesados permanecen entre las partículas del suelo (Lyman et al., 1992). Los hidrocarburos ligeros son conocidos como LNAPLS (Light-Nonaqueous Phase Liquids) (Nielsen, 1991).

Las gasolinas son utilizadas como combustible para máquinas. Los principales componentes químicos incluyen las cadenas de alcanos, cicloalcanos y los aromáticos. La primera cadena corresponde también a parafinas. El porcentaje en volumen de las cadenas mencionadas son de aproximadamente 51% para los alcanos, 36% para los cicloalcanos y 14% de aromáticos. En la tabla No. 2, se presentan algunos de estos compuestos en ciertas gasolinas.

El diesel es una mezcla de parafinas de cadena rota. Los diferentes tipos de hidro-

carburos comerciales, entre ellos la gasolina, tiene una solubilidad de 5 15 ppm a 20 °C y el diesel, corresponden a cortes de destilación. La gasolina contiene relativamente grandes concentraciones de aromáticos como benceno y tolueno. En contraste, en el diesel estos aromáticos prácticamente no se encuentran presentes.

Dentro de los productos del petróleo, los aromáticos corresponden al grupo más importante desde el punto de vista ambiental. El benceno, el tolueno y los xilenos, presenta densidades menores a uno. El benceno es el más soluble con hasta 1780 ppm a la temperatura ambiente. El tolueno

Los componentes aromáticos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) se consideran de más alta movilidad.

La identificación de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante un análisis de cromatografía (Kostecki, 1992), por medio del cual se llegan a identificar y cuantificar. En la figura 1 se muestra el cromatograma de una mezcla de hidrocarburos (Nyer, 1993), así como los rangos de destilación de ciertos compuestos y en la figura 2, los cromatogramas de algunos productos.

Tabla 1
Capacidad de absorción, volatilización y solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas.

COMPUESTOS DE LAS GASOLINAS	CAPACIDAD DE		
	ABSORCION POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACION (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a) Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pirano	100	0	0
Naftaleno	61	8	31
Fenantreno	88	2	10
1 pentano	0.1	99.8	0.1
Fenol	9	0.01	91
Tolueno	3	77	20
Xileno	15	54	31

Tabla 2.
Algunos de los principales constituyentes de las gasolinas (Adaptada por Perry y Modificada por Nyer 1993)

CONSTITUYENTES	VOLUMEN %		
	GASOLINA 1	GASOLINA 2	GASOLINA 3
ALCANOS			
n-PENTANO	0.33	0.44	1.12
n-HEXANO	6.44	7.75	9.15
n-HEPTANO	6.9	5.94	8.42
2-METILPENTANO	2.89	2.56	3.47
2,3-DIMETILHEXANO	0.22	1.3	2.39
CICLOALCANOS			
CICLOPENTANO	0.96	1.76	0.67
METILCICLOPENTANO	6.51	10.29	5.01
CICLOHEXANO	10.4	7.63	7.13
METILCICLOHEXANO	22	14.55	18.07
ETILCICLOPENTANO	2.03	4.38	2.34
TRIMETILCICLOPENTANO	3.64	8.12	4.18
AROMATICOS			
BENCENO	3.27	2.22	3.61
TOLUENO	16.19	7.94	12.02

Algunos constituyentes de los hidrocarburos puede ser cancerígenos, en especial el benceno. La norma de calidad para el benceno en agua es de 1 ppb. (parte por billón).

Los hidrocarburos se pueden encontrar en diferentes formas en el subsuelo como son: fase líquida; fase disuelta en el agua y fase absorbida por el suelo. Estudios recientes han adoptado el BTEX como una forma de expresar a los hidrocarburos

EXPLORACIÓN Y DELIMITACIÓN DE PLUMAS DE HIDROCARBUROS

En el Subsuelo

Parte de los hidrocarburos más comunes se volatiliza, propiedad que se aprovecha para, mediante perforaciones someras, realizar mediciones de los hidrocarburos volátiles existentes y delimitar la zona afectada.

El proceso de exploración se inicia con la perforación de pozos someros, mediante los cuales se realizan mediciones *in situ* y se obtienen muestras de gas y líquido para el análisis de cromatografía. Los resultados de las mediciones permiten delimitar la zona afectada y cuantificar el volátil y el líquido.

Pozos de Medición o Monitoreo

La perforación de los pozos someros de medición, se puede realizar mediante muestreadores manuales o perforadoras sencillas (Devitt, 1987). Son comunes los rotomartillos accionados por energía eléctrica. El rotomartillo «inca» barras de acero inoxidable generalmente de 3/4" de diámetro (Kva, 1990; Kerfoot, 1988). La perforación de este tipo de pozos generalmente alcanza de 2 a 6 metros de profundidad.

Mayores profundidades requieren máquinas perforadoras especiales que incluyen tuberías para perforación y muestreo de suelo, denominadas «augers» (Abdud, 1989).

Mediciones IN SITU

Una vez perforados los pozos someros, se pueden realizar mediciones *in situ* de hidrocarburos volátiles (HCV), oxígeno, explosividad y bióxido de carbono. Un plano con la distribución de HCV puede mostrar claramente la presencia y extensión de la zona contaminada. Los valores de explosividad, además de poder indicar la magnitud de la pluma, dan una «idea» del riesgo, aunque su medición puede estar afectada por la ausencia de oxígeno.

En todos los suelos existen bacterias que biodegradan a los hidrocarburos provocando: (1) ausencia de oxígeno que es consumido por la acción bacteriana y (2) abundancia de bióxido de carbono, como producto de la biodegradación, por ello, la medición y mapeo de los parámetros mencionados constituyen otras formas de delimitar las áreas impregnadas por hidrocarburos.

Cuando en las perforaciones de monitoreo se alcanza el nivel freático, se puede medir el espesor de los hidrocarburos líquidos (HCL) que se encuentran flotando sobre el nivel freático.

Muestreo de Hidrocarburos

El muestreo se puede llevar a cabo sobre muestras de suelo, gas, agua y producto líquido.

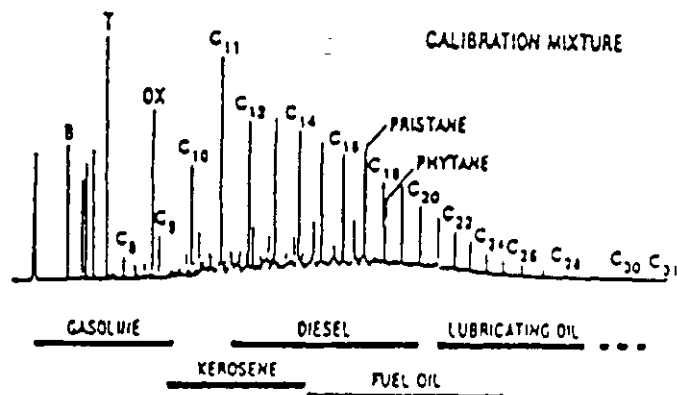


Figura 2.
Cromatogramas de mezcla de Hidrocarburos (Nyer, 1993)

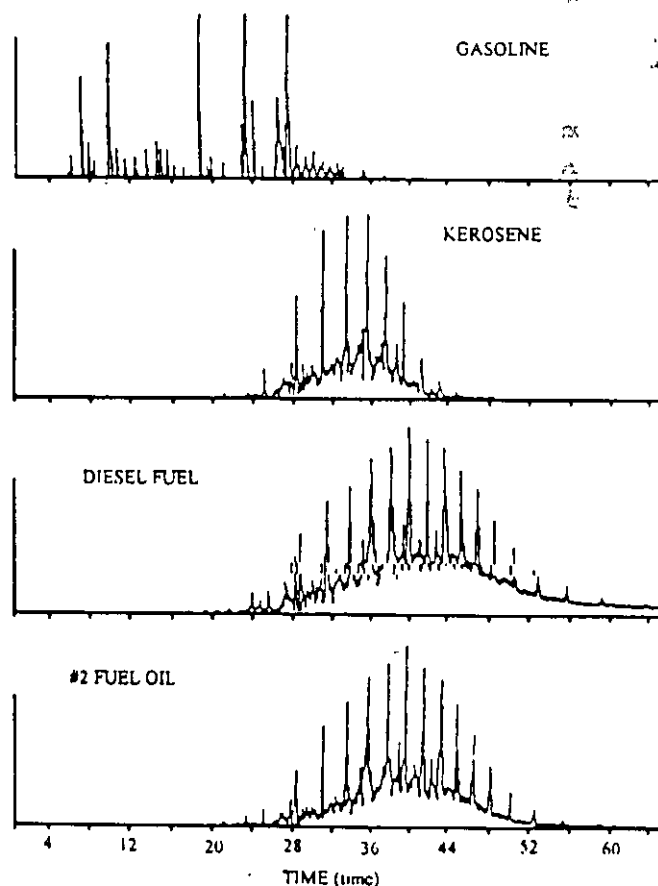
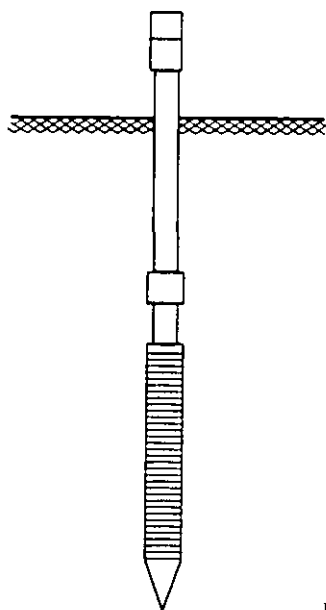


Figura 2.
Cromatogramas de diferentes Hidrocarburos (De Calabrese y Kosteck, 1989)

MUESTRAS DE SUELOS

Con el objeto de definir la litología del subsuelo y extraer muestras de suelo e hidrocarburos, se perforan pozos con obtención de núcleos de suelo inalterado, a partir de la superficie y hasta la profundidad total del pozo. Los núcleos son enviados al laboratorio para efectuarles un análisis de cromatografía. Existen varias formas de realizar el muestreo de núcleos de suelo. Generalmente para profundidades someras (1-10 m), el muestreo se realiza mediante un tubo de acero inoxidable, el cual incluye una punta cónica truncada; a través de ésta, entra el material arcilloso del suelo al tubo, al ser impulsado el muestreador hacia abajo. El tubo muestreador se encuentra revestido en su interior por un empaque de acetato, dentro del cual se aloja la muestra de material. Al sacar el tubo muestreador, se extrae el empaque de acetato y muestra de suelo, al que se le colocan tapas en las partes superior e inferior. Las tapas pueden ser de diferente color con el objeto de marcar la orientación de la muestra.

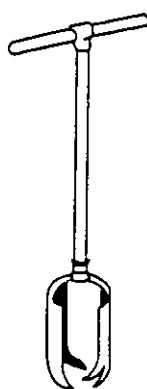
Para el muestreo a profundidades mayores de 10 metros, generalmente se utilizan máquinas perforadoras rotarias, equipadas con tuberías de perforación especiales para muestreo, denominadas «augers». En la figura 3 se muestran diferentes tipos de equipos de muestreo.



**MUESTREADOR
MEDIANTE INCADO
DE TUBERIA**



**MUESTREADOR
DE MAQUINARIA
ROTATORIA**



**MUESTREADOR
MANUAL**

Muestras de Gas

La obtención de muestras de gas en los pozos someros se realiza colocando un tubo plástico flexible dentro del pozo. Se extrae el gas por medio de una pequeña bomba o una hipodérmica y se almacena en bolsas especiales, fabricadas con materiales que no reaccionan con el hidrocarburo o bien en recipientes de vidrio. Las muestras obtenidas son enviadas al laboratorio para su análisis cromatográfico. Son comunes los cromatógrafos portátiles que pueden realizar el análisis en el sitio.

Muestras de Producto Líquido

Cuando la perforación alcanza el nivel freático, puede obtenerse una muestra de agua y del producto (hidrocarburo) líquido. Existen diferentes aparatos para su extracción. El producto líquido debe envasarse y sellarse en recipientes especiales.

Análisis de Laboratorio

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de gas, agua o suelo, son analizadas por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra. (figuras 1 y 2).

CONCLUSIONES

Las fugas de hidrocarburos y su consecuente contaminación de suelos y agua subterránea, son comunes en sitios donde se manejan estos productos, principalmente gasolineras y patios de ferrocarriles, autobuses y aeropuertos. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo depende del tipo y características del material que constituye el medio. Los hidrocarburos comerciales corresponden a cortes de destilación, que van de ligeros y alto grado de volatilización, a pesados o densos. La exploración y delimitación de hidrocarburos en el subsuelo se realiza mediante determinaciones de HCV, O_2 , CO_2 y BTEX, entre otros, medidos en pozos someros. Generalmente se obtienen muestras de gas, líquido y/o sólido para su análisis, cualitativo y cuantitativo, la técnica usual es la cromatografía de gases.

REFERENCIAS

- ABDUL, S.A. 1989. *Limitations of Monitoring Wells for the Detection and Quantification of Petroleum Products in Soil and Aquifers*. In: GWMR.
- ALLER, L. et al., 1989, *Handbook or Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells*.
- CALABRESE, E. J. and P.T. Kostecki, 1989. *Petroleum Contaminated Soils. Vol. 2 Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies*. Lewis Publishers, Inc.
- DEVITT, D. A. et al., 1987. *Soil Gas Sensing for Detection and Mapping of Volatile Organics*. National Water Well Association.
- KVA, ANALYTICAL SYSTEMS. 1990. *Soil Gas Equipment and Brief Field Techniques*. Publisher K-V Associates, INC.
- KERFOOT, H. B. 1988. *Is Soil-Gas Analysis, an Effective Means of Tracking Contaminant Plumes in Groundwater? What are the limitations of the Technology Currently Employed*, In: GWMR.
- KOSTECKI, P.T. AND E. J. CALABRESE 1992. *Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination*. Lewis Publishers.
- LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992. *Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments*. C. K. Sholey, Inc.
- NIELSEN, D. M. 1991. *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. National Water Well Association.
- NYER, E. K. 1993. *Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation*. Lewis Publishers.

Figura 3

Diferentes tipos de muestreadores

RESUMEN

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en 4 formas: líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; volátil en la zona no saturada; disuelto en agua y; líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por el material del medio o sedimentado en la base del acuífero (Lyman et al., 1992). Los métodos apropiados para el saneamiento del subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo. El saneamiento del subsuelo puede iniciarse con la extracción del HC líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo.

Como segundo paso se puede considerar la limpieza del suelo y acuífero contaminados, los cuales tienen una mayor complejidad

Para la extracción inicial de los productos líquido y volátil, el diseño y operación es «relativamente» sencillo. La remediación o saneamiento total del suelo y acuífero incluye técnicas sofisticadas, de alto costo y largo tiempo de ejecución. Existen diversos métodos, destacando entre ellos la extracción del contaminante y la biodegradación. La extracción por bombeo del producto líquido, es común, la cual se extrae junto con el agua del acuífero; una vez en la superficie el producto es almacenado en tanques y el agua extraída es tratada a fin de eliminar los volátiles que contenga. El volátil puede extraerse a través de pozos y, una vez en la superficie, puede ser incorporado a la atmósfera, incinerado o capturado mediante filtros de carbón activado

ABSTRACT

Infiltrated hydrocarbons (HC) underground are found in 4 phases. (1) Liquid of lower density than water, floating over the water level, (2) volatile in the vadose zone; (3) dissolved in water; (4) liquid of higher density than water, found absorbed by the environment or accumulated at the base of the aquifer.



The appropriate methods to clean underground polluted by HC depends of various factors. Some of them are: the phase in which the HC is found, its distribution and soil characteristics. Remediation usually begin with liquid and volatile extraction to reduce the risk. As a second step soil and aquifer cleaning is performed. To start extraction of HC, both liquid and volatile phases, is relatively simple. Total remediation of soil and aquifer includes sophisticated and expensive techniques performed for a long period of time. A common remediation method consists in extraction of liquid product and water by pumping. Once at the surface the product (liquid HC) is stored in tanks and water is treated to eliminate possible volatiles. The volatile phase can

SANEAMIENTO DE ACUÍFEROS

CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

be extracted through wells. Once in surface those volatiles can be incorporated to the atmosphere, incinerated or captured by activated carbon filters

INTRODUCCIÓN

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en varias formas tales como: (1) líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; (2) volátil en la zona no saturada; (3) disuelto en agua y, (4) líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por las partículas del suelo o sedimentado en la base del acuífero (Nielsen, 1991). Una vez conocida su presencia en el subsuelo, (en extensión, concentración, tipo de hidrocarburos y fase en que se encuentra), junto con el conocimiento de la geología y geohidrología del lugar, se pueden establecer las políticas de saneamiento

El o los métodos mas apropiados para el saneamiento de un subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo

En México, se puede dividir el saneamiento en 2 partes. La primera considera la extracción inicial del HC líquido y volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. La segunda parte se puede denominar la «limpieza total», del suelo y acuífero, la cual incluye técnicas sofisticadas de alto costo y largo tiempo de ejecución.

MÉTODOS DE SANEAMIENTO

Los principales métodos para el saneamiento del subsuelo y acuífero por hidrocarburos son: (1) extracción del HC líquido y volátil, (2) biodegradación *in situ* (Nyer, 1993)

Extracción de HC Líquido Y Volátil

Una vez delimitada la zona invadida por HC y cuantificada su concentración, se procede a extraerlo. El producto líquido es bombeado a través de pozos. Este, puede ser extraído junto con el agua del acuífero y una vez en la superficie, es separado (Fetter, 1993). En otros casos, el HC líquido que se encuentra en una capa flotando sobre el agua, de donde puede ser extraído mediante bombas especiales. Para acelerar la acumulación del HC en el entorno del pozo, puede bombearse agua y formarse un cono de abatimiento, cuya pendiente facilita el movimiento de la capa de HC que flota sobre el nivel estático, hacia el pozo. El HC y agua extraídos son procesados en la superficie (Figura 1)

La extracción de volátiles se puede realizar a través de pozos ubicados en la zona vadosa, donde se colocan extractores de aire (Kostecki, 1991, 1992). Pueden perforarse pozos para inyección de aire, que «empujen al volátil hacia su salida». La remoción de volátiles al inicio de la extracción es alta y va disminuyendo con el tiempo

Biodegradación *IN SITU*

Un método para el saneamiento de zonas afectadas por hidrocarburos es la biodegradación (Riser-Roberts, 1992; Calabrese, 1989; Hinchey, et al., 1992). Consiste en utilizar las bacterias que existen en todo

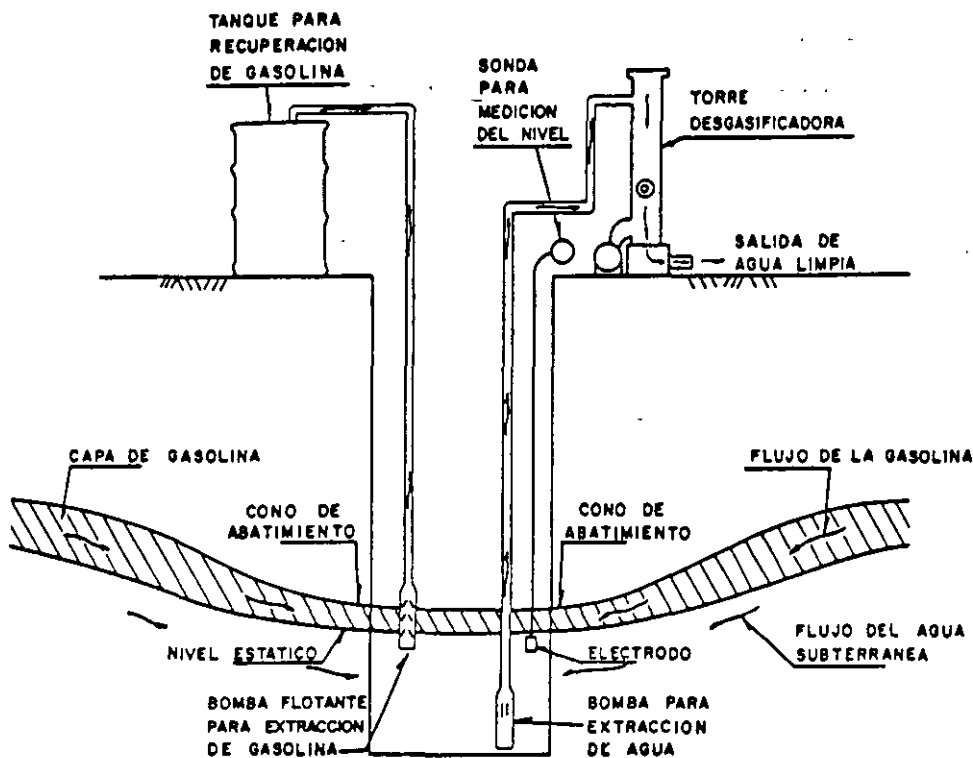


Figura 1.
Extracción de Hidrocarburos por bombeo y
tratamiento en superficie

suelo y que se alimentan de HC y oxígeno, formando bióxido de carbono y agua (Chapelle, 1993). Para acelerar este proceso, se pueden añadir nutrientes que aceleren la acción bacteriana, principalmente oxígeno, el cual se inyecta como gas o mediante agua. Debido al proceso de biodegradación mencionado, una zona invadida por hidrocarburos se caracteriza también por ausencia de oxígeno y abundancia de bióxido de carbono, parámetros que pueden monitorearse durante el saneamiento para determinar el grado de limpieza alcanzado.

EQUIPOS USUALES PARA EL SANEAMIENTO

Con el objeto de ilustrar tanto la forma en que se encuentra el HC en el subsuelo, así como las técnicas más comunes para su extracción o saneamiento, a continuación se describen varios productos comunes en el mercado

En la figura No. 2 se muestra un equipo Westinghouse para el tratamiento de hidrocarburos y agua subterránea extraídos del subsuelo. En el se observa un tanque separador de agua-hidrocarburos, un tanque para el almacenamiento del producto

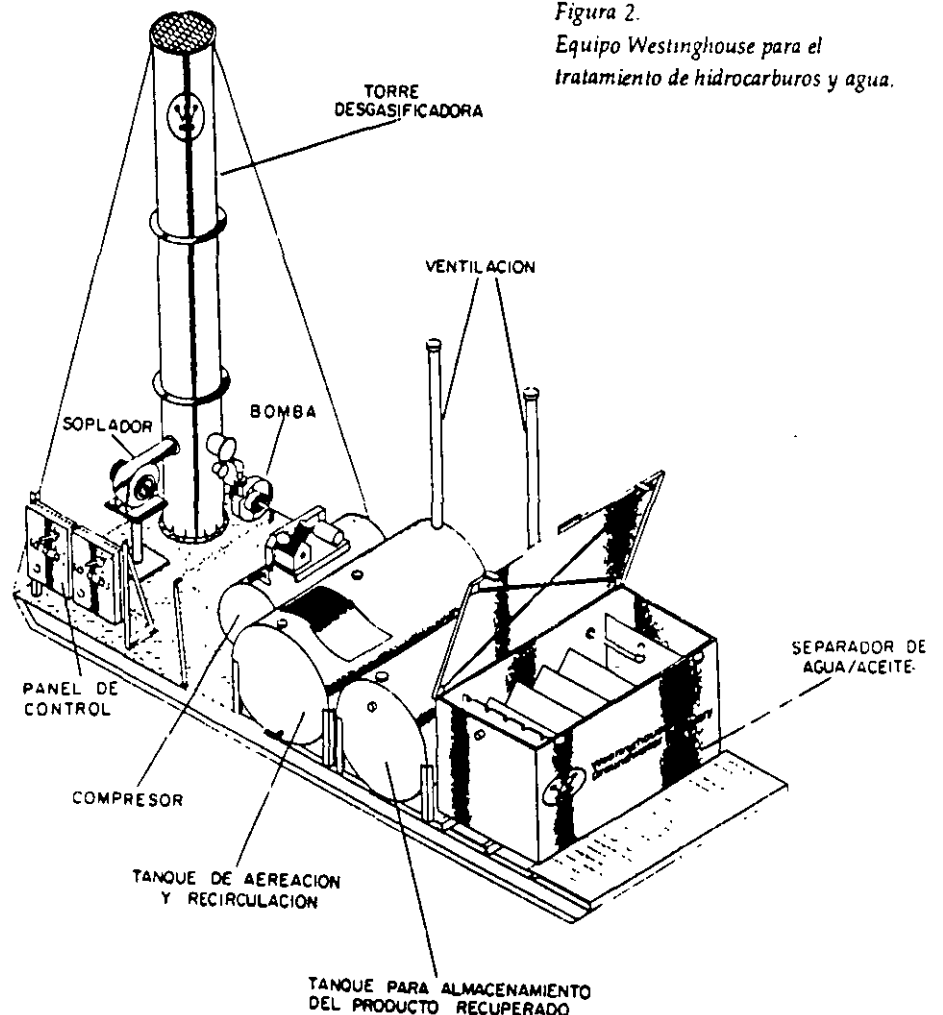


Figura 2.
Equipo Westinghouse para el
tratamiento de hidrocarburos y agua.

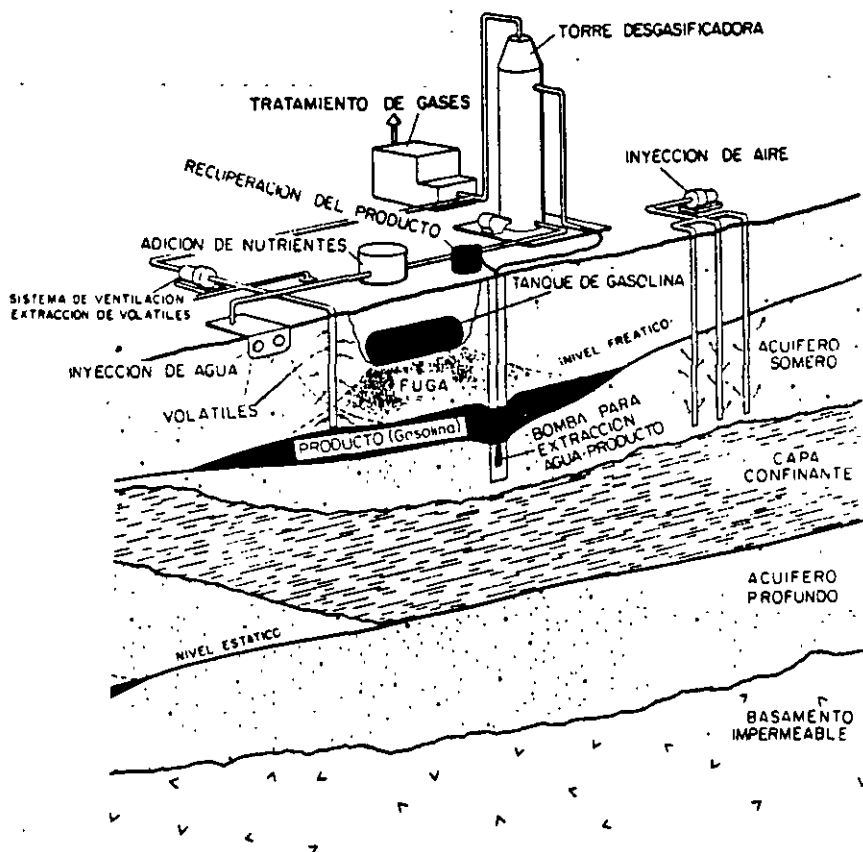
recuperado, un tanque de aereación, un compresor, un soplador acoplado a una torre desgasificadora y un panel de control.

En la figura No. 3 se incluye el sistema de ORS Environmental Equipment, para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátiles. En esta figura, se observa la presencia de un acuífero somero que es contaminado por fugas de un tanque de gasolina. El producto líquido se encuentra flotando sobre el nivel freático. También existen volátiles entre la superficie del terreno y el nivel freático. La extracción del hidrocarburo líquido se realiza mediante un sistema de bombas para la extracción, tanto del producto (HC líquido) como del agua. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada por una torre desgasificadora. El gas obtenido es tratado por oxidación catalítica o incinerado. En la misma figura, se ilustra la inyección de agua y nutrientes al subsuelo, lo que provoca biodegradación, además de «empujar» al producto hacia el pozo. Cuenta también con un sistema de extracción de volátiles, los que son conducidos a la planta de tratamiento de gases.

En la figura No. 4 se muestra la perforación de pozos direccionales para el saneamiento del subsuelo bajo infraestructura como edificios y tanques de almacenamiento.

En la figura No. 5 se incluye el sistema Environmental Instruments para la extracción y tratamiento del producto líquido y del volátil. Los volátiles son extraídos a través de un pozo y pueden ser conducidos a un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico. Un sistema de inyección de aire al subsuelo separa el volátil del agua, para posteriormente ser captado por un pozo. Mediante otro pozo, se extrae agua y producto (HC) líquido. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada a través de un separador de agua/producto. Posteriormente el agua pasa a un proceso de aereación, donde el volátil es separado y conducido hacia un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico.

En la figura No. 6 se muestra un esquema del sistema SENECA para la extracción y tratamiento del producto líquido y volátil del subsuelo. En dicha figura se ilustran pozos de extracción, tanto de volátiles como de producto líquido. Por lo que respecta al



DE ORS ENVIRONMENTAL EQUIPMENT CATALOG

Figura 3.
Sistema ORS/ENVIRONMENTAL EQUIPMENT para extracción y tratamiento de producto líquido y volátil.

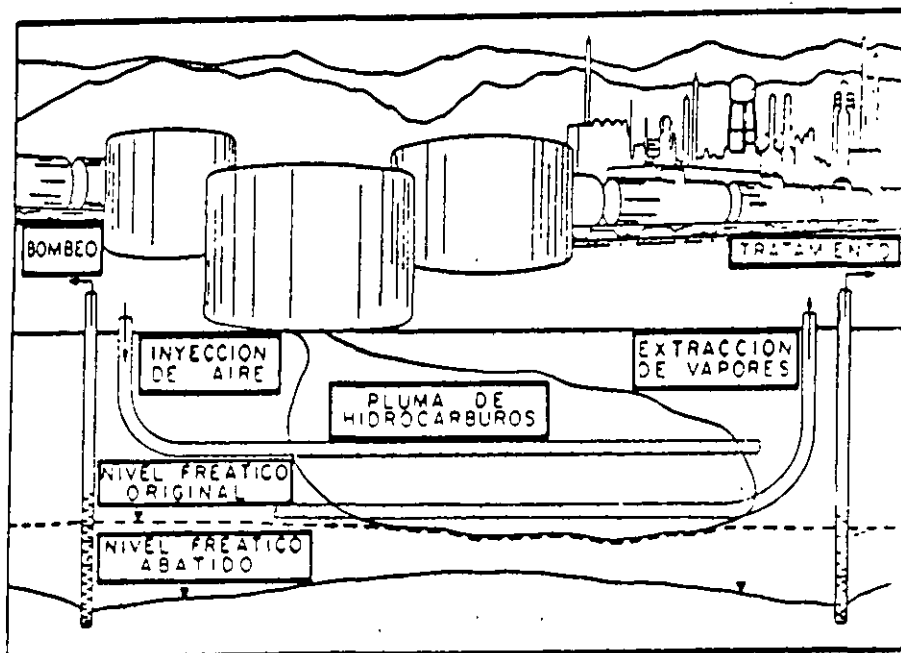


Figura 4.
Saneamiento de hidrocarburos del suelo mediante pozos direccionales (De Engineering-Science, Inc)

producto líquido, éste es extraído por un sistema múltiple de pozos y conducido a un tanque. Posteriormente pasa por un tanque de separación agua/producto. El agua obtenida es conducida a través de un desgasificador, en el que, por medio de un soplador, se produce un burbujeo que permite la separación del volátil del agua

CONCLUSIONES

El HC en el subsuelo y acuífero puede encontrarse en forma líquida, volátil o disuelta en agua. El saneamiento puede consistir en la extracción del HC (líquido o volátil), la cual puede realizarse a través de pozos. La biodegradación *in situ* es un método eficaz para la remoción de HC, hasta niveles bajos, tanto en suelo como en el acuífero. Los principios en que se basa el saneamiento es aplicado en forma comercial por un gran número de compañías productoras de equipo.

REFERENCIAS

CHAPELLE, F 1993 *Ground-Water Microbiology and Geochemistry*. John Wiley and Sons, Inc

FETTER, W. C., 1993 *Contaminant Hydrology*. Macmillan Publishing Company.

HINCHEE, R. E. et al., 1981 *Enhanced Bioreclamation, Soil Venting and Ground Water Extraction*. NWWA/API

Conference on Petroleum Hydrocarbons
KOSTECKI, P.T. AND J. CALABRESE. 1991. *Hydrocarbon Contaminated Soils and Ground-water*, Lewis Publishers

KOSTECKI, P.T. AND J. CALABRESE
1992 *Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination*. Lewis Publishers.

LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY
1992. *Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments*. C. K. Sholey, Inc

NYER, E. K. 1993 *Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation*. Lewis Publishers

NIELSEN, D. M. 1991 *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Water Well Association

RISER-ROBERTS, E. 1992. *Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites*, C. K. Sholey, Inc.

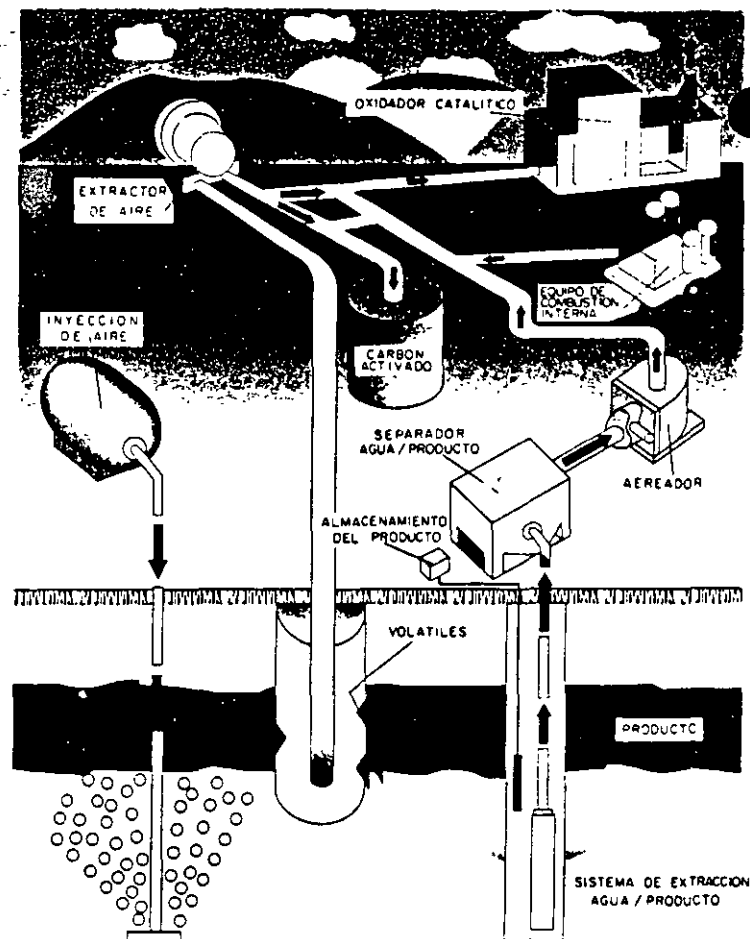


Figura 5.
Sistema Ambiental Instruments para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátil.

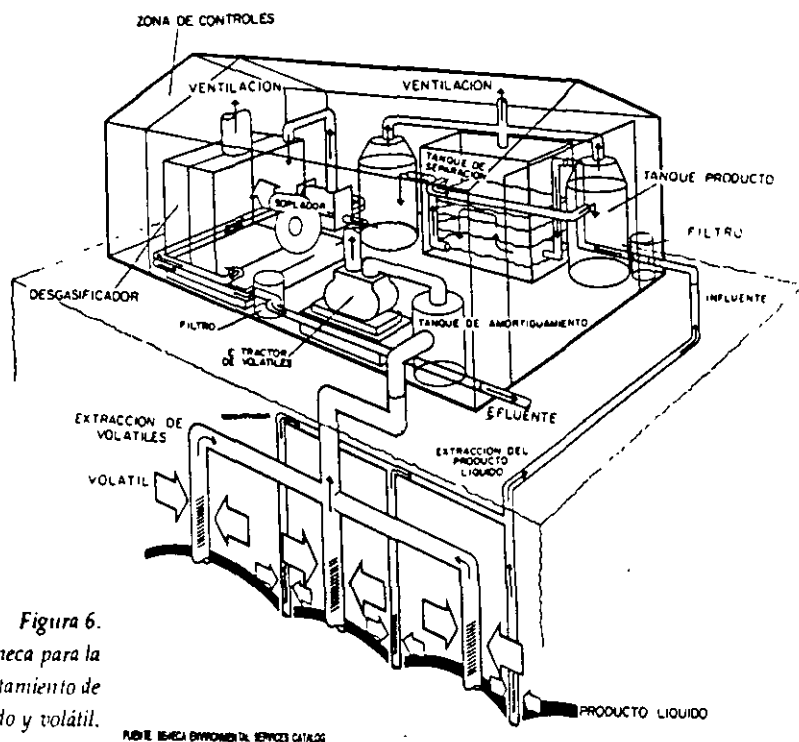


Figura 6.
Sistema Seneca para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátil.

FUENTE: SENECA ENVIRONMENTAL SERVICES CATALOG



Saneamiento de Acuíferos Contaminados por Hidrocarburos

Por: Juan Manuel Lesser Illades
Administrador
Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

Resumen

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en 4 formas: líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático o estático; volátil en la zona no saturada, disuelto en agua y; líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por el material del medio o sedimentado en la base del acuífero. Los métodos apropiados para el saneamiento del subsuelo contaminado por HC, dependen de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo. El saneamiento del subsuelo puede iniciarse con la extracción del HC líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo por explosividad. Como segundo paso se puede considerar la limpieza del suelo y acuífero contaminados, los cuales tienen una mayor complejidad.

Para la extracción inicial de los productos líquido y volátil, el diseño y operación es "relativamente" sencilla. La remediación o saneamiento total del suelo y acuífero incluye técnicas complejas, de alto costo y largo tiempo de ejecución. Existen diversos métodos, destacando entre ellos la extracción del contaminante y la biodegradación. La extracción por bombeo del producto líquido es común, el cual se extrae junto con agua del acuífero, una vez en la superficie el producto es almacenado en tanques y el agua extraída es tratada a fin de eliminar los compuestos volátiles que contenga.

Los componentes volátiles pueden extraerse a través de pozos y, una vez en la superficie, pueden ser incorporados a la atmósfera, incinerados o capturados mediante filtros de carbón activado.

Introducción

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en varias formas tales como: (1) líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático o estático; (2) volátiles en la zona no saturada; (3) disuelto en agua y; (4) líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por las partículas del suelo o sedimentado en la base del acuífero. Una vez conocida su presencia en el subsuelo, (en extensión, concentración, tipo de hidrocarburos y forma en que se encuentra), junto con el conocimiento de la geología y geohidrología del lugar, se pueden establecer las políticas de saneamiento.

El o los métodos más apropiados para el saneamiento de un subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la forma en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo.

Se puede dividir el saneamiento en 2 partes. La primera considera la extracción inicial del HC líquido y volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. La segunda parte se puede denominar la "limpieza total", del suelo y acuífero, la cual incluye técnicas completas de alto costo y largo tiempo de ejecución.

Métodos de Saneamiento

Los principales métodos para el saneamiento del subsuelo y acuífero por hidrocarburos son: (1) extracción del HC líquido y volátil; (2) biodegradación in situ.

Extracción de HC líquido y volátil

Una vez delimitada la zona invadida por HC y cuantificada su concentración, se procede a extraerlo. El producto líquido es bombeado a través de pozos. Este, puede ser extraído junto con el agua del acuífero y una vez en la superficie, es separado. En otros casos, el HC líquido que se encuentra en una capa flotando sobre el agua, de donde puede ser extraído mediante bombas especiales. Para formarse un cono de abatimiento, cuya pendiente facilita el movimiento de la capa de HC que flota sobre el nivel estático, hacia el pozo. El HC y agua extraídos son procesados en la superficie. (Figura 1)

La extracción de volátiles se puede realizar a través de pozos ubicados en la zona no saturada, donde se colocan extractores de aire. Pueden perforarse pozos para inyección de aire, que "empujen al volátil hacia su salida. La remoción de volátiles al inicio de la extracción es alta y va disminuyendo con el tiempo.

Biodegradación INSITU

Un método para el saneamiento de zonas afectadas por hidrocarburos es la biodegradación. Consiste en utilizar las bacterias que existen en todo suelo y que se alimentan de HC y oxígeno, formando bióxido de carbono y agua. Para acelerar este proceso, se pueden añadir nutrientes que aceleren la acción bacteriana, principalmente oxígeno, el cual se inyecta como gas o mediante agua. Debido al proceso de biodegradación mencionado, una zona invadida por hidrocarburos se caracteriza también por ausencia de oxígeno y abundancia de bióxido de carbono, parámetros que pueden medirse durante el saneamiento para determinar el grado de limpieza alcanzado.

Sistema Integral Saneamiento de Hidrocarburos (HC)

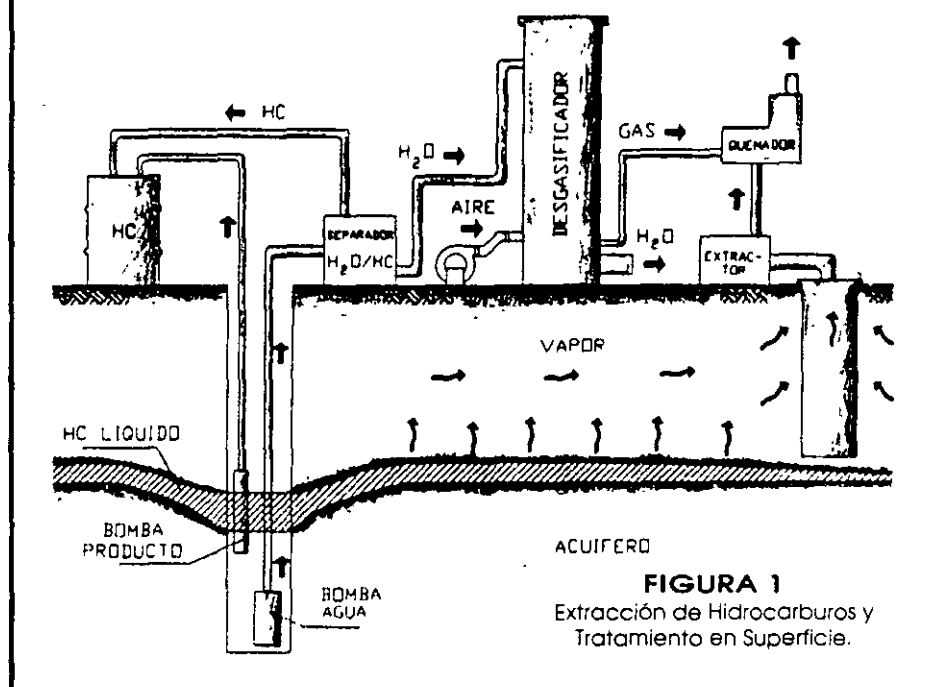


FIGURA 1
Extracción de Hidrocarburos y Tratamiento en Superficie.

Equipos usuales para el saneamiento

Con el objeto de ilustrar tanto la forma en que se encuentra el HC en el subsuelo, así como las técnicas más comunes para su extracción o saneamiento, a continuación se describen varios productos comunes en el mercado.

En la figura No. 2 se incluye el sistema de ORS Environmental Equipment, para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátiles. En esta figura, se observa la presencia de un acuífero somero que es contaminado por fugas de un tanque de gasolina. El producto líquido se encuentra flotando sobre el nivel freático. También existen volátiles entre la superficie del terreno y el nivel freático. La extracción del hidrocarburo líquido se realiza mediante un sistema de bombas para la extracción, tanto del producto (HC líquido) como del agua. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada por una torre desgasificadora. El gas obtenido es tratado por oxidación catalítica o incinerado. En la misma figura, se ilustra la inyección de agua y nutrientes al subsuelo, lo que provoca biodegradación, además de "empujar" al producto hacia el pozo.

Cuenta también con un sistema de extracción de volátiles, los que son conducidos a la planta de tratamiento de gases.

En la figura No. 3 se muestra un esquema del sistema SENECA para la extracción y tratamiento del producto líquido y volátil del subsuelo. En dicha figura se ilustran pozos de extracción, tanto de volátiles como de producto líquido. Por lo que respecta al producto líquido, este es extraído por un sistema múltiple de pozos y conducido a un tanque. Posteriormente pasa por un tanque de separación agua/producto. El agua obtenida es conducida a través de un desgasificador, en el que, por medio de un soplador, se produce un burbujeo que permite la separación del volátil del agua.

Conclusiones

El HC en el subsuelo y acuífero puede encontrarse en forma líquida, volátil o disuelta en agua. El saneamiento puede consistir en la extracción del HC (líquido o volátil), la cual puede realizarse a través de pozos.

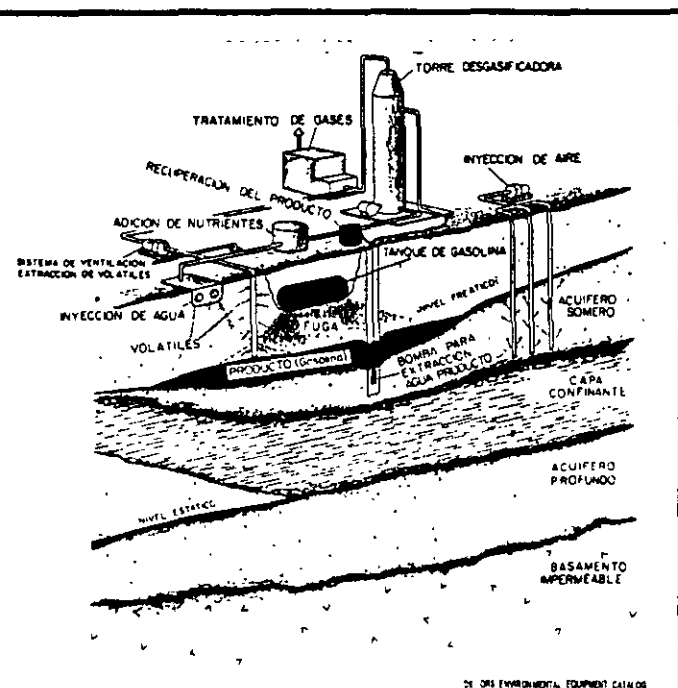


FIGURA 2

Sistema ORS/Environmental Equipment para extracción y
tratamiento de producto líquido y volátil

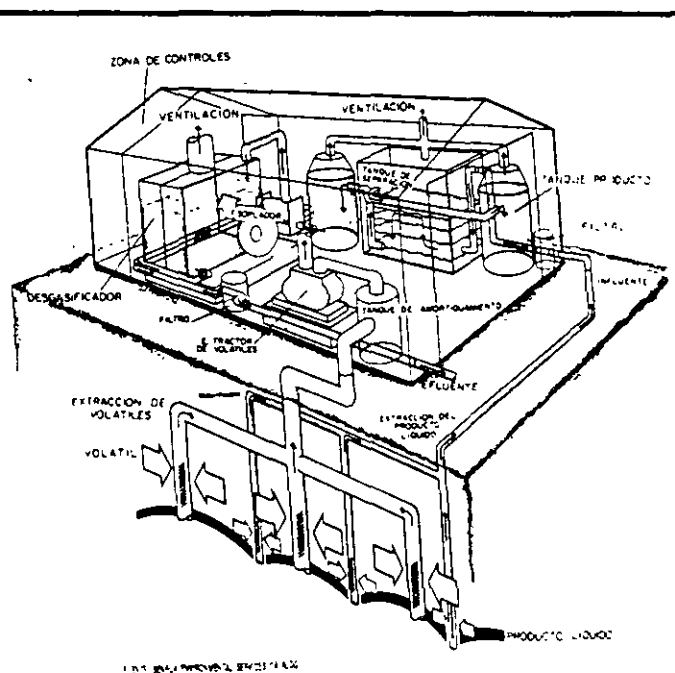


FIGURA 3

Sistema Seneca para la extracción y tratamiento de
producto líquido y volátil

La biodegradación in situ es un método eficaz para la remoción de HC hasta niveles bajos, tanto en suelo como en el acuífero. Los principios en que se basa el saneamiento es aplicado en forma comercial por un gran número de compañías productoras de equipo.

