

93
291



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**“CONTAMINACION DEL SUELO Y AGUA
SUBTERRANEA POR HIDROCARBUROS”**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ROMEO PALACIOS SUAREZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. ENRIQUE CESAR VALDEZ



CD. UNIVERSITARIA, MEXICO.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-015/96

Señor
ROMEO PALACIOS SUAREZ
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. ENRIQUE CESAR VALDEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"CONTAMINACION DEL SUELO Y AGUA SUBTERRANEA POR HIDROCARBUROS"

- I. GENERALIDADES SOBRE HIDROCARBUROS
- II. PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS DE HIDROCARBUROS QUE AFECTAN AL SUELO Y AGUA SUBTERRANEA
- III. PROCESO DE CONTAMINACION
- IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACION DEL SUELO Y AGUA SUBTERRANEA POR HIDROCARBUROS
- V. MEDIDAS DE ATENUACION Y MITIGACION DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 9 de febrero de 1996.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*nl1

	Pag.
AGRADECIMIENTOS.	iii
OBJETIVOS.	v
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO I. GENERALIDADES SOBRE LOS HIDROCARBUROS.	3
1.1 Compuestos hidrocarbonados.	3
1.2 Fuentes naturales de hidrocarburos.	9
1.3 Principales hidrocarburos del petróleo.	9
1.4 Procesos del petróleo.	9
1.5 Productos derivados de los cinco grandes hidrocarburos (metano, etileno, propileno, butileno y benceno).	10
1.6 Principales propiedades de los hidrocarburos más empleados y que pueden contaminar al suelo y agua subterránea.	11
CAPÍTULO II. PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS DE HIDROCARBUROS QUE AFECTAN AL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA.	16
II.1 Exploración y explotación del petróleo.	17
II.2 Almacenamiento, conducción y transporte de hidrocarburos.	18
II.3 Desechos de productos derivados de los hidrocarburos.	21
CAPÍTULO III. PROCESO DE CONTAMINACIÓN.	22
III.1 Principios de geohidrología.	22
III.1.1 Formaciones geológicas como acuíferos.	24
III.1.2 Parámetros hidrológicos fundamentales.	25
III.2 Origen de la contaminación.	27
III.3 Transporte de contaminantes en suelos y acuíferos.	27
III.3.1 Procesos hidrodinámicos.	32
III.3.2 Procesos abióticos.	34
III.3.3 Procesos bióticos.	37
CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.	39
IV.1 Impacto ambiental que produce la contaminación por hidrocarburos en el suelo.	40
IV.2 Impacto ambiental que produce la contaminación por hidrocarburos en el agua subterránea.	41

IV.3 Toxicidad y efectos a la salud.	42
IV.4 Ejemplos de casos en los que se ha presentado derrames de hidrocarburos.	50
CAPITULO V. MEDIDAS DE ATENUACIÓN Y MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES.	51
V.1 Marco legal para la remediación de suelos en México.	51
V.2 Caracterización de suelos y agua subterránea contaminados.	53
V.2.1 Recopilación de información.	54
V.2.2 Inspección preliminar.	54
V.2.3 Investigación inicial de la contaminación.	56
V.3 Remediación de suelos y agua subterránea.	57
V.3.1 Excavación y extracción.	59
V.3.2 Volatilización.	61
V.3.3 Biodegradación.	64
V.3.4 Incineración.	68
V.3.5 Aislamiento.	69
V.3.6 Extracción de agua y tratamiento.	71
V.3.7 Autoeliminación.	75
V.4 Experiencias en el empleo de tecnologías de remediación.	77
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	79
VI.1 Conclusiones.	79
VI.2 Recomendaciones.	82
ANEXOS.	
Anexo A.	84
Anexo B.	91
BIBLIOGRAFÍA.	103

AGRADECIMIENTOS Y OBJETIVOS.