Referencias

- CALABRESE, E.J. AND P.T. KOSTECKI. 1989.** Petroleum Contaminated Soils Volume 2 Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies Lewis Publishers, Inc. 515 p
- CANTER L.W. AND R.C. KNOX. 1985.** Ground Water Pollution Control Lewis Publishers Inc 526
- HAYES, D. E. C. HERNRY AND S. M. TESTA. 1989** A Practical Approach to Shallow Petroleum Hydrocarbon Recovery
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE 1989.** Petroleum Contaminated Soils Volume 1 Lewis Publishers 357 p
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991.** Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater Lewis Publishers 354p
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE 1992** Contaminated Soils Diesel Fuel Contamination Lewis Publishers 227 p
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990** Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH
- LESSER, J. M. 1991** Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos Inter-Lexar CFE
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992** Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993** Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara Jalisco
- LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992** Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments C. K. Smiley, Inc. 375 p
- NYER, E.K. 1993** Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation Lewis Publishers 214 p
- RISER-ROBERTS, E. 1992** Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites C. K. Smiley, Inc. 244 p
- NWWA. 1991** Volatiles Organic Compound Cleanups An Anthology
- NWWA. 1991.** Ground Water and Soil Venting
- ROY F. WASTON, INC. 1988** Remedial Technologies for Leaking Underground Storage Tanks Lewis Publishers 216 p

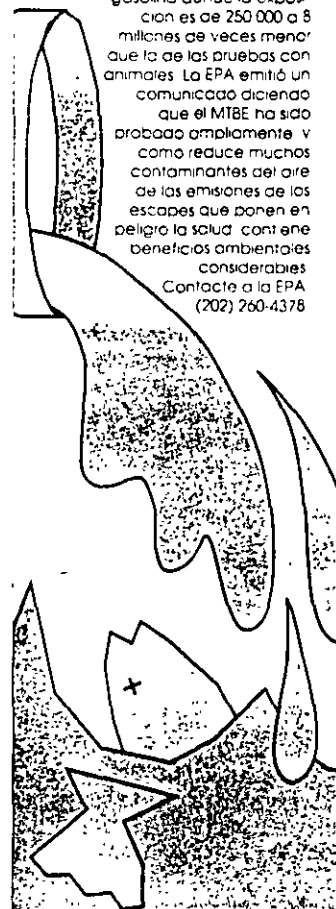
actualidades ambientales

Continúa el debate de la gasolina que se quema limpiamente

Los críticos de una gasolina que se quemó más limpiamente utilizada para reducir la contaminación del aire sostuvieron una conferencia acerca de si un aditivo en la gasolina está provocando que la gente se enferme. Un toxicólogo italiano, Cesare Maltoni, discutió un estudio que utilizó ratones y dijo que mostraba que el MTBE era un carcinógeno importante. Maltoni reconoció que las pruebas involucraron la inyección de dosis extremadamente altas durante períodos prolongados de tiempo. Robert Tarliff, un consultor de ciencias de la salud para la industria de los combustibles oxigenados, dijo que el estudio no era relevante para la gente que llenaba sus tanques de gasolina donde la exposición es de 250.000 a 8 millones de veces menor que la de las pruebas con animales. La EPA emitió un comunicado diciendo que el MTBE ha sido probado ampliamente y como reduce muchos contaminantes del aire de las emisiones de los escapes que ponen en peligro la salud, contiene beneficios ambientales considerables.

Contacte a la EPA
(202) 260-4378

Environmental News Briefing





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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA: DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE LIMPIEZA

**EXPOSITOR: M. EN I. HECTOR G. ZEGARRA M.
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

Evaluación de riesgo a la salud humana: definición de criterios de limpieza

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas en el estado del arte del saneamiento de suelos contaminados es la determinación de **límites de limpieza** que garanticen que el suelo ya no está contaminado. Estos límites se establecieron debido a que en el suelo nunca se alcanzarán concentraciones *cero* del contaminante porque no es factible en términos técnico - económicos. Aunado a esto, el desarrollo tecnológico ha permitido cuantificar concentraciones muy bajas distintas de *cero* de hasta partes por millón o por billón del contaminante (0.0001 o 0.000001 %).

Para resolver la cuestión de ¿qué tan limpio es limpio?, en algunos países en años anteriores, se desarrollaron *criterios interinos de límites de limpieza* que permitieron el desarrollo de las actividades de remediación. Sin embargo estos criterios carecieron de fundamentos científicos defendibles y se reportaron *límites de limpieza* que variaron arbitrariamente en órdenes de magnitud, por ejemplo, desde decenas hasta millares de mg de hidrocarburo por kilogramo de suelo de acuerdo con la ubicación geo-administrativa, incluso dentro de un mismo país.

Actualmente esta variando lo que entendemos por *contaminación, nivel de limpieza y remediación*, implementándose un paradigma que se mueve de límites estrictos generales sin fundamentos científicos demostrados a niveles particulares establecidos con base en criterios científicos y técnicos para proteger a la salud humana (Rifai, 1998). La evaluación del riesgo ha surgido como una de las herramientas más ampliamente utilizadas para estimar el riesgo a la salud que constituye un sitio contaminado y determinar los límites a los cuales no existe la posibilidad de que la población expuesta sufra de efectos tóxicos causados por la presencia de contaminantes. A través de los documentos publicados por la agencia ambiental de los EE.UU. y con el impulso de la ASTM, se ha adoptado en por lo menos 44 estados / territorios de la unión americana la metodología RBCA (Risk-Based Corrective Action) o adaptaciones de ésta para suelos contaminados (EPA, 1999).

De acuerdo con un estudio que evalúan el impacto económico de la aplicación de niveles de limpieza específicos, se ha observado una reducción del 40% tanto en costos como en el número de sitios que se consideraban contaminados (Quigley, 1995). Esto permitiría optimizar los recursos finitos destinados a la remediación de suelos al identificar sitios prioritarios de mayor riesgo. Aunado a esto, la aplicación de esta metodología puede ser una herramienta que concrete criterios requeridos por el marco legal actual, como ocurre en otros países con mayor experiencia y desarrollo en la remediación de suelos.

El presente trabajo busca introducir al lector en el paradigma y en los conceptos de la evaluación del riesgo y su aplicación en la determinación de límites de limpieza.

Entendemos por **riesgo** a:

"La posibilidad de sufrir un daño por exposición a un peligro"

Esta posibilidad del evento comúnmente se evalúa por un valor de probabilidad de ocurrencia de su efecto con consecuencias dañinas. Para el presente caso de riesgo toxicológico o a la salud, el daño está determinado tanto por efectos cancerígenos como por tóxicos no cancerígenos, mientras que el peligro lo establece la sustancia emitida. Como indica la definición propuesta, el peligro es la fuente del riesgo, pero solamente existe la probabilidad de ocurrir si hay exposición. Esta simple definición es suficiente para su concepción, aunque se han propuesto varias definiciones más elaboradas (ver recuadro 1). El análisis de riesgo es una disciplina que involucra la interacción de distintas especialidades para favorecer la identificación, evaluación, control y reducción de riesgos.

Su desarrollo involucra el uso de distintas herramientas de la ingeniería y de la ciencia, diferenciándose cuatro fases principales:

- I. Identificación del peligro
- II. Evaluación del riesgo
- III. Manejo del riesgo
- IV. Comunicación del riesgo

Recuadro 1. Definiciones de riesgo

La Comisión Preparatoria de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano(1978), definió el riesgo como la frecuencia esperada de un efecto nocivo producido por la exposición a un agente químico.

El potencial para la realización de consecuencias adversas e indeseables para la vida humana, la salud, la propiedad o el ambiente. La estimación del riesgo usualmente se basa en el valor esperado de la probabilidad condicional de que ocurra un evento ocasionando la consecuencia del evento dado (Society for Risk Analysis, 1999).

Posibilidad de sufrir un daño por un peligro. Probabilidad que algo cause daño combinado con el potencial de severidad del daño (Cohrssen y Cello, 1989)

Probabilidad de ocurrir un evento con efectos nocivos (Suter, 1993)

La probabilidad o oportunidad que una acción, circunstancia o evento indeseable o deseado resulte en pérdidas y daños (EPA, California Comparative Risk Project Report)

Una medida de la oportunidad de que un daño a la vida, salud, propiedad o al ambiente ocurra (EPA, glosario de Software for Environmental Awareness, Great Lakes National Program Office, 1997 y Office of pollution prevention and toxics)

Metodología

Aunque el análisis de riesgo tiene un sentido más amplio, para fines del presente documento se relacionará con el riesgo de la salud humana.

I. Identificación del peligro

En esta primera etapa se intenta responder la pregunta: ¿Existe un peligro?. Para contestarla se requiere consultar estudios toxicológicos y epidemiológicos, bioensayos con animales in vivo, pruebas en cultivo de tejidos y celulares in vitro, así como la relación estructura actividad. Para el caso de derrames de hidrocarburos se deben

considerar a todos los constituyentes que se encuentran presentes en la mezcla de hidrocarburos y sus aditivos, aquellos que por sus propiedades se consideren *peligrosos* se denominarán *constituyentes de preocupación potencial*. Es importante recordar que a través del tiempo los distintos derivados del petróleo han cambiado su composición en cuanto a la presencia de sus fracciones (monoaromáticos, polinucleoaromáticos, alifáticos, etc.) como de sus aditivos (tetra etilo de plomo, MTBE, TAME, etc.).

Un ejemplo de algunos compuestos derivados del petróleo que se han identificado como compuesto de preocupación potencial se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Ejemplo de posibles sustancias peligrosas

HIDROCARBUROS POLINUCLEOAROMÁTICOS	HIDROCARBUROS MONOAROMÁTICOS	Aditivos
Acenafteno	benceno	MTBE
Fenantreno	etilbenceno	Tetra Etilo de Plomo
Fluoreno	tolueno	
Fluoranteno	xilenos	
Antraceno		
Pireno		
Benzo(a)antraceno		
Metilnaftaleno		

II. Evaluación del riesgo

El objetivo de esta fase es estimar la severidad y probabilidad del daño a la salud humana por la exposición a determinada sustancia. Cuatro distintas, pero relacionadas, etapas se emplean en esta fase:

1. Evaluación de la contaminación
2. Evaluación de la toxicidad
3. Evaluación de la exposición
4. Caracterización del riesgo

1. Evaluación de la contaminación: En esta etapa se estima la concentración, ubicación y el área de la contaminación en ambientes residenciales, agrícolas, recreativos, industriales o comerciales.

Con la finalidad de evaluar la contaminación se debe realizar una adecuada recolección y evaluación de los datos.

1.1. Recolección de datos: Esta se basa en un plan adecuado de muestreo que considera el área afectada, la cual puede ocupar parte o todo el predio e incluso un área exterior a las fronteras del predio. El muestreo fuera del área contaminada puede afectar al análisis de riesgo por disminuir la concentración característica del sitio. A menudo, la determinación del área contaminada requiere para determinar su profundidad del muestreo representativo de la contaminación a varias profundidades.

Se debe considerar en la selección del método de laboratorio determinado para evaluar a la contaminación, que la cuantificación debe realizarse por especie o grupo de compuestos de interés. Las prácticas más usuales indican el uso de métodos cromatográficos - incluso acoplados a espectrómetros de masa - que permitan identificar o realizar una especiación por compuestos de interés y no así los métodos que agrupen a los compuestos como en el Método EPA 418.1 que cuantifica Hidrocarburos Totales del Petróleo o el método de Grasas y Aceites.

1.2 Evaluación de datos: La evaluación de los datos requiere de la participación de especialistas en la determinación del área contaminada y de su profundidad. A los valores reportados como "No Detectados" - menores al nivel de detección del método analítico - se le asigna un valor igual a la mitad del límite de detección reportado por el laboratorio (recomendado por EPA, 1992).

A juicio del especialista, se recomienda el empleo de este valor en vez del *nivel de detección* o *cero*, por considerar la posible presencia del compuesto en una concentración por debajo de la del límite de detección, pero que debido a las características de la contaminación en el sitio no se le puede asignar *cero*. La designación para los compuestos "No detectados" afectará el valor de exposición como se detallará más adelante en la *Evaluación de la exposición*.

2. Evaluación de la toxicidad: En esta fase se presenta y discute por cada compuesto la información de dosis de respuesta cuantitativa para cada constituyente de preocupación potencial. Las fuentes de información de la toxicidad de cada *constituyente de preocupación potencial* debe basarse en estudios científicamente comprobados.

Para tóxicos **no - cancerígenos** se requiere información sobre la *dosis de referencia* (RfD), que comúnmente va acompañada del efecto crítico en el cual se basó la RfD, Factor de incertidumbre (UF), Factor de Modificación (FM) y del nivel de confianza, así como de la referencia de la fuente de información. Los valores de RfD se basan en periodos de exposición crónicos, debido a los largos periodos de tiempo de exposición en los escenarios. La exposición subcrónica en cambio considera periodos de dos semanas a siete años. Un escenario en el cual se pueden emplear RfD subcrónicos es en el caso de trabajadores de la construcción. Para el caso en particular de la ruta de inhalación comúnmente se reporta una concentración de referencia (RfC) en vez de la RfD, su concepto es equivalente.

Por otro lado, para los **cancerígenos** se requiere el *factor de la pendiente de cáncer* que puede complementarse con información del tipo de cáncer observado, la especie animal empleada en el estudio y la clasificación del peso de la evidencia. Para la ruta de inhalación también se puede emplear la Unidad de Factor de Riesgo.

Tanto para tóxicos no cancerígenos como para los compuestos cancerígenos los valores deben estar referidos dependiendo de la ruta evaluada (por inhalación, dérmica

u oral). Para el caso de la toxicidad dérmica que se reporta como dosis adsorbida, es necesario ajustar la toxicidad oral. Se ha recomendado emplear un 5% de eficiencia de adsorción aunque otros valores incluyen 80% para compuestos orgánicos volátiles, 50% para compuestos orgánicos semivolátiles y 20% para inorgánicos.

Otra forma común de evaluar a los cancerígenos es a través de los Factores de Equivalencia de Toxicidad (TEF, por sus siglas en inglés). Por ejemplo para los hidrocarburos polinucleoaromáticos se puede fijar la concentración equivalente del Benzo(a)pireno como 1 y establecer para el Benzo(a)antraceno el valor TEF de 0.1, por el potencial relativo diez veces menor del Benzo(a)antraceno con respecto al Benzo(a)pireno.

Otro aspecto importante de considerar es la biodisponibilidad del compuesto. Aunque esta característica puede considerarse irrelevante debido a que los estudios en animales se reportan en dosis administrada y no en dosis biodisponible, se debe tener en cuenta los efectos de la matriz del medio.

3. Evaluación de la exposición: La exposición es el contacto de un organismo con uno o varios constituyentes de preocupación potencial en las fronteras de intercambio (p. ej. piel, pulmones e hígado). El objetivo de la evaluación de la exposición es determinar o estimar la magnitud, frecuencia, duración y ruta de la exposición en el área contaminada o fuera de ésta. La evaluación de la exposición incluye las siguientes secciones:

3.1. Caracterización de la exposición: En esta sección se incluye información de las características físicas del sitio y de la población. Las características de la población que se consideran son las que influyen en la exposición, como su ubicación y patrones de las actividades que realiza. Se deben considerar a los receptores actuales y a los futuros receptores. Adicionalmente, se puede incluir a subpoblaciones sensibles.

3.2. Identificación de las rutas de exposición: La ruta de exposición de un compuesto es el curso que el compuesto toma de la fuente contaminada al organismo. Una ruta de exposición describe un único mecanismo por el cual un individuo o población está expuesto a un *constituyente de preocupación potencial* originado en el sitio contaminado. Cada ruta de exposición incluye una fuente, un punto de exposición y una vía de exposición. Si el punto de exposición difiere de la fuente, entonces un medio de transporte/exposición (p. ej. el aire) o un medio debe incluirse. La *vía de exposición*, es la manera por la cual un *constituyente de preocupación potencial* entra en contacto con el organismo (p. ej. la ingestión, inhalación y el contacto dérmico).

En esta sección se identifican las rutas por las cuales las poblaciones previamente identificadas pueden estar expuestas. Así un modelo conceptual del sitio puede desarrollarse. Este modelo puede incluir a la(s) fuente(s) de contaminación, el(los) tipo(s) de contaminante(s), el(los) medio(s) afectado(s), las rutas de migración y los potenciales receptores. También se debe considerar el uso del suelo actual y futuro.

Algunos escenarios que se pueden incluir son: agrícola, residencial, comercial/industrial, visitantes y trabajador de la construcción.

3.3. Cuantificación de la exposición: La exposición para cada compuesto en específico por cada vía de exposición identificada se presenta en términos de la masa de la sustancia en contacto con el cuerpo por unidad del peso del cuerpo por unidad de tiempo (mg del compuesto/ kg de peso del cuerpo por día).

Para la evaluación de la exposición es necesario tener para cada especie química una *concentración de referencia* de la exposición. Esta *concentración de referencia* debería ser la concentración promedio real del sitio. Sin embargo, debido a la incertidumbre asociada con la estimación del promedio de la concentración real del sitio se debe emplear un límite estadístico adecuado, con base en la distribución de la concentración de cada constituyente de preocupación potencial. Un método común recomendado por la EPA es el empleo del límite de confianza superior con un percentil del 95 % (UCL95) sobre el promedio aritmético para una distribución normal o log-normal. Existe evidencia contundente que la distribución de la contaminación en el suelo es log-normal. Además, no debe de perderse de vista que la concentración de referencia para la evaluación de la exposición se emplea para cuantificar riesgos a futuro, la cual disminuirá a través del tiempo. Son estas las razones por las que no se recomienda el empleo del valor máximo reportado, incluso un valor alejado de los demás puede ser representativo de una singularidad.

La cuantificación de la exposición se realiza en dos etapas, primero se estima la concentración de la exposición y después la administración por vía de exposición.

3.3.1 Determinación de las concentraciones de exposición: Para determinar la concentración del constituyente de preocupación potencial en cada punto de exposición se deben emplear modelos de transporte y destino de cada compuesto (ver Tabla 2). Algunas estimaciones de la concentración se deben realizar para el punto de exposición en agua subterránea, suelo, aire, agua superficial, sedimentos o alimentos.

Tabla 2. Modelos comúnmente requeridos para calcular factores de transferencia entre medios

Medio fuente	Factores de transferencia entre medios	Medio destino	Transporte lateral
Superficie del suelo	Volatilización Emisión de partículas	Aire (exterior)	Si
Subsuelo	Volatilización	Aire (exterior)	Si
Subsuelo	Volatilización a espacios cerrados	Aire en interiores	
Agua subterránea	Volatilización	Aire (exterior)	Si
Agua subterránea	Volatilización a espacios cerrados	Aire en interiores	
Suelo	Lixiviación / Atenuación / Dilución	Agua subterránea	Si

Mancha (disuelta o en producto libre)	Dilución	Agua subterránea	Sí
---------------------------------------	----------	------------------	----

3.3.2. Estimación de la administración: La administración (I , mg/kg peso del cuerpo al día) es cantidad del compuesto en la *vía de exposición* (p. ej. la ingestión, inhalación y el contacto dérmico). Para determinarla se debe conocer la *concentración de exposición* C (p. ej. para ingestión mg/l), la tasa de contacto (CR , p. ej. para ingestión l/d), la frecuencia de exposición (EF , días/año), la duración de la exposición (ED , años), el peso promedio del individuo (BW , kg) y el tiempo promedio de la exposición (AT , días) y se calcula con la siguiente ecuación genérica:

$$I = C * \frac{CR * EF * ED}{BW} * \frac{1}{AT}$$

Para la estimación de la administración se puede emplear - dependiendo del nivel incertidumbre manejada en la evaluación del riesgo - valores supuestos establecidos para varios parámetros por agencias internacionales o valores reales del sitio. Los supuestos para la estimación del riesgo se basan en los parámetros establecidos como *Exposición Máxima Razonable* (RME, por sus siglas en inglés), aunque su empleo ha sido duramente criticado. Otra opción es el empleo de los supuestos de la *Exposición de Tendencia Central* (CTE).

4. Caracterización del riesgo: Es la última sección de la *evaluación del riesgo*, en ésta se integra los resultados de las fases previas. Esta fase cuantifica el *riesgo del sitio* y determina las concentraciones máximas para garantizar que no se rebase el *riesgo aceptado*, a esta concentración se le denomina *Límite de Limpieza*. Parte de la información generada sirve para la siguiente fase de *manejo del riesgo*.

La información usualmente se presenta por compuesto, vía y receptor, permitiendo la observación de valores acumulados de riesgo de cáncer e índice de peligro (toxicidad).

Una de

Se recomienda determinar la incertidumbre del proceso. Una de las alternativas es el *análisis de sensibilidad*, sin embargo, un recurso más poderoso es el análisis de la incertidumbre por simulación tipo *Monte Carlo*. El análisis de la incertidumbre para la aplicación de modelos matemáticos involucra la determinación de la variación o imprecisión en una función de salida basado en la variación colectiva de los modelos de entrada, mientras que el análisis de sensibilidad involucra la determinación de los cambios en el modelo de respuesta como resultado de los cambios en los parámetros del modelo individual.

III. Manejo del riesgo

Emplea la información de la identificación del peligro y la de evaluación del riesgo junto con información técnica, social, económica, política y opciones de control y respuesta para determinar que acciones que se deben realizar para reducir el riesgo.

Es importante destacar la relación entre la *Evaluación del Riesgo* y el *Manejo del Riesgo*. La *Evaluación del Riesgo* tiene un sentido más "técnico" y "puro" sin la

influencia de valores sociales, económicos y políticos, mientras que el Manejo del riesgo si los puede considerar. Un ejemplo práctico, suponga que usted esta realizando una *Evaluación del Riesgo* de un sitio contaminado con hidrocarburos, al seleccionar los escenarios uno puede incurrir en el error de considerar las medidas de mitigación, como sería en el caso de considerar las tecnologías de limpieza (no la atenuación natural), por lo cual se reduciría el *riesgo real del sitio contaminado*.

IV. Comunicación del riesgo

En esta fase las partes interesadas transmiten e intercambian información sobre los niveles de riesgo a la salud humana y los *Límites de Limpieza* determinados para asegurar un riesgo aceptable. Así como las medidas de acción necesarias para alcanzar dicho riesgos.

A menudo la comunicación del riesgo involucra al generador del riesgo y/o a las autoridades competentes.

ANEXOS

ANEXO 1. Límites de Limpieza Basados en Riesgo y Acciones Correctivas Basadas en Riesgo (RBCA)

La metodología denominada por EPA como RBCA por sus siglas en inglés de Risk-Based Corrective Action, se utiliza ampliamente en la Unión Americana. Anteriormente los límites de limpieza se basaban en comparaciones directas con los límites establecidos por otras agencias. Un ejemplo claro era el límite de limpieza basado en las concentraciones máximas permisibles en agua potable que se aplicaba para derrames de derivados del petróleo en el suelo con contacto con el agua subterránea. Este límite denominado MCL - por sus siglas en inglés - es siempre más bajo que el basado en riesgo debido a que considera más vías de exposición y no contempla los factores reales de atenuación del sitio. Los MCL, aunque se basen en riesgo a la salud - entre otros valores como el olor, color, sabor y frecuencia de aparición - consideran más escenarios y vías de exposición del contaminante en el entorno del receptor, como la ingestión por alimentos, contacto con materiales, etc.

A partir de 1994, la American Society for Testing and Materials publica una guía para la realización de acciones de corrección para sitios con derrames de petróleo. Esta guía permitió determinar el riesgo real de los derrames y permitió - tanto al gobierno, consultores, responsables del derrame, etc. - tener una herramienta que permitiera determinar un límite de limpieza real de la contaminación bajo el escenario del sitio. Este incremento en el límite de limpieza tuvo fuertes repercusiones en la disminución de los costos de tratamiento.

La guía RBCA no solamente considera a la evaluación del riesgo, sino que involucra a un proceso de tomas de decisiones para la evaluación y respuesta a los derrames, basado en la protección a la salud y al ambiente. Aunque recomienda para determinados casos una evaluación más detallada, el riesgo ecológico de acuerdo con RBCA sólo se cualifica y no se cuantifica, considerando sólo posibles impactos de los hábitats o recursos sensibles, como las especies económicamente más relevantes y especies en vías de extinción. Como antecedentes al RBCA para la evaluación del riesgo a la salud humana se encontraban los lineamientos del Superfund, desde 1989. Mientras que para la evaluación de riesgos ambientales, recién se han desarrollado hace un tres años.

De acuerdo con la guía RBCA se realiza como primer paso una **evaluación inicial del sitio** que involucra la determinación de los *constituyentes de preocupación potencial* (I. *Identificación del peligro*), extensión del medio afectado (II.1. *Evaluación de la contaminación*) y rutas potenciales de migración y *receptores* (II.3.1. *Caracterización de la exposición*; y II.3.2. *Identificación de las vías de exposición*). De acuerdo con esta información se puede obtener una **clasificación del sitio** basándose en cuatro escenarios los cuales van de mayor a menor severidad requiriendo una inmediata o mediata acción. La clasificación de los escenarios se basa en efectos a la salud y a los recursos sensibles, si el efecto es inmediato se considera la primera clasificación, si el

efecto es a corto plazo (menor de dos años) se consideran la segunda clasificación, si el efecto es a largo plazo (mayor de dos años) es de clasificación 3 y si no se demuestran efectos a largo plazo pertenece a la cuarta clasificación.

Posteriormente se pasa a la primera etapa de evaluación (**Tier 1**) en la que se realiza una *evaluación del riesgo* con varios supuestos y se determina los *límites de limpieza* preliminares (RBSL). Si las concentraciones de exposición del sitio son mayores a las del límite de limpieza preliminares, entonces se puede implementar un plan de acción (IV. *Manejo del Riesgo*) o si se considera adecuado se puede realizar una segunda *evaluación del riesgo* (**Tier 2**) con datos más representativos del lugar. Otra opción es realizar acciones provisionales y volver a clasificar el sitio para continuar con las etapas de evaluación.

Después de la segunda *evaluación del riesgo*, puede seguir una tercera (**Tier 3**). Esta secuencia de evaluaciones implica cada vez un análisis más detallado con información cada vez más cercana a la realidad (ver Tabla 1.A.). Para la *evaluación de riesgos* esto implica parámetros más reales del lugar y modelos más avanzados, pero que supuestamente repercute en un incremento del *límite de limpieza* - con su consiguiente disminución en los costos del saneamiento. Este incremento en el *límite de limpieza* se debe a que los parámetros generales son muy conservadores, por lo que "inflan" el riesgo cuando es de suponerse que los valores reales son menores. Se debe recalcar que no se recomienda que las vías de exposición, ni los escenarios, ni los receptores se incrementen, lo que debe variar son algunos de los parámetros supuestos y los modelos cada vez más avanzados y también menos conservadores. Por otro lado la incertidumbre se reduce con cada secuencia de evaluación, pero también se incrementan los costos de la *evaluación del riesgo* - que comparativamente deben ser menores al ahorro en el saneamiento por el incremento en el *límite de detección*.

Tabla 1.A. Secuencia de las etapas de evaluación del riesgo en RBCA

ETAPA	Límite de la concentración	Información requerida	Evaluación	Característica	Si la concentración del suelo* es mayor al límite.
1a	RBSL (Risk-based screening levels)	Tipo de contaminante y rutas potenciales de exposición	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Preliminar • Varios supuestos 	No específica Conservadora (menor concentración de las tres etapas) Evaluación preliminar	(1) Remediar hasta RBSL (2) Etapa 2
2a	SSTL (Site-specific target level)	Modelos simples de transporte y destino	<ul style="list-style-type: none"> • Medio • Algunos supuestos 	Específica Poco conservadora Evaluación del sitio	(1) Remediar hasta SSTL (2) Etapa 3
3a	SSTL (Site-specific target level)	Modelos avanzados de transporte y destino	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo • Pocos supuestos 	Específica Muy poco conservadora	Remediar hasta SSTL

* La concentración del suelo debe ser la concentración más representativa de la concentración promedio real (no la de la muestra) del suelo a futuro. Esto debido a que la evaluación se basa en efectos a la salud en los siguientes años de la población expuesta.

NOTA: El avanzar de etapa presume un límite de concentración menos conservador, esperando que aumente el límite al avanzar de etapa, por lo que se espera un menor costo de saneamiento. Todas las etapas tienen el mismo "nivel" de protección a la salud humana (riesgo aceptable), el aumento del límite y

la disminución del costo se debe a la información y modelos utilizados.

ANEXO 2. Criterio de expertos

Las metodologías de cuantificación del riesgo y la determinación del nivel de limpieza con base en éste son herramientas invaluable para la evaluación del riesgo. Sin embargo los supuestos metodológicos que conllevan todo el paradigma del riesgo así como los supuestos involucrados en el escalamiento de los valores toxicológicos de animales a humanos, los supuestos en todos los modelos del transporte y destino de los contaminantes y en general de todos los parámetros empleados así como su incertidumbre asociada hace necesario que a través del criterio de expertos se complemente el análisis e interpretación de la información generada.

La aplicación del criterio de expertos va más allá del requerido para la cuantificación del nivel del riesgo y los niveles de limpieza, como es el caso en la determinación de los escenarios. Involucra además, un análisis más global que considera toda la información que se obtuvo o generó del sitio real y la experiencia y antecedentes observados por el experto. Algunos análisis que permiten complementar la evaluación del riesgo toxicológico incluyen la determinación del riesgo por explosividad, determinación de la vulnerabilidad del acuífero e impacto al suministro del agua potable, riesgos ambientales y daños a los bienes, entre otros.

El **riesgo por explosividad** es necesario considerarlo para evitar muertes súbitas y daños a los bienes. La mezcla de oxígeno con compuestos volátiles, como los hidrocarburos, aunado con una fuente de ignición pueden provocar una explosión. Por esto los niveles de limpieza no se pueden basar sólo en criterios riesgos de toxicidad y cáncer, debido a que la detección de un alto riesgo de explosividad sobre la base de los monitoreos realizados en el sitio puede dictaminar un criterio de limpieza distinto al de toxicidad, requiriendo acciones de remediación inmediatas y distintas a las involucradas en la disminución del riesgo a la salud humana.

En mezclas de hidrocarburos los criterios de limpieza a menudo se fijan con base en el riesgo a la salud para determinadas sustancias que han demostrado su toxicidad y carcinogenicidad y no necesariamente se incluyen a todas las explosivas. Debido a la gran complejidad de sustancias involucradas en las mezclas de hidrocarburos (gasolinas, queroseno, diesel, etc.) se evalúan sólo algunas sustancias prioritarias como los BTEX y determinados hidrocarburos polinucleoaromáticos y no toda la mezcla de compuestos que pueden ser explosivos (p. ej. hexanos). Aunado a esto se conoce que las explosiones se realizan no forzosamente por una elevada concentración de compuestos orgánicos volátiles, basta con una cantidad adecuada que sature un sistema cerrado (p. ej. un ducto del drenaje) con una mezcla adecuada de oxígeno y un detonante para producir una explosión.

Los acuíferos, debido a su alta calidad, son y/o pueden ser a futuro una fuente prioritaria de suministro de agua potable. Debido a que la contaminación del suelo puede involucrar el deterioro de la calidad del agua del acuífero es importante realizar

estudios que permitan evaluar el **riesgo potencial de contaminación hidrogeológica**. Un método sistemático empleado muy a menudo es DRASTIC (Aller et al., 1987). DRASTIC es un método que permite evaluar y conformar gráficas de la vulnerabilidad¹ del acuífero por contaminación a través de la designación de unidades hidrogeológicas y emplea un sistema de graduación de acuerdo con los siguientes factores principales de vulnerabilidad que conforman sus siglas en inglés:

Depth: profundidad al nivel estático
 Recharge: Recarga neta
 Aquifer media: medio del acuífero
 Soil media: tipo de suelo
 Topography: topografía
 Impact of the vadose zone media: impacto de la zona vadosa
 Conductivity, hydraulic: conductividad hidráulica

DRASTIC, emplea un esquema de graduación relativa que utiliza una combinación de "pesos" y "grados" para producir el índice DRASTIC (valor numérico). Con base en este índice se despliega gráficas de las unidades hidrogeológicas. DRASTIC permite dar prioridad a los esfuerzos de protección, monitoreo y limpieza (algunos supuestos y limitaciones se encuentran en el Recuadro 2). Una herramienta útil para el manejo de la información y visualización de la información son los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el empleo del SIG es común emplear la paquetería ARC/INFO Y ARC/VIEW. De acuerdo con los críticos de DRASTIC uno de sus mayores desventajas en el uso por individuos sin experiencia.

Recuadro 2. Supuestos y limitaciones de DRASTIC

Aunque algunas publicaciones emplean el método DRASTIC como fue publicada en su fuente original, existen reportes de adecuaciones (Secunda, 1998) y modificaciones (NAWQA, 1999) para disminuir sus limitaciones y salvar sus supuestos:

Supuestos:

Área mayor a 0.4 km² (20x20)
 Contaminación en la superficie de la tierra
 El contaminante fluye con el agua subterránea por precipitación (transporte por infiltración)
 El contaminante presenta la movilidad del agua

Las mayores **limitaciones** son por no considerar:

La actividad humana en agua subterránea
 Fracturas y fallas. El lecho fracturado es característica de mayor vulnerabilidad que incluso las gravas y las arenas.
 Efectos significativos de precipitación (duración e intensidad).
 Reactividad del suelo
 Diferente movilidad entre contaminantes
 Anisotropía y heterogeneidad del suelo
 Zona vadosa
 Conductividad hidráulica del acuífero
 Dilución

Los **riesgos ambientales** se realizan para evitar impactos irreversibles. El escenario del sitio y el conocimiento del analista establecerá criterios de limpieza para protección de los ecosistemas sensibles (p. ej. presencia de especies protegidas, en peligro de extinción, etc.) o que permitan una actividad económicamente rentable (pesca en algún

¹ La vulnerabilidad es la tendencia o probabilidad de los contaminantes de alcanzar una posición específica en el sistema de agua subterránea después de su introducción en algún lugar superior del acuífero (NCR, 1993).

cuerpo de agua, fuentes de agua para el ganado, para uso industrial u otro ajeno al potable, etc.). En estos casos los criterios no sólo se deben basar en impactos en la salud humana, sino que se deben designar animales o plantas blanco para determinar su riesgo.

ACEPTACIÓN DEL RIESGO

Aceptación del riesgo, límites de limpieza y costos

Un aspecto prioritario es la determinación de la aceptación del riesgo. A finales de los años setenta y comienzo de la década de los ochenta, varias agencias de los EEUU adoptaron el criterio de “uno en un millón” como un nivel de riesgo insignificante a escala social. De acuerdo con la FDA – la primera agencia que estableció el nivel de aceptación del riesgo – el nivel de “uno en un millón” se estableció por la necesidad de fijar un número necesariamente finito que fuese la referencia que permitiera la realización de evaluaciones de riesgo. Este nivel significa un incremento del riesgo de un efecto adverso en “uno en un millón” para un periodo de vida de 70 años. La filosofía de este nivel se basó en brindar la seguridad que el riesgo humano virtualmente no existiera. Es necesario considerar que aunque para efectos de cálculos matemáticos e interpretación de datos se fija para una persona con cáncer en un millón, en realidad el riesgo es menor debido a los parámetros usualmente conservadores en los supuestos científicos de la evaluación del riesgo (ASTM).

El riesgo de “uno en un millón” se fijó con base en el concepto “De Minimis” - el riesgo a un nivel tan bajo que sea usualmente ignorado (ver más adelante *Opciones para determinar el riesgo aceptable*). Resulta razonable su empleo, considerando que el riesgo de “uno en un millón” es 200 veces menor con respecto al riesgo de “2 en 10 000” de morir en un accidente de automóvil y sin embargo los estadounidenses continúan manejando carros.

En EEUU, la FDA y posteriormente la EPA emplearon el límite de “uno en un millón” (1×10^{-6}) para toda la población norteamericana, sin embargo se ha empleado el valor de “uno en 10 000” (1×10^{-4}), para poblaciones pequeñas.

El nivel de aceptación del riesgo tiene por característica ser universal, pues se fija independientemente de la sustancia y afecta directamente al nivel de limpieza calculado. Por ejemplo, en un ejercicio de estimación del nivel de limpieza presentado en la siguiente tabla se obtiene para el benceno una concentración de limpieza de 10 ppm con un nivel de riesgo de “uno en un millón” y de 1 000 ppm para “uno en 10 000”, es decir 100 veces más elevado. En términos de costos, alcanzar un nivel de limpieza cien veces menor equivale a incrementar los costos de forma exponencial.

Tabla 4. Ejemplo del efecto del riesgo aceptable en el límite de limpieza

Riesgo de cáncer		Concentración en suelo (ppm)
1×10^{-4}	“uno en 10 000”	1 000
1×10^{-6}	“uno en un millón”	10

Para un escenario de receptor industrial/comercial considerando las vías de exposición dérmica, por ingestión e inhalación.

Participación en la definición del nivel aceptable

No se debe de perder de vista, que en México no se ha dictaminado aún un valor de aceptación del riesgo y que compete a las autoridades y el concurso de la sociedad participar en su desarrollo.

Debido a que toda tecnología, actividad o sustancia conlleva un riesgo, es prácticamente imposible eliminarlo. Incluso la prohibición de la fuente generará otra sustituta para satisfacer la necesidad que la primera cubría. Por esto usualmente se identifica como nivel de riesgo aquel que sea tolerable o "suficientemente seguro". Para tomar esta decisión se debe considerar los costos de reducción del riesgo, la percepción del riesgo, los beneficios y la posibilidad de sustituir la fuente de riesgo. Algunos casos erróneos se muestran en el Recuadro 3.

Recuadro 3. Casos erróneos en determinar el nivel del riesgo aceptable

Un ejemplo claro de carencia de efectividad en el manejo de recursos dedicados al manejo de riesgos es la legislación de limpieza de residuos peligrosos del Superfund que dicta a la EPA establecer "riesgo cero" en vez de "riesgo razonable", por lo que se han saneado completamente muy pocos sitios, mientras que hay muchos sin saneamiento (Gowda, 1999).

En 1958 la Cláusula Delaney en el Acta de Alimentos, Fármacos y Cosméticos ("Food, Drug, and Cosmetic Act" de la "Food and Drug Act" prohibía aditivos sintéticos carcinógenos en alimentos ("riesgo cero"). Esta cláusula produjo un mayor riesgo a la salud por la falta de aditivos y la introducción, en algunos casos, de sustancias más peligrosas. En 1996 la ley fue enmendada.

La determinación del nivel de riesgo es una tarea que aún requiere la participación de las distintas esferas sociales. Las autoridades requerirán la participación equilibrada de expertos técnico-científicos como de la ciudadanía en general. Desde los años setenta la experiencia internacional en materia de riesgo ha observado reiteradamente la gran brecha que existe entre la percepción del riesgo del ciudadano común con respecto a la cuantificada con respaldo científico (Gowda, 1999; Tesh, 1999; Slovic, 1999; Slovic, 1987; Viscusi, et. al., 1997; Langford, et. al. 1999). Por ejemplo, en la unión norteamericana los ciudadanos perciben un riesgo mayor que el verdadero calculado para pesticidas y plantas de energía nuclear (Tesh, 1999). Es por esto que para optimizar los recursos limitados de una nación y atender reales necesidades de reducción de riesgos se debe equilibrar la participación ciudadana por las distintas subpoblaciones que conforman la sociedad, debido a la presión social que la población ejerce en las autoridades locales y estatales con base en la percepción del riesgo para la determinación del riesgo aceptable (Tesh, 1999; Gowda, 1999). En EEUU se critica el mayor recurso dedicado a la compensación de riesgos "visibles" que a riesgos que en realidad "salven" más vidas, algunas veces como consecuencia de la cobertura de los medios de comunicación (Gowda, 1999).

Por otro lado, es importante considerar la percepción del riesgo de la nación y no "importarla" de modelos extranjeros, debido a la diferencia de percepción del riesgo entre naciones o culturas (Bian y Keller, 1999). Del mismo modo se debe considerar los costos que involucran la reducción de riesgos para que se alcance el nivel aceptable de acuerdo con las necesidades de la sociedad (Gowda, 1999). Un ejemplo claro es el

sacrificio histórico que la unión norteamericana realizó: por más de una siglo algunos mineros de carbón de origen indígena con sus familias y comunidades estuvieron expuestos a enormes riesgos para que el resto del país disfrutara los beneficios de una sociedad industrializada, pero ahora ellos tienen minas más seguras, compensación por "pulmón negro", reclamo a la mina y otros programas.

La EPA con la finalidad de determinar las prioridades ambientales realizó un estudio técnico con base en riesgo de 31 problemas ambientales en EEUU. Para los especialistas de la EPA, los derrames de hidrocarburos y la contaminación de la fuente de agua potable se percibieron como medio o bajo, mientras que para los ciudadanos estadounidenses se percibieron como término medio (moderado), en especial por daños en la salud humana. Sin embargo la EPA ha realizado grandes esfuerzos para el saneamiento de sitios contaminados brindando una de las más altas tasas esfuerzo/riesgo (alto esfuerzo y mediano riesgo) para este rubro (Cohrssen y Covello, 1989). Otros estudios indican que los ciudadanos estadounidenses perciben estos riesgos como moderado - alto (Slovic, 1999).

Opciones para determinar el riesgo aceptable

Existen dos corrientes para formalizar la decisión del riesgo aceptable. La primera emplea técnicas de **análisis costo-beneficio**, **análisis costo-efectivo** y **análisis de tomas de decisiones**, pero su empleo ha sido muy criticado. Por ejemplo, calcular los valores de algunos beneficios como la salud humana resulta difícil o imposible (¿cuánto pagaría por su salud?) (Cohrssen y Covello, 1989). Otro punto débil en la técnica es que considera que los beneficios los gozarán las mismas personas que cedieron beneficios, lo cual no siempre ocurre (Cohrssen y Covello, 1989). Este nivel se debe basar con criterios de equidad (proteger a las subpoblaciones más sensibles) y no sólo de eficiencia (eficiencia de maximizar beneficios/costo) (Morgan, 2000).

La otra corriente se basa en métodos comparativos con precedentes. Compara el riesgo de la tecnología, actividad o sustancia con los riesgos que las personas están dispuestas a aceptar. Una opción dentro de esta corriente es identificar los niveles de **riesgo anteriormente aceptados** y emplearlo como nivel aceptable; otra es considerar los **peligros naturales** como base de la aceptación, ambas opciones fueron muy criticadas (Cohrssen y Covello, 1989). Una muy reciente propuesta basada en **términos de equidad** (que incluye a *toda* la población) propone que se debe abatir cualquier riesgo en el que un sólo individuo este expuesto a un riesgo mayor a "uno en 35 000" valor aproximado al riesgo que enfrenta un estadounidense de morir en un lodazal o tornado (Morgan, 2000). Sin embargo la opción, actualmente, más empleada

es la “**De Minimis**”²: el riesgo a un nivel tan bajo que sea usualmente ignorado. Esta se basa en considerar un riesgo que a escala social sea insignificante comparado con los riesgos asociados a las actividades usuales de la población.

Aunque el riesgo fijado a través de “**De Minimis**” es el más empleado, se ha criticado por:

I. El riesgo fijado no considera otros factores, como el riesgo a futuras generaciones o al ecosistema

II. No sólo una probabilidad (“uno en tantos”) define al riesgo. Por ejemplo, para el riesgo de morir es de “uno en un millón”, si la población expuesta es de 100 personas, entonces la percepción del riesgo es muy baja, pero si la población es de 100 000 000, entonces el riesgo se torna más significativo.

III. Por no considerar riesgos acumulativos. Por ejemplo, imagine que un nuevo peligro presenta un riesgo de “uno en un millón” por una vida de 70 años, si le adicionamos un nuevo riesgo de “uno en un millón” cada año, entonces el riesgo total de toda la vida será aproximadamente “1 en 29000”!

IV. El nivel está fijado con riesgos aceptables actuales que pueden cambiar en un futuro.

² El término *De Minimis* se deriva de la doctrina legal “de minimis non curat lex” “la ley no se interesa en materias triviales” (Cohrssen y Covello, 1989)

Referencias

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. y Petty, R. 1897. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeological settings. US EPA Report 600/2-85/018
- Bian, W-Q y Keller, L. R. 1999. Chinese and Americans agree on what is fair, but disagree on what is best in social decisions affecting health and safety risks. *Risk Analysis*. 19 (3): 439 – 452
- California Comparative Risk Project Report. 1997 en Regional and State Planning Division <http://www.epa.gov/opperspd/futures>
- Cohrssen, J. J. y Cello, T. 1989. Risk Analysis U.S. Council on Environmental Quality, Executive Office of the President.
- EPA, 1999. Environmental Protection Agency. Risk-Based Decision-Making. National Training Initiative. 26 de Febrero 1999. En <http://www.epa.gov/swerust1/rbdrm/train.htm>
- Gowda, M. V. R. 1999. Heuristics, biases, and the regulation of risk. *Policy Sciences* 32. 59 – 78
- Langford, I. H., Marris, C. McDonald, A-L., Goldstein, H., Rashbash, J. y O'Riordan, T. 1999. *Risk Analysis*. 19 (4): 675 –683
- Morgan, M. G. 2000. Risk Management should be about efficiency and equity. *Environmental Science and Technology*. 34(1).32A-34A
- National Research Council. 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Academy Press, Washington, D.C. USA citado por Lynch, S.D., Reynders, A.G. y Schulze, R.E. 1994. Preparing input data for a national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa, *Water S.A* 20. 239-246
- National Water-Quality Assessment Program-NAWQA. 1999. Improvements to the DRASTIC Ground-Water Vulnerability Mapping Method. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. USGS Fact Sheet FS-066-99 Marzo 1999.
- Office of pollution prevention and toxics. 2000 en <http://www.epa.gov/opptintr/index.html>
- Quigley, J. T. 1995. Predicted Benefits of Risk-Based Corrective Action. Groundwater Service, Inc. GSI No 1662.
- Secunda, S., Collin, M. L., Melloul, A. J. 1998 Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*. 54 (1): 39-57
- Slovic, P. 1987. Perception of risk. *Science*. 236: 280 –285
- Slovic, P. 1999. Trust, emotion, sex, politics, and Science: Surveying the Risk – Assessment Battlefield. *Risk Analysis*. 19(4) 689 - 701
- Society for Risk Analysis. 1999 en <http://www.sra.org>
- Software for Environmental Awareness, Great Lakes National Program Office. 1997 en <http://www.epa.gov/glnpo/software.html>.
- Suter, S. 1993. Ecological risk assessment Lewis Publishers. Michigan
- Tesh, S. 1999. Citizen experts in environmental risk. *Policy Science*. 32: 39 – 58
- Viscusi, W. K., Hakes, J. K. y Carlin, A. 1997 Measures of mortality risks. *Journal of Risk and Uncertainty*. 14: 213 – 233



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

MARCO NORMATIVO

**EXPOSITOR: BIO. HECTOR LESSER HIRIART
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

**INSTRUCTIVO PARA LA FORMULACION
DEL INFORME PREVENTIVO AL QUE SE
REFIEREN LOS ARTICULOS 7º Y 8º
DEL REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL
DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO
Y LA PROTECCION AL AMBIENTE
EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL**

I. Datos generales

Contestar las preguntas que a continuación se presentan en forma clara y concreta:

1. Nombre de la empresa u organismo solicitante.
2. Nombre y puesto del responsable del proyecto.
3. Nacionalidad de la empresa.
4. Actividad principal de la empresa u organismo.
5. Domicilio para oír y recibir notificaciones.
6. Cámara o asociación a la que pertenece la empresa u organismo, indicando:
 - Número de registro.
 - Fecha de ingreso.
 - Registro Federal de Causantes.

Ubicación y descripción general de la obra o actividad proyectada, indicando:

1. Nombre del proyecto.
2. Naturaleza del proyecto (descripción general del proyecto, indicando la capacidad proyectada y la inversión requerida).
3. Vida útil del proyecto.
4. Programa de trabajo.
5. Ubicación física del proyecto. Anexar plano de distribución de la planta y plano de localización del predio, especificando:
 - Estado.
 - Municipio.
 - Localidad.
 - Localización.
6. Situación legal del predio.
7. Superficie requerida (ha, m).
8. Colindancia del predio y actividad que se desarrolla.
9. Obra civil desarrollada para preparación del terreno.
10. Vías de acceso (marítimas y terrestres).
11. Vinculación con las normas y regulaciones de uso del suelo en el área correspondiente.
12. Requerimientos de mano de obra.
13. Obras o servicios de apoyo a utilizar en las diferentes etapas del proyecto.
14. Sitios alternativos para el desarrollo de la obra o actividad.

III. Descripción del proceso

1. Materiales y sustancias que serán utilizados en las etapas de preparación del sitio, construcción y mantenimiento de la obra o actividad proyectada. *Enlistar e indicar volúmenes.*

2. Equipo requerido para las etapas de preparación de sitio, construcción, operación y mantenimiento de la obra u actividad proyectada. *Enlistar e indicar capacidad instalada.*

3. Recursos naturales del área que serán aprovechados en las diferentes etapas. *Especificar.*

4. En caso de una industria de transformación y/o extractiva:

- Indicar las sustancias o materiales que serán utilizados en el proceso.
- Enlistar los productos finales.

5. Fuente de suministro de energía eléctrica y o combustible.

6. Requerimientos de agua cruda y potable, y fuente de suministro.

7. Residuos que serán generados en las diferentes etapas del proyecto, y destino final de los mismos.

- Emisiones a la atmósfera.
- Descarga de aguas residuales.
- Residuos sólidos.
- Emisiones de ruido.
- Otro.

**INSTRUCTIVO PARA DESARROLLAR
Y PRESENTAR LA MANIFESTACION
DE IMPACTO AMBIENTAL EN LA MODALIDAD
GENERAL A QUE SE REFIEREN
LOS ARTICULOS 9º Y 10º DEL REGLAMENTO
DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO
ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE
EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL**

I. Datos generales

Contestar las preguntas que a continuación se presentan, en forma clara y concreta.

1. Nombre de la empresa u organismo solicitante.
2. Nacionalidad de la misma.
3. Actividad principal de la empresa u organismo.
4. Domicilio para oír y recibir notificaciones, indicando:
 - Estado.
 - Municipio.
 - Código postal.
 - Ciudad.
 - Localidad.
 - Teléfono.
5. Cámara o asociación a la que pertenece.

5.1. Registro en la Cámara, indicando:

- Número.
- Fecha.

6. Registro Federal de Causantes.

7. Responsable de la elaboración del estudio de impacto ambiental, indicando:

- Nombre.
- Razón social.
- Registro SEDUE.

7.1. Registro Federal de Causantes.

7.2. Domicilio para oír y recibir notificaciones. y teléfono.

II. Descripción de la obra o actividad proyectada

En esta sección se solicita información de carácter general de la obra o actividad, con la finalidad de configurar una descripción general de la misma; asimismo se solicita información específica de cada etapa, con el objetivo de obtener los elementos necesarios para la evaluación del impacto (positivo o negativo) de la obra o actividad.

1. Descripción general.

1.1. Nombre del proyecto.

1.2. Naturaleza del proyecto. Explicar en forma general el tipo de obra o actividad que se desea llevar a cabo, especificando el volumen de producción —si se trata de una industria—, la capacidad proyectada y la inversión requerida.

1.3. Objetivos y justificación del proyecto. El solicitante debe dejar en claro las causas que motivaron la realización de la obra o actividad y los beneficios económicos, sociales y de otro tipo que ésta contemple.

1.4. Programa de trabajo. En este punto se debe anexar la calendarización de cada etapa, indicando la fecha de inicio de actividades.

1.5. Proyectos asociados. Explicar si en el desarrollo de la obra o actividad se requerirá de otros proyectos.

1.6. Políticas de crecimiento a futuro. Explicar en forma general la estrategia a seguir por la empresa indicando ampliaciones, futuras obras o actividades que pretenderán desarrollarse en la zona.

2. Etapa de selección del sitio.

En este apartado se solicita información referente a las características del lugar en que se desarrollará la obra o actividad, así como de los alrededores de la zona.

2.1. Ubicación física del proyecto. Anexar plano de localización del predio, indicando las coordenadas en las que se sitúa.

- Estado.
- Municipio.
- Localidad.

2.2. Urbanización del área. Aclarar si el predio se sitúa en una zona urbana, suburbana o rural.

2.3. Criterios de elección del sitio. Menciona estudios realizados para la selección.

2.4. Superficie requerida (ha, m²).

2.5. Uso actual del suelo en el predio. Mencionar el tipo de actividad que se desarrolla.

2.6. Colindancias del predio. Mencionar la orientación de cada predio, indicando la principal actividad que en ellos se desarrolle.

2.7. Situación legal del predio. Compra, venta, concesión, expropiación, otro.

2.8. Vías de acceso al área donde se desarrollará la obra o actividad. En el caso de proyectos relacionados con cuerpos de agua señalar las rutas de navegación que se utilizarán.

2.9. Sitios alternativos que hayan sido o estén siendo evaluados. Indicar su ubicación regional, municipal, local, otra.

3. Etapa de preparación del sitio y construcción.

En este apartado se solicitará información relacionada con las actividades de preparación del sitio previas a la construcción, así como las actividades relacionadas con la construcción misma de la obra o con el desarrollo de la actividad.

— Se deben anexar los planos gráficos del proyecto y el sistema constructivo, así como memoria técnica del proyecto, esto último en forma breve.

3.1. Programa de trabajo. Presentar en forma gráfica (v. gr. GANTT) fechas de inicio y finalización de la preparación del sitio y construcción, indicando además las principales actividades que se desarrollarán en estas etapas con su respectiva calendarización.

3.2. Preparación del terreno. Indicar si para la preparación del terreno se requerirá de algún tipo de obra civil (desmontes, nivelaciones, relleno, despiece, desecación de lagunas, otros). En caso de que así sea, especificar:

3.2.1. Recursos que serán alterados.

3.2.2. Área que será afectada: localización.

3.3. Equipo utilizado. Señalar el tipo de maquinaria que se utilizará durante la etapa de preparación del sitio y construcción, especificando la cantidad y operación por unidad de tiempo.

3.4. Materiales. Enlistar los materiales que se utilizarán en ambas etapas, especificando el tipo, volumen y forma de traslado del mismo.

— En caso de que se utilicen recursos de la zona (bancos de materiales, madera u otros), indicar cantidad.

3.5. Obras y servicios de apoyo. Indicar obras provisionales y los servicios necesarios en la etapa de preparación del terreno, y para la etapa de construcción (construcción de caminos de acceso, puentes provisionales, campamentos, otros).

3.6. Personal utilizado. Especificar el número de trabajadores que serán empleados, y su tiempo de ocupación.

7. Requerimientos de energía.

3.7.1. Electricidad. Indicar origen, fuente de suministro, potencia y voltaje.

3.7.2. Combustible. Indicar origen, fuente de suministro, cantidad que será almacenada y forma de almacenamiento.

3.8. Requerimientos de agua. Especificar si se trata de agua cruda o potable, indicando el origen, volumen, traslado y forma de almacenamiento.

3.9. Residuos generados. Indicar el tipo o tipos de residuos que se generarán durante la etapa de preparación del sitio y la de construcción.

3.10. Desmantelamiento de la infraestructura de apoyo. Indicar el destino final de las obras y servicios de apoyo empleados en esta etapa.

4. Etapa de operación y mantenimiento.

La información que se solicita en este apartado, corresponde a la etapa de operación del proyecto, y a las actividades de mantenimiento necesarias para el buen funcionamiento del mismo. Las preguntas 4, 5 y 6 deben ser contestadas en caso de que el proyecto esté relacionado con la industria de la transformación y/o extractiva.

4.1. Programa de operación. Anexar un diagrama de flujo. Las industrias de la transformación y extractivas agregar una descripción de cada uno de los procesos.

4.2. Recursos naturales del área que serán aprovechados. Indicar tipo, cantidad y su procedencia.

4.3. Requerimientos de personal. Indicar la cantidad total del personal que será necesario para la operación, especificando turnos.

— Los puntos del 4 al 6 sólo deberán ser contestados por proyectos relacionados con la industria de la transformación y/o extractiva.

4.4. Materias primas e insumos por fase de proceso:

— Indicar tipo y cantidad de los mismos, considerando las sustancias que sean utilizadas para el mantenimiento de la maquinaria.

4.4.1. Subproductos por fase de proceso.

— Indicar tipo y volumen aproximado.

4.4.2. Productos finales.

— Indicar tipo y cantidad estimada.

4.5. Forma y características de transportación de:

Materias primas.

Productos finales.

Subproductos.

4.6. Forma y características de almacenamiento de:

Materias primas.

Productos finales.

Subproductos.

4.6.1. Medidas de seguridad. Indicar las que serán adoptadas.

4.7. Requerimientos de energía.

4.7.1. Electricidad.

— Indicar voltaje y fuente de aprovechamiento.

4.7.2. Combustible.

— Indicar tipo, origen, consumo por unidad de tiempo y forma de almacenamiento.

4.8. Requerimientos de agua.

— Indicar cantidad y origen, asimismo reportar los requerimientos excepcionales que vayan a ser utilizados y su periodicidad aproximada, plantear otras fuentes alternativas de abasto.

	Consumo ordinario		Consumo excepcional	
	Volumen	Origen	Volumen	Periodicidad
Agua potable	_____	_____	_____	_____
Agua tratada	_____	_____	_____	_____
Agua cruda	_____	_____	_____	_____

4.9. Residuos. Indicar el tipo de residuos que serán generados, especificando el volumen.

— Emisiones a la atmósfera. Indicar si son gaseosos, humos o partículas.

— Descarga de aguas residuales. Indicar aspectos físicos, químicos y bioquímicos.

— Residuos sólidos industriales. Describir sus componentes, y si se encuentran en estado húmedo o seco.

— Residuos sólidos domésticos.

— Residuos agroquímicos. Indicar tipo y período de vida de sus componentes.

— Otros.

4.10. Factibilidad de reciclaje.

— Indicar si es factible el reciclaje de los residuos que reporta.

4.11. Disposiciones de residuo.

— Especificar forma de manejo y características del cuerpo receptor.

4.12. Niveles de ruido.

— Indicar intensidad (en dB) y duración del mismo.

4.13. Posibles accidentes y planes de emergencia.

— Describa en forma detallada.

5. Etapa de abandono de sitio.

— En este apartado deberá describir el destino programado para el sitio y sus alrededores, al término de las operaciones, y se deberá especificar:

5.1. Estimación de vida útil.

5.2. Programas de restitución del área.

5.3. Planes de uso del área al concluir la vida útil del proyecto.

III. Aspectos generales del medio natural y socio-económico

Medio natural.

- En esta sección se deberá describir el medio natural resaltando aquellos aspectos que se consideren particularmente importantes por el grado de afectación que provocaría el desarrollo del proyecto. Como apoyo será necesario anexar una serie de fotografías que muestren al área del proyecto y su zona circundante.

I. Rasgos físicos

1. Climatología.

1.1. Tipo de clima:

- Considerar la clasificación de Köppen modificada por E. García para la República Mexicana.

1.2. Temperaturas promedio.

1.3. Precipitación promedio anual (mm).

1.4. Intemperismos severos.

- Indicar frecuencia de intemperismos, p. ej. huracanes, heladas, granizadas o algún otro.

1.5. Altura de la capa de mezclado del aire. Sólo en caso de información disponible.

1.6. Calidad del aire. Sólo en caso de información disponible.

2. Geomorfología y geología.

- 2.1. Geomorfología general. Elaborar una síntesis en la que se describa, en términos generales, las características geomorfológicas más importantes. Especificar si existen bancos de material, su ubicación y estado actual.

2.2. Descripción breve de las características del relieve.

2.3. Susceptibilidad de la zona a:

- Sismicidad.
- Deslizamientos.
- Derrumbes.
- Otros movimientos de tierra o roca.
- Posible actividad volcánica.

3. Suelos:

3.1. Tipo de suelos presentes en el área y zonas aledañas.

3.2. Composición del suelo. (Clasificación de FAO.)

3.3. Capacidad de saturación.

4. Hidrología (rango de 10 a 15 km).

4.1. Principales ríos o arroyos cercanos:

- Permanentes o intermitentes.
- Estimación del volumen de escorrentía por unidad de tiempo.
- Actividad para la que son aprovechados.
- Indicar si reciben algún tipo de residuo.

4.2. Embalses y cuerpos de agua cercanos (lagos, presas, etc.).

Localización y distancia al predio.

Área inundable del cuerpo de agua o emba (ha).

• Volumen (mm³).

• Usos principales.

4.3. Drenaje subterráneo.

• Profundidad y dirección.

• Usos principales (agua, riego, etc.).

• Cercanía del proyecto a pozos.

- En caso de extracción, consultar si el agua está siendo explotada, subexplotada, etc.

5. Oceanografía. (Si el proyecto se asocia a un área de influencia marina, presentar la siguiente información.)

5.1. Batimetría:

- Bancos.
- Composición de sedimentos.
- Arrecifes o bajos fondos.

5.2. Ciclo de mareas.

5.3. Corrientes.

5.4. Temperatura promedio del agua.

II. Rasgos biológicos

Presentar la información de acuerdo con los alcances del proyecto (en una zona terrestre, marí o ambas).

1. Vegetación.

1.1. Tipo de vegetación de la zona.

1.2. Principales asociaciones vegetacionales y distribución.

1.3. Mencionar especies de interés comercial.

1.4. Señalar si existe vegetación endémica y/o en peligro de extinción.

2. Fauna.

2.1. Fauna característica de la zona.

2.2. Especies de valor comercial.

2.3. Especies de interés cinegético.

2.4. Especies amenazadas o en peligro de extinción.

3. Ecosistema y paisaje.

Responder las siguientes preguntas colocando "SI" o "NO" al final de éstas. En caso de que la respuesta sea afirmativa, explique en términos generales la forma en que la obra o actividad incidirá.

3.1. ¿Modificará la dinámica natural de algún cuerpo de agua?

3.2. ¿Modificará la dinámica natural de las comunidades de flora y fauna?

3.3. ¿Crearé barreras físicas que limiten el desplazamiento de la flora y/o fauna?

3.4. ¿Se contempla la introducción de especies exóticas?

3.5. Explicar si es una zona considerada con cualidades estéticas únicas o excepcionales.

6. ¿Es una zona considerada con atractivo turístico?

3.7. ¿Es o se encuentra cerca de un área arqueológica o de interés histórico?

3.8. ¿Es o se encuentra cerca de un área natural protegida?

3.9. ¿Modificará la armonía visual con la creación de un paisaje artificial?

3.10. ¿Existe alguna afectación en la zona? Explique en qué forma y su grado actual de degradación?

III. Medio socioeconómico.

En este apartado se solicitará información referente a las características sociales y económicas del sitio seleccionado y sus alrededores.

1. Población.

Proporcionar en forma concisa los siguientes datos:

- . Población económicamente activa.
- . Grupos étnicos.
- . Salario mínimo vigente.
- . Nivel de ingresos per cápita.

2. Servicios.

Indicar con una cruz si el sitio seleccionado y sus alrededores cuenta con los siguientes servicios:

2.1. Medios de comunicación.

- Vías de acceso. Indicar sus características y su distancia al predio.
- Teléfono.
- Telégrafo.
- Correo.
- Otros.

2.2. Medios de transporte.

- Terrestres.
- Aéreos.
- Marítimos.
- Otros.

2.3. Servicios públicos.

- Agua (potable, tratada).
- Energéticos (combustibles).
- Electricidad.
- Sistema de manejo de residuos. Especificar su tipo y distancia al predio.
 - . Drenaje.
 - . Canales de desagüe.
 - . Tiradero a cielo abierto.
 - . Basurero municipal.
 - . Relleno sanitario.
 - . Otros.

2.4. Centros educativos.

- Enseñanza básica.
- Enseñanza media.
- Enseñanza media superior.
- Enseñanza superior.
- Otros.

2.5. Centros de salud. Indicar su distancia al predio.

- De 1er. grado.
- De 2o. grado.

2.6. Vivienda. Indicar el tipo de vivienda predominante por su tipo de material de construcción y su distancia al predio.

- Madera.
- Adobe.
- Tabique.

2.7. Zonas de recreo.

- Parques.
- Centros deportivos.
- Centros culturales (cine, teatro, museos, monumentos nacionales).

3. Actividades.

Indicar con una cruz el tipo de actividad predominante en el área seleccionada y su alrededor.

3.1. Agricultura:

- De riego.
- De temporal.
- Otras.

3.2. Ganadería:

- Intensiva.
- Extensiva.
- Otras.

3.3. Pesca:

- Intensiva.
- Extensiva.
- Otras.

3.4. Industriales:

- Extractiva.
- Manufacturera.
- De servicios.

4. Tipo de economía.

Indicar con una cruz a cuál de las siguientes categorías pertenece el área en que se desarrollará el proyecto.

- Economía de autoconsumo.
- Economía de mercado.
- Otras.

5. Cambios sociales y económicos.

Especificar con una cruz si la obra o actividad creará:

- Demanda de mano de obra.
- Cambios demográficos (migración, aumento de la población).
- Aislamiento de núcleos poblacionales.
- Modificación en los patrones culturales de la zona.
- Demanda de servicios:
 - . Medios de comunicación.
 - . Medios de transporte.
 - . Servicios públicos.

- . Zonas de recreo.
- . Centros educativos.
- . Centros de salud.
- . Vivienda.

IV. Vinculación con las normas y regulaciones sobre uso del suelo

En este apartado el solicitante deberá consultar a la Secretaría de Desarrollo Urbano Estatal o Federal para verificar si el uso que pretende darse al suelo corresponde al establecido por las normas y regulaciones.

Los elementos que deberán considerarse son:

1. Plan Director Urbano, correspondiente a la Dirección General de Desarrollo Urbano.
2. Planes o Programas Ecológicos del Territorio Nacional, correspondientes a la Dirección General de Normatividad y Regulación Ecológica.
3. Sistema Nacional de Áreas Protegidas, a cargo de la Dirección General de Conservación Ecológica de los Recursos Naturales.

V. Identificación de impactos ambientales

En esta sección se deberán identificar y describir los impactos ambientales provocados por el desarro-

llo de la obra o actividad durante las diferentes pas. Para ello, se puede utilizar la metodología más convenga al proyecto.

VI. Medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales identificados

En este apartado el proponente dará a conocer las medidas y acciones a seguir por el organismo interesado, con la finalidad de prevenir o mitigar los impactos que la obra o actividad provocará en cada etapa de desarrollo del proyecto.

Las medidas y acciones deben presentarse en forma de programa en el que se precisen el impacto potencial y la(s) medida(s) adoptada(s) en cada una de las etapas.

Conclusiones

Finalmente, con base en una autoevaluación integral del proyecto, el solicitante deberá realizar un balance (impacto desarrollo) en donde se discutirán los beneficios que genere el proyecto y su importancia en la economía local, regional o nacional, y la influencia del proyecto en la modificación de los procesos naturales.

Referencias

En este punto indicar aquellas fuentes que hayan sido consultadas para la resolución de este estudio

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente establece, en su artículo 146, que deberán publicarse en el D.O.F. los listados de las actividades consideradas altamente riesgosas, lo cual ha ocurrido en dos ocasiones: el 28 de marzo de 1990 y el 4 de mayo de 1992.

El Primer Listado se publicó en la Gaceta Ecológica #9 y el Segundo nunca ha aparecido en sus páginas. Con el propósito de difundir y mantener actualizada a la sociedad en general y, en particular, al sector industrial, presentamos ambos Listados. Un elemento adicional que muestra su importancia es que están siendo utilizados como referencia en el Programa de Desregulación y Simplificación de Trámites a la Industria en Materia de Impacto Ambiental.

PRIMER LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS

ACUERDO por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los Artículos 5o. Fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 Fracción XXXII y 37 Fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expide el primer listado de actividades altamente riesgosas.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Gobernación.

ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARIAS DE GOBERNACION Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 5o. FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE; 27 FRACCION XXXII Y 37 FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL, EXPIDEN EL PRIMER LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS.

CONSIDERANDO

Que la regulación de las actividades que se consideran altamente riesgosas por la magnitud o gravedad de los efectos que puedan generar en el equilibrio ecológico o el ambiente, está contemplada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como asunto de alcance general de la nación o de interés de la Federación y se prevé que una vez hecha la determinación de las mismas, se publicarán los listados correspondientes.

Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Que por lo tanto, se hace necesario determinar la cantidad mínima de las sustancias peligrosas con las propiedades antes mencionadas, que en cada caso, convierte su producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, en actividades que, de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas, vía atmosférica, provocarían la presencia de límites de concentración superiores a los permisibles, en un área determinada por una franja de 100 metros en torno de las instalaciones, o medios de transporte, y en el caso de la formación de nubes explosivas, la existencia, de ondas de sobrepresión. A esta cantidad mínima de sustancia peligrosa, se le denomina cantidad de reporte.

Que en consecuencia, para la determinación de las actividades consideradas altamente riesgosas, se partirá de la clasificación de las sustancias peligrosas, en función de sus propiedades, así como de las cantidades de reporte correspondiente.

Que cuando una sustancia presente más de una de las propiedades señaladas, está se clasificará en fun-

ción de aquella ó aquéllas que presenten el o los más altos grados potenciales de afectación al ambiente, a la población o a sus bienes y aparecerá en el listado o listados correspondientes.

Que mediante este Acuerdo se expide el primer listado de actividades altamente riesgosas y que corresponde a aquéllas en que se manejan sustancias tóxicas. En dicho listado quedan exceptuadas en forma expresa el uso y aplicación de plaguicidas con propiedades tóxicas, en virtud de que existe una legislación específica para el caso, en la que se regula esta actividad en lo particular.

Que este primer listado y los subsecuentes que se expidan, para el caso de aquellas actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables, explosivas, reactivas, corrosivas o biológicas, éstas constituirán el sustento para determinar las normas técnicas de seguridad y operación, así como para la elaboración de los programas para la prevención de accidentes, previstos en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mismos que deberán observarse en la realización de dichas actividades. Que cuando las actividades asociadas con el manejo de sustancias con propiedades radioactivas, podrían considerarse altamente riesgosas, las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología no establecerán un listado de las mismas, en virtud de que la expedición de las normas de seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas compete a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud, de conformidad con los dispuesto por la legislación que de manera específica regula estas actividades.

Que las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Agricultura y Recursos Hidráulicos y del Trabajo y Previsión Social, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este primer listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente:

ACUERDO

ARTICULO 1o.- Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte.

ARTICULO 2o.- Para los efectos de este ordenamiento se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

Cantidad de reporte: Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Manejo: alguna o el conjunto de las actividades siguientes; producción, procesamiento, transporte, almacenamiento uso o disposición final de sustancias peligrosas.

Sustancia peligrosa: Aquella que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radioactividad, corrosividad o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Sustancia tóxica: Aquella que puede producir en organismos vivos, lesiones, enfermedades, implicaciones genéticas o muerte.

ARTICULO 3o.- Con base en lo previsto en el artículo primero, se expide el primer listado de actividades altamente riesgosas, que corresponde a aquéllas en que se manejen sustancias tóxicas. Estas actividades son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejen volúmenes iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes:

I. Cantidad de reporte: a partir de 1kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acido cianhídrico
Acido fluorhídrico-(fluoruro de hidrógeno)
Arsina
Cloruro de hidrógeno
Cloro (1)
Diborano
Dióxido de nitrógeno
Flúor
Fosgeno
Hexafluoruro de telurio
Oxido nítrico
Ozono(2)
Seleniuro de hidrógeno
Tetrafluoruro de azufre
Tricloruro de boro

b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acroleína
Alil amina
Bromuro de propargilo
Butil vinil éter
Carbonilo de níquel
Ciclopentano
Clorometil metil eter
Cloruro de metacrililo
Dioxolano
Disulfuro de metilo
Fluoruro cianúrico
Furano
Isocianato de metilo
Metil hidracina
Metil vinil cetona
Pentaborano
Sulfuro de dimetil
Tricloroetil silano

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

2 Clorofenil tiourea
2,4 Ditiobiuret
4,6 Dinitro-cresol
Acido becen arsénico
Acido cloroacético
Acido fluoroacético
Acido metil-carbamilo
Acido tiocianico 2-benzotiánico
Aldicarb
Arseniato de calcio
Bis clorometil cetona
Bromodiolona

Carbofurano (furadán)
Carbonilos de cobalto
Cianuro de potasio
Cianuro de sodio
Cloroplatinato de amonio
Cloruro crómico
Cloruro de dicloro benzalkonio
Cloruro platinoso
Cobalto
Cobalto (2,2-(1,2-etano)
Complejo de organorodio
Decaborano
Dicloro xileno
Difacionona
Didisocianato de isoforona
Dimetil-p-fenilendiamina
Dixitoxin
Endosulfan
Epn
Estereato de cadmio
Estricnina
Fenamifos
Fenil tiourea
Fluoroacetamida
Fósforo (rojo, amarillo y blanco)
Fósforo de zinc
Fosmet
Hexacloro naftaleno
Hidruro de litio
Metil anzifos
Metil paration
Monocrotofos (azodrín)
Oxido de cadmio
Paraquat
Paraquat-metasulfato
Pentadecilamina
Pentóxido de arsénico
Pentóxido de fósforo
Pentóxido de vanadio
Pireno
Piridina, 2 metil, 5 vinil
Seleniato de sodio
Sulfato de estricnina
Sulfato taloso
Sulfato de talio
Tetracloruro de iridio
Tetracloruro de platino
Tetraóxido de osmio
Tiosemicarbazida
Triclorofón
Trióxido de azufre

II. Cantidad de reporte: a partir de 10 kg.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acido sulfhídrico
Amoniaco anhidro
Fosfina
Metil mercaptano
Trifluoruro de boro

- b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

1,2,3,4 diepoxibutano
2.cloroetanol
Bromo
Cloruro de acrilóilo
1 Sulfuro
Mesitylén
Oxícloruro fosforoso
Pentacarbonilo de fierro
Propionitrilo
Pseudocumeno
Tetracloruro de titanio
Tricloro (clorometil) silano
Vinil norborneno

- c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

Acetato de metoxietilmercurio
Acetato fenil mercúrico
Acetato mercúrico
Arsenito de potasio
Arsenito de sodio
Azida de sodio
Bromuro cianógeno
Cianuro potásico de plata
Cloruro de mercurio
Cloruro de talio
Fenol
Fosfato etilmercúrico
Hidroquinona
Isotiosianato de metilo
Lindano
Malonato taloso
Malononitrilo
Níquel metálico
Óxido mercúrico
Pentaclorofenol
Pentacloruro de fósforo

Salcomina
Selenito de sodio
Telurio
Telurito de sodio
Tiosemicarbácida acetona
Tricloruro de galio
Warfarin

III. Cantidad de reporte: a partir de 100 Kg.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en el estado gaseoso:

Bromuro de metilo
Etano (3)
Óxido de etileno

- b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2,6-Diisocianato de tolueno
Acetaldehído (3)
Acetato de vinilo
Acido nítrico
Acilonitrilo
Alcohol alílico
Beta propiolactona
Cloroacetaldehído
Crotonaldehído
Disulfuro de carbono
Eter bis-cloro metílico
Hidracina
Metil tricloro silano
Nitrosodimetilamina
Óxido de propileno
Pentacloroetano
Pentafluoruro de antimonio
Perclorometil mercaptano
Piperidina
Propilenimina
Tetrametilo de plomo
Tetranitrometano
Tricloro benceno
Tricloruro de arsénico
Trietoxisilano
Trifluoruro de boro

- c) En el caso de las siguientes sustancias en estado sólido:

Acido cresílico
Acido selenioso
Acrilamida

Carbonato de talio
Metomil
Oxido tálico
Yoduro cianógeno

Tiocianato de etilo
Tolueno (3)

IV. Cantidad de reporte: a partir de 1,000 Kg.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Butadieno

- b) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetonitrilo
Benceno (3)
Cianuro de bencilo
Cloroformo
Cloruro de benzal
Cloruro de bencilo
2,4-Diisocianato de tolueno
Epiclorohidrina
Isobutironitrilo
Oxicloruro de selenio
Peroxido de hidrógeno
Tetracloruro de carbono (3)
Tetraetilo de plomo
Trimetilcloro silano

V. Cantidad de reporte: a partir de 10,000 Kg.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2,4,6 Trimetil anilina
Anilina
Ciclohexilamina
Cloruro de bencen sulfonilo
Diclorometil fenil silano
Etilen diamina
Forato
Formaldehido cianohidrina
Gas mostaza; sinónimo (sulfato de bis 2-cloroetilo)
Hexacloro ciclo pentadieno
Lactonitrilo
Mecloretamina
Metanol
Oleum
Sulfato de dimetilo /

VI. Cantidad de reporte: a partir de 100,000 Kg.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido.

1,1-Dimetil hidracina
Anhídrido metacrílico
Cumeno
Diclorvos
Eter dicloroetilico
Eter diglicidílico
Fenil dicloro arsina
Nevinfos (fosforín)
Octametil difosforamida
Tricloro fenil silano

VII. Cantidad de reporte: a partir de 1,000,000 kg

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Adiponitrilo
Clordano
Dibutilftalato
Dicrotofós (bidrín)
Dimetil 4 ácido fosfórico
Dimetilftalato
Dioctilftalato
Fosfamidón
Metil-5-Dimetón
Nitrobenceno
Tricloruro fosforoso

- (1) Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

- (2) Se aplica exclusivamente a actividades donde se realicen procesos de ozonización.

- (3) En virtud de que esta sustancia presenta además propiedades explosivas o inflamables, también será considerada, en su caso, en el proceso para determinar los listados de actividades altamente riesgosas, correspondientes a aquellas en que se manejen sustancias explosivas o inflamables.

ARTICULO 40.- Se exceptúa del listado de actividades altamente riesgosas, previsto en el artículo

anterior, el uso o aplicación de plaguicidas con propiedades tóxicas.

ARTICULO 5o.- Para efectos del presente Acuerdo, se entenderá como sustancias en estado sólido, aquéllas que se encuentren en polvo menor de 10 micras.

ARTICULO 6o.- En el caso de las sustancias señaladas en el artículo 3o. que correspondan a plaguicidas, la cantidad de reporte se entenderá referida a su ingrediente técnico, llamado también activo.

En los demás casos, las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse de conformidad con su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentran en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, a fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

ARTICULO 7o.- Las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal; Comercio y Fomento Industrial; de Salud; Agricultura y Recursos Hidráulicos y del Trabajo y Previsión Social, podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de investigaciones que al efecto se lleven a cabo.

TRANSITORIO

UNICO.- El presente acuerdo entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el *Diario Oficial de la Federación*.

Ciudad de México a 26 de marzo de mil novecientos noventa.- El Secretario de Gobernación, Fernando Gutiérrez Barrios.- Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Patricio Chirinos Calero.-Rúbrica.

Publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de marzo de 1990.

SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS

ACUERDO por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 5o.- fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 fracción XXXII y 37 fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expiden el segundo listado de actividades altamente riesgosas.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Gobernación.

ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARÍAS DE GOBERNACIÓN Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 5o.

FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE, 27 FRACCION XXXII Y 37 FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL EXPIDEN EL SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS.

CONSIDERANDO

Que la regulación de las actividades altamente riesgosas, está contemplada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como asunto de alcance general de la nación o de interés de la Federación y se prevé que una vez hecha la determinación de las mismas se publicarán los listados correspondientes.

Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las mismas o bien una explosión, ocasionarían una afectación significativa al ambiente a la población o a sus bienes.

Que por lo tanto, se hace necesario fijar dicha cantidad para cada sustancia peligrosa que presente las propiedades antes mencionadas. A esta cantidad se le denomina cantidad de reporte.

Que con base en el criterio anterior se ha procedido a determinar las actividades altamente riesgosas en función de las propiedades de las sustancias que se manejen y a agrupar dichas actividades en los listados correspondientes.

Que cuando una actividad esté relacionada con el manejo de una sustancia que presente más de una de las características de peligrosidad señaladas, en cantidades iguales o superiores a su cantidad de reporte, dicha actividad será considerada altamente riesgosa y se incluirá en cada uno de los listados que correspondan.

Que el 28 de marzo de 1990 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* el primer listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias tóxicas. Que mediante este Acuerdo se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas, en cantidades tales que de producirse una liberación, ya sea por fuga o derrame de las mismas en la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final provocaría la formación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamabilidad, en un área determinada por una franja de 100 de longitud en torno de la instalaciones o medio de transporte dados, y en el caso de formación de nubes explosivas, la presencia de ondas de sobrepresión de 0.51b/pulg² en esa misma franja.

Que tanto el primer listado que corresponde al manejo de sustancias tóxicas y este concerniente al manejo de sustancias inflamables y explosivos así como los subsecuentes que se expidan para el caso de aquellas actividades relacionadas con el manejo de sustancias reactivas, corrosivas o biológicas, constituirán el sustento para determinar las normas técnicas de seguridad y operación, así como para la elaboración y presentación de los programas para la prevención de accidentes previstos en el artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, mismos que deberán observarse en la realización de dichas actividades.

Que aun cuando las actividades asociadas con el manejo de sustancias con propiedades radioactivas podrían considerarse altamente riesgosas, las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología no establecerán un listado de las mismas, en virtud de que la expedición de las normas de seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas compete a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud de conformidad con lo dispuesto por la legislación que de manera específica regula estas actividades.

Que la Secretaría de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología previa opinión de las Secretarías de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, así como con la participación de la Secretaría de la Defensa Nacional, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este segundo listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente:

ACUERDO

ARTICULO 1o.- Se expide el segundo listado de actividades altamente riesgosas que corresponde a aquellas en que se manejen sustancias inflamables y explosivas.

ARTICULO 2o.- Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peli-

grosas en cantidades iguales o superiores a la cantidad de reporte.

ARTICULO 3o.- Para los efectos de este Acuerdo se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

Cantidad de reporte: Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transportes dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población, o a sus bienes.

Manejo: alguna o el conjunto de las actividades siguientes: producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final de sustancias peligrosas.

Sustancia peligrosa: Aquella que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radiactividad, corrosividad, o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Sustancia inflamable: Aquella que es capaz de formar una mezcla con el aire en concentraciones tales para prenderse espontáneamente o por la acción de una chispa.

Sustancia explosiva: Aquella que en forma espontánea o por acción de alguna forma de energía genera una gran cantidad de calor y energía de presión en forma casi instantánea.

ARTICULO 4o.- Las actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables y explosivas que deben considerarse altamente riesgosas son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso y disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejan cantidades iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes:

I. Cantidad de reporte a partir de 500 kg.

a) en el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Acetileno
Acido sulfhídrico
Anhídrido hipocloroso
Butano (Niso)
Butadieno
1-Buteno
2-Buteno (cis,trans)
Cianógeno
Ciclobutano
Ciclopropano
Cloruro de metilo
Cloruro de vinilo
Difloruro 1-Cloroetano
Dimetil amina
2,2-Dimetil propano
Etano
Eter metílico
Etileno
Fluoruro de etilo
Formaldehído
Hidrógeno
Metano
Metilamina
2-Metil propeno
Propano
Propileno
Propino
Sulfuro de carbonilo
Tetrafluoroetileno
Trifluorocloroetileno
Trimetil amina

b) En el caso de las sustancias en estado gaseoso no previstas en el inciso anterior y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación $<37.8^{\circ}\text{C}$
Temperatura de ebullición $<21.1^{\circ}\text{C}$
Presión de vapor $>760\text{ mm hg}$

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2-Butino
Cloruro de etilo
Etilamina
3-Metil-1-Buteno
Metil etil eter
Nitrito de etilo
Oxido de etileno
1-Pentano

II. Cantidad de reporte a partir de 3,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetaldehído
Ácido cianhídrico
Amileno(cis,trans)
Colodión
Disulfuro de carbono
2-Metil-1-Buteno
2-Metil-2-Buteno
Óxido de propileno
Pentano (Niso)
1-Penteno
1-Penteno
Sulfuro de dimetilo

III. Cantidad de reporte a partir de 10,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acroleína
Alil amina
Bromuro de alilo
Carbonilo de níquel
Ciclopentano
Ciclopenteno
1-Cloro propileno
2-Cloro propileno
Cloruro de alilo
Cloruro de acetilo
Cloruro de propilo (Niso)
1,1-Dicloroetileno
Dietilamina
Dihidropirán
2,2 Dimetil butano
2,3 Dimetil butano
2,3 Dimetil 1-Buteno
2,3 Dimetil 2-Buteno
2- Etil 1-Buteno
Eter dietílico
Eter vinílico
Etilico mercaptano
Etoxiacetileno
Formiato de etilo
Formiato de metilo
Furano
Isopreno
Isopropenil acetileno
2-Metil Pentano
3-metil Pentano
2-Metil-1-Penteno

2-Metil-2-Penteno
4-Metil-1-Penteno
4-Metil-2-Penteno
2-Metil-2-Propanotiol
Metil propil acetileno
Metil triclorosilano
Propil amina (Niso)
Propenil etil éter
Tetrahidrofurano
Triclorosilano
Vinil etil éter
Vinil isopropil éter

IV. Cantidad de reporte a partir de 20,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetato de etilo
Acetato de metilo
Acetato de vinilo
Acetona
Acrilato de metilo
Acrilonitrilo
Alcohol metílico
Alcohol etílico
Benceno
1-Bromo-2-Buteno
Butilamina (Niso,sec,ter)
Ciclohexano
Ciclohexeno
Cicloheptano
2-Cloro-2-Buteno
Cloruro de butilo (Niso,sec,ter)
Cloruro de vinilideno
Dicloroetano
Dicloroetileno (cis,trans)
1,2-Dicloroetileno
Dimetil diclorosilano
1,1 Dimetil hidrazina
2,3 Dimetil pentano
2,4 Dimetil pentano
Dimetoxi metano
Diisobutileno
Diisopropilamina
Dioxolano
Eter etil propílico
Eter propílico (Niso)
Etil butil éter
Etil ciclobutano
Etil ciclopentano
Etil diclorosilano

Etil metil cetona
 Etilenimina
 Formiato de propilo (Niso)
 Fluorobenceno
 1-Hexeno
 2-Hexeno (cis,trans)
 Heptano (Niso y mezclas de isómeros)
 Hepteno
 Heptileno
 Heptileno 2-trans
 1,4-Hexadieno
 Hexano (Niso y mezclas de isómeros)
 Isobutiraldehído
 2-Metil furano
 Metil Ciclohexano
 Metil Ciclopentano
 Metil Diclopentano
 Metil Diclorosilano
 Metil éter propílico
 2-Metil hexano
 3-Metil hexano
 Metil hidrazina
 2-Metil-1,3-Pentadieno
 4-Metil-1,3-Pentadieno
 Metil pirrolidina
 2-Metil tetrahidrofurano
 Metil vinil cetona
 Monoxido de butadieno
 Nitrato de etilo
 2,5-Norbornadieno
 Oxido de butileno
 Oxido de pentametileno
 1,2-Oxido de butileno
 Pirrolidina
 Propionaldehído
 Propionato de metilo
 Propionato de vinilo
 Trietilamina
 2,2,3-Trimetil butano
 2,3,3-Trimetil-1-Buteno
 2,3,4-Trimetil-1-Penteno
 2,4,4-Trimetil-2-Penteno
 3,4,4-Trimetil-2-Penteno
 Trimetilclorosilano
 Vinil isobutil éter

V. Cantidad de reporte a partir de 50,000 kg.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

Gas L.P. comercial ¹¹

VI. Cantidad de reporte a partir de 100,000 kg

- a) En el caso de las siguientes sustancias en el estado líquido:

Acetato de propilo (Niso)
 Alcohol alílico
 Alcohol desnaturalizado
 Alcohol propílico (Niso)
 Amilamina (N,sec)
 Bromuro de N-butilo
 Butirato de metilo
 Butironitrilo (Niso)
 1,2-Dicloropropano
 2,3-Dimetil hexano
 2,4-dimetil hexano
 P-Dioxano
 Eter alílico
 Formiato de isobutilo
 2-Metil-2-Butanol
 2-Metil Butiraldehído
 2-Metil-3-Etil pentano
 3-Metil-2-Butanotiol
 Metil metacrilato
 Piperidina
 Piridina
 Propionato de etilo
 Propionitrilo
 Tetrametilo de plomo
 2,2,3-Trimetil pentano
 2,2,4-Trimetil pentano
 2,3,3-Trimetil pentano
 Tolueno

VII. Cantidad de reporte a partir de 200,000 kg

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Acetal
 Acetato de butilo (iso,sec)
 Acetato de isoamilo
 Acetato de isopropenilo
 Acetonitrilo
 Acrilato de isobutilo
 Alcohol amílico (N,sec)
 Alcohol butílico (iso,sec,ter)
 Amil mercaptan
 Benzotrifluoruro

1-Butanol
 Butil mercaptan (N.sec)
 Butirato de etilo (Niso)
 Clorobenceno
 Cloruro de amilo
 Crotonaldehído
 Cumeno
 Dietilcetona
 Dietílico carbonato
 1,3-Dimetil butilamina
 1,3-Dimetil ciclohexano
 1,4-Dimetil ciclohexano (cis, trans)
 Estireno
 Etil benceno
 Etil butilamina
 2-etil butiraldehído
 Etil ciclohexano
 Etilendiamina
 Etileno-glicol dietílico éter
 Ferropenacarbonilo
 Isobromuro de amilo
 Isoformiato de amilo
 Metacrilato de etilo
 Metil isobutil cetona
 Metil propil cetona
 Nitroetano
 Nitrometano
 Octano (N, iso)
 Octeno (iso)
 1-Octeno
 2-Octeno
 Oxido de mesitilo
 2,2,5-Trimetil hexano
 Vinil triclorosilano
 Xileno (M.O.P.)

VIII. Cantidad de reporte a partir de 10,000 kg

- a) En el caso de las sustancias en estado líquido, no previstas en las fracciones anteriores y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación $<37.8^{\circ}\text{C}$
 Temperatura de ebullición $>21.1^{\circ}\text{C}$
 Presión de vapor ≤ 760 mm hg

IX. Cantidad de reporte a partir de 10,000 barriles.

- a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

Gasolinas ⁽¹⁾
 Kerosenas incluye naftas y diáfano ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

ARTICULO 5.- Se exceptúa de este listado a las actividades relacionadas con el manejo de las sustancias a que se refiere el artículo 41 de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos.

ARTICULO 6.- Las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse referidas a su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentren en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, con el fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

ARTICULO 7.- Las Secretarías de Gobernación y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía Minas e Industria Paraestatal de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y de Trabajo y Previsión Social, podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de las investigaciones que sobre el particular se lleven a cabo.

TRANSITORIO

UNICO.- El presente acuerdo entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el *Diario Oficial de la Federación*.

México D.F. a 30 de Abril de 1992.- El Secretario de Gobernación, Fernando Gutiérrez Barrios.- Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, Luis Donaldo Colosio Murrieta.- Rúbrica.

Publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 4 de mayo de 1992.



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

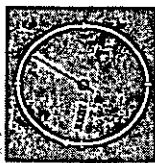
MODULO II: CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS

TEMA

EXPERIENCIA EN MÉXICO PARA DEFINIR CRITERIOS DE LIMPIEZA DE SUELOS

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL MUÑOZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

*"Experiencia en México
para definir Criterios de
limpieza de suelos"*



eXperTos Consultores Ambientales
Ing. Juan Manuel Muñoz

1

Suelos

- ◆ No definición oficial.
- ◆ Marco reglamentario incompleto y parcialmente articulado.
- ◆ Definición ingenieril. Parte mas alta del regolito.

2

Para empezar...

- ◆ Suelo, Subsuelo y Agua Subterránea de jurisdicción federal.
- ◆ Disposiciones relacionadas en leyes estatales.
- ◆ Efectos prácticos, primeros 30 cm desde la superficie.

3

Tripié sin una pata

- ◆ Medio físico: agua, aire y suelo.
- ◆ Reglamentación en agua, atmósfera, impacto ambiental, riesgo, RESPEL.
- ◆ Suelo... no NOM's, ni reglamento vigente..., solo Criterios.

4

Suelos no Residuos

- ◆ El suelo no es un RESPEL, se gestiona de manera independiente.
- ◆ Origen y definición de un residuo, NOM 052.
- ◆ Mezcla de residuos.

5

Contaminación Antropogénica

- ◆ Materiales y residuos, peligrosos y no.
- ◆ Accidentes en transportación.
- ◆ Manejo inadecuado de materiales y RESPEL.
- ◆ Tomas clandestinas, Sitios abandonados.

6

Además...

- ◆ Erosión.
- ◆ Desertificación.
- ◆ Salinización.



- ◆ Pérdida de la capacidad productiva de los suelos e invalidación para su uso.

7

Sedesol 1992

- ◆ INE y Profepa.
- ◆ INE.- Establecer Normas y criterios para restaurar la calidad del ambiente.
- ◆ Normas que aseguren la conservación o restauración...

8

Respuesta

- ◆ Convenios INE-Universidades.
- ◆ Procedimiento Técnico Administrativo para remediación.
- ◆ Acreditamiento de Tecnologías.
- ◆ Protocolo de Pruebas.

9

Semarnap 1994

- ◆ Profepa.- (Art. 68) Formular programas para la evaluación y restauración de daños ambientales, y sitios contaminados.
- ◆ INE.- (Art. 59) Coadyuvar con Profepa en la determinación de medidas para la atención de Emergencias.

10

Emergencias Ambientales

- ◆ Definiciones.
- ◆ Imponer Medidas Técnicas y de Seguridad.
- ◆ Delegaciones Profepa.- Imponer las Medidas de Seguridad, cuando existan casos de contaminación.

11

Medidas de Seguridad

- ◆ Art. 170 Cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico, casos de contaminación...
- ◆ La neutralización o cualquier acción análoga que impida que materiales o residuos generen los efectos...

12

Medidas Profepa 1997

- ◆ Evaluación de daños.
- ◆ Propuesta de Restauración.
- ◆ Investigación del Accidente.
- ◆ Estudio de Riesgo.
- ◆ PPA.

13

En Semarnap

- ◆ Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.- Operativo.
- ◆ Enfoque de resultados, a través de "Criterios Interinos", a nivel operativo y emergente.
- ◆ No acreditamiento, ni certificación.

14

Componentes del proceso

1. Evaluación de Daños.
2. Criterios de muestreo.
3. Propuesta de restauración.
4. Especificaciones de laboratorio.

15

Mas componentes...

4. Criterios Interinos.
 5. Registro y Seguimiento.
 6. Guías específicas.
- ◆ Todos los componentes accesorios.

16

Criterios Interinos

- ◆ Hidrocarburos, Acidos y Bases (Ocho).
- ◆ Usados en pares.
- ◆ Inorgánicos Tóxicos y disolventes (Catorce).

17

Usos de suelo

1. Agrícola, forestal, recreativo, de conservación.
2. Residencial, comercial.
3. Industrial.

18

Procedencia

- ◆ Grupo de Trabajo sobre Restauración de suelos contaminados.
- ◆ 37 reuniones.
- ◆ 1997-2000.
- ◆ Científicos mexicanos.

19

Participantes

- ◆ Universidad Nacional Autónoma de México (FQ, II, IG, PUMA)
- ◆ Instituto Politécnico Nacional.
- ◆ Universidad Autónoma Metropolitana
- ◆ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
- ◆ Semarnap (INE, CNA, Profepa).
- ◆ Gobierno del Distrito Federal.
- ◆ Colegio de Ingenieros Ambientales de México.

20

Aportaciones del GDT

- ◆ Manual Técnico (Guías).
- ◆ Criterios Interinos 22 sustancias.
- ◆ Dictamen sobre el encapsulamiento con cemento, cal y arena.
- ◆ Métodos inaceptables.
- ◆ Especificaciones de laboratorio.
- ◆ Actualizaciones 1999 y 2000 Guías.

21

Mas aportaciones

- ◆ Criterios de muestreo de suelos.
- ◆ Dictamen sobre tanques enterrados.
- ◆ Clasificación de hidrocarburos.
- ◆ Dictamen sobre el proceso de atadura química.
- ◆ Técnicas demostradas.
- ◆ "Disposiciones y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados".

22

Semarnat 2001

- ◆ Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes.
- ◆ Elaborar una base de información de contaminantes en suelo.
- ◆ Coadyuvar con Profepa en las medidas para la atención de emergencias ambientales y prevención y control de accidentes.

23

DG Manejo Integral de Contaminantes

- ◆ Elaborar programas para la identificación, evaluación y restauración de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos. Artículo 26.
- ◆ Evaluar, dictaminar y resolver sobre la utilización de tecnologías y sustancias para la recuperación de suelos contaminados con dichos materiales y residuos peligrosos.

24

Dirección General del Sector

- ◆ Primario y Recursos Naturales no renovables. Artículo 21.
- ◆ Diseñar y promover instrumentos de fomento y normatividad ambiental respecto de la restauración del suelo, el agua, especialmente los ecosistemas sujetos a protección especial, y sus habitats críticos, y el desarrollo sustentable de las actividades del sector primario.

25

Dirección General de Industria

- ◆ Artículo 22.
- ◆ Diseñar y promover instrumentos de fomento y normatividad ambiental para proteger los recursos naturales y los ecosistemas respecto de la contaminación del suelo y el agua, que generan las actividades del sector industrial.

26

DG de Energía y

- ◆ Actividades Extractivas. Artículo 24.
- ◆ Determinar las causas, elementos y efectos de los problemas ambientales generados por los sectores de energía y actividades extractivas respecto de la prevención, remediación y control de la contaminación generada por dichos sectores.

27

DGEAE Artículo 24

- ◆ Diseñar y promover instrumentos de fomento y normatividad ambiental de la seguridad y la protección ambiental, así como para salvaguardar los recursos naturales y los ecosistemas respecto de la contaminación del suelo, que generan las actividades del sector energía y actividades extractivas.

28

DGEAE Artículo 24

- ◆ Diseñar normas, criterios e instrumentos de fomento que apoyen la adopción de tecnología ambientalmente sustentable en los sectores de energía y actividades extractivas,... La prevención, remediación y control de la contaminación generada por dichos sectores.

29

DG de Federalización

- ◆ y Descentralización de servicios forestales y de suelo. Artículo 29.
- ◆ Integrar y mantener actualizado el inventario en materia de suelos, en coordinación con las autoridades competentes y entidades del sector, así como establecer y operar el sistema de monitoreo de la calidad del suelo.

30

DG Técnica Industrial Profepa

- ◆ Artículo 38.
- ◆ Coordinar acciones de muestreo y análisis de residuos peligrosos y suelos, derivados del programa de inspección y vigilancia en materia industrial.
- ◆ Apoyar a las Delegaciones en la evaluación de la contaminación del suelo.

31

DG Técnica Industrial

- ◆ Definición de las técnicas apropiadas para el análisis de residuos peligrosos, de suelos..., de conformidad con la normatividad jurídica aplicable.
- ◆ Definir lineamientos técnicos para la custodia de muestras de suelo y residuos peligrosos.

32

DG Técnica Industrial

- ◆ Promover la realización de la intercalibración de laboratorios acreditados, dedicados al análisis de residuos peligrosos, suelos y materiales peligrosos.
- ◆ DG Inspección de Fuentes de contaminación. Artículo 79. Vigilar el cumplimiento de las disposiciones jurídicas en materia de restauración de suelos.

33

DG de Impacto Ambiental

- ◆ Artículo 78.
- ◆ Participar en aplicación de las medidas necesarias para atender las contingencias ambientales.

34

Para completar

- ◆ Anteproyecto de Reglamento.
- ◆ Materiales Peligrosos, Residuos Peligrosos, Actividades Riesgosas y,
- ◆ Restauración de suelos contaminados.

35

Criterios de selección

- ◆ A "niveles de fondo".
- ◆ A límites de detección.
- ◆ A niveles no detectables.
- ◆ BADT.

36

Criterios de selección (2)

- ◆ Registros previos ROD, RDR.
- ◆ A estándares, normas o lineamientos existentes.
- ◆ A través de Evaluaciones de Riesgo a la Salud o al Ambiente.

37

Consideraciones generales

- ◆ Referencia genéricas.
- ◆ Resolución caso por caso.
- ◆ Muy alto, inalcanzable.
- ◆ Muy bajo, no protección.

38

Consideraciones

- ◆ Mismo método de laboratorio antes, durante y después.
- ◆ Muestra control (autoridades).
- ◆ Nivel de fondo.

39

Antecedentes

- ◆ Ausencia de normatividad nacional.
- ◆ Uso de referencias internacionales.
- ◆ No reglamento o procedimiento para evaluación de riesgos.

40

Prioridades

- ◆ Mas del 90% de eventos reportados involucraban HC y ácidos.
- ◆ Inorgánicos tóxicos en sitios abandonados.

41

Tipo 1

- ◆ Un solo contaminante.
- ◆ Pequeños en tamaño.
- ◆ Muchos en número.
- ◆ Responsable identificado.

42

Características

- ◆ Seguro disponible.
- ◆ Reciente.
- ◆ Materiales peligrosos.
- ◆ Accidentes en transportación.

43

Tipo 2

- ◆ Mezcla de varios contaminantes.
- ◆ Grandes extensiones.
- ◆ Pequeños en número.
- ◆ Sin responsable identificado.

44

Características

- ◆ Sin seguro disponible.
- ◆ Antiguos.
- ◆ Residuos peligrosos:
- ◆ Casi siempre abandonados.

45

Criterios interinos gasolina

Uso de suelo/ Contaminante	Agricultura, forestal, etc (ppm)	Residencial, comercial (ppm)	Industrial (ppm)
Gasolina	200	200	500
Benceno	20	20	50
Tolueno	40	40	100
Xilenos	40	40	100

46

Criterios interinos diesel

Diesel	1,000	1,000	1,000
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*	80.0	80.0	800.0

47

Criterios Interinos combustóleo

Residuos aceitosos, Combustóleo	1,000	1,000	2,000
Benzopireno*	0.08	0.08	0.75
Benzo(a) antraceno*	0.80	0.80	7.5
Benzo(b) Fluoranteno*	0.80	0.80	7.5
Benzo(K) Fluoranteno*	8.0	8.0	75.0
Criseno*	80.0	80.0	750

48

Criterios ácidos y bases

Contaminante	Unidades de pH
Ácidos (ácido sulfúrico)	pH del suelo mayor o igual a 4
Bases (sosa)	pH del suelo menor o igual a 10

49

Espec's de laboratorio

Contaminante	Método
Hidrocarburos base diesel	EPA 8015 B
Hidrocarburos base gasolina	EPA 8015 B
Hidrocarburos recuperables de petróleo	EPA 418.1 ASTM 3921
Benzopireno	EPA 8310, 8100 u 8270 (poliaromáticos)
Benceno	EPA 8240 u 8260 C (monoaromáticos y otros orgánicos volátiles)

50

Segundo Grupo

Uso de suelo/ Contaminante	Residencial (ppm)	Agrícola (ppm)	Industrial (ppm)
Plomo total	200	100	1,500
Arsénico total	20	20	40
Bario total	750	150	1,500
Cadmio total	20	20	100

51

Continuación...

Mercurio total	20	20	100
Niquel total	150	75	700
Selenio total	20	20	100
Zinc total	800	300	1,500
Cromo total	375	75	750

52

Últimos...

Cianuro	50	5	500
Acniamida	0.2	0.02	2.4
Acrlonitrilo	1.4	0.02	4.8
Plomo orgánico	0.1	0.5	1.0
HC monoaromáticos totales (arominas)	40	40	100

53

Espec's laboratorio

Contaminante	Método
Plomo total	EPA 7420
Arsénico total	EPA 7061
Bario total	EPA 7080
Cadmio total	EPA 7130
Mercurio total	EPA 7471
Niquel total	EPA 7520
Selenio total	EPA 7741

54

Continuación...

Zinc total	EPA 7950
Cromo total	EPA 7190
Cianuros	EPA 9010a
Acrilamida	EPA 8260 C
Acrlonitrilo	EPA 8260 C
HC monoaromáticos totales	EPA 8260 C

55

Definición de Criterios

- ◆ Compuestos químicos indicadores de toxicidad, efecto en la salud.
- ◆ [HC] como parámetro de control.
- ◆ Aplicación en función de uso de suelo.

56

Definición...

- ◆ Concentraciones reales alcanzadas para el caso de México.
- ◆ pH: Parámetro de control para restaurar suelos contaminados con ácidos o álcalis.

57

Marco internacional de referencia

- ◆ Normatividad oficial en EEUU.
- ◆ Parámetro indicador/Método Analítico.
- ◆ Intervalos amplios de concentración.

58

Marco de referencia

- ◆ Producto de Evaluaciones de riesgo a la salud.
- ◆ Compuestos cancerígenos y no cancerígenos.
- ◆ Amplia variabilidad.

59

Entrada en aplicación

- ◆ Primer Grupo III reunión GDT, 15 de abril de 1998.
- ◆ Segundo Grupo XXII reunión GDT, 5 de noviembre de 1999.

60

Segundo grupo

- ◆ Aplicados por pares (1er Grupo).
- ◆ Considerando análisis inicial en evaluación.
- ◆ A niveles de fondo (2º Grupo).

61

Conclusión

- ◆ Nuevas autoridades, nuevas disposiciones, misma Ley.
- ◆ El que contamina paga.
- ◆ La atención oportuna de un suelo contaminado puede hacer la diferencia.
- ◆ CI's Práctica común. Licitaciones Pemex, CFE, ASA, etc.

62



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS

TEMA

CONTAMINANTES ORGÁNICOS: CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

XIII CURSO INTERNACIONAL SOBRE
CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS

MÓDULO II:

CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS
CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS

TEMA

**CONTAMINANTES ORGÁNICOS:
CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO**

EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE DEL 2001

CONTAMINANTES LÍQUIDOS DE TIPO ORGÁNICO

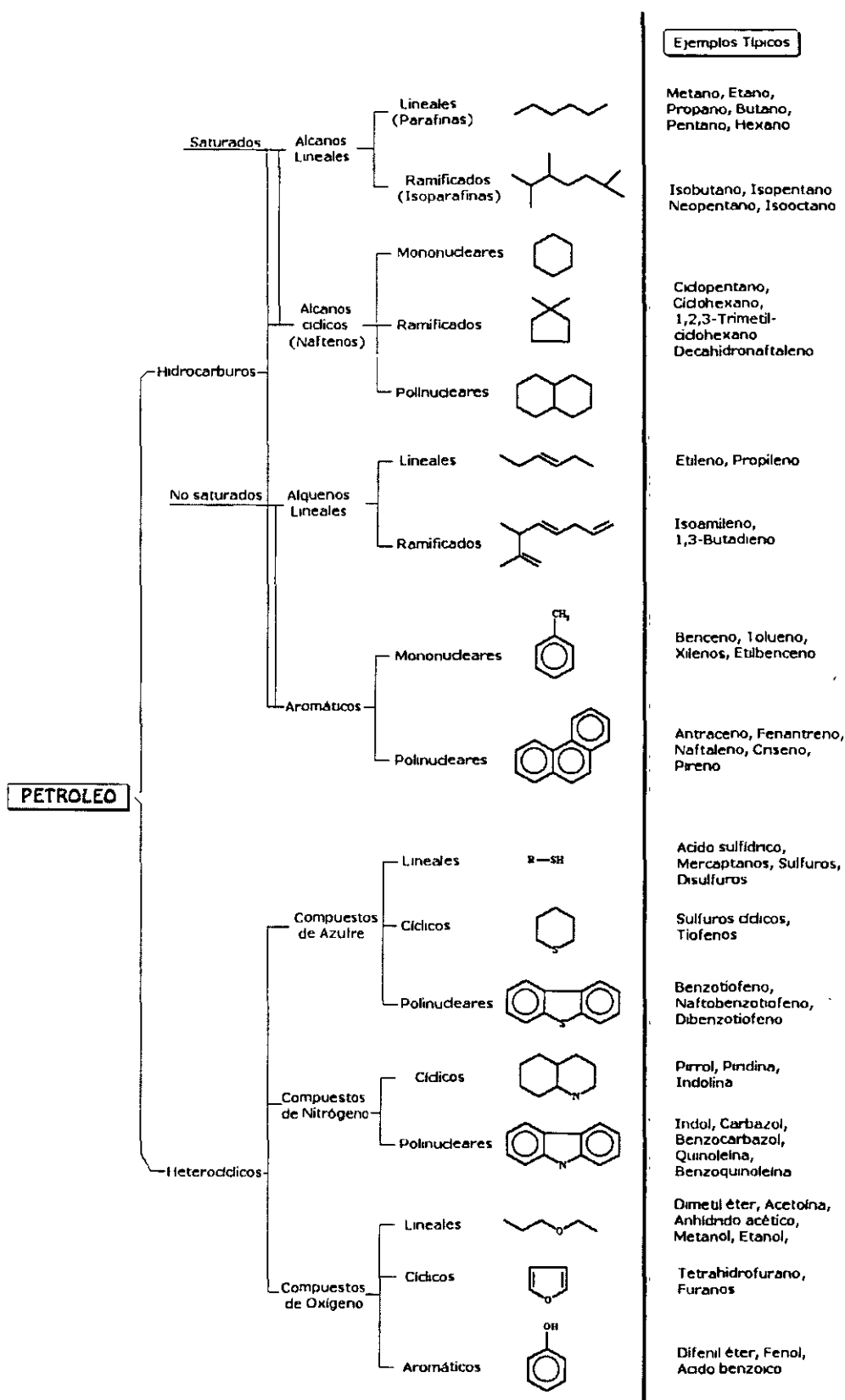
(NAPLs: Non-Aqueous Phase Liquids)

LNAPLs: Más ligeros que el agua

*petróleo crudo, combustóleo, aceites, diesel, gasolina,
benceno, tolueno, xilenos*

DNAPLs: Más densos que el agua

*tetracloruro de carbono, cloroformo, cloruro de metileno,
bifenilos policlorados, percloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE)*



CONSTITUYENTES DEL PETRÓLEO

ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DE HIDROCARBUROS PUROS

Nombre del Hidrocarburo	Fórmula condensada	Punto de ebullición (°C)	Gravedad específica g/cm ³
Metano	CH ₄	-164	0.466
Etano	C ₂ H ₆	-88.6	0.572
Propano	C ₃ H ₈	-42	0.501
Butano	C ₄ H ₁₀	-0.5	0.601
Pentano	C ₅ H ₁₂	+36.1	0.626
Hexano	C ₆ H ₁₄	+68.9	0.660
Heptano	C ₇ H ₁₆	+98.4	0.684
Octano	C ₈ H ₁₈	+125.6	0.703
Nonano	C ₉ H ₂₀	+150.8	0.718
Decano	C ₁₀ H ₂₂	+174.1	0.730
Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	+270	0.769
Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	+316.1	0.777
Eicoseno	C ₂₀ H ₄₂	+343	0.778
Triacontano	C ₃₀ H ₆₂	+449.7	0.775
Tetracontano	C ₄₀ H ₈₂	-	-
Pentacontano	C ₅₀ H ₁₀₂	-	0.794
Benceno	C ₆ H ₆	80.1	0.879
Tolueno	C ₆ H ₅ CH ₃	110.6	0.866
<i>o</i> -Xileno	1,2-(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	144.4	0.881
<i>m</i> -Xileno	1,3-(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	139.1	0.867
<i>p</i> -Xileno	1,4-(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	138.4	0.861
Pentametilbenceno	C ₆ H(CH ₃) ₅	232	-
Hexametilbenceno	C ₆ (CH ₃) ₆	265	-
Metilterbutiléter	CH ₃ OC(CH ₃) ₃	55.2	0.741
Teramilmetiléter		85.0	0.764

CONTENIDO DE ALGUNOS HIDROCARBUROS
EN COMBUSTIBLES

Compuesto	Gasolina	Diesel
Benceno %	0.12 - 3.50	0.50
Tolueno %	2.73 - 21.80	1.33
Etilbenceno %	0.36 - 2.86	0.37
<i>o</i> -Xileno %	0.68 - 2.86	1.01
<i>m</i> -Xileno %	1.77 - 3.87	0.96
<i>p</i> -Xileno %	0.77 - 1.58	0.35
Naftaleno %	0.09 - 0.49	0.50

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIBLES DERIVADOS DEL PETRÓLEO

Combustible	Temperatura de ebullición (°C)	Viscosidad cinemática (centistokes)	Gravedad específica (g/cm ³)
Gasolina	27 - 225	0.5 - 0.65	0.680 - 0.760
Gasavión	27 - 135	-	0.739
Gasolvente	77 - 138	-	0.761
Gasnafta	142 - 187	-	0.768
Kerosina	130 - 288	-	0.800
Turbosina	149 - 288	-	0.810
Gasóleo	216 - 308	-	0.848
Diesel	216 - 371	2.2 - 2.4	0.850
Aceites	300 - 500	65 - 194	0.860 - 0.950
Combustóleo	315 - 545	-	0.960
Asfalto	315 - 545	-	1.034

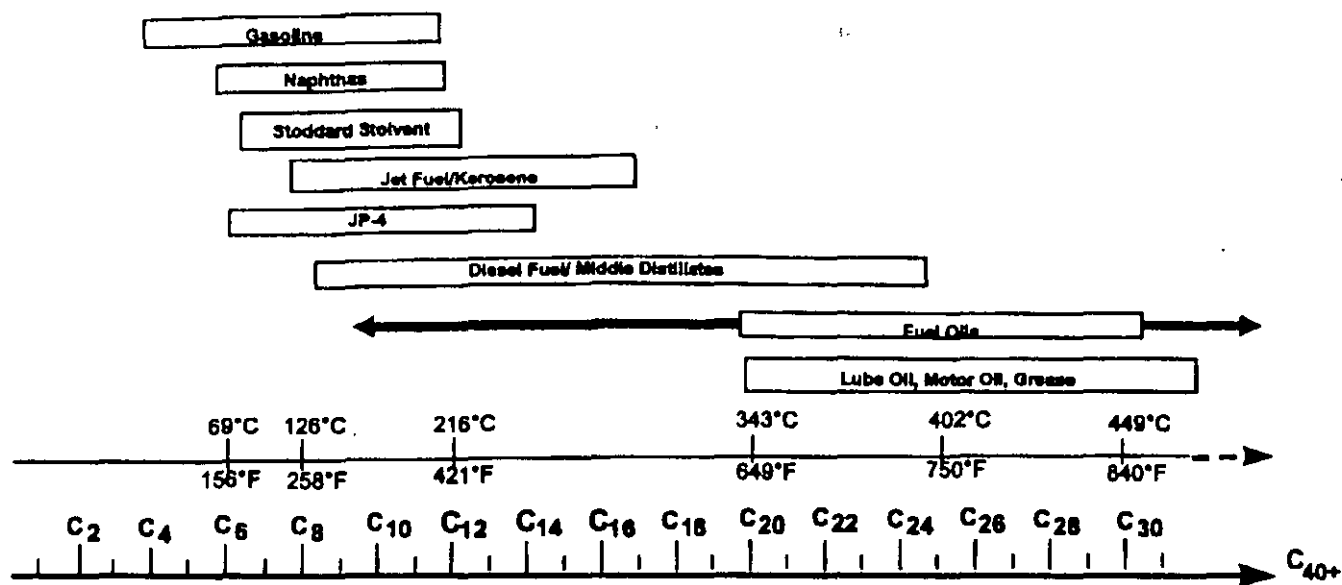


Figure 2. Approximate Carbon and Boiling Ranges of Petroleum Products

SOLUBILIDAD DE ALGUNOS HIDROCARBUROS PUROS EN AGUA

Compuesto	Solubilidad (mg/l)
MTBE	48 000
TAME	2 640
<i>n</i> -hexano	18
Benceno	1 750
Tolueno	526
<i>o</i> -Xileno	175
Etilbenceno	169
<i>m</i> -Xileno	158
Naftaleno	31
Acenafteno	3.93
Acenaftileno	3.93
Indeno(1,2,3,c,d)pireno	2.07
Fluoreno	1.69
Fenantreno	1.00
Benzo(k)fluoranteno	0.430
Fluoranteno	0.206
Pireno	0.135
Antraceno	0.045
Benzo(b)fluoranteno	0.014
Benzo(a)antraceno	0.0067
Criseno	0.0016
Benzo(a)pireno	0.0012
Benzo(g,h,i)perileno	0.0007
Dibenzo(a,h)antraceno	0.0005

La solubilidad puede ser influenciada por la presencia de otras sustancias

Propiedades del MTBE

Origen y usos

El metilterbutiléter (MTBE) es un compuesto químico sintético que pertenece al grupo de los oxigenantes, los cuales son adicionados a los combustibles para incrementar el contenido de oxígeno. Este aditivo ha sido utilizado en las gasolinas de nueva generación para reducir los niveles de monóxido de carbono y de ozono causados por las emisiones a la atmósfera que ocasionan los automotores. En Estados Unidos su aplicación en las gasolinas data de 1979, su uso se incrementó cuando se prohibió el uso del tetraetilo de plomo para mejorar la calidad del aire (1990 Clean Air Act Amendment).

En México el MTBE empezó a utilizarse alrededor de 1990, con la aparición de la gasolina Magna y posteriormente con la gasolina Premium, mismas que desplazaron a la gasolina Nova, cuyo uso se eliminó para evitar las emisiones de plomo a la atmósfera.

En Estados Unidos se reportó en la década de los 80's, la presencia de MTBE en aguas superficiales y subterráneas, por lo que actualmente es el país más avanzado en estudios sobre su comportamiento en el ambiente, las técnicas para su análisis, los aspectos regulatorios y el desarrollo de técnicas de restauración para la limpieza de las aguas contaminadas.

En relación a los aspectos regulatorios, con las modificaciones a la Ley de Seguridad del Agua Potable (Safe Drinking Water Act) de 1996, a fines de 1999 la Oficina de Agua de la USEPA agregó el MTBE a la lista de candidatos contaminantes para continuar con los estudios evaluatorios antes de decidir si se incluía o no en la normatividad correspondiente. Como una situación preventiva, un Comité Asesor recomendó el control de los niveles de concentración entre 0.020 y 0.040 mg/l (20 y 40 partes por billón) para evitar que su color y olor característicos fueran motivo de alarma por parte de los consumidores. En mayo del año 2000, el Consejo de Agua de los Estados de Occidente (Western States Water Council) en California fijó el límite permisible del MTBE en una concentración de 0.013 mg/l, en agua destinada para consumo humano.

El MTBE se produce mediante procesos químicos de síntesis a partir del metanol e isobutileno, a diferencia de las gasolinas que son producidas por la refinación del petróleo y constituyen la fracción que destila entre 30 y 225 °C. El MTBE se adiciona a las gasolinas hasta el momento en que éstas son formuladas para su distribución y posterior venta al público, por ello es menos común encontrarlo como contaminante del subsuelo en refinerías.

Características fisicoquímicas del MTBE

La fórmula química del MTBE es $\text{CH}_3\text{OC}(\text{CH}_3)_3$, su peso molecular es de 88.15 y su gravedad específica de 0.743 g/cm^3 . Es un líquido de color amarillo muy claro con un olor característico a terpenos, a temperatura ambiente es volátil, explosivo e inflamable, de manera similar a la gasolina y al benceno.

Su estructura química se presenta en la Fig. 1, la disposición del grupo éter en la molécula le confiere un “momento dipolo” debido al par de electrones que están asociados al átomo de oxígeno. Esto es hace que el MTBE se comporte como un compuesto “iónico” a diferencia de los hidrocarburos contenidos en la gasolina, que por naturaleza son prácticamente no-polares.

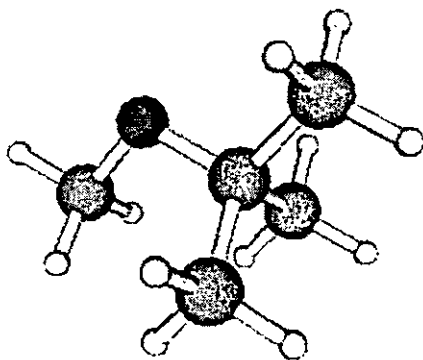


Fig. 1 Estructura química del MTBE

Para explicar el comportamiento del MTBE como contaminante en el suelo y subsuelo, es conveniente comparar sus características con las de los hidrocarburos típicos de la gasolina, que en conjunto se conocen como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), y en especial con el benceno que es el más común. En la Tabla 1, se resumen sus características fisicoquímicas y se comparan con las de otros hidrocarburos.

El coeficiente de distribución octanol/agua (K_{ow}) del MTBE indica que tiene una afinidad por el agua, 1.6 veces mayor que la del benceno. De ahí que su solubilidad en el agua sea de 48,000 mg/l, que es 28 veces mayor a la del benceno, que es de 1,750 mg/l. Estas dos propiedades se deben básicamente a su polaridad, como se mencionó anteriormente.

Cuando está como contaminante en el agua a concentraciones superiores a la de su solubilidad, el MTBE forma una capa que flota en el agua, esto es porque su densidad es menor a la del agua, al igual que los BTEX, la gasolina y el diesel.

El MTBE tiene una muy baja afinidad por el carbono orgánico, $K_{oc} = 11.2$, por lo que prácticamente no se adsorbe en la materia orgánica del suelo, a diferencia del benceno que tiene una $K_{oc} = 79$. Esto hace que el MTBE no se encuentre como contaminante en el suelo, sino en el agua subterránea.

Tabla 1. Comparación de las propiedades fisicoquímicas

Compuesto	Peso molecular	Gravedad específica g/cm^3	Log K_{ow} Coeficiente de distribución octanol/agua	Solubilidad en agua a 20-25°C mg/l	Constante de la Ley de Henry (K_{aw} ; aire/agua) adim	Presión de vapor a 20-25°C mm Hg	Coeficiente de difusión	
							en aire cm^2/s	en agua cm^2/s
MTBE	88.15	0.743	1.08	48 000	0.0238	249.0	0.079	0.0000940
TAME	102.20		1.92	2 640	0.000065	75.21	-	-
Benceno	78.11	0.879	1.77	1 750	0.2290	95.2	0.088	0.0000098
Tolueno	92.13	0.866	2.13	515	0.2600	30.0	0.085	0.0000094
Etilbenceno	106.16	0.867	2.56	169	0.3250	10.0	0.075	0.0000078
Xileno	106.16	0.870	2.38	198	0.2900	7.0	0.072	0.0000085
Naftaleno	128.20	-	3.30	31	0.0199	0.23	0.059	0.0000075
Fenantreno	178.22	-	4.15	1 60	0.25	0.00021	0.033	0.0000074
Pireno	202.30	-	4.58	0 16	0.000000289	0.000000042	0.027	0.0000072

Además, el MTBE presenta un coeficiente de retardo muy bajo (de 1.21 cuando para el benceno es de 2.5), esto le permite desplazarse prácticamente junto con el agua. Este movimiento en el flujo subterráneo se ve favorecido porque el MTBE tiene un coeficiente de dispersión en agua casi 10 veces mayor al del benceno y además por el fenómeno de difusión, que se da como respuesta a un gradiente de concentración. Lo anterior ocasiona un incremento en el tamaño de las manchas de contaminación en agua subterránea y en un tiempo menor comparado con lo que ocurriría si se tratara de benceno.

Por otro lado, la constante de la Ley de Henry que se interpreta como un coeficiente de distribución aire/agua (K_{aw}), indica que el MTBE es 10 veces menos volátil que el benceno cuando ambos están disueltos en el agua. Sin embargo, la presión de vapor del MTBE es 26 veces más alta que la del benceno. Esto significa que aunque el MTBE tenga preferencia por el agua, las pocas moléculas que se desprendan en forma de vapor ejercerán una mayor presión al pretender abandonar el agua, en comparación con la presión que pueden ejercer las moléculas de benceno. Ya en el aire, el MTBE presenta un coeficiente de dispersión similar al del benceno.

Lo anterior contribuye al hecho de obtener lecturas altas de explosividad en la fase gaseosa del subsuelo, además esto se ve favorecido porque en una gasolina el MTBE está en mayor proporción, entre 10 y 15%, comparado con el benceno que está en 1.5%.

Biodegradación natural en el ambiente

Respecto a la biodegradación del MTBE por atenuación natural, en el ambiente del subsuelo se considera más difícil y lenta comparada con la del benceno, ya que su estructura molecular muestra mayor resistencia al ataque microbiano, pero puede ser degradado bajo condiciones óptimas cuando hay un aporte de importante de oxígeno como aceptor final de electrones.

Otros productos relacionados

El MTBE se produce por síntesis, por lo que se pueden encontrar otros compuestos relacionados que se generan durante la reacción. El TAME, metilteramiléter, es uno de los compuestos que generalmente acompaña al MTBE, al igual que trazas de metanol que es la materia prima para la reacción.

CREOSOTA

Origen de su presencia como contaminante del ambiente:

derrames en plantas de impregnación de madera para construcción de casas, durmientes y postes; arrastre por derrame de combustibles que ocurren sobre vías de ferrocarril

Características

prácticamente sólida a temperatura ambiente, fluido viscoso a altas temperaturas; componentes típicos: hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) complejos

Efectos a la salud

√ la mayoría de los componentes típicos son cancerígenos a humanos

Método analítico:

hidrocarburos totales: EPA 418.1

identificación del perfil cromatográfico típico: método EPA 8015 B

identificación de sus componentes típicos: EPA 8310

Forma de contaminación:

generalmente contaminan suelo superficial, prácticamente no hay lixiviación natural por su alta viscosidad, pero pueden ser arrastrados al subsuelo cuando hay derrames de combustibles

Soluciones de restauración:

suelos: incineración bajo condiciones bien controladas para evitar la formación y emisiones de dioxinas a la atmósfera; oxidación química controlada

agua subterránea: cierre de pozos para consumo; contención mediante galerías perimetrales

Límites permisibles en agua y suelo:

hidrocarburos poliaromáticos de manera individual

Table B-6. Indicator Compounds and Hydrocarbon Fractions¹**TYPE OF RELEASE**

Indicator Compound	TYPE OF RELEASE							unknown
	gasoline	kerosene, jet fuel	diesel, light fuel oils	heavy fuel oils	crude oil	highly refined base oils ²	Used motor oil, lubricating oil	
Benzene	X	X						X
Toluene	X	X						X
Ethylbenzene	X	X						X
Xylene	X	X						X
Acenaphthene		X	X	X	X		X	X
Anthracene		X	X	X	X		X	X
Benzo(a)pyrene		X	X	X	X		X	X
Chrysene		X	X	X	X		X	X
Dibenz(a,h) Anthracene		X	X	X	X		X	X
Indeno(1,2,3-cd)pyrene		X	X	X	X		X	X
Benzo(k)fluoranthene		X	X	X	X		X	X
Benz(a)anthracene		X	X	X	X		X	X
Fluoranthene		X	X	X	X		X	X
Fluorene		X	X	X	X		X	X
Naphthalene		X	X	X	X		X	X
Pyrene		X	X	X	X		X	X
Lead (inorganic)	3							3
Metals							X	
MTBE	3							3
MEK	3							3
MIK	3							3
Aliphatics C ₆ -C ₈	X				X			X
Aliphatics C ₈ -C ₁₀	X	X	X		X			X
Aliphatics C ₁₀ -C ₁₂	X	X	X		X			X
Aliphatics C ₁₂ -C ₁₆		X	X		X	X		X
Aliphatics C ₁₆ -C ₂₈			X	X	X	X	X	X
Aromatics C ₈ -C ₁₀	X	X	X		X			X
Aromatics C ₁₀ -C ₁₂	X	X	X		X			X
Aromatics C ₁₂ -C ₁₆		X	X		X	X		X
Aromatics C ₁₆ -C ₂₁			X	X	X	X		X
Aromatics C ₂₁ -C ₂₈				X	X	X	X	X

Notes

¹ASTM 1995 and TPH Criteria Working Group; for large releases, additional indicator compounds may be identified for evaluation.

²Applies to oils formulated with highly refined base oils including mineral oil-based hydraulic fluids (Toxicological Profile for Mineral Oil Hydraulic Fluids, Organophosphate Ester Hydraulic Fluids, and Polyalphaolefin Hydraulic Fluids, ATSDR, 1994), motor oils, industrial oils, and automatic transmission fluid-type oils.

³When suspected to be present.

Propiedades Físicoquímicas de Hidrocarburos Monoaromáticos

	No. CAS	Peso Molecular (g/mol)	Coeficiente de dispersión		Log (Kow) Coeficiente de distribución octanol/agua	Constante de Ley de Henry (K _{aire/agua})	Presión de vapor (a 20-25°C) (mm Hg)	Solubilidad (a 20-25°C) (mg/l)
			En aire (cm ² /s)	En agua (cm ² /s)				
MTBE	1634-04-4	88.15	0.0792	0.00009410	1.08	0.9238	249	48,000
Benceno	71-43-2	78.1	0.0880	0.00000980	1.77	0.229	95.2	1,750
Tolueno	108-88-3	92.4	0.0850	0.00000940	2.13	0.260	30.0	515
Xilenos	1330-20-7	106.2	0.0720	0.00000850	2.38	0.290	7.00	198
Étilbenceno	100-41-4	106.2	0.0750	0.00000780	2.56	0.325	10.0	169

Propiedades de los hidrocarburos monoaromáticos con relación a efectos a la salud (toxicidad y riesgo de cáncer)

	Dosis de Referencia (mg/kg/día)		Concentración de Referencia (mg/m ³)	Factor de la Pendiente de Cáncer 1/(mg/kg/día)		Unidad del Factor de riesgo 1/(µg/m ³)	Evidencia demostrada	Riesgo de cáncer	Factor de Absorción Dérmica Relativa (adimensional)	Coeficiente de Permeabilidad Dérmica (cm/h)	Tiempo de Exposición Dérmica (h)	Tiempo de Exposición Crítica (h)	Coeficiente de Permeabilidad Dérmica Relativo (adimensional)	Factor de Adsorción Dérmica (cm/evento)
	oral	dérmica		oral	dérmica									
Benceno	3.00E-03	-	5.95E-03	2.90E-02	2.99E-02	8.29E-06	A	Cáncer	0.5	0.021	0.26	0.63	0.013	7.3E-2
Xilenos	2.00E+00	1.84E+00	7.00E+00	-	-	-	D	No-Cáncer	0.5	0.08	0.39	1.4	0.16	2.9E-1
Tolueno	2.00E-01	1.60E-01	4.00E-01	-	-	-	D	No-Cáncer	0.5	0.045	0.32	0.77	0.054	1.6E-1
Etilbenceno	1.00E-01	9.70E-02	1.00E+00	-	-	-	D	No-Cáncer	0.5	0.074	0.39	1.3	0.14	2.7E-1
MTBE	1.00E-02	8.00E-03	3.00E+00	-	-	-	-	No-Cáncer	0.5	-	-	-	-	-

Propiedades Físicoquímicas de Hidrocarburos Poliaromáticos

	No. CAS	Peso Molecular (g/mol)	Coeficiente de dispersión		Log (Ko/w) Coeficiente de distribución octanol/agua	Constante de Ley de Henry (K _{aire/agua})	Presión de vapor (a 20-25°C) (mm Hg)	Solubilidad (a 20-25°C) (mg/l)
			En aire (cm ² /s)	En agua (cm ² /s)				
Naftaleno	91-20-3	128.2	0.0590	0.00000750	3.30	0.0199	0.230	31
Acenafteno	83-32-9	154.2	0.0421	0.00000769	3.85	0.318	0.005	3.93
Acenaftileno	208-96-8	152.2	0.0439	0.00000753	4.00	0.0047	0.00000000851	3.93
Fluoreno	86-73-7	166.0	0.0363	0.00000788	3.86	0.00483	0.017	1.69
Fenantreno	85-01-8	178.2	0.0333	0.00000747	4.15	0.250	0.00021	1.60
Fluoranteno	206-44-0	202.0	0.0302	0.00000635	4.58	2.76	0.0177	0.206
Pireno	129-00-0	202.3	0.0272	0.00000724	4.58	0.00000029	0.000000042	0.160
Indeno(1,2,3,c,d)pireno	193-39-5	276.3	0.0233	0.00000441	7.53	0.00000000021	0.000000001	0.0620
Antraceno	120-12-7	178.2	0.0324	0.00000774	4.15	2.78	0.0000013	0.0450
Benzo(b)fluoranteno	205-99-2	252.0	0.0226	0.00000556	5.74	0.000829	0.000000667	0.0147
Benzo(a)antraceno	56-55-3	228.3	0.0510	0.00000900	6.14	0.000000569	0.00000015	0.0057
Benzo(k)fluoranteno	207-08-9	252.3	0.0226	0.00000556	5.74	0.000000441	0.00000000959	0.0043
Criseno	218-01-9	228.2	0.0248	0.00000621	5.30	0.000000487	0.00000000576	0.0018
Benzo(a)pireno	50-32-8	252.3	0.0430	0.00000900	6.01	0.0000466	0.000568	0.0016
Benzo(g,h,i)perileno	191-24-2	276.0	0.0490	0.00005650	6.20	0.00000577	0.000000001	0.0007
Dibenzo(a,h)antraceno	53-70-3	278.4	0.0200	0.00000524	5.87	0.0000157	0.00000000052	0.0005

Propiedades de los hidrocarburos poliaromáticos con relación a efectos a la salud (toxicidad y riesgo de cáncer)

	Dosis de Referencia (mg/kg/día)		Concentración de Referencia (mg/m ³)	Factor de la Pendiente de Cáncer 1/(mg/kg/día)		Unidad del Factor de riesgo 1/(1g/m ³)	Evidencia mostrada en la práctica	Riesgo de cáncer	Factor de Absorción Dérmica Relativa (adimensional)	Coeficiente de Permeabilidad Dérmica (cm/h)	Tiempo de Exposición Dérmica (h)	Tiempo de Exposición Crítica (h)	Coeficiente de Permeabilidad Dérmica Relativo (adimensional)	Factor de Adsorción Dérmica (cm/evento)
	oral	dérmica		oral	dérmica									
Naftaleno	0.400	0.356	1.40	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	0.069	0.53	2.2	0.2	2.7E-1
Acenafeno	0.0600	0.0534	-	-	-	-	-	No-Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Acenaftileno	0.00400	0.00356	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Fluoreno	0.0400	0.0356	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Fenantreno	0.0300	0.0267	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	0.23	1.1	5.6	2.9	1.2E+0
Fluoranteno	0.0400	0.0356	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	0.36	1.5	7.3	8.9	2.1E+0
Pireno	0.0300	0.0267	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Indeno(1,2,3,c,d)pireno	-	-	1.10	0.730	0.820	8.80E-05	B2	Cáncer	0.05	1.9	4.2	20	380	1.9E+1
Antraceno	0.300	0.267	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Benzo(b)fluoranteno	-	-	1.00	0.730	0.820	8.80E-05	B2	Cáncer	0.05	0.81	2.2	10	46	5.8E+0
Benzo(a)antraceno	-	-	1.00	0.730	0.820	8.80E-05	B2	Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Benzo(k)fluoranteno	-	-	0.100	0.0730	0.082	8.80E-06	B2	Cáncer	0.05	1.2	3	14	130	1.0E+1
Criseno	-	-	0.0000009	1.15	1.29	3.29E-04	B2	Cáncer	0.05	0.81	2.2	10	46	5.8E+0
Benzo(a)pireno	-	-	11.00	7.30	8.20	2.09E-03	B2	Cáncer	0.05	-	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perileno	0.0300	0.0267	-	-	-	-	D	No-Cáncer	0.05	1.2	2.9	14	130	9.8E+0
Dibenzo(a,h)antraceno	-	-	0.400	7.30	8.20	-	B2	Cáncer	0.05	2.7	4.4	21	690	2.7E+1

Hoja 2 de 2

EFECTOS DE ALGUNOS HIDROCARBUROS EN LA SALUD HUMANA

CONTAMINANTE	FACTOR DE ATENUACIÓN EN SUELO QUE DETERMINA LA LIXIVIACIÓN HACIA EL AGUA SUBTERRÁNEA (mg/kg)	EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	
		EFFECTO ^{2,3}	DAÑOS
ACENAFTENO	5.2	tóxico	Irritante a las mucosas y piel. Daño al hígado
FENANTRENO		tóxico	Irritante de la piel y vías respiratorias
FLUORENO	6.8	tóxico	Irritante de la piel y vías respiratorias. Reducción de células rojas y hemoglobina
NAFTALENO	0.0077	tóxico	Fatiga confusión, náusea y vómito. Alergia en la piel y puede dañar el hígado y el riñón
ANTRACENO	23	tóxico	Irritante en la piel. Su dosis de referencia se fijó por efecto no observado.
FLUORANTENO	310	tóxico	Necropatía, incremento del peso del hígado, alteraciones hematológica y efectos clínicos
BENZO(B)FLUORANTENO	0.23	carcinógeno	Irrita piel y ojos. Produce tumores en pulmón ensayado en ratones
BENZO(K)FLUORANTENO	2.3	carcinógeno	Se ha demostrado su carcinogenicidad en animales
BENZO(A)PIRENO	0.019	carcinógeno	Daño en glóbulos rojos de la sangre hasta anemia y depresor del sistema inmunológico. Efectos negativos en el desarrollo y reproducción.
BENZO(A)ANTRACENO	0.073	carcinógeno	Desarrollo de tumores
DIBENZO(A)ANTRACENO	0.07	carcinógeno	
BENCENO	0.00009	carcinógeno	Daño al sistema nervioso central y efectos en el sistema hematológico e inmunológico
TOLUENO	0.44	tóxico	Efecto narcótico, daño al hígado, riñón.
ETILBENCENO	0.75	tóxico	Impacto en el sistema nervioso, hígado y riñón
XILENOS	11-13	tóxico	Efecto al sistema nervioso central e hígado
METILTERBUTILÉTER	1.4	tóxico	Límite establecido por sabor y olor, más que por toxicidad

PENTACLOROFENOL

Origen de su presencia como contaminante del ambiente:

fungicida empleado en la conservación de la madera y tratamiento de semillas

Características

líquido ligeramente soluble en agua

Efectos a la salud

✓ probables cancerígenos a humanos

✓ se absorbe en los tejidos causando daños a hígado, riñón y sistema nervioso

Método analítico: EPA 8310, EPA 8270

Forma de contaminación:

generalmente contaminan suelo superficial, hay lixiviación natural por lluvia en función del pH, pueden ser arrastrados al acuífero cuando hay derrames de combustibles

Solución de remediación en acuíferos:

filtración por carbón activado

Solución de remediación en suelos:

oxidación química controlada; excavación, confinamiento

Límites permisibles en agua:

Canadá protección vida acuática 0.00002 – 0.0003 mg/l

agua potable 0.030 mg/l

USA agua potable 0.02 – 0.20 mg/l

México agua (fuente de abastecimiento para consumo humano) 0.030 mg/l

Límites permisibles en suelo:

Canadá agrícola 0.05 mg/kg; residencial 0.5 mg/kg; industrial o comercial 5 mg/kg

TETRACLOROETILENO (PERCLOROETILENO) Y TRICLOROETILENO

Origen de su presencia como contaminantes del ambiente:

descargas de la industria de electrónicos y ensamblado de microcomponentes
descargas de plantas de lavado en seco y de fabricación de blanqueadores orgánicos

Características

líquido más denso que el agua e insoluble en ésta (DNAPL), volátil a temperatura ambiente

Efectos a la salud

- ✓ causa problemas hepáticos, aumenta el riesgo de cáncer
- ✓ clasificación USEPA B2 (suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales, insuficiente evidencia para clasificarlo como carcinógeno a humanos)

Método analítico:

EPA 8260

Forma de contaminación:

cuando ocurre un derrame en el suelo superficial, tiende a penetrar rápidamente al subsuelo, por su alta densidad alcanza el acuífero y se deposita en el fondo de éste

Soluciones de remediación en acuíferos

extracción y filtración por carbón activado o adsorbentes específicos;
barreras pasivas

Límite permisible en agua

USA 0.005 mg/l

BIFENILOS POLICLORADOS

Origen de su presencia como contaminantes del ambiente:

derrames superficiales en subestaciones eléctricas, disposición de transformadores en tiraderos industriales, accidentes en carretera

Características

líquido aceitoso, con una elevada constante dieléctrica, insoluble en agua con densidad mayor a la del agua (DNAPL), soluble en disolventes orgánicos y en combustibles destilados del petróleo

Marcas comerciales comunes:

Aroclor, Clorfen, Fenclor, Kaneclor

Variedades comunes de Aroclor: 1242, 1248, 1254, 1260, 1262

(los dos últimos dígitos indican el % de cloro en la molécula, entre mayor sea el %, es mayor su toxicidad, hay 209 compuestos químicamente diferentes)

Efectos a la salud

- ✓ cancerígenos a humanos por contacto dérmico
- ✓ acumulable en tejidos grasos (bioacumulación)
- ✓ daños al sistema respiratorio, sistema nervioso e hígado por exposición a vapores de dioxinas y dibenzofuranos clorados que son producto de su calentamiento

Método analítico: EPA 8082

Forma de contaminación:

generalmente contaminan suelo superficial, hay poca lixiviación natural por lluvia, pero pueden ser arrastrados al acuífero cuando hay derrames de combustibles

Soluciones de remediación:

suelo: considerar los suelos afectados como residuos peligrosos, someter a incineración bajo condiciones bien controladas para evitar la formación y emisiones a la atmósfera de dioxinas y dibenzofuranos clorados

agua subterránea: filtración por carbón activado y adsorbentes innovadores

Límites permisibles en agua:

USA	0.0005 – 0.0001 mg/l
Canadá	0.0000001 mg/l
México	0.0000008 mg/l

Límites permisibles en suelo (Canadá):

agrícola 0.5 mg/kg; residencial 5 mg/kg; industrial y comercial 50 mg/kg

PLAGUICIDAS ORGANOCOLORADOS

Origen de su presencia como contaminantes del ambiente:

aplicación en áreas de cultivo, dispersión durante su transporte, derrames y disposición en industrias productoras

Características

generalmente son polvos insolubles en agua, durante su formulación se adicionan agentes tensoactivos para facilitar su dispersión

Nombres comunes

adlin, dieldrin, endrin, lindano, BHC α , BHC β , BHC δ , clordano, DDD, DDE, DDT, heptacloro, heptacloro epóxido, metoxicloro

Otros compuestos relacionados con la fabricación:

clorobenceno, diclorobencenos, clorofenoles, 1,2-dicloroetano

Efectos a la salud

√ la gran mayoría son carcinógenos, mutágenos y tóxicos, producen daño al hígado, sistema respiratorio y sistema nerviosos central

Método analítico:

EPA 8081

Forma de contaminación:

a partir del suelo superficial por lixiviación pueden permear y alcanzar el manto freático; por infiltración de aguas de canales o ríos

Soluciones de remediación de agua subterránea:

filtración por carbón activado

Soluciones de remediación de suelos:

oxidación química controlada, excavación y confinamiento

LÍMITES DE PLAGUICIDAS ORGANOCLORADOS EN AGUA

CONTAMINANTE	M É X I C O			USA	CANADA
	CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA ¹ 1989	LÍMITE EN AGUA DE USO PÚBLICO URBANO ² 1999	LÍMITE EN AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO ³ 2000	LÍMITES MÁXIMOS EN AGUA POTABLE ⁴ 2001	LÍMITES MÁXIMOS EN AGUA POTABLE ⁵ 1991
ALDRIN	0.00003	0.001	0.00003	-	0.00007
DIELDRIN	0.0000007	0.001	0.00003	-	0.00007
ENDRIN	-	0.0005	-	0.002	-
BHC α	-	-	-	-	-
BHC β	-	-	-	-	-
BHC δ	-	-	-	-	-
BHC γ (LINDANO)	0.003	0.003	0.002	0.0002	0.004
CLORDANO	0.003		0.20 (total de isómeros)	0.002	0.007
HEPTACLORO Y HEPTACLOROEPÓXIDO	0.0001 (total)	0.0001 -	0.00003 -	0.0004 0.0002	0.003
DDD	0.0000002	-	-	-	-
DDE	-	-	-	-	-
DDT	0.001	0.001	1.000 (total de isómeros)	-	0.030 (total de isómeros)
METOXICLORO	0.030	-	0.020	0.040	0.900
ENDOSULFAN (α y β)	-	0.070	-	-	-
HEXACLOROBENCENO	0.00001	0.00005	0.001	0.001	-
CLOROBENCENO	0.020	0.020	-	0.100	-
DICLOROBENCENOS	0.400	0.400	-	-	-
1,2 diclorobenceno	-	-	-	0.600	0.030
1,3 diclorobenceno	-	-	-	-	-
1,4 diclorobenceno	-	-	-	0.075	0.001
1,2 DICLOROETANO	0.005	0.003	-	0.005	0.005

¹ Como fuente de abastecimiento de agua potable

² Ley Federal de Derechos en Materia de Agua

³ NOM-127-SSA1

⁴ Office of Water, USEPA

⁵ Canadian council of Ministers of the Environment

TABLE X2.2 Physicochemical Properties of Sample Compounds Selected to Represent the Magnitude and Range of Properties Within Environmentally Significant Compound Classes^A

Compound Class	Sample Compounds	C_w Aqueous Solubility (mg/L)	P^B Vapor Pressure (torr)	K_H Henry's Law Constant (L atm mol ⁻¹)	log K_{ow} Octanol-Water Partition Coefficient	K_{oc} Organic Carbon Partition Coefficient (mL/g) ^D
Organics						
Halogenated Volatile Organic Compounds	Dichloromethane	1.9E+04	4.5E+02	2.60E+00	1.15	1.1E+01
	Tetrachloroethene	1.50E+02	1.91E+01	2.75E+01	2.88	3.7E+02
Non-halogenated Volatile Organic Compounds	Carbon Disulfide ^C	2.10E+03 (20°C)	2.97E+02 (20°C)	1.4E+00 (20°C)	1.70-4.16	6.5E+01
	Methyl Ethyl Ketone ^C	2.39E+05	9.06E+01	1.05E-02	0.29	4.8E+00
Alkylated Benzenes (subset of Aromatic VOCs)	Benzene	1.79E+03	9.6E+01	5.5E+00	2.13	5.4E+01
	Ethylbenzene	1.66E+02	9.57E+00	7.9E+00	3.15	5.8E+02
Chlorinated Benzenes (subset of Chlorinated Hydrocarbons)	1,2-Dichlorobenzene	1.18E+02	1.48E+00	2.5E+00	3.38	1.0E+03
	Hexachlorobenzene	5.81E-03	2.35E-05	1.50E+00	5.5	7.4E+04
Phenols	Phenol	9.0E+05	1.95E-01	4.1E-04	1.45	2.3E+00
	2-Chlorophenol ^C	2.80E+04	1.42E+00	5.6E-04	2.15	6.2E+01
Phthalate Esters	Dimethyl Phthalate	4.25E+03	1.82E-02	1.10E-03	1.53	4.4E+01
	Di-n-butyl Phthalate	9.43E+00	7.26E-05	1.29E-03	4.57	1.3E+03
Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Organochlorine Pesticides	Aldrin ^C	0.02(20°C)	0.0000375 (20°C)	5.0E-01	6.5	3.8E+04
	Dieldrin	2.20E-01	5.02E-06	1.12E-02	5.48	9.9E+03
Organic Acids and Bases	Benzic Acid ^{C,D}	2700 (18°C)	4.5e-3 (20°C)	7.00E-05	1.87	5.7E+01
	Aniline ^{C,E}	3.61E+04	4.89E-01	1.20E-01	0.9	1.4E+01
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)	Naphthalene	3.15E+02	7.96E-02	4.3E-01	3.36	1.4E+03
	Benzo(a)pyrene	1.52E-03	5.51E-09	1.20E-03	6.50	1.9E+06
Inorganics						
Metals ^C	Lead	NA	1.00E+01 (1160°C)	NA	NA	NA
	Mercury	NA	2.00E-03	NA	NA	NA

^A All data is for 25°C and was taken from Schwarzenbach et al (10) unless otherwise noted.

^B All K_{oc} values estimated using linear free energy relationships.

^C Data from Howard (11).

^D Benzoic acid is an organic acid and has an acid dissociation (pKa) of 4.1 (11).

^E Aniline is an organic base and has a base dissociation constant (pKb) of 9.4 (11).

LÍMITES PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA
EN LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA

ESTADO	CONTAMINANTE	PARAMETRO INDICADOR	LÍMITE PERMISIBLE (NIVEL DE LIMPIEZA)		MÉTODO ANALÍTICO	
			SUELO (mg/kg)	AGUA SUBTERRÁNEA (mg/l)	SUELO	AGUA SUBTERRÁNEA
Alabama	gasolina	benceno		0.005		EPA 602.624
		tolueno		1		EPA 602.624
		etilbenceno		0.700		EPA 602.624
		xilenos		10		EPA 602.624
	gasolina diesel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071 EPA 418.1	
Arizona	gasolina	HTP		0.001		EPA 418.1
		benceno	0.13	0.005	EPA 8020	EPA 502.2
		tolueno	200	1	EPA 8020	EPA 502.2
		etilbenceno	68	0.700	EPA 8020	EPA 502.2
		xilenos	44	10	EPA 8020	EPA 502.2
Arkansas	gasolina diesel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
		BTEX	0-400		EPA 8020	
California	gasolina	benceno	0.3-1		EPA 8020	
		tolueno	0.3-50		EPA 8020	
		etilbenceno	1-50		EPA 8020	
		xilenos	1-50		EPA 8020	
Delaware	gasolina diesel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
		BTEX	10		EPA 3010+8020	
Florida	gasolina	benceno		0.001		EPA 602
		BTEX		0.050		EPA 602
		naftalenos		0.100		EPA 610
Georgia	gasolina	benceno		0.005 - 0.071		EPA 8020
		tolueno		1 - 200		EPA 8020
		etilbenceno		0.700 - 28.718		EPA 8020
		xilenos		10		EPA 8020
		BTEX	20-100		EPA 8020	
	gasolina diesel aceite gastado diesel	HTP	100-500		California M	
		benzopireno		0.00003 - 0.0002		EPA 550 EPA 8270
		antraceno		110		EPA 8270
		criseno		0.0003		EPA 8270
		fluorantreno		0.370		EPA 8270
		fluoreno		14		EPA 8270
		pireno		11		EPA 8270

**LÍMITES PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA
EN LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA**

ESTADO	CONTAMINANTE	PARÁMETRO INDICADOR	LÍMITE PERMISIBLE (NIVEL DE LIMPIEZA)		MÉTODO ANALÍTICO	
			SUELO (mg/kg)	AGUA SUBTERRÁNEA (mg/l)	SUELO	AGUA SUBTERRÁNEA
Idaho	gasolina	benceno		0.005		EPA 8020
		tolueno		1		EPA 8020
		etilbenceno		0.700		EPA 8020
		xilenos		10		EPA 8020
	diesel	HTP	40-200		EPA 8015	
		HTP	100-2000		EPA 8015	
	aceite gastado	HTP	100		EPA 418.1	
Kansas	gasolina	benceno	1.4	0.005	EPA 8020	EPA 502.2
		tolueno		1		EPA 502.2
		etilbenceno		0.680		EPA 502.2
		xilenos		0.440		EPA 502.2
	gasolina diesel aceite gastado diesel	HTP	100			
		naftaleno		0.143		
Kentucky	gasolina	BTEX (c/u)	1	0.005	EPA 8240	EPA 8240
Louisiana	gasolina	BTEX	100		EPA 8020	
Michigan	gasolina	benceno	24	0.001	EPA 8020	EPA 8020
		tolueno	16,000	0.790	EPA 8020	EPA 8020
		etilbenceno	1500	0.074	EPA 8020	EPA 8020
		xilenos	5600	0.280	EPA 8020	EPA 8020
Missouri	gasolina	HTP	50-500	0.005 – 0.010	EPA 418.1M	EPA 418.1
Montana	gasolina	HTP	100			
	diesel					
Nebraska	gasolina	benceno	0.005-50	0.005	EPA 8021	EPA 8021
	diesel	BTEX	1-10,000		EPA 8021	
Nevada	gasolina	HTP	100		EPA 8015	
	diesel					
New Jersey	gasolina	benceno	3-13	0.0002	EPA SW 846	EPA SW 846
		tolueno	1000	1	EPA SW 846	EPA SW 846
		etilbenceno	1000	0.700	EPA SW 846	EPA SW 846
		xilenos	110-1000	0.040	EPA SW 846	EPA SW 846
		antraceno	10,000	2	EPA SW 846	EPA SW 846
		naftaleno	230-4200		EPA SW 846	EPA SW 846

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

Publicado en: S. Saval, 1995. Remedación y Restauración. En *PEMEX Ambiente y Energía, Los retos del futuro*, México, UNAM-Petróleos Mexicanos, 151-189.

Fuente original: Oliver T., Kostechi P. y Calabrese E. *State Summary of Soil and Groundwater Cleanup Standards for Hydrocarbons*, Association for the Environmental Health of Soils for EPA Office of Underground Storage Tanks, USA, 1993.

**RESUMEN DE LIMITES PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS MONOAROMÁTICOS Y POLIAROMÁTICOS EN AGUA SUBTERRÁNEA
EN LOS ESTADOS UNIDOS**

ESTADO	BTEX	BENCENO	TOLUENO	ETILBENCENO	XILENOS
Alabama	-	0.005	1	0.700	10
Arizona	-				
Idaho	-				
Florida	0.050	0.001	-	-	-
Georgia	-	0.005 – 0.071	1 – 200	0.700 - 28.718	10
Kansas	-	0.005	1	0.680	0.440
Kentucky	0.050 (c/u)	-	-	-	-
Michigan	-	0.001	0.790	0.074	0.280
Nebraska	-	0.005			
New Jersey	-	0.0002	1	0.700	0.040
INTERVALO	0.050	0.001 – 0.071	0.790 - 200	0.074 – 28.718	0.040 – 10

Antraceno	Georgia	110.00 mg/l
	New Jersey	2.00 mg/l
Benzopireno	Georgia	0.00003 – 0.0002 mg/l
Criseno	Georgia	0.0003 mg/l
Fluoranteno	Georgia	0.370 mg/l
Fluoreno	Georgia	14.00 mg/l
Naftaleno	Florida	0.100 mg/l
	Kansas	0.143 mg/l
Pireno	Georgia	11.00 mg/l

CRITERIOS INTERINOS DE REMEDIACIÓN PARA AGUA EN CANADÁ

HIDROCARBUROS	WINNIPEG, MANITOBA (1991)		OTTAWA, ONTARIO (1991)		BRITISH, COLUMBIA (1995)		QUÉBEC (1988)	
	PROTECCIÓN VIDA ACUÁTICA	AGUA POTABLE	PROTECCIÓN VIDA ACUÁTICA	AGUA POTABLE	PROTECCIÓN VIDA ACUÁTICA	AGUA POTABLE	AGUA SUBTERRÁNEA (Intervalo según el uso)	
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
MONOAROMÁTICOS								
Benceno	0.300	0.005	0.300	0.005	0.300	0.005	0.001	0.005
Tolueno	0.700	0.0024	0.700	-	0.700	0.0024	0.050	0.150
Etilbenceno	0.300	0.024	0.300	-	0.300	0.024	0.050	0.150
Xilenos	-	0.300	-	-	-	0.300	0.020	0.060
POLIAROMÁTICOS								
Naftaleno	-	-	-	-	0.001	-	0.010	0.030
Acenafteno	-	-	-	-	0.006	0.00001	0.020	0.030
Acenaftileno	-	-	-	-	-	-	0.010	0.020
Fluoreno	-	-	-	-	0.012	-	0.002	0.010
Antraceno	-	-	-	-	0.0001	-	0.007	0.020
Fenantreno	-	-	-	-	0.0003	-	0.001	0.005
Fluoranteno	-	-	-	-	0.0002	-	0.002	0.010
Pireno	-	-	-	-	0.00002	-	0.007	0.030
Criseno	-	-	-	-	-	-	0.001	0.005
Benzo(a)pireno	-	0.00001	-	0.00001	0.00001	0.0001	0.0002	0.001
Benzo(b)fluoranteno	-	-	-	-	0.00001	0.0001	0.0002	0.001
Benzo(a)antraceno	-	-	-	-	0.00001	0.0001	0.0005	0.002
Benzo(k)fluoranteno	-	-	-	-	0.00001	0.0001	0.0002	0.001
Indeno(1,2,3,c,d)pireno	-	-	-	-	0.00001	-	0.001	0.005
Dibenzo(a,h)antraceno	-	-	-	-	0.00001	0.0001	0.0002	0.001

**CRITERIOS INTERINOS DE REMEDIACIÓN PARA AGUA SUBTERRÁNEA EN HOLANDA
(1983)**

SUBSTANCIA (mg/l)	INTERVALO PERMISIBLE
MONOAROMÁTICOS	
Benceno	0.001 – 0.005
Etilbenceno	0.020 – 0.060
Tolueno	0.015 – 0.050
Xilenos	0.020 – 0.060
BTEX totales	0.030 – 0.100
POLIAROMÁTICOS	
Antraceno	0.002 – 0.010
Naftaleno	0.007 – 0.030
Fenantreno	0.002 – 0.010
Fluoranteno	0.001 – 0.005
Criseno	0.0005 – 0.002
Benzo(a)antraceno	0.0005 – 0.002
Benzo(a)pireno	0.0002 – 0.001
Benzo(k)fluoranteno	0.0005 – 0.002
Benzo(g,h,i)perileno	0.001 – 0.005
Indeno(1,2,3,cd)pireno	0.0005 – 0.002
HPAs totales	0.010 – 0.040

LÍMITES PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN AGUA EN MÉXICO

	HIDROCARBUROS MONOAROMÁTICOS mg/	HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS mg/l
Ley Federal de Derechos en Materia de Agua; CNA, 1999		
recarga	benceno 0.010 tolueno 0.700 etilbenceno 0.300	acenafteno 0.020
Criterios Ecológicos de Calidad del Agua; DOF, 1989		
fuelle de abastecimiento de agua potable	benceno 0.010 tolueno 14.300 etilbenceno 1.400	acenafteno 0.020 fluoranteno 0.040
NOM-127-SSA1-1994 (2000)		
uso y consumo humano	benceno 0.010 tolueno 0.700 etilbenceno 0.300 xilenos 0.500	-

**LÍMITES DE CONCENTRACIÓN DE MTBE EN AGUA SUBTERRÁNEA
EN LOS ESTADOS UNIDOS**

LUGAR	CONCENTRACIÓN mg/l
Arizona	0.035
California	0.013
Connecticut	0.100
Delaware	0.180
Florida	0.050
Hawaii	0.020
Kansas	0.020
Lousiana	0.018
Maine	0.035
Minesota	0.040
Mississippi	0.055
Missouri	0.040 - 0.400*
Montana	0.030
Nevada	0.020 - 0.200*
New Hampshire	0.070
New Jersey	0.070
New Mexico	0.100
New York	0.010
North Carolina	0.200
Ohio	0.040
Oklahoma	0.020
Oregon	0.020 - 0.040*
Pennsylvania	0.020
Rhode Island	0.020 - 0.040*
South Carolina	0.040
Utah	0.200
Vermont	0.040
Washington	0.020
Wisconsin	0.060
Wyoming	0.200

Modificado de: Jacobs J., Guertin J., and Herron C., 2001

* el límite se aplica en función del uso que se vaya a dar al agua



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

ALTERNATIVAS DE REMEDIACION

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

COSTOS DE RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS Y SUS IMPLICACIONES EN LA NORMATIVIDAD

Susana Saval
Instituto de Ingeniería, UNAM
Apartado Postal 70472, México, D.F. 04510
ssb@pumas.iingen.unam.mx

Introducción

Durante el manejo y disposición de materiales o residuos peligrosos, el suelo constituye la principal matriz receptora. Cuando se trata de materiales sólidos, la afectación al suelo es superficial en tanto no ocurra una lixiviación por efecto de la lluvia o por una autodescomposición de éstos. Si en cambio los materiales o residuos peligrosos se encuentran en estado líquido, éstos pueden migrar hasta alcanzar cuerpos de agua superficiales, o incluso, penetrar al subsuelo y alcanzar depósitos de agua subterránea someros o profundos. Tomando como referencia la legislación ambiental vigente desde 1996, surge la obligación de reparar el daño causado a los recursos naturales afectados.

El concepto de restauración, que está definido en la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) como el *"conjunto de actividades tendientes a la recuperación y reestablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales"* es tal vez la definición más ambiciosa con la cual se puede asegurar el equilibrio ecológico en su amplio sentido, pero su enfoque se ve limitado ante la actividad industrial, donde la cantidad de residuos o la concentración de contaminantes es en ocasiones muy alta o las condiciones del sitio son muy particulares. En estos casos, es cuando conviene hablar de otro concepto como saneamiento o remediación, términos técnicos cuyo enfoque está dirigido específicamente a la reducción en la concentración de contaminantes a niveles que no constituyan un riesgo para la salud o el ambiente en general.

Si los materiales o residuos peligrosos son sólidos, es probable que después de su recolección con equipo y personal especializado puedan ser llevados a un confinamiento autorizado. Sin embargo, cuando el suelo y subsuelo quedan afectados aún después de retirar los materiales o residuos, es necesario aplicar una remediación. Para ello, existen una gran cantidad de técnicas que difieren en su base de funcionamiento y por supuesto en su costo. Muchas de ellas han sido aplicadas exitosamente, mientras que otras han ocasionado mayores disturbios ambientales que los de la propia contaminación.

Caracterización de sitios contaminados

Como paso previo a la restauración es necesario realizar la caracterización del sitio contaminado, ésta reviste particular importancia, ya que está enfocada a conocer en detalle el problema de contaminación (Saval, 1998a). El mayor porcentaje de las actividades se realiza en el propio sitio, mientras que otra parte en el laboratorio. El trabajo en campo está dirigido fundamentalmente a evaluar la superficie y profundidad que abarca la mancha de contaminación en el suelo y si la afectación ha llegado a un cuerpo de agua superficial o subterráneo. Para ello se requiere de perforaciones, instalación de pozos, mediciones en campo y muestreos inalterados. El costo de las perforaciones está en función del tipo de material geológico, de la maquinaria requerida, de la profundidad que se pretende alcanzar y además de las actividades de muestreo que se hayan planeado para realizar en el momento de las perforaciones. Como referencia se puede mencionar que el costo de perforación por metro lineal varía entre \$ 1000 y \$ 3000 M.N. Respecto a la instalación de pozos, su costo dependerá del uso que se les va a dar y de los requerimientos solicitados para cada caso en particular, se cotiza por metro lineal hasta \$ 5000 M.N.

Por lo que respecta al muestreo, éste debe planearse cuidadosamente. Las muestras deben ser químicamente inalteradas y representativas de la contaminación y del volumen de suelo contaminado. Recientemente la Profepa ha establecido que se requiere de una muestra por cada 100m³ de suelo, esto es, una superficie de 100m² a 1 m de profundidad (Profepa, 1999):

Las actividades en el laboratorio se enfocan principalmente a los análisis para conocer el tipo y concentración de contaminantes y con ello evaluar el riesgo que implica su presencia en el propio sitio. Aquí, es indispensable definir claramente los métodos analíticos a utilizar para que los resultados sean útiles y no haya necesidad de repetir el muestreo, más aún cuando se trata de muestras profundas. El costo por análisis varía entre \$ 500 y \$ 1500 M.N. según las especificaciones de cada uno.

Como parte de la caracterización, se requiere también de pruebas de tratabilidad a través de las cuales es posible demostrar que la concentración de los contaminantes puede ser reducida de manera efectiva. De las pruebas de tratabilidad surgen las necesidades que se deberán satisfacer cuando se trabaje en gran escala, así como una estimación del tiempo de ejecución y de los costos de la restauración. La caracterización y su costo son únicos para cada sitio, aunque el tipo de actividades que se realicen sea similar entre un caso y otro.

El resultado de una caracterización debe ser la propuesta de restauración del sitio, la cual es también única para cada sitio en particular. Puede constar de una o varias alternativas técnicas, o bien, una combinación de varias. La estrategia a seguir en la restauración es la decisión más importante, por lo que cualquier gasto que se escatime en la caracterización puede significar un dato necesario para la restauración, que no se obtuvo en el momento adecuado.

Técnicas de restauración de sitios contaminados

De acuerdo con su base de funcionamiento, las técnicas de restauración pueden ser físicas, químicas o biológicas. Todas las técnicas tienen sus ventajas y limitaciones, las cuales conviene conocer para decidir para qué casos aplica cada una de ellas (Saval, 1995). Existen técnicas que necesariamente se aplican en el sitio contaminado (*in situ*) por ejemplo, aquellos casos donde el suelo superficial no requiere ser excavado, cuando la contaminación está en el subsuelo y/o alcanza el nivel del agua subterránea, o bien, cuando se trata de cuerpos de agua superficiales. Otras técnicas se aplican fuera del sitio, por lo que se requiere excavar el suelo contaminado y transportarlo a otro sitio para ser sometido a remediación, aunque esta opción es muy utilizada no se recomienda por el riesgo que representa el manejo y movimiento de contaminantes. Un listado de técnicas de remediación para suelo y subsuelo se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Técnicas de remediación más utilizadas en México

Remediación de suelo superficial <i>in situ</i>	Remediación de suelo fuera del sitio	Remediación de suelo profundo y agua subterránea <i>in situ</i>
biorremediación	confinamiento	aislamiento y contención
labranza (landfarming)	incineración	atenuación natural
atenuación natural	biorremediación	lavado (flushing)
oxidación química	oxidación química	bombeo y tratamiento
extracción de vapores	lavado	adsorción en carbón activado
solidificación y estabilización	estabilización en relleno	biorremediación

Seguimiento de la restauración

Existen varios aspectos que deben ser tomados en consideración para dar seguimiento a la restauración de un sitio, entre los más importantes se pueden citar:

1. la estrategia de muestreo, que incluye la periodicidad, el número y la localización de las diferentes muestras a obtener, que generalmente son de suelo y agua subterránea;
2. la definición de los métodos analíticos a utilizar;
3. la elección del laboratorio que realizará los análisis; y
4. la obtención de muestras no contaminadas en los alrededores para verificar los valores de fondo que serán muy útiles en casos específicos, por ejemplo cuando se trata de metales pesados.

Las actividades de muestreo y análisis son de fundamental importancia, ya que con ello se evalúa el avance de la remediación, se estima el tiempo necesario para alcanzar los límites de limpieza y se toman las decisiones para el cierre administrativo de cada caso de restauración de sitios contaminados.

Costos de restauración de sitios contaminados

Existen varios factores que determinan el costo de una restauración, entre ellos están:

- la presencia de materiales y residuos almacenados en recipientes
- la existencia de un tiradero industrial
- el tipo y concentración de contaminantes
- la profundidad de la contaminación en el suelo
- la existencia de contaminación en el agua subterránea
- la estrategia de remediación que se pretende aplicar a suelo y subsuelo
- los límites de limpieza que se deben alcanzar
- las condiciones que debe tener el sitio después de la restauración
- el tiempo en el que se pretende realizar la restauración

El costo de una restauración puede desglosarse en los diferentes conceptos que la constituyen, los cuales se enlistan en la Tabla 2. El porcentaje que cada concepto representa del total, será diferente para cada estrategia de restauración, aquellas en las que se requiere equipo, éste concepto ocupará el mayor porcentaje, especialmente en lo referido a operación y mantenimiento.

Tabla 2. Desglose de los costos de restauración

√ equipo
<ul style="list-style-type: none">• inversión• instalación• operación y mantenimiento
√ proceso
<ul style="list-style-type: none">• mano de obra y supervisión• materiales consumibles
√ trabajo de laboratorio
<ul style="list-style-type: none">• análisis de seguimiento
√ trabajo de gabinete
<ul style="list-style-type: none">• planeación e integración del proyecto• análisis e interpretación de resultados
√ costos indirectos

Encontrar en la literatura costos de restauración ha sido el principal anhelo de aquellos interesados en el tema, pero dado que cada estrategia responde a las características de cada caso en particular, conviene tomar cualquier información con cierta reserva. Algunas experiencias que se refieren a suelos contaminados con hidrocarburos se presentan en la Tabla 3, aquí resaltan los costos más bajos para las técnicas de biorremediación y aún en este caso, las cifras tienen un importante intervalo de variación. Esta variación se debe a las necesidades de movimiento del suelo cuando el tratamiento es en superficie o a la instalación de pozos si el tratamiento es *in situ*, actividades con las que se busca la oxigenación y homogeneidad del sistema, aspectos que son la base del éxito de una biorremediación (Saval, 1998b).

Tabla 3. Costos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Técnica de remediación	\$ M.N. / m ³ suelo
Oxidación química	200 - 700
Biorremediación	50 - 600
Confinamiento	500 - 800
Lavado	600 - 900
Incineración	1 000 - 1 200
Estabilización en relleno	400 - 700

Toda remediación tiene un comportamiento similar al que se representa en la Fig. 1. La concentración de contaminantes baja notablemente al inicio, después la disminución ocurre de manera más lenta hasta que los cambios son mínimos. Mientras tanto, el costo acumulado va siempre en aumento. El momento en que la restauración resulta incosteable debe ser previsto con anticipación, más aún cuando la concentración de contaminantes está lejos de los límites de limpieza establecidos. Si esto llegara a ocurrir, la única solución es buscar otra estrategia de remediación, para lo cual los resultados de las pruebas de tratabilidad serán de gran utilidad.

De lo anterior se concluye que el aspecto más importante durante la restauración de un sitio, es conocer la concentración mínima de contaminantes que se alcanza con la técnica de remediación elegida, la cual debe ser congruente con los límites de limpieza establecidos para un sitio en particular.

Límites de limpieza: normatividad y disposiciones vigentes

En ausencia de normatividad propia que establezca niveles de limpieza a alcanzar durante la restauración de sitios contaminados, se han venido adoptando normatividades extranjeras. La más común es la que se aplica para suelos y agua subterránea en los Estados Unidos de Norteamérica, la cual establece límites permisibles que son particulares para cada uno de los Estados. En un análisis detallado de dicha

información, se encontró un amplio intervalo que varía incluso en varios órdenes de magnitud, ejemplo de ello es el benceno, cuyo límite máximo permisible está entre 0.005 y 50 mg/kg (Saval, 1999a) Con lo anterior se puede establecer que un límite de limpieza puede ser tan riguroso que difícilmente podrá alcanzarse en una restauración, o bien, puede ser tan alto que aún después de la restauración representa un riesgo para la salud y para el ambiente en general.

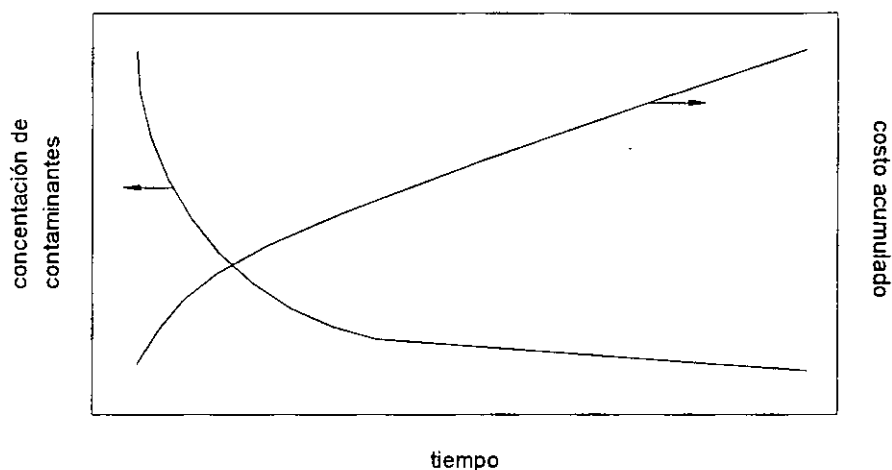


Fig 1 Comportamiento de la remediación de un suelo contaminado

La experiencia documentada en la materia ha creado ciertas tendencias de realizar estudios de evaluación de riesgo toxicológico y ecológico para cada sitio, pero tampoco existe una normatividad propia que establezca un procedimiento uniforme para realizar dichos estudios. Además, la aplicación de los diversos enfoques reportados pueden dar como resultado un intervalo muy amplio en las concentraciones permisibles, dado que se realizan con base en supuestos y valores teóricos que son tomados de la literatura o de experiencias previas, situación que es igualmente preocupante porque no constituyen una base verdaderamente firme para establecer límites de limpieza.

Tomando como base que el mayor número de emergencias ambientales con afectación a suelo son las ocasionadas por derrames de hidrocarburos, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente estableció en 1998 los Criterios Interinos de Limpieza para Suelos Contaminados con Hidrocarburos, los cuales se presentan en la Tabla 4 (Profepa, 1998a; Cancino y col., 1998). Para el establecimiento de estos Criterios se tomaron en consideración tres aspectos principales:

1. la adopción de indicadores de riesgo a la salud, como son el benceno y otros hidrocarburos poliaromáticos considerados cancerígenos;
2. la distinción entre suelos según su uso, para que en zonas industriales se permitan límites de concentración más altos que en zonas urbanas, comerciales o agrícolas;

3. las experiencias previas de restauración en México, donde se han aplicado técnicas amables al ambiente y se hayan alcanzado los límites de limpieza fijados previamente.

Tabla 4 Criterios interinos de limpieza para suelos contaminados con hidrocarburos

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Uso de suelo:	agricultura forestal recreativo de conservación	residencial comercial	industrial
Contaminante: (concentraciones en mg/kg, ppm, base seca)			
Gasolina			
HTPs	200	200	500
Benceno*	20	20	50
Tolueno	40	40	100
Xilenos	40	40	100
Diesel			
HTPs	1,000	1,000	2,000
benzopireno*	0.08	0.08	0.80
benzo(a)antraceno*	0.80	0.08	8.0
benzo(b)fluoranteno*	0.80	0.80	8.0
benzo(k)fluoranteno*	8.00	8.00	80.0
criseno*	80.0	80.0	800.0
Residuos aceitosos			
HTPs	1,000	1,000	2,000
benzopireno*	0.08	0.08	0.75
benzo(a)antraceno*	0.80	0.80	7.5
benzo(b)fluoranteno*	0.80	0.80	7.5
benzo(k)fluoranteno*	8.00	8.00	75.0
criseno*	80.0	80.0	750.0
*compuestos cancerígenos			

Fuente: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1998a; Cancino y col., 1998.

Para la aplicación de los Criterios Interinos de Limpieza en casos de restauración, se deben cumplir dos condiciones: el límite de concentración del producto y el límite de concentración de las sustancias que constituyen un riesgo a la salud.

Como complemento a los Criterios Interinos de Limpieza para Suelos Contaminados con Hidrocarburos, la Profepa estableció en el primer semestre de 1999, las técnicas analíticas recomendadas durante la caracterización de sitios contaminados y el seguimiento de restauraciones (Tabla 4). La base de estas

decisiones radica en la aplicación de métodos específicos para cada tipo de contaminante y en especial para aquellos que son nocivos a la salud (Profepa, 1999).

Tabla 4 Métodos de análisis recomendados para suelos contaminados con hidrocarburos

Contaminante	Método analítico base
Hidrocarburos base diesel	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía de gases - Ionización de flama (EPA 8015 B)
Hidrocarburos base gasolina	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía de gases - Ionización de flama (EPA 8015 B)
Hidrocarburos recuperables de petróleo (petróleo, aceites y residuos aceitosos)	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Espectrometría en infrarrojo (EPA 418.1)
Benzopireno	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía - Espectrometría de masas (EPA 8310 / 8100 / 8270 C)
Benceno	Extracción de la muestra de suelo con cloruro de metileno Cromatografía de gases - Espectrometría de masas (EPA 8240 / 8260 C)

Fuente: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1999

Por otra parte, la falta de una normatividad en el área de restauración de sitios contaminados, también provocó la aplicación de la NOM-053-ECOL/93 para el análisis de todo tipo de material o residuo de características desconocidas a través de pruebas de Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad e Inflamabilidad (CRETI). La experiencia acumulada durante varios años ha demostrado que este procedimiento está lejos de arrojar resultados verdaderamente confiables para "basuras industriales" y no es el adecuado para análisis de suelos contaminados. La recomendación que surge es una revisión detallada de las NOM-052-ECOL/93 y NOM-053-ECOL/93, para hacer las adecuaciones necesarias.

Entre otras disposiciones oficiales, existe un Manual Técnico para la Atención de Emergencias Ambientales desarrollado por la Profepa, el cual contiene guías para la evaluación de daños ambientales y para la determinación de acciones correctivas, donde se hace énfasis en el procedimiento a seguir durante la caracterización y la restauración de sitios contaminados (Profepa, 1998b).

Una propuesta para una normatividad ad hoc

El proceso de creación de normas ambientales en México se ha dado, por lo general, tomando como referencia regulaciones de otros países y sin tomar en consideración la situación específica de México y la

experiencia práctica acumulada a través de la participación de los verdaderos expertos en cada área. Esto ha generado normas que no pueden ser aplicadas tal como fueron dictadas, porque están lejos de la realidad. Como ejemplo se puede citar la NOM-087-ECOL/95, la cual se elaboró con la finalidad de controlar la disposición final a los residuos biológico-infecciosos, pero que no tomó en cuenta las dificultades económicas, en este caso, del sector salud.

Se ha detectado una marcada influencia de técnicas extranjeras que no son aplicables a la situación específica de México, y que se han filtrado a través de intereses económicos de un importante número de empresas que en su mayoría tienen poco dominio del tema. No todas las técnicas han mostrado ser la mejor solución para la restauración de un sitio determinado y en muchos casos se han alcanzado los límites de limpieza a través de actividades que no están sustentadas en principios científicos (Saval, 1999b).

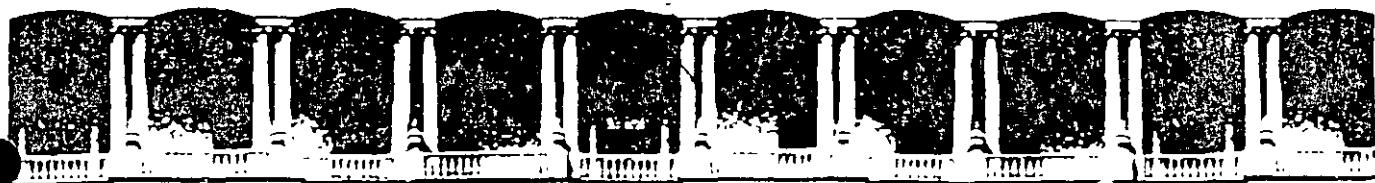
Aunque se ha establecido que el costo de restauración de un sitio es función de varios factores, se puede decir que en general es del orden de millones de pesos. Muchas industrias contaminadoras han gastado varios millones de pesos para remediar suelos contaminados con el compromiso de alcanzar los límites de limpieza que se fijaron, pero sin conocer la base de funcionamiento de la técnica aplicada y sin saber si será una solución permanente. Al paso del tiempo, el problema de contaminación está presente de nuevo y en muchos casos, su magnitud es mayor que cuando se atacó por primera vez, pero dado que se cumplieron los objetivos en su momento, no hay nada que hacer al respecto, excepto iniciar una nueva restauración. En muchos casos, este es un comportamiento cíclico que ocurre con más frecuencia cuando los límites de limpieza son muy estrictos o los tiempos de ejecución son muy cortos.

El tema de la restauración de sitios contaminados en México es todavía nuevo, a pesar de los muchos trabajos que se han realizado especialmente en zonas afectadas por derrames de petróleo o sus derivados, pero aún hace falta adquirir más experiencia dada la gran diversidad de casos.

Tomando en cuenta lo anterior, no parece ser conveniente crear ahora instrumentos normativos definitivos que después tengan que adecuarse, sin embargo, ante la urgencia de establecer reglas claras y la falta de tiempo para tomar decisiones acertadas, surge como propuesta la posibilidad de crear Criterios y Procedimientos Técnicos y Administrativos que puedan aplicarse en la práctica con un seguimiento muy cercano durante un periodo de tiempo bien definido al momento de su publicación. De esta forma se podría acumular experiencia que serviría como base para elaborar documentos que en el mediano plazo se conviertan en Normas Oficiales Mexicanas. En el caso específico de la restauración de sitios contaminados con hidrocarburos, la experiencia que se ha venido generando con la aplicación de los Criterios Interinos de Limpieza constituyen una base idónea para el establecimiento de la normatividad correspondiente. De la misma manera convendría proceder para el caso de suelos contaminados con bifenilos policlorados, con metales pesados y con otros contaminantes comunes en México.

Bibliografía

- Cancino M.A., Rodríguez J.D. y Muñoz J.M., 1998. Restauración de sitios contaminados, el papel de la autoridad. *Teorema*, Año 5, Número 18 (septiembre-noviembre), pp 73-75.
- Profepa, 1998a. Memorias del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Sitios Contaminados. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Dirección de Emergencias Ambientales.
- Profepa, 1998b. Manual técnico para la aplicación de medidas para la atención de emergencias ambientales. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Dirección de Emergencias Ambientales.
- Profepa, 1999. Memorias del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Sitios Contaminados. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Dirección de Emergencias Ambientales. En redacción.
- Saval S., 1995. Remediación y Restauración. En *Pemex: Ambiente y Energía, Los Retos del Futuro*, UNAM-Petróleos Mexicanos, México.
- Saval S., 1998a. La reparación del daño. Aspectos técnicos: Remediación y Restauración. La responsabilidad jurídica en el daño ambiental. UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp 209-235.
- Saval S., 1998b. Situación actual y perspectivas de la biorremediación de suelos y acuíferos en México, *BioTecnología*, Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C Vol. 3: 71-76.
- Saval S., 1999a. En busca de criterios de limpieza para sitios contaminados con hidrocarburos. *Teorema*, Año 5, Número 19 (diciembre 1998-febrero 1999), pp 14-16.
- Saval S., 1999b. Éxitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos. Reunión Anual del Programa Universitario del Medio Ambiente 1998: Conservación y restauración de suelos. Coordinación de Vinculación, Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM, en prensa.



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

“Tres décadas de orgullosa excelencia” 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD EN UN SITIO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA SITIO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS

La evaluación del riesgo a la salud es una herramienta mediante la cual se determinan los posibles efectos adversos a la salud de individuos expuestos a fuentes contaminantes en un sitio específico donde han ocurrido derrames.

La estrategia utilizada en este caso específico se fundamenta en los procedimientos de la USEPA (United States Environmental Protection Agency) para la Evaluación de Riesgos del SARA (*Superfund Agreement and Recovery Act*) en su Título 42 del Código Federal de Regulaciones, Parte 90 (*Title 42, CFR, Part 90*), así como en el método ASTM 1739-95 RBCA (*Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*). Dicha estrategia consta de los siguientes pasos:

- Identificación de los Constituyentes Químicos de Preocupación Potencial (CQPP)
- Definición de las características de los receptores
- Definición del escenario
- Cálculo de las concentraciones en los puntos de exposición
- Cálculo de los factores de riesgo de cáncer
- Cálculo de los índices de riesgo por toxicidad

Identificación de los Constituyentes Químicos de Preocupación Potencial (CQPP)

A partir de los análisis realizados a las muestras de suelo y de agua subterránea, se identificaron 10 compuestos diferentes que fueron: benzo(a)antraceno, fenantreno, fluoreno, naftaleno, pireno, acenaftileno, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos. De éstos, benzo(a)antraceno y benceno son carcinógenos a humanos, mientras que los otros hidrocarburos solamente son considerados como tóxicos. Con la finalidad de obtener las concentraciones representativas de cada compuesto en el sitio de estudio, durante el procedimiento de evaluación del riesgo se determinó el empleo de los percentiles al 95% (UCL95). Para aquellas concentraciones que resultaron no-detectables, se asignó la mitad del límite mínimo de concentración del método correspondiente para cada hidrocarburo. En la Tabla 1 se presentan los valores que fueron considerados.

Definición de las características de los receptores

Se consideraron los valores estándar bajo condiciones conservadoras para proteger la salud humana. Así también se consideraron el tipo de actividades que se desarrollan en el lugar, la presencia de trabajadores o residentes en los alrededores del sitio contaminado, sus características y el tiempo que permanecen en el lugar.

Definición de los diferentes escenarios

Para definir los diferentes escenarios se tomaron en consideración las características particulares del subsuelo y las de la contaminación, básicamente un suelo de tipo areno-arcilloso y una profundidad al nivel freático promedio de 3.50 m. El edificio adjunto se consideró como independiente, también se tomó en cuenta la zona residencial en los alrededores.

Con lo anterior se estableció el siguiente escenario: **contaminación de suelo superficial y subsuelo, así como del agua subterránea.**

Los mecanismos de transporte y rutas de exposición fueron:

- Volatilización y dispersión en zonas abiertas, de los vapores de hidrocarburos provenientes del subsuelo, con lo cual la ruta de exposición es la inhalación de hidrocarburos volátiles y de partículas de suelo impregnadas con hidrocarburos.
- Contacto dérmico e ingestión accidental del suelo contaminado que podría ser arrastrado por los vientos.
- Movimiento natural de agua subterránea con posible ingestión accidental.

Cálculo de las concentraciones en los puntos de exposición a los receptores

Se obtuvieron las concentraciones de exposición de cada compuesto, considerando un período de vida de exposición de 70 años con efectos cancerígenos para el caso de benzo(a)antraceno y benceno, y de 30 años para los todos los hidrocarburos que pudieran producir efectos tóxicos no cancerígenos. A partir de estas concentraciones se obtuvieron las concentraciones promedio por ruta de exposición: inhalación de vapores, contacto dérmico e ingestión. Con estas cifras se calcularon los factores de riesgo de cáncer y los índices de peligrosidad.

Cálculo de los factores de riesgo de cáncer

De acuerdo con las recomendaciones de la USEPA, se fijó el riesgo de cáncer aceptable causado por todos los hidrocarburos juntos, es decir, el valor acumulado, de 1×10^{-5} . Esto significa que solamente se acepta que uno de cada 100,000 individuos pueda ser afectado por cáncer. De aquí que, aquellas cifras por arriba de este valor sí constituye un riesgo a la salud, mientras que las que están por abajo no constituyen un riesgo.

Para los casos donde el factor obtenido estuvo muy cercano al valor de referencia se analizó también el riesgo de cáncer individual, es decir, para cada hidrocarburo con la finalidad de identificar compuesto que aporta el mayor riesgo entre los que fueron analizados. La cifra de fue utilizada como referencia fue de 1×10^{-6} , la cual indica que

solamente se acepta que uno de cada millón de individuos pueda ser afectado por cáncer.

Los factores de riesgo obtenidos para cada ruta de exposición fueron:

Inhalación de hidrocarburos volátiles provenientes de suelo y subuelo

- El riesgo acumulado de cáncer en la planta de combustibles es de 2.1×10^{-9} , lo cual significa que uno de cada 476 millones de individuos podría ser afectado por cáncer. Esta cifra está por debajo del valor aceptable, lo cual indica que no hay riesgo de cáncer.
- El riesgo acumulado de cáncer para los trabajadores que eventualmente realizaran algún movimiento del suelo en la planta de combustibles es de 2.3×10^{-10} , esta cifra indica que uno de cada 4,348 millones de individuos podría ser afectado por cáncer, esto significa que no constituye un riesgo.
- El riesgo acumulado de cáncer en el edificio adjunto es de 1.1×10^{-11} , esta cifra que es menor que la anterior, significa que uno de cada 90,090 millones de individuos podría ser afectado por cáncer, por lo que se asume que no constituye un riesgo.
- El riesgo acumulado de cáncer en la zona residencial es de 1.3×10^{-12} , esto es, uno de cada 769,230 millones de individuos podría ser afectado por cáncer, lo cual indica que no constituye un riesgo.

Ingestión y contacto dérmico del suelo

- El riesgo acumulado de cáncer para los trabajadores del sitio es de 1.4×10^{-8} , esto significa que uno de cada 71.4 millones de individuos podría ser afectado por cáncer, por lo tanto no constituye un riesgo.
- En caso de existir movimiento de suelo, el riesgo acumulado de cáncer para los trabajadores que tuvieran que realizar esta actividad sería de 4.5×10^{-10} , esto indica que no constituye un riesgo.

Ingestión accidental de agua subterránea

- El riesgo acumulado de cáncer al ingerir agua subterránea de la planta de combustibles es de 2.2×10^{-6} , esto significa que uno de cada 454,000 individuos podría ser afectado por cáncer. Esta cifra es muy cercana al riesgo acumulado aceptable, y está muy cerca del valor del riesgo individual aceptable, de uno en un millón, el cual se debe

- básicamente al **benceno**, por lo cual se asume que **únicamente en caso de haber ingestión de agua subterránea de la planta de combustibles sí podría existir riesgo de cáncer.**
- El riesgo acumulado de cáncer al ingerir agua subterránea del edificio adjunto es de 2.1×10^{-7} , es decir, que uno de cada 4.76 millones de individuos podría ser afectado por cáncer, lo cual no constituye un riesgo bajo las condiciones actuales.
- Hacia el área residencial, el riesgo acumulado de cáncer por ingerir agua subterránea es de 7.1×10^{-7} , esta corresponde a uno de cada 1.41 millones de individuos, lo cual no constituye un riesgo bajo las condiciones actuales.

El resumen de los valores citados se presenta en la Tabla 2.

Índices de peligrosidad por toxicidad

Para todos los casos se fijó el índice de peligrosidad acumulada aceptable por toxicidad en 1 de acuerdo con las recomendaciones de la USEPA. Con esta base se considera que las cifras por arriba de este valor **sí constituyen un peligro por toxicidad**, mientras que las que están por abajo de este valor no constituyen un peligro.

Inhalación de hidrocarburos volátiles provenientes de suelo y subuelo

- El índice de peligrosidad por toxicidad en la planta de combustibles es de 1.3×10^{-4} , cifra que está por debajo del valor aceptable, por lo tanto no hay peligro.
- El índice de peligrosidad para los trabajadores que eventualmente podrían realizar algún movimiento de suelo en la planta de combustibles es de 3.4×10^{-4} , cifra que está por debajo del valor aceptable, lo que indica que no hay peligro.
- El índice de peligrosidad en el edificio adjunto es de 6.7×10^{-7} , esta cifra está muy por abajo del valor aceptable, lo cual indica que no hay peligro.
- El índice de peligrosidad en la zona residencial es de 6.4×10^{-8} , lo cual es indicativo de que no hay peligro.

Ingestión y contacto dérmico del suelo

- El índice de peligrosidad para los trabajadores en la planta de combustibles es de 4.4×10^{-4} , no hay peligro.

- En caso de existir algún movimiento del suelo en la planta de combustibles, el índice de peligrosidad específicamente para los trabajadores que realizarían la actividad sería de 3.5×10^{-4} . No hay peligro.

Ingestión accidental de agua subterránea

- El índice de peligrosidad en caso de ingerir agua subterránea de la planta de combustibles es de 0.11, esta cifra es cercana al límite y constituye una alerta para evitar la ingestión de agua de la planta, debido básicamente a la presencia de benceno.
- El índice de peligrosidad al ingerir agua subterránea del edificio adjunto es de 9.1×10^{-3} , esto indica que no hay peligro.
- En el área residencial, el índice de peligrosidad por ingerir agua subterránea es de 2.5×10^{-2} . No existe peligro.

Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 3.

Conclusiones

1. De las rutas de exposición analizadas, se concluye que **bajo las condiciones del sitio al momento del estudio, no hay riesgo a la salud, a menos que hubiera ingestión accidental de agua subterránea del interior de la planta de combustibles**. Este dato no es de extrañarse por el hecho de existir producto libre flotando sobre el agua freática.
2. En caso de que se llegara a modificar el escenario analizado, por ejemplo un nuevo derrame, o cualquier actividad que ocasione la salida de los hidrocarburos del límite perimetral, será necesario actualizar la evaluación del riesgo a la salud.
3. Para las actividades de remediación se recomienda utilizar la concentración de benceno en agua subterránea como parámetro indicador durante el seguimiento analítico.

Bibliografía de apoyo

American Society for Testing and Materials (ASTM), 1995. *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*. Designation: E 1789-95, 51 pp.

RBCA Tool Kit Chemical Releases, paquete con registro autorizado Groundwater Services, Inc.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1999. Region III Risk-based Concentrations, October 22, <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/rbc0501.xls>

Tabla 1. RESUMEN DE DATOS DE CONCENTRACIONES UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO A LA SALUD

SUELO

HIDROCARBURO	LÍMITE DE DETECCIÓN mg/kg	No. MUESTRAS ANALIZADAS	CONCENTRACIONES ENCONTRADAS EN LAS MUESTRAS (mg/kg)			CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVA mg/kg
			MÁXIMA	PROMEDIO	ULC95 SOBRE EL PROMEDIO	
benzo(a)antraceno	0.0167	10	0.1030	0.0096	0.0120	0.0120
fenantreno	0.0167	10	0.203	0.0100	0.0140	0.0140
fluoreno	0.6670	10	1.2000	0.3800	0.4600	0.4600
naftaleno	0.6670	10	0.3300	0.3300	0.3300	0.3300
pireno	0.0167	10	0.3500	0.0100	0.0140	0.0140
acenaftileno	0.6670	10	0.3300	0.3300	0.3300	0.3300
xilenos	0.0300	17	31.0000	0.0580	0.1400	0.1400
tolueno	0.0100	17	0.1600	0.0073	0.0110	0.0110
etilbenceno	0.0100	17	2.3000	0.0075	0.0140	0.0140
benceno	0.0100	17	0.0620	0.0058	0.0075	0.0075

AGUA SUBTERRÁNEA

HIDROCARBURO	LÍMITE DE DETECCIÓN mg/l	No. MUESTRAS ANALIZADAS	CONCENTRACIONES ENCONTRADAS EN LAS MUESTRAS (mg/l)			CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVA mg/l
			MÁXIMA	PROMEDIO	UCL95 SOBRE EL PROMEDIO	
benzo(a)antraceno	0.0005	9	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
fenantreno	0.0050	9	0.06000	0.00450	0.00840	0.00840
fluoreno	0.0200	9	0.04300	0.01300	0.01900	0.01900
naftaleno	0.0200	9	0.24000	0.13000	0.19000	0.19000
pireno	0.0005	9	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
acenaftileno	0.0200	9	0.03100	0.01200	0.01600	0.01600
xilenos	0.0300	19	2.90000	0.04500	0.09000	0.09000
tolueno	0.0100	19	0.18000	0.00800	0.01300	0.01300
etilbenceno	0.0100	19	0.52000	0.01000	0.01900	0.01900
benceno	0.0100	19	0.15000	0.00970	0.01600	0.01600

Tabla 2. FACTORES DE RIESGO A LA SALUD HUMANA

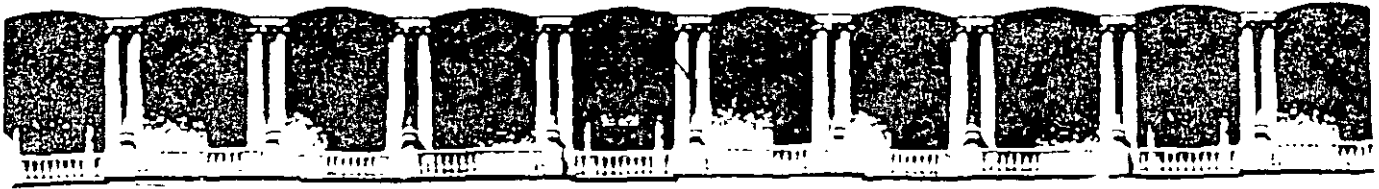
Hidrocarburo	RUTA DE EXPOSICIÓN								
	INHALACIÓN DE HIDROCARBUROS PROVENIENTES DE SUELO Y SUBSUELO				INGESTIÓN Y CONTACTO DÉRMICO CON SUELO		INGESTIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA		
	EN LA PLANTA DE COMBUSTIBLES	POR MOVIMIENTO DEL SUELO	EN EL EDIFICIO ADJUNTO	EN LA ZONA RESIDENCIAL	DE LA PLANTA DE COMBUSTIBLES	POR MOVIMIENTO DEL SUELO	DE LA PLANTA DE COMBUSTIBLES	DEL EDIFICIO ADJUNTO	DE LA ZONA RESIDENCIAL
Factores de riesgo individuales (por hidrocarburo) Riesgo aceptable 1 E-6									
benzo(a)antraceno	9.6 E-12	1.3 E-12	5.1 E-14	5.9 E-15	1.2 E-8	3.8 E-10	6.4 E-7	7.1 E-10	1.6 E-9
fenantreno*									
fluoreno*									
naftaleno*									
pireno*									
acenaftileno*									
xilenos*									
tolueno*									
etilbenceno*									
benceno	2.1 E-9	2.3 E-10	1.1 E-11	1.3 E-12	2.3 E-9	6.8 E-11	1.6 E-6	2.1 E-7	7.0 E-7
Factores de riesgo acumulado (por todos los hidrocarburos juntos) Riesgo aceptable 1 E-5									
Acumulado	2.1 E-9	2.3 E-10	1.1 E-11	1.3 E-12	1.4 E-8	4.5 E-10	2.2 E-6	2.1 E-7	7.1 E-7

Nota: los hidrocarburos marcados con * no son carcinógenos a humanos, por ello las celdas quedaron vacías

Tabla 3. ÍNDICES DE PELIGROSIDAD POR TOXICIDAD

Hidrocarburo	RUTA DE EXPOSICIÓN								
	INHALACIÓN DE HIDROCARBUROS PROVENIENTES DE SUELO Y SUBSUELO				INGESTIÓN Y CONTACTO DÉRMICO CON SUELO		INGESTIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA		
	EN LA PLANTA DE COMBUSTIBLES	POR MOVIMIENTO DEL SUELO	EN EL EDIFICIO ADJUNTO	EN LA ZONA RESIDENCIAL	DE LA PLANTA DE COMBUSTIBLES	POR MOVIMIENTO DEL SUELO	DE LA PLANTA DE COMBUSTIBLES	DEL EDIFICIO ADJUNTO	DE LA ZONA RESIDENCIAL
Índice de peligrosidad individual (por hidrocarburo) Índice aceptable 1									
benzo(a)antraceno	3.0 E-10	1.0 E-9	1.6 E-12	1.6 E-13	9.0 E-7	4.0 E-7	7.2 E-3	6.5 E-5	1.0 E-6
fenantreno**					1.7 E-6	1.4 E-6	1.0 E-3	6.6 E-6	1.8 E-5
fluoreno**					4.2 E-5	3.5 E-5	4.6 E-3	3.3 E-4	9.2 E-4
naftaleno	1.2 E-6	2.9 E-6	6.2 E-9	6.1 E-10	3.1 E-6	2.5 E-6	4.6 E-3	8.5 E-5	2.4 E-4
pireno**					1.8 E-6	1.5 E-6	8.2 E-5	2.7 E-6	7.5 E-6
acenaftileno**					3.1 E-4	2.5 E-4	3.9 E-2	1.7 E-3	4.8 E-3
xilenos	1.1 E-6	2.9 E-6	5.7 E-9	5.6 E-10	2.2 E-6	1.6 E-6	1.1 E-4	5.7 E-5	1.6 E-4
tolueno	2.2 E-6	5.4 E-6	1.2 E-8	1.1 E-9	2.1 E-6	1.5 E-6	6.2 E-4	7.7 E-5	2.2 E-4
etilbenceno	9.3 E-7	1.8 E-6	4.9 E-9	4.9 E-10	4.2 E-6	3.1 E-6	1.8 E-3	7.7 E-5	2.1 E-4
benceno	1.2 E-4	3.2 E-4	6.4 E-7	6.2 E-8	7.2 E-5	5.3 E-5	5.1 E-2	6.7 E-3	1.9 E-2
Índice de peligrosidad acumulado (por todos los hidrocarburos juntos) Índice aceptable 1									
Acumulado	1.3 E-4	3.4 E-4	6.7 E-7	6.4 E-8	4.4 E-4	3.5 E-4	1.1 E-1	9.1 E-3	2.5 E-2

Nota: para los hidrocarburos marcados con ** no existe información suficiente con la cual se puedan realizar los cálculos, por ello las celdas quedaron vacías



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

BIORREMEDIACION

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

ESTRATEGIA PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO CON DIESEL

Dra. Susana Saval

Ejercicio

Se tiene un sitio contaminado con diesel y se pretende realizar la biorremediación en 6 meses, pero no se cuenta con información previa. Es necesario proceder inicialmente a una caracterización para plantear una estrategia adecuada para el sitio en particular y que favorezca la actividad de los microorganismos encargados de degradación de los hidrocarburos.

1. Caracterización del sitio

Una caracterización completa incluye cuatro enfoques básicos que son: geohidrología, química de contaminantes, física y química del suelo, así como microbiología. La integración de estos enfoques ayuda a conceptualizar el sitio como un biorreactor y la manera como debe operar para ofrecer óptimas condiciones a los microorganismos y con ello dirigir el objetivo hacia la disminución en la concentración de los hidrocarburos. En la Fig. 1 se presenta un diagrama que muestra el desarrollo de un proceso de biorremediación. Cada uno de los enfoques citados se describe en los siguientes incisos.

1.1. Caracterización geohidrológica

Una caracterización geohidrológica permite definir la distribución horizontal y vertical de los hidrocarburos en el suelo y subsuelo, así como el tipo de material geológico que conforma los diferentes estratos y la profundidad al nivel del agua subterránea (nivel freático). Esto último es importante ya que el diesel, por su baja viscosidad, puede infiltrar fácilmente al subsuelo en caso de derrame, y por su densidad menor a la del agua, puede formar una capa que flota sobre el nivel freático, cuando el combustible no es adsorbido por el suelo durante su trayectoria en forma vertical hacia la profundidad.

En el caso particular del sitio problema, el hecho de que el suelo sea de tipo arenoso, favorece de manera sustancial las probabilidades de que lo anterior ocurra, por lo que probablemente la concentración de diesel que se quede adsorbido en el suelo sea muy baja y que la mayor parte se encuentre en fase libre y haya alcanzado el nivel freático.

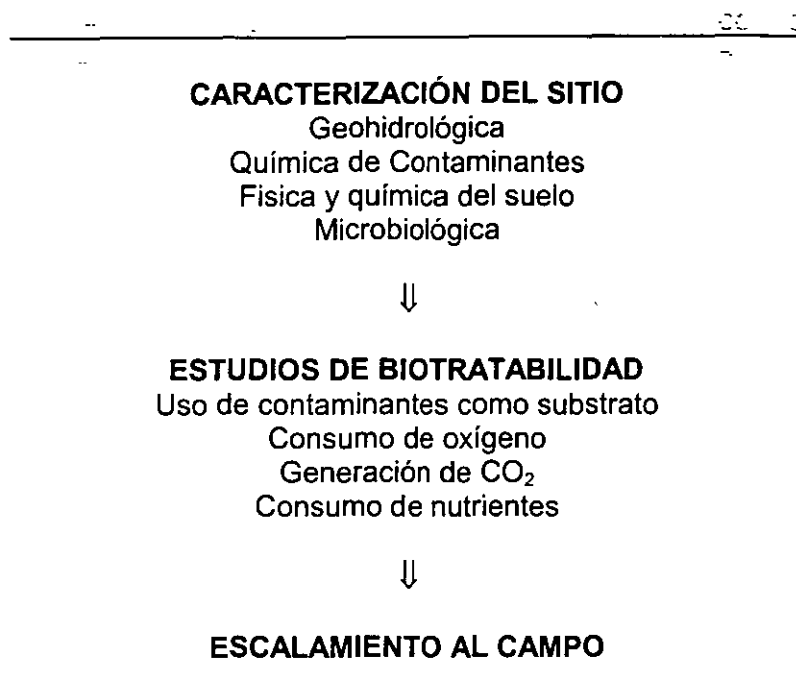


Fig. 1. Desarrollo de un proyecto de biorremediación

Para hacer una caracterización geohidrológica es indispensable realizar perforaciones; la opción más recomendable es que las perforaciones sean de diámetro pequeño, generalmente 2 cm. En ellas se pueden hacer mediciones *in situ* de hidrocarburos volátiles y explosividad a diferentes profundidades con lo cual se delimita la mancha de contaminación. Además, se pueden tomar muestras inalteradas de suelo a diferentes profundidades, verificar la existencia de un nivel freático cercano a la superficie, la presencia de hidrocarburos flotando sobre el nivel del agua y en los casos más severos, el espesor del combustible en fase libre.

La información obtenida en campo se "vacía" en planos para identificar de manera tridimensional, las zonas más afectadas y también aquellas que por su conformación, podrían constituir "zonas muertas" por la baja permeabilidad, las cuales ofrecerán resistencia a la transferencia de masa. Esto último es de fundamental importancia al tomar como base el esquema conceptual de un biorreactor.

1.2. Caracterización química de los contaminantes

En general, cuando se trata de derrames antiguos es conveniente hacer análisis exhaustivos para identificar el tipo de contaminantes presentes. Esto no solo es con la

finalidad de evaluar el grado de contaminación, sino también para identificar los contaminantes que deberán ser reconocidos por los microorganismos como “sustratos a degradar”, además de verificar la presencia de otros contaminantes que pudieran inhibir la actividad microbiana, como es el caso de metales pesados y compuestos altamente clorados. Los métodos recomendados para identificar y cuantificar los contaminantes se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Técnicas para análisis de contaminantes

PARÁMETRO	MÉTODO	OBSERVACIONES
Diesel, Gasolina, Turbosina, Kerosina	EPA 8015	Identificación de los combustibles por su perfil cromatográfico típico “huella digital”
Hidrocarburos monoaromáticos volátiles (BTEX)	EPA 8240 EPA 8260	Identificación y confirmación de benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos y sus derivados
Hidrocarburos poliaromáticos	EPA 8100 EPA 8310 EPA 8270	Identificación y confirmación de acenafteno, antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, fenantreno, fluoranteno, fluoreno, naftaleno, pireno y otros
Bifenilos policlorados	EPA 8080	Identificación de preparaciones por el porcentaje de átomos de cloro en la molécula
Plaguicidas organoclorados	EPA 8081	identificación y confirmación de aldrin, dieldrin, endrin, lindano, clordano, DDT, DDE y otros
Metales	EPA 6010 ó específicos para cada metal	Identificación de arsénico, plomo, cromo, mercurio y otros

En este caso particular es importante mencionar que si el problema de contaminación está siendo vigilado por autoridades ambientales, habrá que realizar los análisis en un laboratorio acreditado para ajustarse a las disposiciones oficiales, si no es así, la infraestructura de un laboratorio de investigación será suficiente para dar el apoyo requerido.

Si se confirma en una primera visita al sitio, que lo derramado es únicamente diesel y que el suelo donde ocurrió no estaba previamente afectado, el análisis de hidrocarburos por el método EPA 8015 será suficiente. Si no es así, deberán realizarse análisis complementarios específicos para determinar el contenido de metales y compuestos clorados.

En la actualidad existe una tendencia de realizar estudios de evaluación de riesgo a la salud para cuantificar el riesgo que constituye la presencia de contaminantes para la población expuesta, básicamente trabajadores y residentes de zonas habitacionales aledañas. De ser así la gama de análisis se amplía para incluir la cuantificación de

hidrocarburos monoaromáticos volátiles y de poliaromáticos, con lo cual se identifican las sustancias de preocupación potencial, que son aquellas catalogadas como carcinógenas y/o tóxicas a humanos. Para la evaluación de riesgo se recomienda el método conocido como RBCA (por sus siglas en inglés: Risk Based Corrective Action).

La experiencia práctica indica que para el caso de un derrame de solamente diesel, lo más seguro es que se encuentren compuestos tóxicos, pero no carcinogénicos a humanos, como son los poliaromáticos: naftaleno, fenantreno y fluoreno, que son los que se encuentran en mayor proporción. Si el derrame es reciente estarán presentes también monoaromáticos volátiles como tolueno y xilenos.

A partir de los análisis se puede anticipar que entre más alta sea la concentración de diesel en el suelo, el proceso de biorremediación tomará más tiempo. Experiencias en el laboratorio indican que una concentración de 30,000 mg/kg es un punto de transición en relación a la facilidad con la cual se llevará a cabo el proceso

1.3. Caracterización física y química del suelo

El suelo es un medio de multifases muy complejo, es una matriz sólida que en la zona no-saturada se encuentra rodeada por un ambiente gaseoso y en la zona saturada por un ambiente acuoso. Cuando hay hidrocarburos, que por lo general son hidrofóbicos, conforman una fase líquida que rodea las partículas de suelo, la cual desplaza el agua libre que está presente.

Las bacterias generalmente se adhieren a las partículas de suelo, por lo que todos los elementos que conforman el microambiente deben permitir una óptima actividad metabólica para la degradación del diesel. De aquí surge la importancia de conocer las características del microambiente antes de iniciar el proceso de biorremediación y durante su realización.

Los principales parámetros físicos y químicos a determinar son: tipo de suelo, tamaño de partícula, textura, densidad real, densidad aparente, humedad, capacidad de retención de agua; pH, contenido de materia orgánica, concentración de fósforo (en forma de ortofosfato), y contenido de nitrógeno total y amoniacal. Las técnicas analíticas que se recomiendan se enlistan en la Tabla 2.

Los parámetros físicos permitirán entender la facilidad para la transferencia de masa, que en el caso de biorremediación se refiere al oxígeno y a los nutrientes, en tanto que los químicos permitirán predecir si la actividad microbiana puede ser o no exitosa.

En la práctica, no todos los parámetros son analizados antes de definir la estrategia de operación a escala real, debido al tiempo que consumen los análisis. No obstante, es conveniente realizarlos para hacer algún ajuste durante el desarrollo del proceso a escala real.

1.4. Caracterización microbiológica

El suelo es el recurso donde habita la mayor biodiversidad microbiana, de hecho, ha sido la fuente de aislamiento de un gran número de especies que desde hace muchas décadas se han utilizado en procesos biotecnológicos comerciales para la producción de alimentos, bebidas y fármacos, entre otros.

En suelos que han estado contaminados por algún tiempo, los microorganismos se someten a un fenómeno de selección natural, mediante el cual sobreviven únicamente aquellos que toleran la presencia y concentración de los contaminantes. En suelos cuya contaminación ocurrió muy recientemente, la población microbiana puede verse afectada por la presencia de contaminante hasta un caso extremo donde no queden sobrevivientes.

Tabla 2. Técnicas para análisis físicos y químicos del suelo

PARÁMETRO	MÉTODO
Tamaño de partícula	por cribado en malla de diferentes aberturas
Densidad real y aparente	con picnómetro y núcleos inalterados para calcular la porosidad
Textura	con hidrómetro
Humedad	gravimetría a 110 °C
Capacidad de retención de agua	saturación con agua y posterior filtración con medición del volumen
pH	en agua y/o solución de cloruro de calcio
Materia orgánica	por oxidación de acuerdo a Walkley-Black
Fosfatos	por espectrofotometría (Bray P-1)
Nitrógeno total y amoniacal	por método Kjeldahl

Cuando los contaminantes son hidrocarburos, los microorganismos desarrollan la capacidad de utilizarlos como fuente de carbono y energía. Las características del microambiente determinan el tipo de población microbiana predominante, en la mayoría de los suelos contaminados las especies típicas son las bacterias debido principalmente al valor de pH que se registra, el cual por lo general se encuentra entre 7 y 9. En especial, el género *Pseudomonas* ha mostrado una gran versatilidad de adaptación a ambientes contaminados y una importante capacidad degradadora, que está dada por su versatilidad bioquímica. Esto último es importante, ya que si el derrame en el sitio ocurrió algunos meses atrás, lo más seguro es que el propio suelo tenga las bacterias en tipo y cantidad adecuadas para que con sólo la adición de sales minerales, ocurra la biorremediación (bioestimulación). Si por el contrario, el derrame es reciente, la biorremediación será posible únicamente mediante la inoculación de microorganismos

exógenos (bioaumentación). De aquí surge la importancia de realizar una caracterización microbiológica.

Una estrategia de caracterización microbiológica completa incluye la cuantificación de bacterias y los estudios de biotratibilidad. La realización de todo en forma de paquete toma tiempo, por ello es que estos últimos se consideran como un concepto independiente en la Fig. 1. Para este problema en particular, en el que se tiene un tiempo restringido, se recomienda hacer únicamente la cuantificación de bacterias antes de iniciar la biorremediación y los estudios de biotratibilidad simultáneamente al trabajo en campo.

En este caso particular, será considerado únicamente el proceso aerobio, ya que es el que permite la biodegradación de los hidrocarburos en un menor tiempo y en un ambiente más fácilmente controlable para trabajo en campo.

Determinaciones típicas de la caracterización microbiología:

- Cuantificación de bacterias heterótrofas. Con este análisis se puede cuantificar el contenido de bacterias capaces de utilizar compuestos orgánicos como fuente de carbono y energía. No toda la población existente en el suelo es cultivable, debido a que los microorganismos están adaptados a un ambiente natural que es diferente al que se logra en el laboratorio. Sin embargo, las cifras que en la práctica se han obtenido son del orden de 10^6 - 10^8 bacterias/g de suelo, aunque la literatura cita órdenes de magnitud mayores. La cuantificación de bacterias heterótrofas se puede realizar en muestras provenientes de la superficie y hasta la profundidad afectada.
- Cuantificación de bacterias degradadoras. Mediante este análisis es posible conocer el porcentaje de bacterias heterótrofas que tienen capacidad para degradar diesel. Las técnicas analíticas que se emplean son variadas, pero la mejor es aquella que se realiza bajo las condiciones que simulan las que privan en el sitio contaminado, especialmente en lo que se refiere al contacto microorganismo-diesel. Para este caso se recomienda un medio mineral con agar y diferentes alícuotas de diesel, con un período de incubación de 5 días como máximo a la temperatura típica del suelo en el sitio contaminado. Una proporción de bacterias degradadoras del orden de 10^4 - 10^6 bacterias/g suelo es adecuada para una biorremediación utilizando la flora nativa, cifras menores harán necesaria la adición de inóculos. Esta técnica es también utilizada para dar seguimiento a la biorremediación y verificar que la población degradadora es suficiente para llevar el proceso a los niveles de saneamiento requeridos y en el tiempo programado. La cuantificación de bacterias degradadoras se realiza en muestras obtenidas de la superficie y hasta la profundidad que sea necesaria.
- Detección de genes catabólicos. Esta es una técnica de actualidad, basada en los principios de la Biología Molecular. Se aplica para verificar si la población presente posee genes que codifican para la síntesis de enzimas involucradas en la degradación de hidrocarburos específicos. Para el caso de hidrocarburos y en especial diesel, se buscan los genes *xyl E*, *ndoB* y *alkB*, los cuales están involucrados en la degradación de tolueno, naftaleno y n-alcanos, respectivamente.

Esta técnica ya ha sido probada en el laboratorio y se recomienda en proyectos de investigación, porque aporta información muy valiosa ya que es cuantitativa.

- Detección de bacterias del género *Pseudomonas*. Esta técnica es opcional, se aplica cuando existe un interés especial por saber si las bacterias del género mencionado están presentes.
- Identificación de bacterias. Cuando existe un interés especial por identificar géneros y especies predominantes se aplica la técnica API, la cual puede ser acompañada del análisis de componentes de la membrana celular para una mayor precisión. Esta técnica se recomienda únicamente cuando se trata de proyectos de investigación.

Para los estudios de biotratibilidad se recomiendan las siguientes pruebas:

- Cuantificación del diesel residual. Con esta prueba es posible verificar si el diesel está siendo realmente utilizado como sustrato, lo cual garantiza que la biorremediación será exitosa. Para la cuantificación se utiliza el análisis cromatográfico citado en la Tabla 1.
- Respirometría. Se refiere a la cuantificación del consumo de oxígeno y de bióxido de carbono generado por la biodegradación. Esta técnica se aplica preferentemente a nivel de microcosmos en botellas selladas para tener muestras representativas del ambiente gaseoso. La cuantificación de los gases se realiza por cromatografía de gases. Con los resultados de esta prueba se podrán predecir los requerimientos de oxígeno del proceso de biorremediación.
- Consumo de nutrientes básicos, nitrógeno amoniacal y fosfatos, que son indispensables para la actividad metabólica. Para cuantificarlos se utilizan las técnicas analíticas citadas en la Tabla 2. Determinaciones periódicas permitirán identificar en momento en el que la actividad microbiana se puede ver limitada por el agotamiento de nutrientes, y se hace necesaria una nueva adición.

La integración de los resultados de las pruebas de biotratibilidad y de la caracterización microbiológica podrán predecir el máximo nivel de degradación por alcanzar y el tiempo que esto tomará.

2. Producción de inóculo

En caso de que la flora nativa no pueda garantizar la degradación del diesel, será necesario obtener cultivos para inocularlos al suelo contaminado. Los cultivos se producen en biorreactores por las técnicas tradicionales con algunas diferencias, ya que los biorreactores se instalarán cerca del sitio contaminado. Aquí, es conveniente mencionar la importancia de mantener la presión selectiva sobre el cultivo, por lo que será necesario adicionar diesel como único sustrato, para mantener la actividad biodegradadora en condiciones óptimas. El preinóculo para este cultivo será mantenido en el laboratorio, también bajo las condiciones de presión selectiva.

Conviene señalar aquí, que en el mercado existen preparaciones microbianas, pero no se recomienda su uso, ya que generalmente las bacterias que contienen no soportan las condiciones extremas que imperan en un sitio contaminado y mueren. Además, porque no siempre se pueden conocer sus características y su liberación al ambiente podría constituir un riesgo.

3. Puesta en marcha de la biorremediación a escala real

En virtud de que no se sabe la profundidad a la cual llega la contaminación con diesel, se describirá la estrategia para 3 situaciones típicas que son: afectación únicamente en la capa superficial, afectación en la zona no-saturada y afectación en zona no-saturada con presencia de combustible en fase libre flotando sobre el manto freático. La aplicación de alguna de ellas estará en función de los resultados de la caracterización geohidrológica.

Tomando como base que se trata de un suelo arenoso, se ha considerado que hay una concentración de diesel inicial bastante menor a 30,000 mg/kg.

3.1. Biorremediación en superficie

Esta opción considera que el suelo contaminado está en el estrato superficial con un espesor de aproximadamente 50 cm. Para la superficie de 400 m² se recomienda una técnica de biolabranza en la cual será necesario mover el suelo con maquinaria con el fin de favorecer el recambio de gases, esto es, la entrada de oxígeno y el desprendimiento de bióxido de carbono.

Durante la ejecución, será necesario llevar un registro diario de la humedad y hacer ajustes para mantenerla entre 25 y 30%, para ello se recomienda un sistema de riego en forma de rocío. Este es un aspecto importante porque los nutrientes y los cultivos degradadores, en caso de agregarlos, conviene depositarlos en donde se requieren, es decir, en la superficie. Si se agregan grandes cantidades de agua, más aún en un suelo arenoso, ésta tenderá a penetrar al suelo y arrastrar las sales que se hayan adicionado, hacia la profundidad.

Los nutrientes que se agregan son grado fertilizante o sales industriales. Respecto a la concentración, aunque la literatura general sobre el tema menciona que se debe mantener una relación de 100:10:1 para diesel:N-NH₄⁺:P-PO₄³⁻, respectivamente, la experiencia práctica ha mostrado que es mejor adicionar las concentraciones de nitrógeno y fosfatos típicas para un suelo rico en estos nutrientes, al inicio del proceso y hacer las adiciones necesarias el tiempo que dure la biorremediación para mantenerlas constantes. Esto tendrá como ventaja adicional, que conforme se va reduciendo la concentración del diesel, se va estimulando la actividad biológica natural del suelo y con ello el crecimiento de especies vegetales nativas.

De ninguna manera se recomienda la adición de agentes tensoactivos, ya que éstos tienden a disolver los hidrocarburos y facilitar su migración hacia los estratos inferiores, situación que representa un riesgo mayor que la contaminación misma, más aún cuando se alcanza el nivel del agua subterránea:

En caso de que no se pueda trabajar en la misma zona contaminada, por el tipo de actividades que ahí se realizan y que el espacio físico del que se disponga sea limitado, se recomienda un tratamiento en biopila. Para ello, será necesario levantar el suelo contaminado y apilarlo sobre una geomembrana para evitar la lixiviación de los contaminantes en el área de tratamiento. El recambio de gases se hará a través de tuberías horizontales perforadas, colocadas en la parte media de la biopila, las cuales irán conectadas a un extractor de gases. El oxígeno del aire ambiente podrá ingresar a la biopila al mismo tiempo que se desaloja el CO_2 . El control de la humedad será también indispensable y para la adición de nutrientes se tomarán las mismas recomendaciones descritas anteriormente.

3.2. Biorremediación *in situ* en la zona no-saturada

Para la biorremediación *in situ* en la zona no-saturada, se hará necesaria la instalación de galerías de infiltración con el fin de hacer llegar los nutrientes a las zonas afectadas. Estas galerías de infiltración son pozos horizontales perforados o ranurados que se colocan cerca de la superficie sobre la zona contaminada, para distribuir de manera horizontal y vertical, los nutrientes disueltos en agua. Serán también necesarios pozos verticales con tubería ranurada, de 10 cm de diámetro y hasta la profundidad afectada, para proporcionar oxígeno al sistema mediante la inyección de aire, estos pozos se colocan en línea para alternarlos con otros de las mismas características que servirán para extraer los gases ricos en CO_2 . Para un suelo arenoso como el que se tiene, la distancia entre los pozos podría ser de 20 m. Cada línea de pozos va conectada a un mismo equipo de ventilación o extracción según proceda, periódicamente se intercambia la función de los pozos, es decir, aquellos que sirvieron para ventilación, cambian para ser de extracción y viceversa. Esta alternancia promueve el flujo de gases en el subsuelo y trata de que en todos los puntos del sistema exista actividad biodegradadora. Aquí es donde se puede confirmar que el área en tratamiento se convierte en un biorreactor.

Para verificar el avance de la biorremediación serán necesarias perforaciones periódicas, por ejemplo cada mes, con muestreo de suelo hasta la profundidad inicialmente afectada, para realizar los análisis que demuestren el avance de la biorremediación.

Si en este caso también existe afectación en la superficie, se combinan las acciones descritas en este inciso con las del 3.1.

3.3. Biorremediación en la zona no-saturada con presencia de combustible en fase libre flotando sobre el nivel freático

Por el tipo de suelo arenoso, es muy probable que ésta sea la situación que prive en el lugar. Esto es debido a que las arenas poseen alta permeabilidad, lo cual por un lado facilita la acumulación de agua a profundidades cercanas a la superficie, alrededor de 3 m para este caso supuesto, y por otro lado, facilita la migración del combustible hacia la profundidad, hasta donde alcance el nivel del agua para luego migrar de manera horizontal. Generalmente en estos suelos existe una capa de suelo arcilloso por debajo de las arenas, la cual por su baja permeabilidad permite la acumulación de agua en la capa superficial de arenas.

Para esta opción el primer paso es la perforación de pozos de 10 a 20 cm de diámetro, en los cuales se hará la extracción del producto libre. La distancia entre los pozos podría ser también de 20 m y la profundidad de 4 o 5 m, esto es, 1 ó 2 m por abajo del nivel freático. La extracción se realiza con bombas especiales que pueden operar de manera constante. El avance de esta remediación física se confirma con mediciones del espesor de producto libre.

Una vez que se agote el producto libre, se da inicio a la biorremediación propiamente. Para ello se procede de la manera descrita en el inciso anterior promoviendo el flujo de gases, pero esta vez, se hace burbujear el aire en el agua subterránea. El suministro de nutrientes hacia la zona no-saturada se puede hacer a través de galerías de infiltración con pozos horizontales o mediante los mismos pozos de venteo. En la zona saturada se puede extraer el agua subterránea para darle tratamiento en superficie, en biorreactores aereados con suministro de nutrientes y una vez agotado el diesel devolver el agua tratada al subsuelo. En la Fig. 2 se muestra un diagrama conceptual de un proceso de biorremediación para ejemplificar lo descrito en este inciso, y que también puede ilustrar lo descrito en el inciso 3.2.

Al igual que en el caso anterior, para verificar el avance de la biorremediación serán necesarias perforaciones mensuales con muestreo de suelo hasta la profundidad inicialmente afectada y practicar los análisis necesarios.

4. Seguimiento de la biorremediación

El análisis para confirmar el avance de la biorremediación se refiere básicamente la cuantificación del diesel residual, sin embargo, otras determinaciones como el contenido de bacterias degradadoras, de nitrógeno amoniacal y fosfatos, así como la humedad y el pH son esenciales para anticipar cualquier limitación de la actividad microbiana. Aquí, la opción de llevar a cabo las pruebas de biotratabilidad simultáneamente al proceso de biorremediación, adquiere especial importancia porque estas pruebas, que se realizan en el laboratorio, son una versión miniaturizada del proceso a escala real. Cualquier

comportamiento observado en el laboratorio que se aleje de las expectativas, podrá ser prevenido y/o corregido en el proceso a escala real.

5. Límites de limpieza por alcanzar

Si el problema de contaminación está siendo vigilado por las autoridades ambientales, el límite de limpieza estará dictado por los Criterios Interinos de Limpieza (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), los cuales indican concentraciones máximas de diesel, de 1000 mg/kg para suelos de uso agrícola y residencial, y de 2000 mg/kg para suelos de uso industrial.

6. Programación de las actividades

Lo más importante para dar inicio a la biorremediación es la caracterización geohidrológica, ya que de aquí se tomarán las decisiones para instalar la infraestructura necesaria, básicamente pozos, que pueden ser para monitoreo del agua subterránea, para la inyección de aire, para la extracción de gases, o bien, para la incorporación y distribución de los nutrientes.

Tomando como base que se dispone de 6 meses, se puede establecer el programa de actividades que se presenta, que incluye la caracterización del sitio. Es posible que la urgencia de sanear el suelo contaminado pretenda restringir los análisis detallados que han sido descritos. Si esto ocurre, la recomendación es iniciar la producción del inóculo con bacterias degradadoras de diesel que se tengan en el laboratorio, al mismo tiempo que se inicia la caracterización geohidrológica con muestreo y análisis de hidrocarburos para realizar una bioaumentación, aún sin tener información sobre la flora microbiana. Esto es a manera preventiva porque toma tiempo la producción masiva de inóculo. Aún si el suelo tuviera una buena proporción de flora degradadora nativa, el inóculo podría adicionarse y con ello se aumentaría la velocidad de degradación del diesel.

Lo anterior no significa que deberá pasarse por alto toda la estrategia descrita, sólo se hacen ajustes al programa, ya que para llevar a la práctica un proceso de biorremediación serio, es necesario demostrarlo con elementos técnicos bien fundamentados.

Programa de actividades

ACTIVIDAD	MESES					
	1	2	3	4	5	6
Caracterización geohidrológica	x					
Caracterización de contaminantes	x	x				
Caracterización física y química del suelo	x	x				
Caracterización microbiológica	x	x				
Pruebas de biotratabilidad	x	x	x	x		
Extracción de combustible en fase libre	x	x				
Biorremediación en campo		x	x	x	x	x
Producción de inóculo		x	x	x	x	
Seguimiento de la biorremediación		x	x	x	x	x

Para este caso en particular se estima que en 5 meses será posible alcanzar el nivel de limpieza citado en el inciso 5.



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

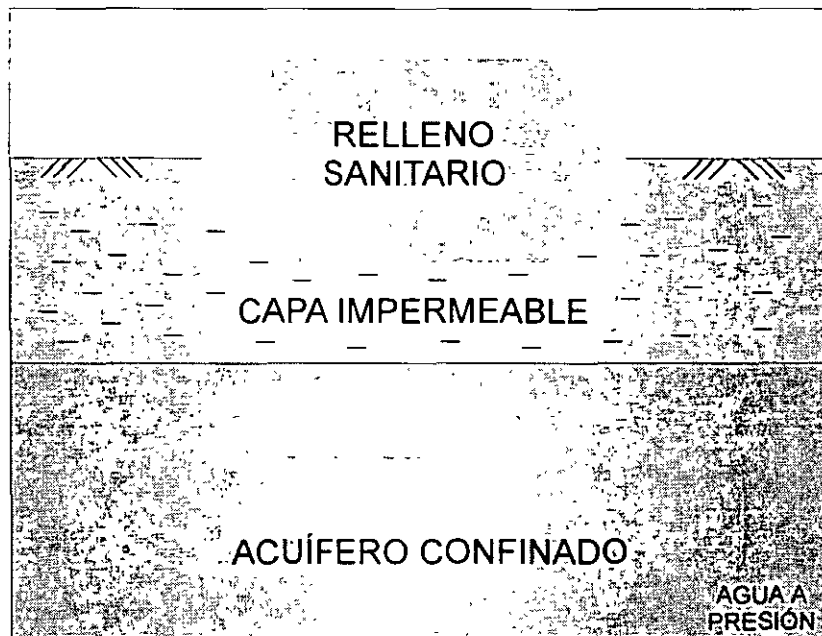
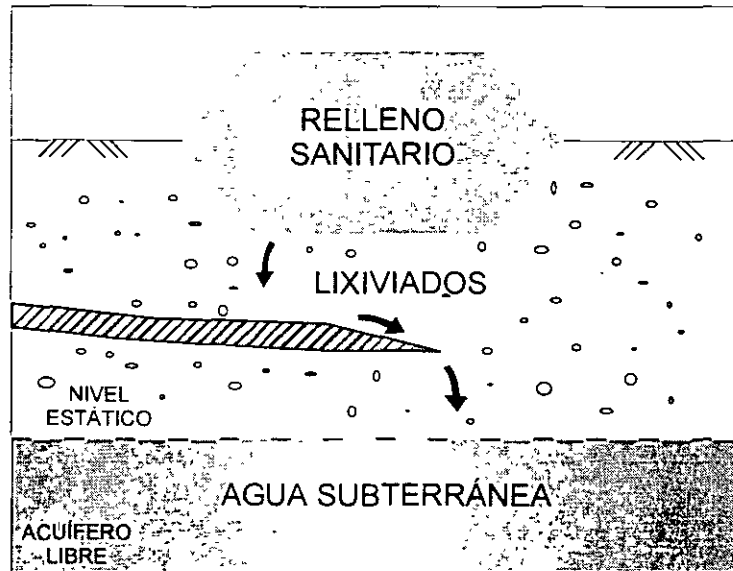
MODULO II: CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGANICOS

TEMA

RELLENO SANITARIOS

**EXPOSITOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

RELLENOS SANITARIOS



El área inundada después de la superficie del lago, es la que los charcos dejan por debajo de la superficie del agua retenida por las barreras naturales.



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

TEMA DE ACUERDO A
LA NOM-083-96

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

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

D Análisis del sistema de flujo

- Zonas de recarga y descarga
- Flujo local y regional

E Evaluación potencial de contaminación

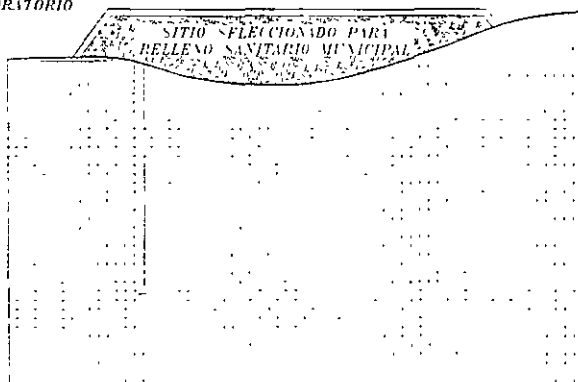
- Determinar si el sitio es apto
- Factor de tránsito de la infiltración



**DATOS BASICOS REQUERIDOS
PARA CONOCER UN SITIO**

DONDE NO EXISTE NIVEL PIEZOMETRICO

POZO
EXPLORATORIO



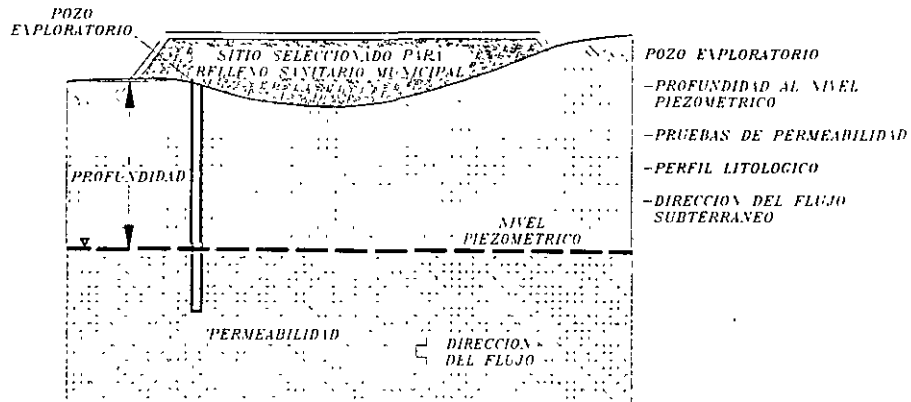
POZO EXPLORATORIO

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



DATOS BASICOS REQUERIDOS PARA CONOCER UN SITIO

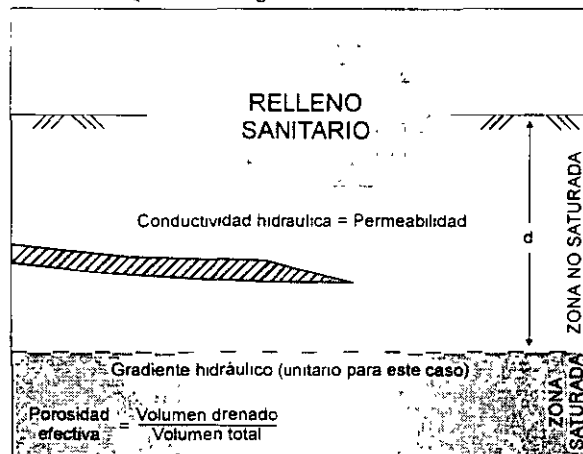
DONDE SE ENCUENTRA NIVEL PIEZOMETRICO



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

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

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



f menor de
 3×10^{-10}

EJEMPLO 1 ARENAS

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

$$i = 1$$

$$u = 0.10$$

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

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

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

EJEMPLO 2 ARCILLAS

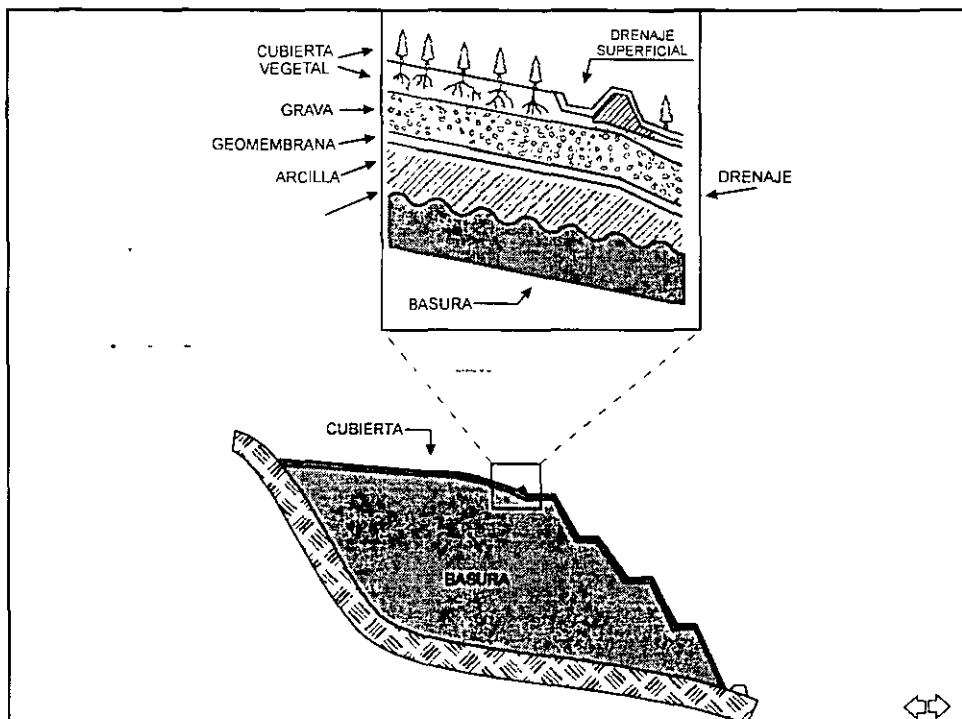
$$k = 10^{-10} \text{ m/seg}$$

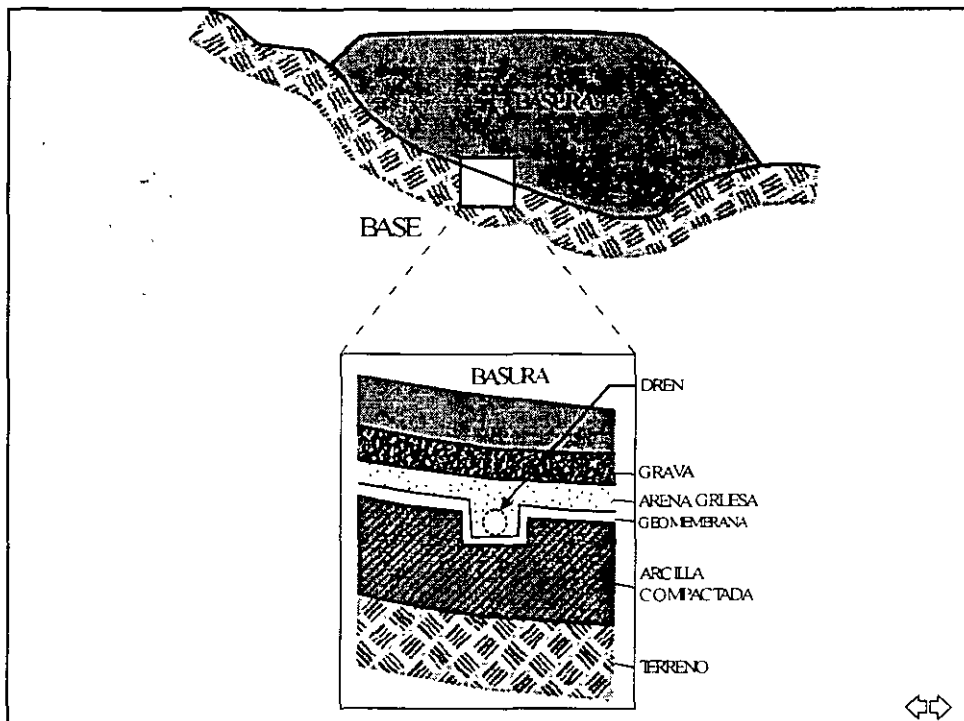
$$i = 1$$

$$u = 0.3$$

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

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





FACTORES QUE AFECTAN EL RELLENO

- TIPO DE BASURA
- TIEMPO
- TEMPERATURA AMBIENTE
- HUMEDAD
- OXIGENO

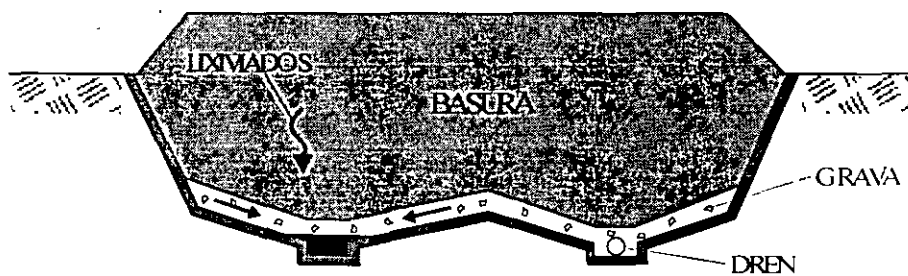


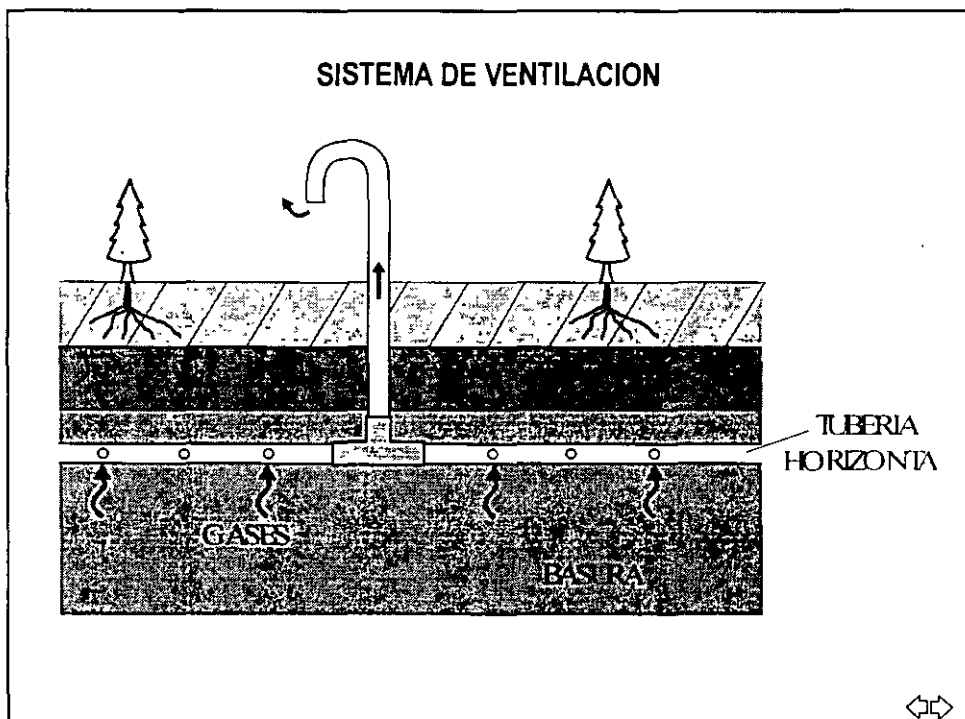
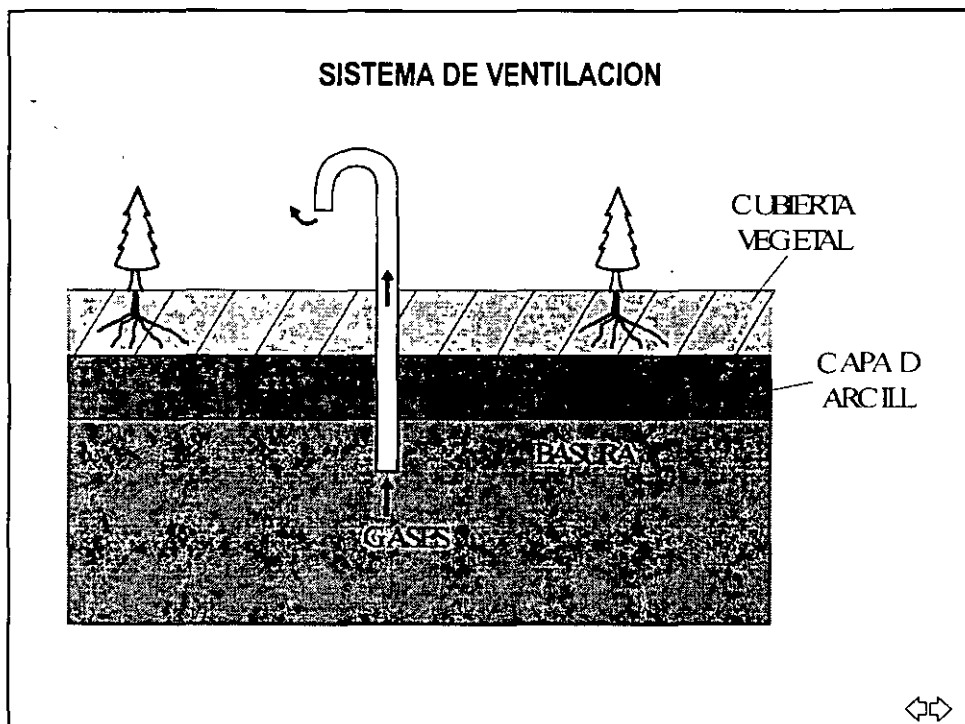
FACTORES QUE AFECTAN LA CANTIDAD DE LIXIVIADO

- PRECIPITACION
- NIVEL ESTATICO SOMERO
- CUBIERTA



DRENAJE DENTRO DEL RELLENO SANITARIO

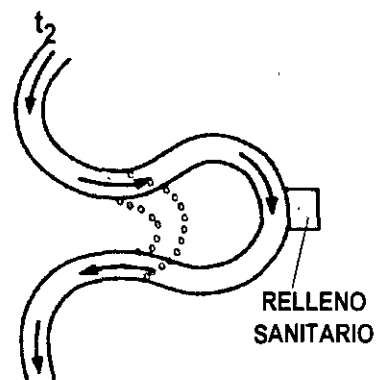
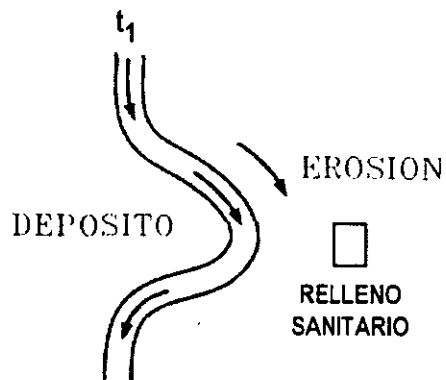


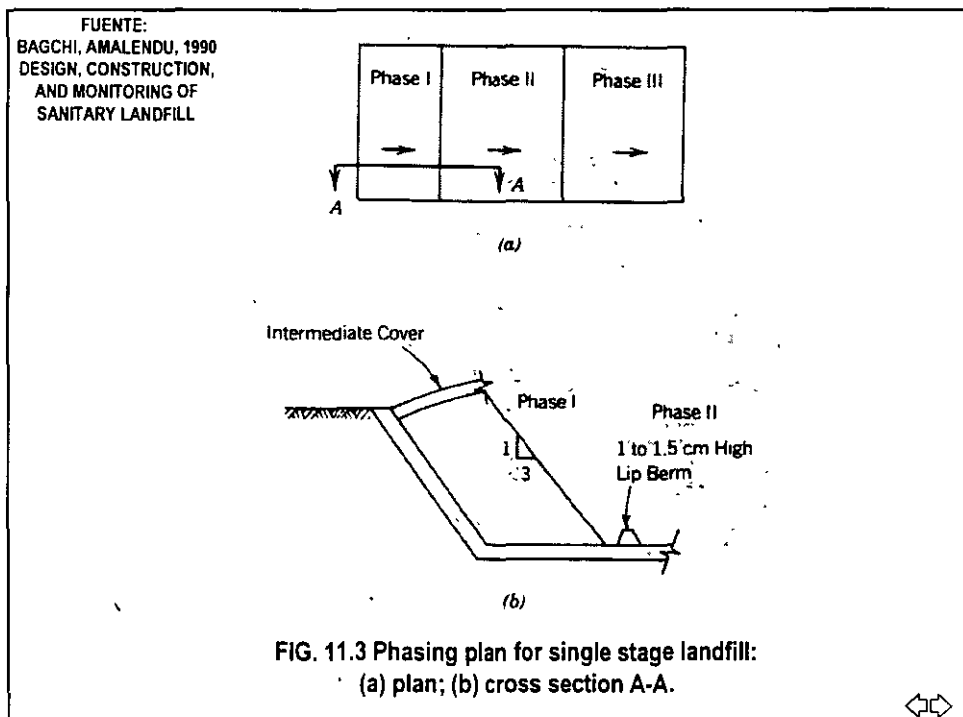
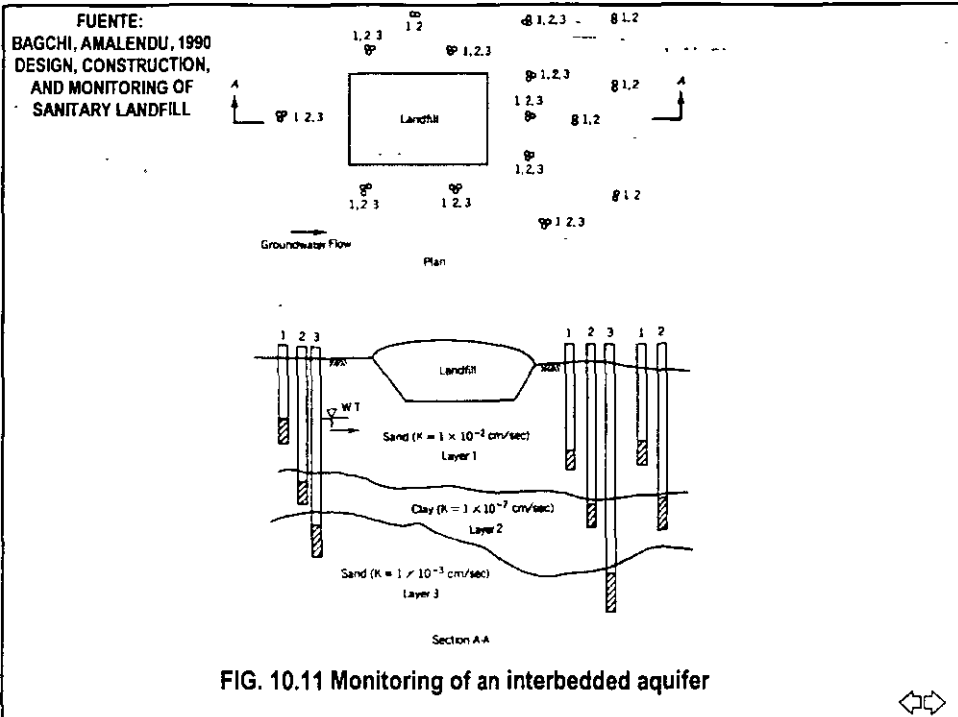


INFLUENCIA DEL TIEMPO GEOLOGICO



INFLUENCIA DEL TIEMPO GEOLOGICO





FUENTE:
GEOTECHNICAL PRACTICE
FOR WASTE DISPOSAL,
POR DAVID E. DANIEL

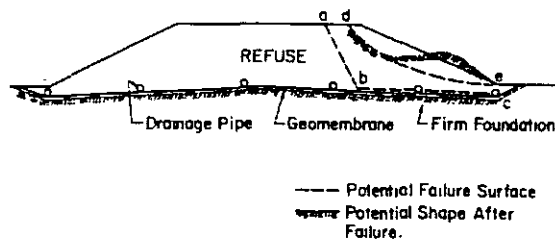


FIG. 11.1 Stability of a landfill on firm base

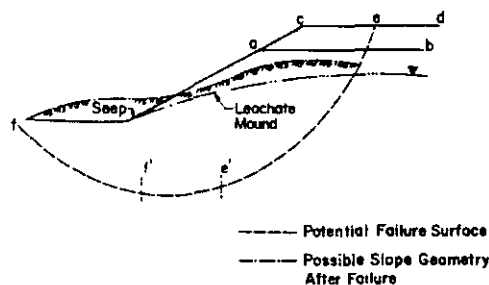


FIG. 11.2 Stability of a landfill expansion on soft base

FUENTE:
GEOTECHNICAL PRACTICE
FOR WASTE DISPOSAL,
POR DAVID E. DANIEL

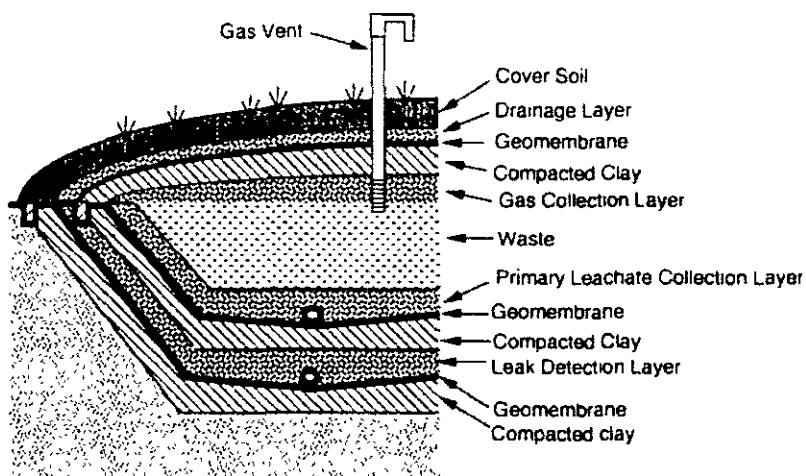


FIG. 5.6 Double composite liner system and multiple-component cover system in a waste containment unit

FUENTE:
GEOTECHNICAL PRACTICE
FOR WASTE DISPOSAL,
POR DAVID E. DANIEL

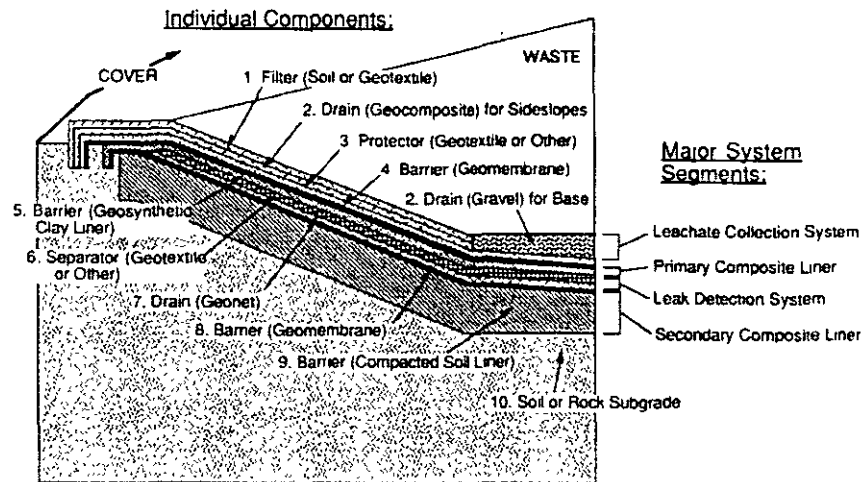


FIG. 5.7 Lining system recommended by Daniel and Koerner (1991)

FUENTE:
GEOTECHNICAL PRACTICE
FOR WASTE DISPOSAL,
POR DAVID E. DANIEL

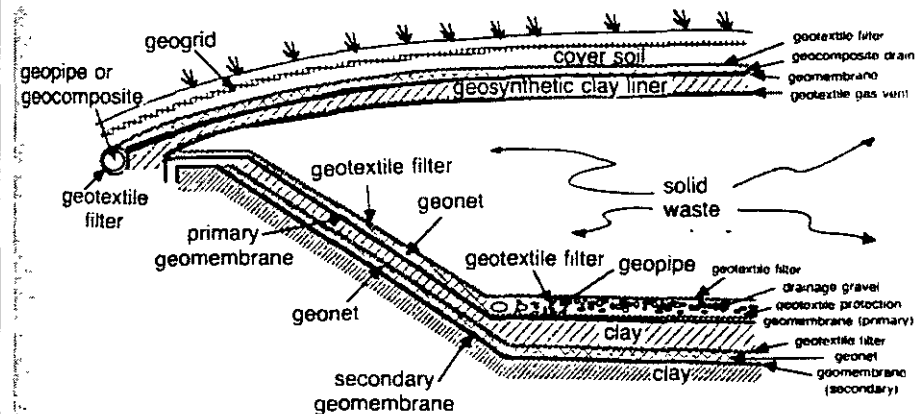


FIG. 8.2 Cross-section of solid waste landfill liner system and closure system illustrating the major use of geosynthetics



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS

MODULO I: RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES INORGANICOS

TEMA

OPERACIÓN Y PROCESOS UNITARIOS, EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

**EXPOSITOR: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERIA
SEPTIEMBRE DEL 2001**

XIII CURSO INTERNACIONAL SOBRE CONTAMINACION DE SUELOS Y ACUIFEROS.

OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS, EN LA REMOCION DE CONTAMINANTES.

1. **INTRODUCCION.** Las operaciones y procesos unitarios posibilitan modificar las características másicas del agua y su energía potencial como fluido.

2. **CAMPO DE APLICACIÓN.** Remoción de contaminantes en los acuíferos.

2.1 **Acuíferos superficiales.**

2.2 **Acuíferos subterráneos.**

Someros.

Lentes quedados.

Subterráneos.

2.3 **Aplicaciones.**

Industria.

Servicios municipales.

Preservación cualitativa estratégica.

Afloramiento.

Vertido final.

3. SIGNIFICADO SANITARIO.

- | | | |
|------------|-----------------------------|---|
| 3.1 | Ablandamiento. | Proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua. |
| 3.2 | Adsorción. | Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución. |
| 3.3 | Coagulación Química. | Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración. |
| 3.4 | Desinfección. | Dstrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos. |
| 3.5 | Evaporación. | Separación del agua de los sólidos disueltos, utilizando calor como agente de separación. |
| 3.6 | Filtración. | Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada. |
| 3.7 | Floculación. | Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos. |
| 3.8 | Flotación. | Separación de partículas a través del rompimiento de una suspensión por medios físicos o hidráulicos. |

- 3.9 Intercambio iónico.** Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético con el que se pone en contacto.
- 3.10 Neutralización.** Adición de sustancias básicas o ácidas al agua para obtener un pH neutro.
- 3.11 Estabilización.** Obtención de determinada concentración de sales y pH del agua, para evitar la incrustación o corrosión de los materiales con que se fabrican los elementos que la conducen o contienen.
- 3.12 Osmosis Inversa.** Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.
- 3.13 Oxidación.** Pérdida de electrones de un elemento, ion o compuesto por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.
- 3.14 Sedimentación.** Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas en el agua, por efecto gravitacional.

4. EJEMPLOS PRACTICOS DE APLICACION.

4.1 Recarga.

4.2 Potabilización.

4.3 Reuso.

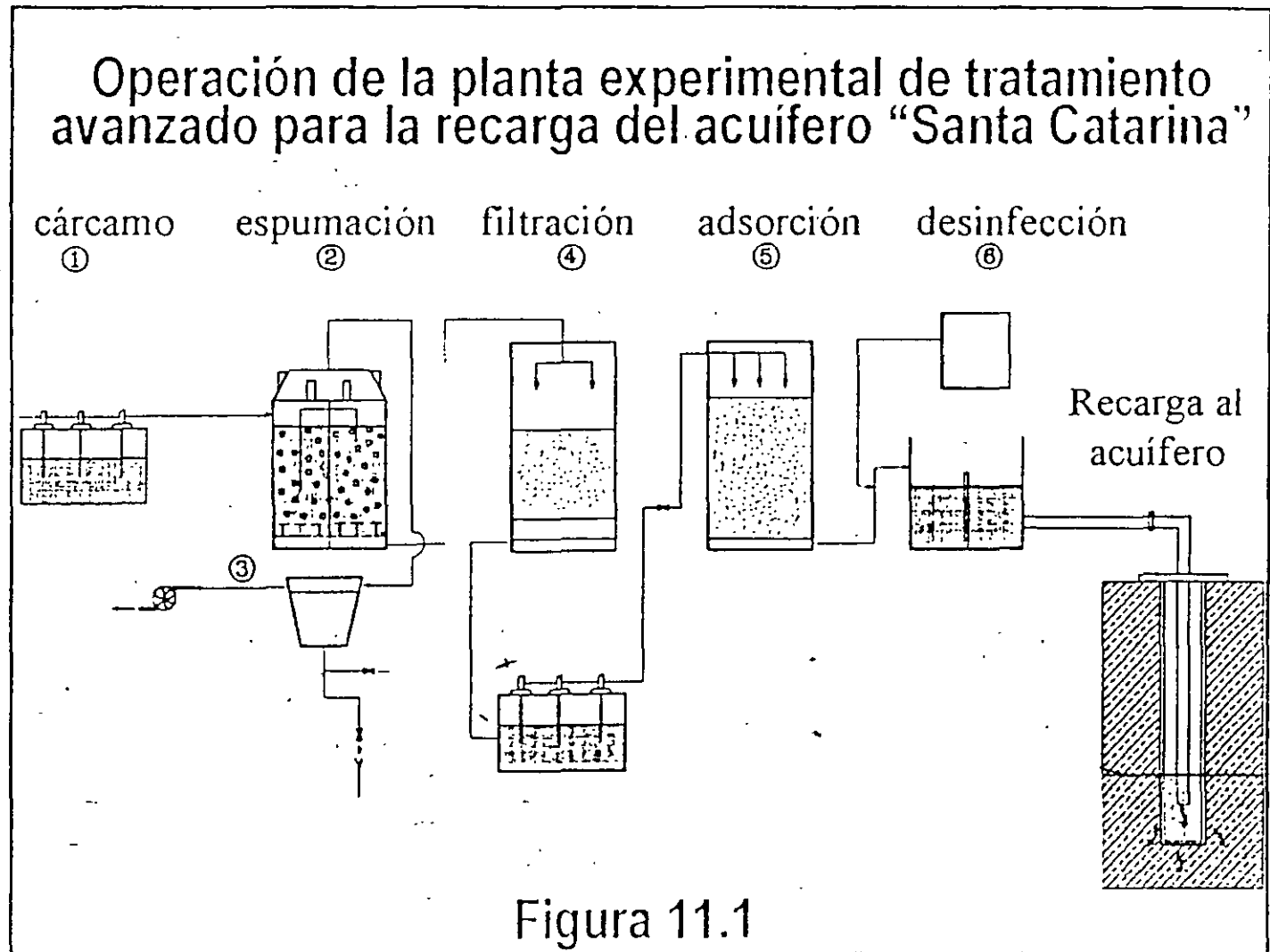
4.4 Preservación..

4.5 Reciclaje.

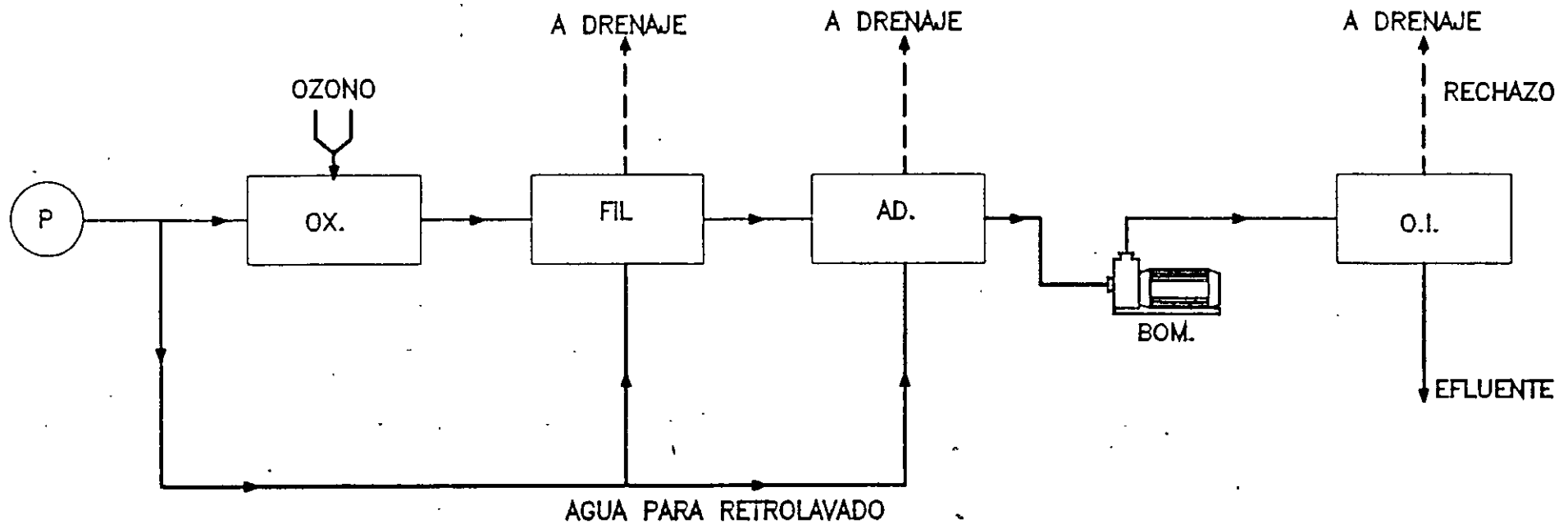
4.6 Saneamiento.

4.7 Repotabilización.

4.1.RECARGA.



4.2 POTABILIZACION



NOMENCLATURA:

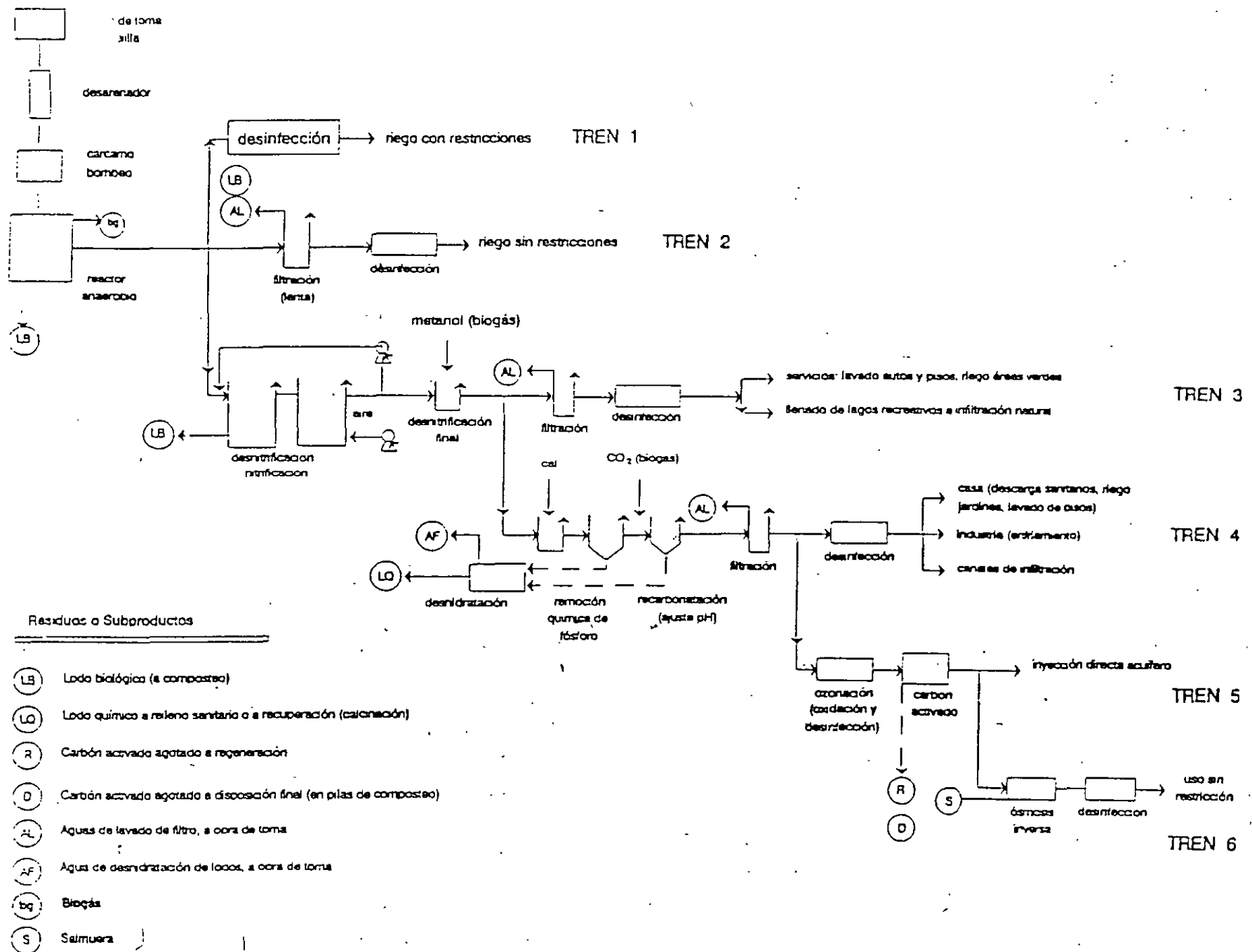
P	POZO DE AGUA
OX.	OXIDACION.
FIL.	FILTRACION.
AD	ADSORCION
BOM.	BOMBEO
O.I.	OSMOSIS INVERSA

SIMBOLOGIA:

→	AGUA
- - - →	AGUA TURBIA

POTABILIZADORA A PIE DE POZO.

4.3.REUSO.



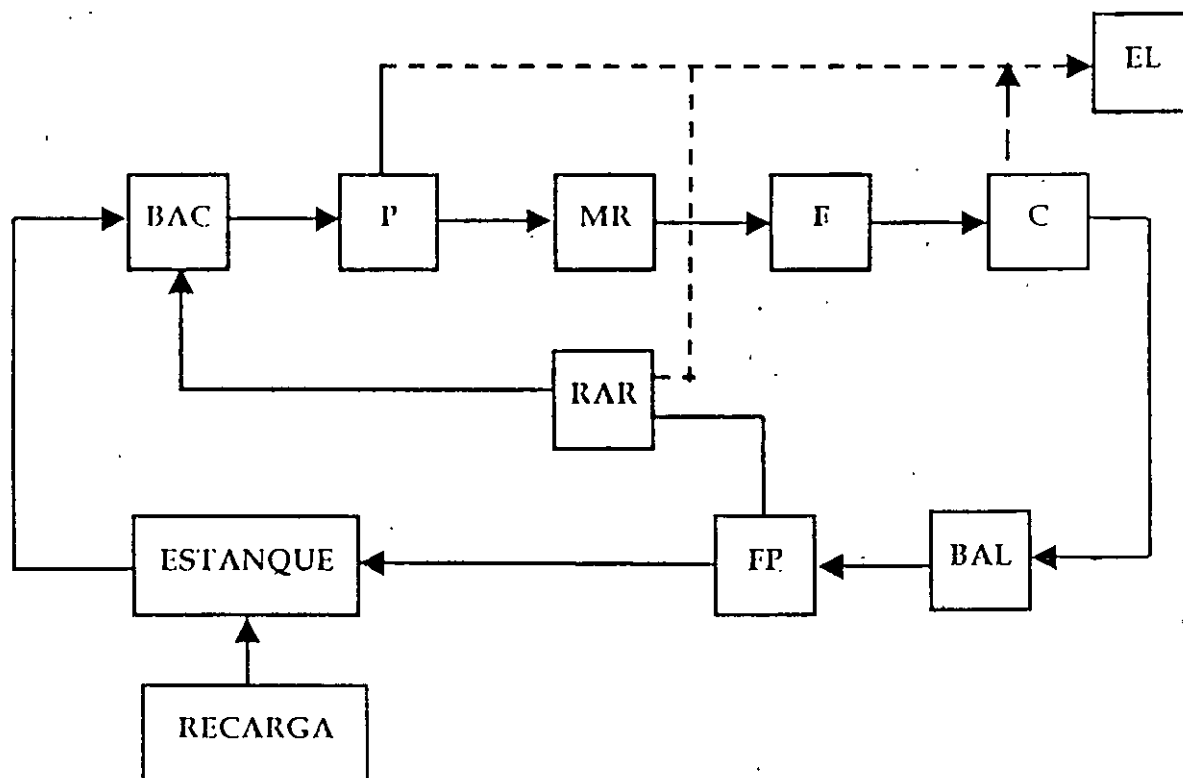
4.3.REUSO.

Tabla 3. Subtrenes de tratamiento, calidad de agua alcanzada, reúso compatible y cumplimiento con NOM-001.

Subtren de tratamiento	Objetivo	Calidad de agua obtenida	Reúso posible	Descarga NOM-001
1)	Remoción de carbón orgánico y sólidos suspendidos, y coliformes.	DQO < 160 mg/l DBO < 60 mg/l SST < 40 mg/l	Riego agrícola con restricciones.	Suelo (riego). Humedad natural. +++ Aguas costeras (excepto estuarios).
2)	1), remoción total de sólidos suspendidos, huevos de helmintos y coliformes.	DQO < 100 mg/l DBO < 30 mg/l SST < 5 mg/l	Riego agrícola sin restricciones.	Suelo (riego). Humedad natural +++ Aguas costeras (excepto estuarios).
3)	1), remoción de nitrógeno y coliformes.	DQO < 160 mg/l SST < 5 mg/l NT < 5 mg/l	Servicios (lavado de autos, pisos, riego de áreas verdes).	Suelo (riego). Humedad natural. Aguas costeras (estuarios). + Embalses (urbano) Río (protección de la vida acuática).
4)	1), remoción de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, huevos de helmintos y coliformes.	DQO < 20 mg/l SST < 5 mg/l NT < 3 mg/l PT < 0.5 mg/l	Intradomiciliario (descarga de sanitarios, lavado de pisos, riego de jardines). Industria (enfriamiento). Infiltración superficial.	Objetivo: reúso
5)	4), remoción de materia orgánica residual, color y olor.	DQO < 10 mg/l SST < 1 mg/l NT < 1 mg/l PT < 0.1 mg/l Color 7 unidades Pt-Co Turbiedad 1 UTN	Inyección directa al acuífero.	Objetivo: reúso
6)	5), remoción de sales disueltas.	DQO < 5 mg/l SST = 0 mg/l NT < 0.1 mg/l PT < 0.05 mg/l Color 5 unidades Pt-Co Turbiedad 0.5 UTN Conductividad < 200 μ mhos/cm	Uso sin restricciones.	Objetivo: reúso

NT: Nitrógeno total. PT: Fósforo total.

Fig. 1 DIAGRAMA DE FLUJO

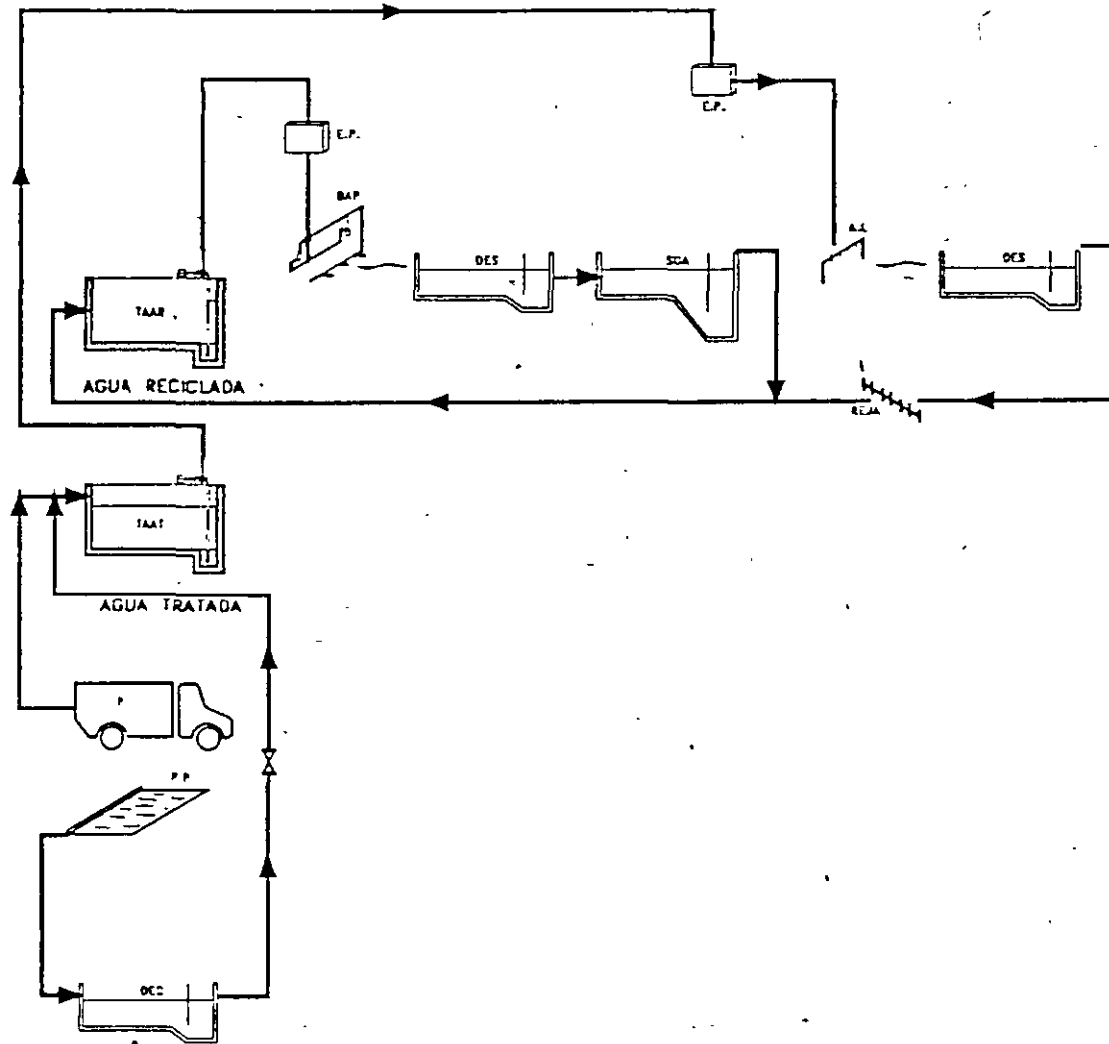


DESCRIPCIÓN.

- 1) Bombeo de agua cruda, (BAC).
- 2) Presedimentación, (P).
- 3) Mezcla rápida de reactivos, (RM).
- 4) Floculación, (F).
- 5) Clarificación, (C).
- 6) Bombeo de agua en línea, (BAL).
- 7) Filtración a presión, (FP).
- 8) Recuperación de agua de retrolavado, (RAR).
- 9) Extracción de lodos, (EL).

Los parámetros del control supervisorio de los procesos serán los que aplican en cada unidad, del siguiente grupo: Sólidos sedimentables, materia flotante, sólidos en todas sus formas y turbiedad; para efecto de la verificación de la calidad del agua la comparación será contra la norma NOM-003-ECOL-1997.

4.5.RECICLAJE.



DESCRIPCION

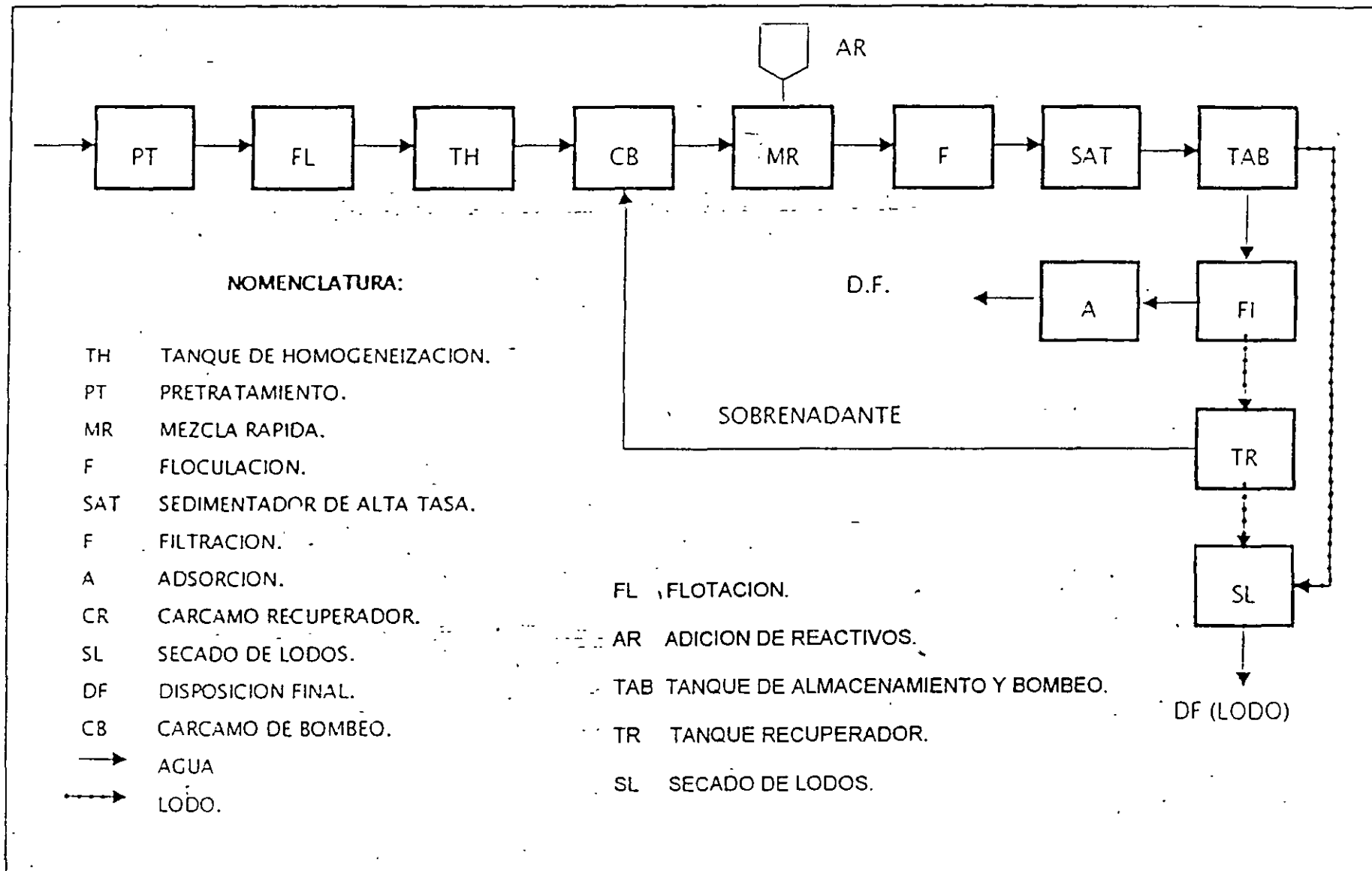
- T.A.A.P. TANQUE DE ALMACENAMIENTO AGUA POTABLE
- B BOMBAS
- T TINACOS
- N.H. NUCLEO HIDRAULICO
- N.S. NUCLEO SANITARIO
- F.S. FOSA SEPTICA
- T.C. TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO
- P.A. POZO DE ABSORCION
- EXC EXCEDENTE
- DEC DECANTACION
- P.P. PRECIPITACION PLUVIAL
- T.A.A.T. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA TRATADA
- P PIPAS
- T.A.A.R. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA RECUPERADA
- B.A.P. BOMBAS DE ALTA PRESION
- R.L. RAMPAS DE LAVADO
- DES DESARENADOR
- S.G.A. SEPARADOR DE GRASAS Y ACEITES
- A.L. ARCO DE LAVADO
- A.G. AGUAS GRISES
- R.A.V. RIEGO AREAS VERDES
- E.P. EQUIPO DE PRESION

MANEJO INTEGRAL DEL AGUA

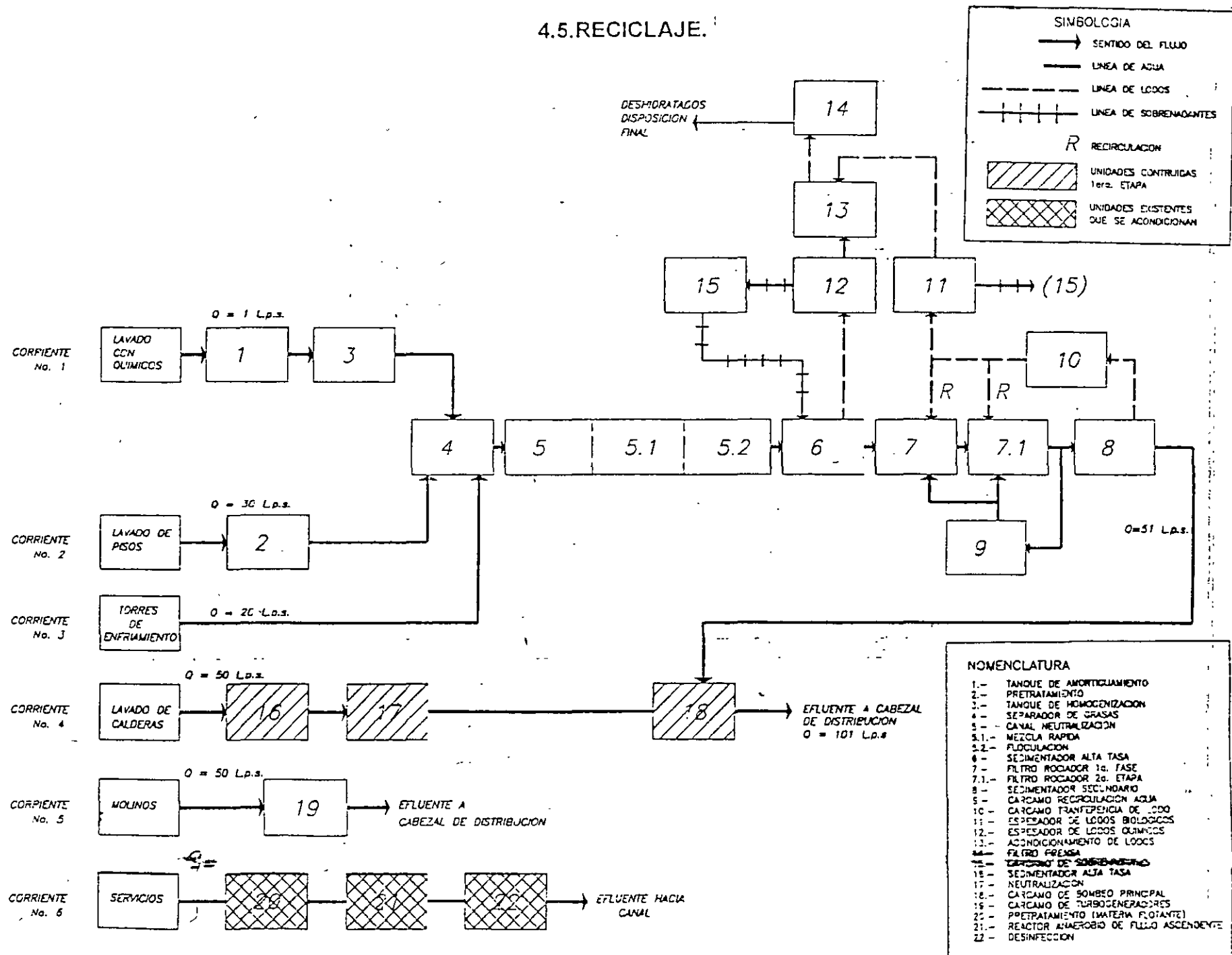
FIG. 1 DIAGRAMA DE FLUJO

4.5.RECICLAJE.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.



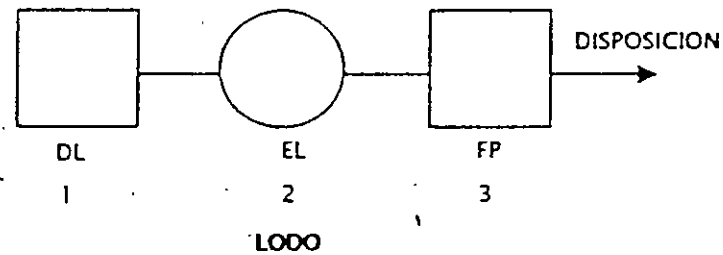
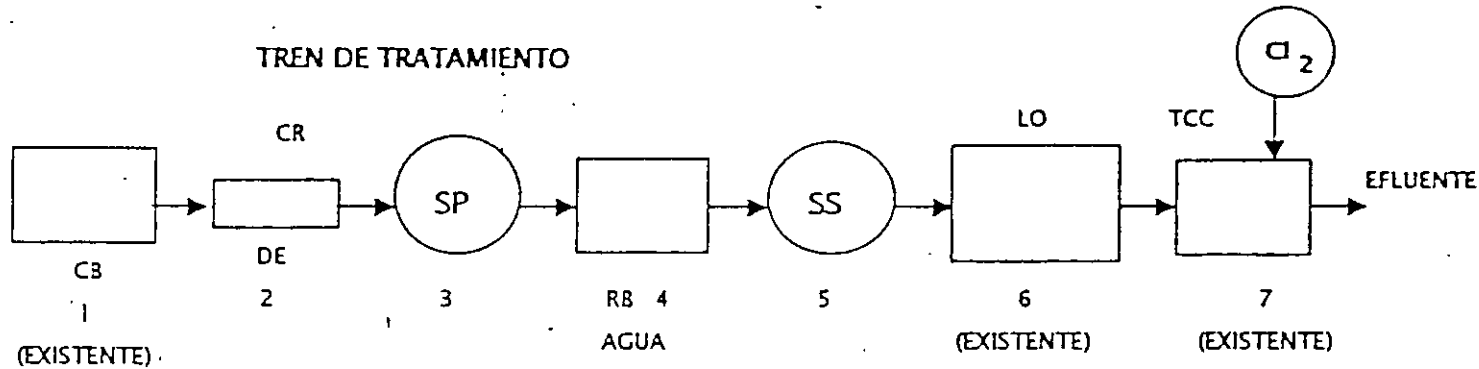
4.5. RECICLAJE.



4.6.SANEAMIENTO.

LODOS ACTIVADOS CONVENCIONALES

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS EN LA ZONA TURISTICA DE NOPOLO, B.C.S.



DATOS DE PROYECTO.

CASTO DE DISEÑO	60 LPS.
NUMERO DE MODULOS	2.
PARAMETROS EN EL INFLUENTE.	
DBO	220 mg/Lt
SST	220 mg/Lt
CONDICIONES EFLUENTE.	
DBO	30 mg/Lt
SST	30 mg/Lt

TREN	1	2	3	4	5	6	7
AGUA	CARCAMO DE BOMBEO	PRETRATAMIENTO	SEDIMENTADOR PRIMARIO	REACTOR BIOLOGICO	SEDIMENTADOR SECUNDARIO	LAGUNA DE OXIDACION	TANQUE DE CONTACTO DE CLORO
LODO	DIGESTOR DE LODO.	ESPESADOR DE LODO.	FILTRO PRES.				

٧

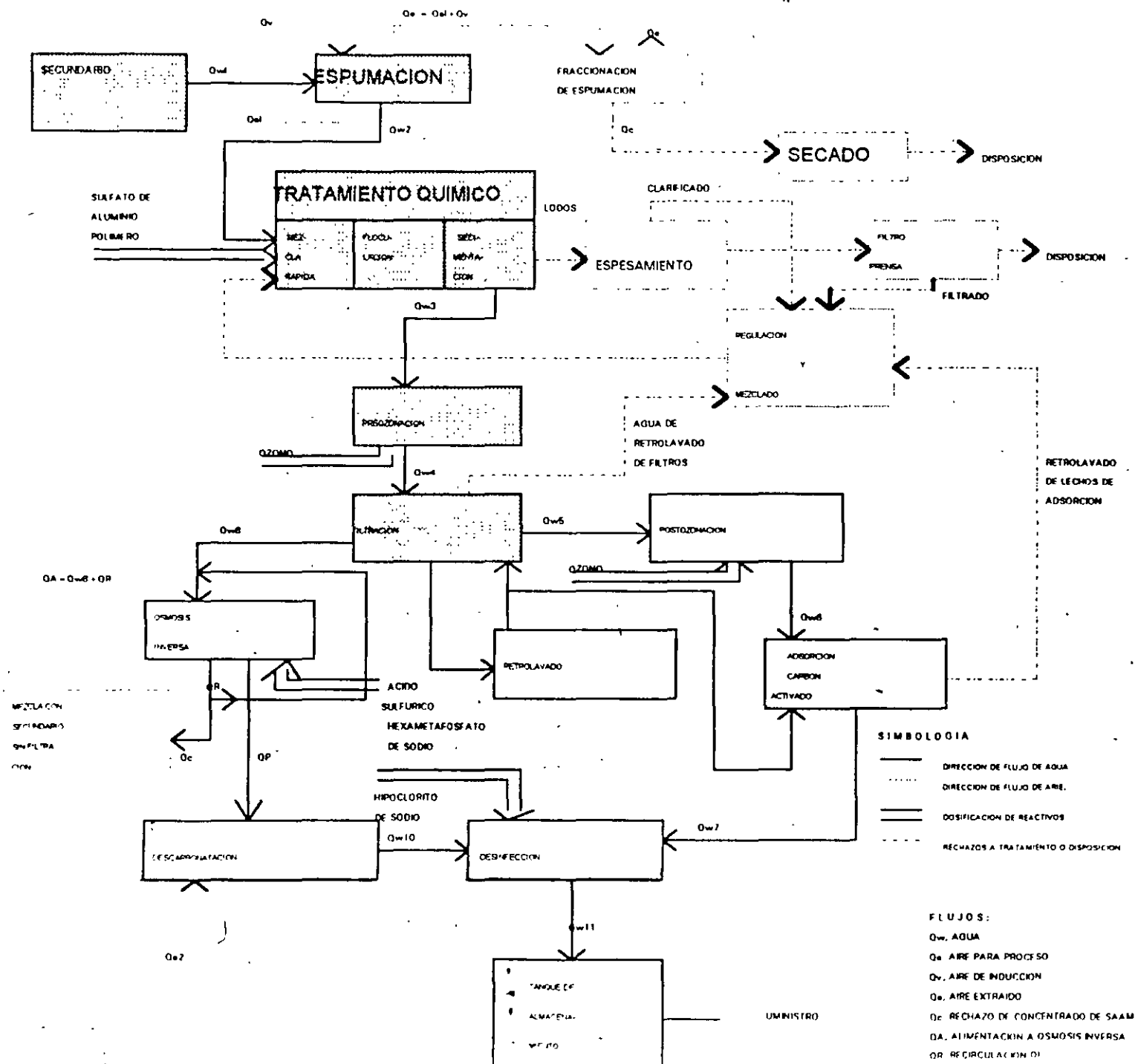
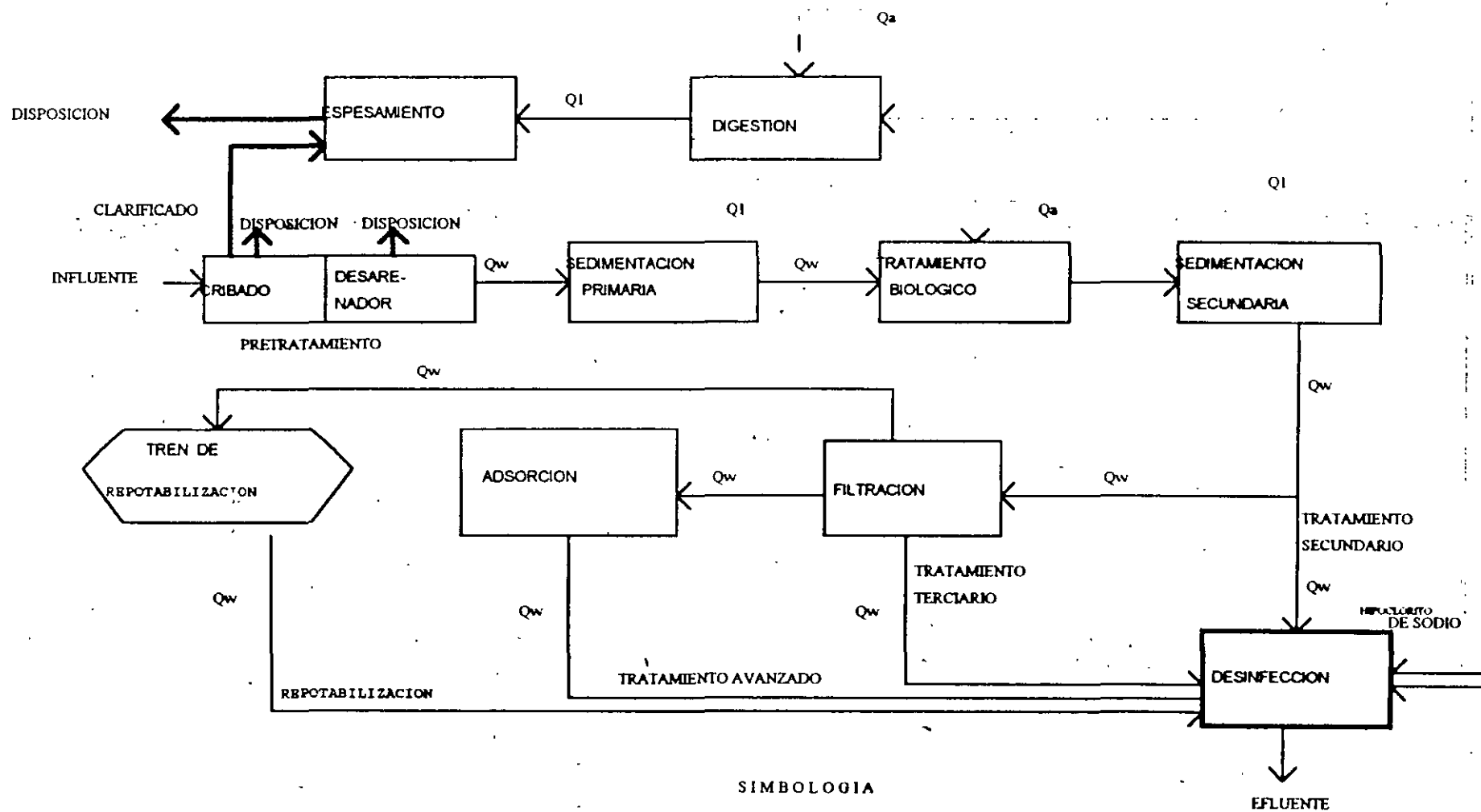


FIG. 5.3.4.a. TRENES PARA LODOS DIFERENTES NIVELES DE TRATAMIENTO.



SIMBOLOGIA

- DIRECCION DE FLUJO DE AGUA.
- - - DIRECCION DE FLUJO DE AIRE.
- == DOSIFICACION DE REACTIVOS.
- RECHAZOS A TRATAMIENTO O DISPOSICION

FLUJOS

- Q_w , AGUA
- Q_a , AIRE PARA PROCESO
- Q_l , LODOS



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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

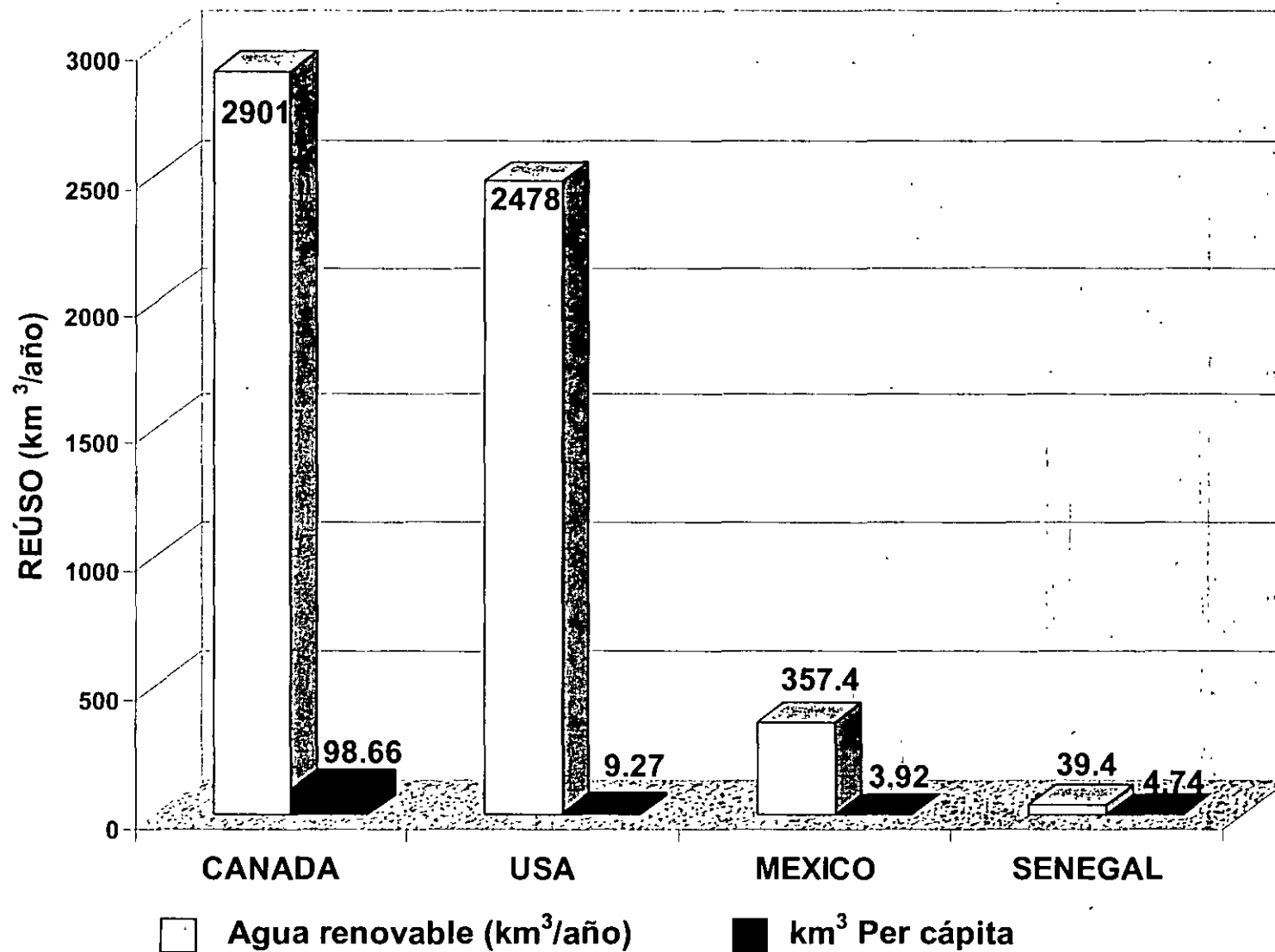
MODULO II: RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS

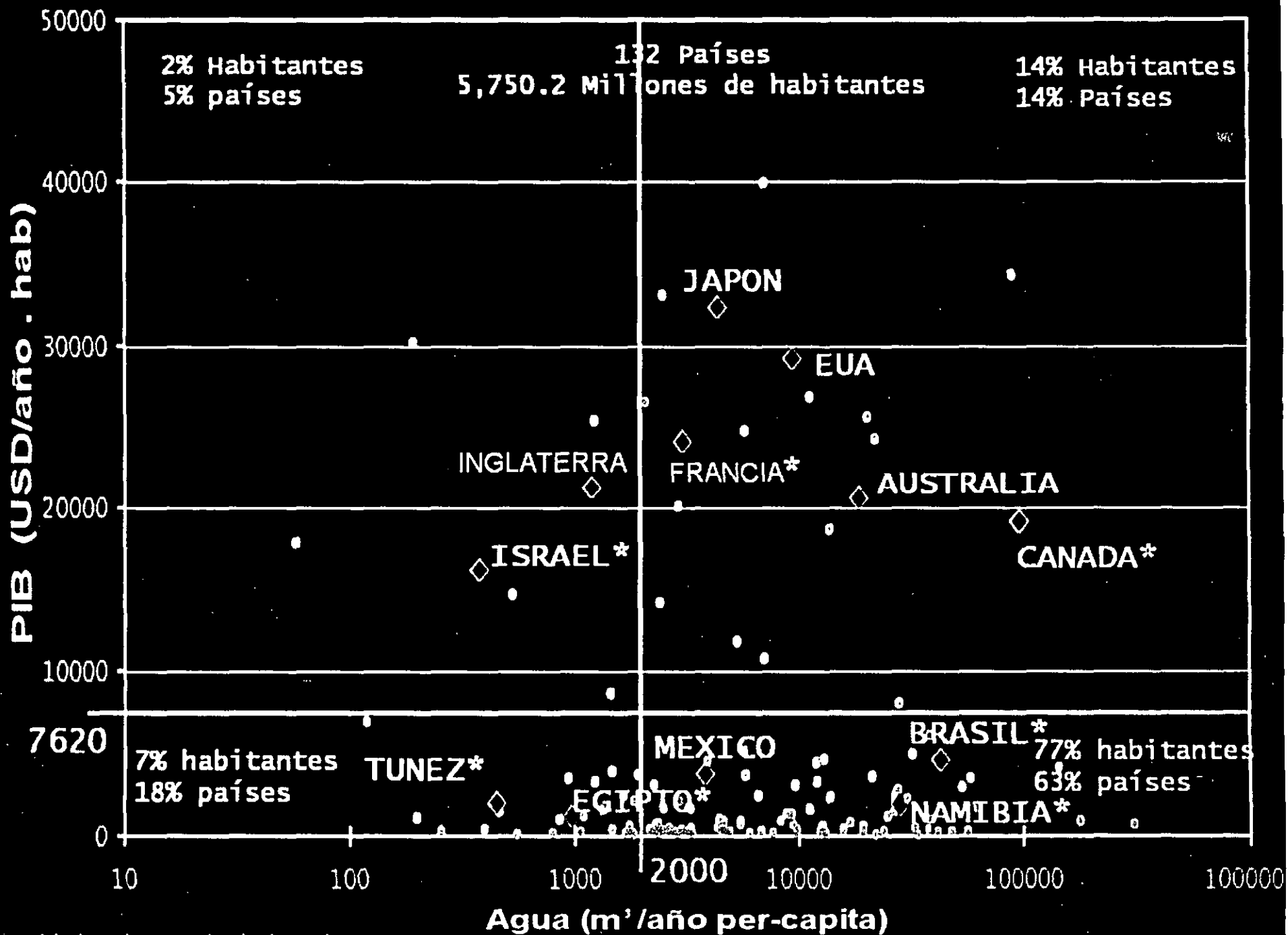
TEMA

CALIDAD DEL AGUA

**EXPOSITOR: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE DE 2001**

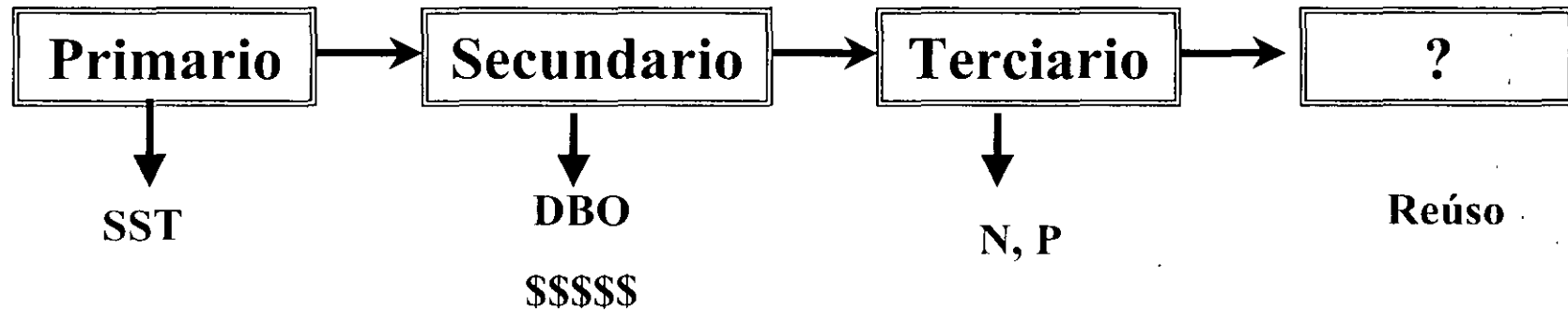
Indicadores Hidrológicos Estándar



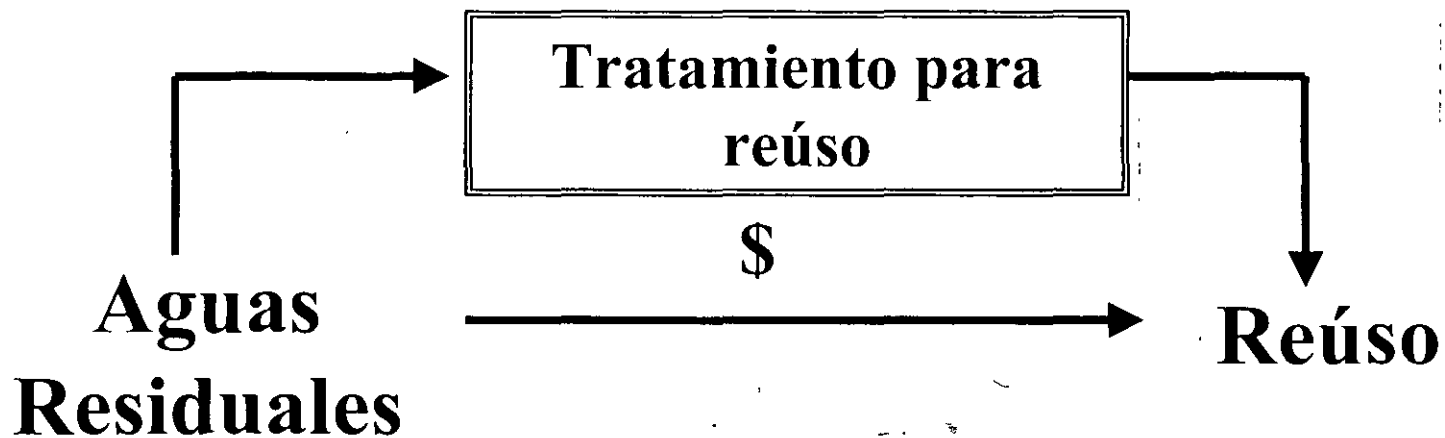


* Incluye el agua en rios de otros países

Países Desarrollados



Países en Desarrollo



Comparación de la calidad microbiológica

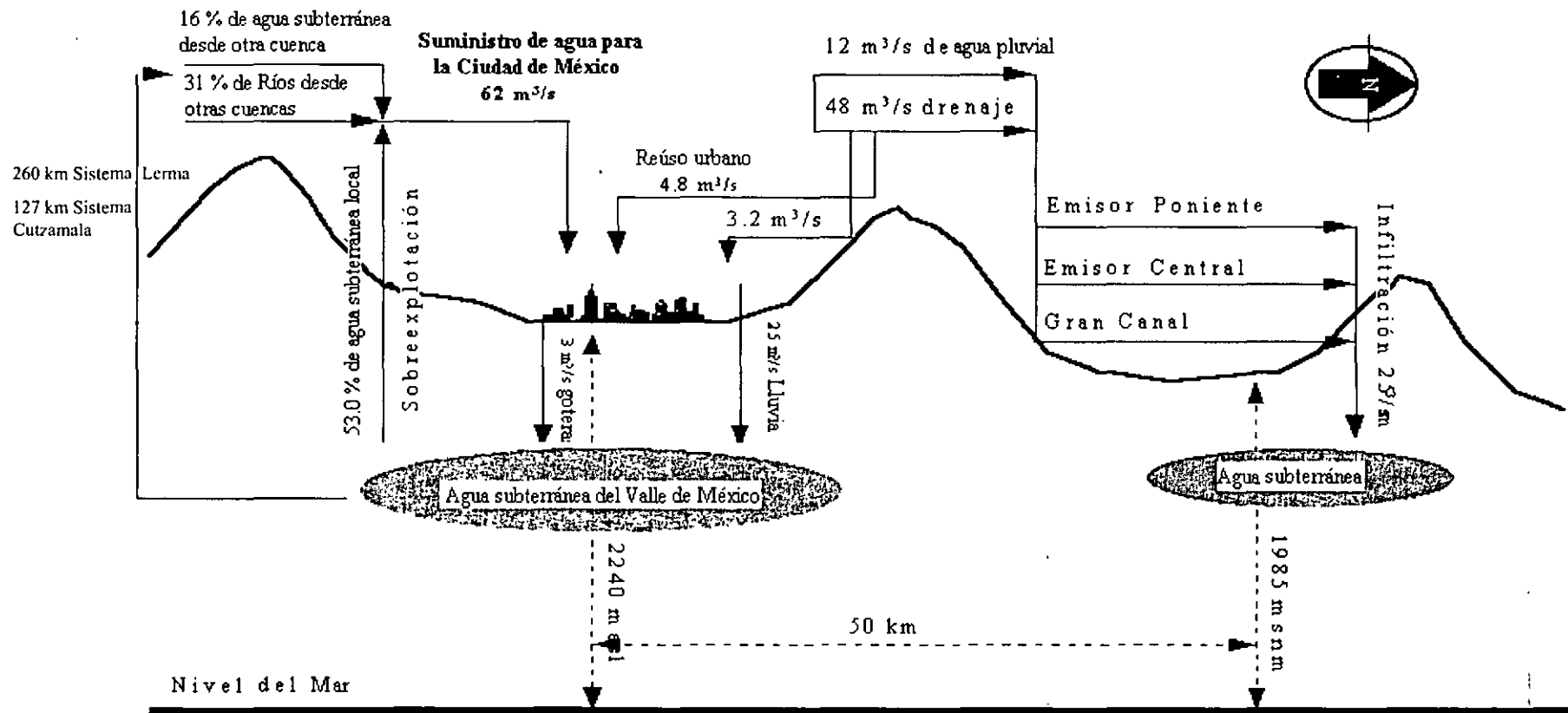
PAIS	SALMONELLA, nmp/100 mL	REFERENCIA
ISRAEL	10^1 A 10^2	ARMONT ET AL., 1994
ESTADOS UNIDOS	10^2 A 10^4	NRC, 1996
MÉXICO	10^5 A 10^9	JIMENEZ ET AL, 1998

10 10'98

Balance Hidráulico en la Ciudad de México

Valle de Mexico

Valle del Mezquital





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

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

CURSOS ABIERTOS

XIII CURSO INTERNACIONAL EN CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MODULO II: RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS

TEMA

CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO (ANEXO)

**EXPOSITOR: DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 2001**

OTRAS CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES
DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS

COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN
OCTANOL/AGUA
 $K_{O/W}$

CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY
 $K_{A/W}$

COEFICIENTE DE RETARDO
(AFINIDAD POR CARBONO ORGÁNICO K_{OC})

PRESIÓN DE VAPOR

COEFICIENTE DE DISPERSIÓN

ASPECTOS A CONSIDERAR DURANTE
EL MUESTREO DIRECTO

- muestras inalteradas
- preservadas en frío hasta su análisis
- número representativo de acuerdo al sitio
- volumen representativo (suelo)
- distribución adecuada de los puntos de muestreo
- recipientes de acuerdo al tipo de análisis a realizar

Análisis de contaminantes orgánicos

Contaminante	Método
HTPs	EPA 418.1
Gasolina y diesel	EPA 8015 B
BTEX	EPA 8260, EPA 8240
MTBE	EPA 8260
Poliaromáticos	EPA 8310, 8270
Disolventes clorados	EPA 8270
Plaguicidas organoclorados	EPA 8081
Bifenilos policlorados	EPA 8082

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:

fijación, 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

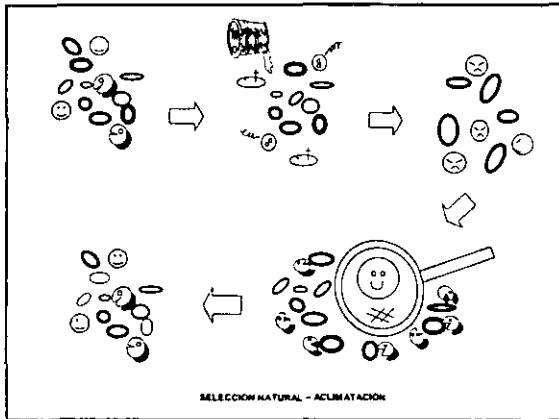
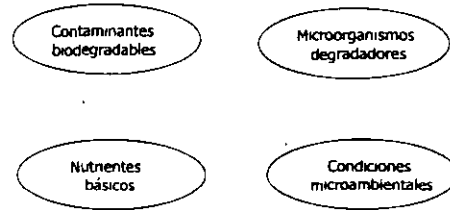
COMPUESTOS INORGÁNICOS EN SUELOS
BIOTRANSFORMABLES

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

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

Para que ocurra la biorremediación se requiere



CARACTERÍSTICAS MICROBIANAS DEL SUELO

- baja densidad microbiana (10^6 - 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 INVOLUCRADOS EN LA BIODEGRADACIÓN O BIOTRANSFORMACIÓN DE CONTAMINANTES

- Bacterias
- Hongos
- Levaduras
- Actinomicetos
- Algas

DEFINICIONES

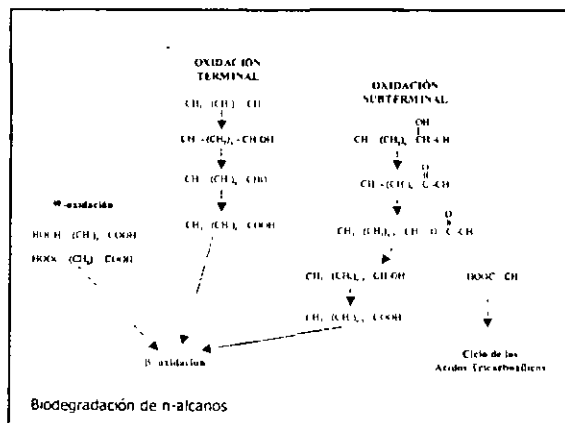
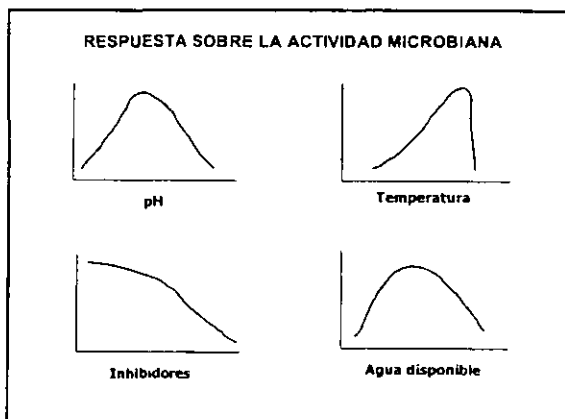
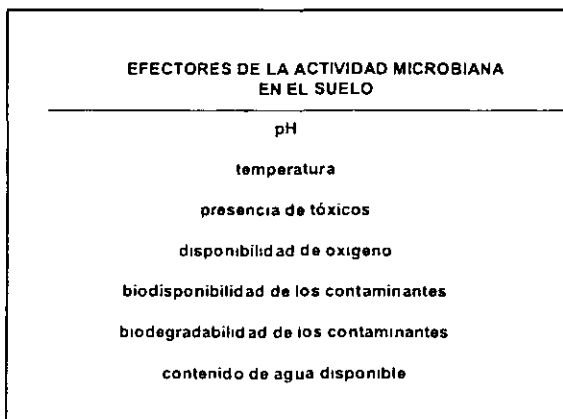
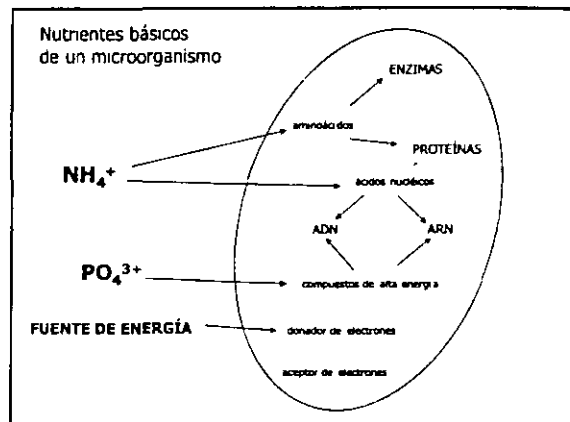
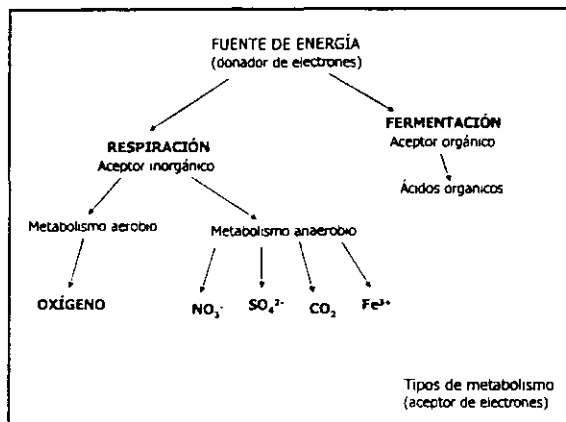
ACTIVIDAD METABÓLICA. Reacciones bioquímicas catalizadas por enzimas que realizan los microorganismos para abastecerse de energía.

BIOTRANSFORMACIÓN. Modificación de la estructura química de compuestos.

BIODEGRADACIÓN. Transformación de compuestos orgánicos en entidades químicas cada vez más sencillas

MINERALIZACIÓN. Degradación de compuestos orgánicos a dióxido de carbono

BIOACUMULACIÓN. Incorporación de compuestos inorgánicos en el interior de las células



DESARROLLO DE UN PROYECTO DE BIORREMEDIACIÓN

CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

✓ análisis del entorno
✓ análisis geohidrológico
✓ análisis de contaminantes
✓ análisis fisicoquímico
✓ análisis microbiológico

↓

ESTUDIOS DE BIOTRATABILIDAD

↓

ESCALAMIENTO AL CAMPO

ANÁLISIS DEL ENTORNO

características del **MACROAMBIENTE**:

✓ temperatura
✓ forma de acceso
✓ actividades típicas del lugar
✓ manejo del proceso a escala real

CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA

características del futuro **BIORREACTOR**

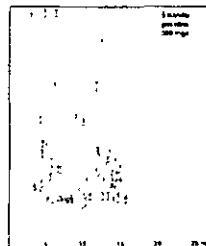
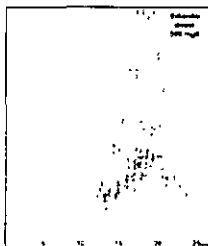
✓ tamaño
✓ forma
✓ heterogeneidad
✓ dirección preferencial del flujo

CARACTERIZACIÓN DE CONTAMINANTES

características de los **SUSTRATOS**:

✓ tipo
✓ diversidad
✓ concentración
✓ posibles inhibidores de la actividad microbiana

Perfiles cromatográficos de diesel y gasolina EPA 8015 B



CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA

características del **MICROAMBIENTE**:

✓ pH
✓ nutrientes naturales
✓ interacción con los contaminantes
✓ tipo de matriz

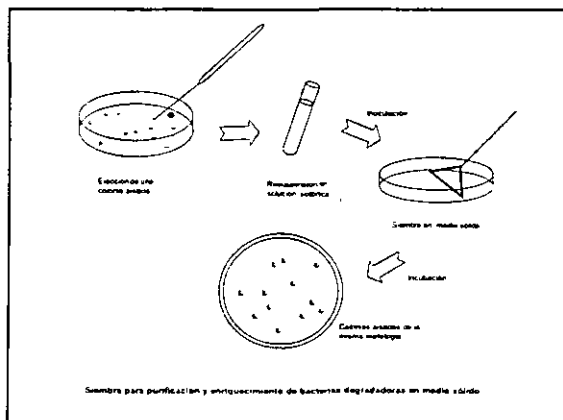
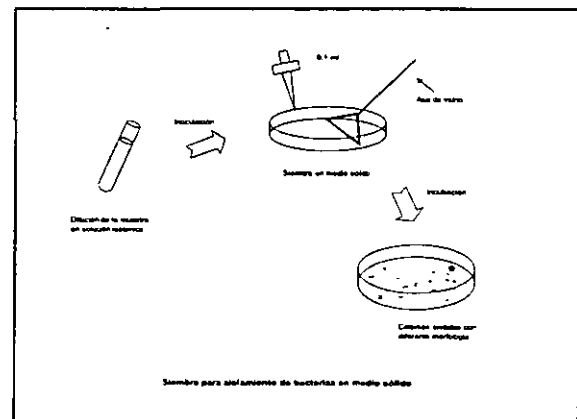
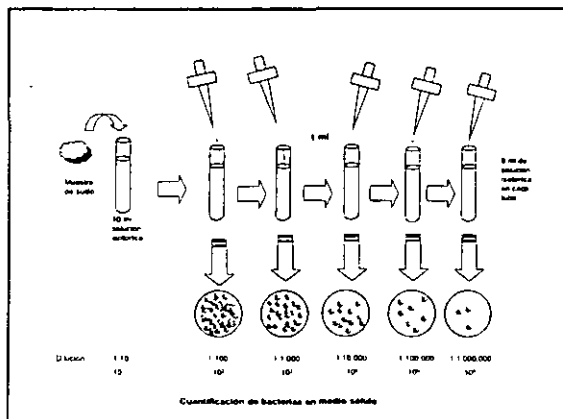
CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

características de los
MICROORGANISMOS NATIVOS y de los INÓCULOS:

- ✓ heterótrofos
- ✓ tolerantes
- ✓ degradadores
- ✓ con genes catabólicos (*xylE*, *ndoB*, *alkB*)

EN BIORREMEDIACIÓN SE TIENEN

- sistemas multisubstrato: los contaminantes se presentan en mezclas complejas y frecuentemente interperizadas
- sistemas multiorganismo: consorcios microbianos son los responsables de la biodegradación
- dominio de la población autóctona: en presencia de microorganismos exógenos se presenta competencia
- inmovilización de los microorganismos: se adhieren al material geológico
- limitaciones en la transferencia de masa: en función de la permeabilidad del material geológico
- condiciones microambientales: se deben mantener las que prevalecen en el sitio



OPCIONES DE BIORREMEDIACIÓN

BIOESTIMULACIÓN: adición de fertilizantes para mantener la actividad metabólica

BIOINCREMENTO: adición de microorganismos en gran volumen para adicionarlos al suelo

BIOVENTILACIÓN: suministro de aire para satisfacer las necesidades de oxígeno de los microorganismos

ATENUACIÓN NATURAL: acción de los microorganismos nativos sobre los contaminantes, sin la participación del hombre

BIORREMEDIACIÓN

**ATENUACIÓN
NATURAL**

**PRODUCCIÓN
DE INÓCULOS
(Bioincremento)**

**FERTILIZACIÓN
(Bioestimulación)**

**PRODUCTOS
COMERCIALES
(Bioincremento)**

PRODUCTOS COMERCIALES

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

TRABAJOS DE REMEDIACIÓN EN CAMPO

	SUELO SUPERFICIAL	SUBSUELO
acciones previas	recuperación del producto	extracción de producto libre
herramientas	excavación y movimiento del suelo	bombeo-inyección
espacio físico	<i>in situ</i> fuera del sitio	<i>in situ</i> on site

TIPOS DE BIORREACTORES

BIOPILAS

BIOCELDA

**BIOCULTIVO
(Land-farming)**

**AGITADOS
Y
AEREADOS**

PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD

Biodegradación de contaminantes
Consumo de oxígeno
Generación de CO₂
Consumo de nutrientes

U

Datos cinéticos
Requerimiento de nutrientes
Limitaciones de la actividad metabólica

INFORMACIÓN QUE SURGE DE LAS PRUEBAS DE BIOTRATABILIDAD

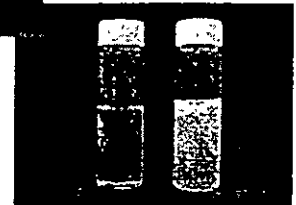
forma de operación en campo
estrategia de seguimiento y control del proceso
requerimiento de materiales
tiempo de ejecución
costo

AGENTES TENSOACTIVOS (SURFACTANTES)

Aumentan la
biodisponibilidad de los
sustratos orgánicos



Acción de los
surfactantes
sobre los
hidrocarburos



ATENUACIÓN NATURAL

MEDIDAS CORRECTIVAS INTRÍNECAS QUE
REDUCEN LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES
EN SUELO Y SUBSUELO



RIESGO A LA SALUD

ATENUACIÓN NATURAL

Reduce el riesgo potencial de un sitio contaminado debido a

Procesos físicos (no destructivos)

- ✓ Dilución
- ✓ Dispersión
- ✓ Volatilización

Procesos químicos (no destructivos)

- ✓ Sorción

✓ transformaciones abióticas

Procesos biológicos (destructivos)

- ✓ biodegradación

ATENUACIÓN NATURAL: Procesos físicos

✓ DISPERSIÓN HIDRODINÁMICA

- **difusión molecular**: movimiento que se da como respuesta a un gradiente de concentración aun en ausencia de flujo del agua subterránea
- **dispersión mecánica**: distribución de moléculas debido a interacciones entre el movimiento advectivo de los contaminantes y la estructura porosa del suelo (mecanismo dominante)
- **dispersión longitudinal**: está en función del tamaño del poro, se rige por la dirección del flujo subterráneo
- **dispersión transversal**: perpendicular al flujo, se rige por la tortuosidad

"la dispersión hidrodinámica facilita la biodegradación por disminución de las concentraciones"

ATENUACIÓN NATURAL: Procesos físicos

✓ DILUCIÓN POR RECARGA

inyección de agua al subsuelo

"la dilución por recarga facilita la biodegradación por la incorporación de oxígeno al suelo"

✓ VOLATILIZACIÓN

pérdida natural de la masa volátil

"la volatilización facilita la biodegradación por la reducción en la concentración"

ATENUACIÓN NATURAL: Procesos químicos

✓ SORCIÓN

- limita la movilidad de los contaminantes, por lo que reduce la porción de aquellos que están en fase libre
- limita el tamaño de la mancha de contaminación
- se rige por las interacciones químicas entre los contaminantes y la matriz química del suelo
- está controlada por el contenido de materia orgánica

✓ REACCIONES ABIÓTICAS

- reacciones de transformación química (modificación de la estructura molecular) en ausencia de actividad microbiana

ATENUACIÓN NATURAL: Procesos biológicos

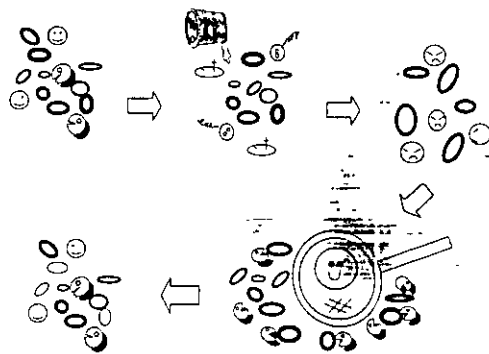
✓ BIODEGRADACIÓN

- reacciones de transformación de compuestos orgánicos a entidades químicas cada vez más sencillas que pueden llegar hasta la mineralización (CO_2 y H_2O)

- utilización en cascada de aceptores de electrones disponibles

- oxígeno
- nitratos (NO_3^-)
- sulfatos (SO_4^{2-})
- ión ferrico (Fe^{3+})
- bióxido de carbono

vías metabólicas alternativas para la degradación (reductivas)



SELECCIÓN NATURAL - ACLIMATACIÓN

ATENUACIÓN NATURAL: Condicionantes para su ejecución

- ✓ 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

MÉTODO NO INVASIVO DE REMEDIACIÓN ACTIVA



TRABAJO POR HACER:

CONFIRMACIÓN Y VIGILANCIA A LARGO PLAZO
DE LOS PROCESOS NATURALES
QUE OCURREN EN EL SITIO

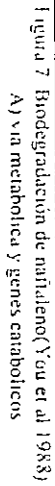
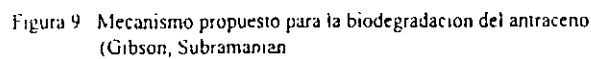
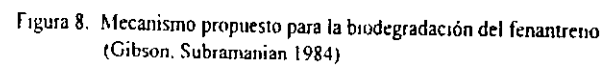
ATENUACIÓN NATURAL: Monitoreo periódico a largo plazo

✓ EN CAMPO

- perforaciones discretas a la profundidad de la contaminación
- obtención de muestras (alteradas)
- medición *in situ* de gases (oxígeno, bióxido de carbono, nitrógeno, metano)

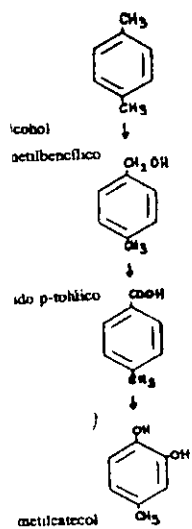
✓ EN EL LABORATORIO

- 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

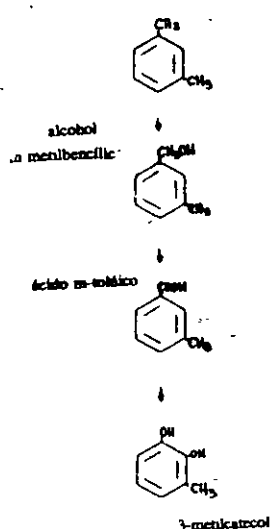


DEGRADACIÓN DE para-, meta- Y orto-XILENO

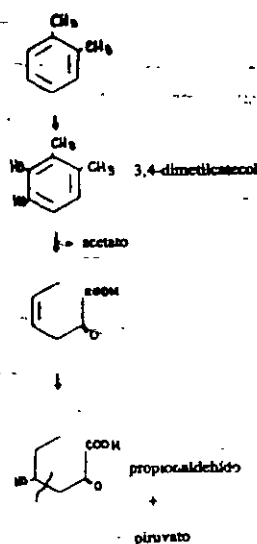
para-XILENO



meta-XILENO

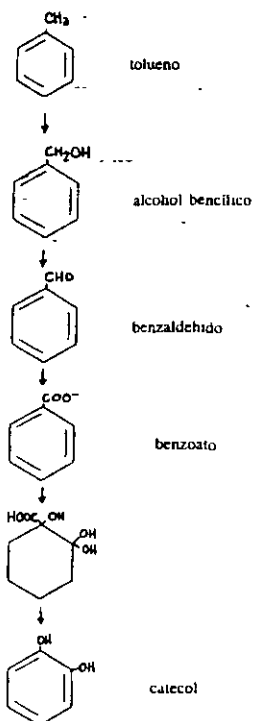


orto-XILENO

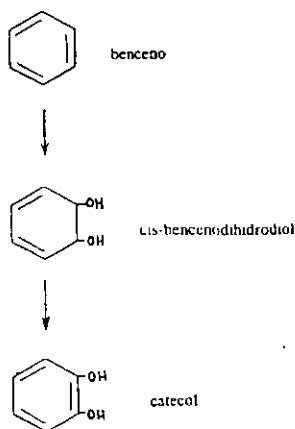


RUPTURA DE ANILLO

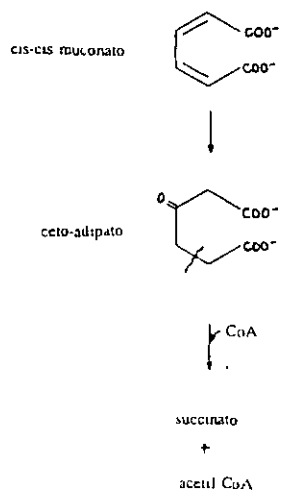
DEGRADACIÓN DE TOLUENO



DEGRADACIÓN DE BENCENO



VIA CETO-ADIPATO



VIA META-RUPTURA