AGRADECIMIENTOS

Antes que todo quiero dar gracias a Dios por haberme dado la vida y una familia siempre unida, y por darme los medios necesarios para poder concluir con mis estudios.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad, por medio de su Facultad de Ingeniería, de realizar los estudios correspondientes de Ingeniería Civil.

Al Ing. Enrique César Valdez, por ser un profesor que siempre se ha preocupado y esmerado por la docencia y en plasmar en sus alumnos los conocimientos de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental, y por aceptar ser mi asesor y director de ésta obra.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería con los que tuve la oportunidad de cursar sus asignaturas y aprender de ellos.

A mi Padre, el Dr. Julio Palacios Ruiz, por su cariño, respeto y sobre todo por alentarme y apoyarme siempre incondicionalmente en mis estudios.

A mi Madre, la Sra. Rosa Alicia Suárez de Palacios, por su amor y comprensión infinitos.

A mis hermanos, María Magdalena, Juan Antonio, Rosa Alicia y Luis Armando por estar siempre unidos.

Al coraje y orgullo que han hecho de mí, una persona que se esfuerza en todo momento por librar los obstáculos en la vida y alcanzar los objetivos y metas trazados.

OBJETIVOS

- 1.- Identificar las principales causas de contaminación por hidrocarburos al suelo.y agua subterránea.
- 2.- Describir los principales mecanismos de transporte de contaminantes tanto en la zona saturada como en la zona no saturada.
- 3.- Señalar los diversos impactos adversos sobre el ambiente, que provoca la acción de hidrocarburos en el subsuelo.
- 4.- Por último, mencionar y describir las principales medidas de atenuación y mitigación de los impactos ambientales, que se han venido desarrollando y practicando en los últimos años a través de las obras de remediación.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Una fuerte transformación en la tecnología y en la vida del hombre, se produjo a partir del cambio en el uso de fuentes de energía, en la que los hidrocarburos sustituyen al vapor a partir de los años 40's. El manejo y disposición de los hidrocarburos no contemplaba la repercusión de los efectos que causarían al infiltrarse al subsuelo. No fue sino hasta que se empezó a manifestar la contaminación del suelo y agua subterránea con sus respectivos impactos adversos al ambiente, que se comenzaron a preocupar las autoridades y a tomar cartas en el asunto para tratar de prevenir la contaminación y remediar al suelo y acuíferos contaminados.

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

Debido a que las aguas subterráneas constituyen una importante fuente de abastecimiento de agua potable y para otros usos como agrícola e industrial, y en algunas zonas es el único recurso con que cuentan para satisfacer sus demandas, es de suma importancia hacer conciencia del problema que causa la contaminación del suelo y agua subterránea.

Los suelos y el agua subterránea constituyen importantes recursos naturales y que podrían considerarse no renovables, debido a que transcurre mucho tiempo para que se vuelvan a formar. Estos recursos naturales tienen gran importancia dentro de los procesos productivos que se desarrollan en el país. Es por esto que es evidente la necesidad de establecer mecanismos que induzcan un equilibrio dinámico entre el desarrollo económico, cultural y la conservación y uso en forma racional de estos recursos naturales.

Es alarmante y preocupante ver como cada día la calidad del ambiente se degrada, en especial la del suelo y agua subterránea que son parte importante de los ecosistemas, dicha alteración es producto en parte de un incremento demográfico acelerado y de la falta de conciencia sobre los problemas que lleva en sí la contaminación ambiental.

Es por todo esto que nace la inquietud de hacer este trabajo donde se haga notar las causas, efectos y la posible remediación de la contaminación del suelo y agua subterránea por hidrocarburos.

En el primer capítulo de esta obra se hace mención en forma general de los compuestos formados por hidrocarburos, en él se definirá que son los hidrocarburos, cómo se nombran, que

características tienen, cuáles tienen mayor uso y cuáles son los que están en mayor posibilidad de contaminar al suelo y agua subterránea.

En el segundo capítulo se hace referencia a las principales fuentes de contaminación por hidrocarburos, en ellas se incluyen los derrames y fugas en los diferentes sistemas de almacenaje y conducción de hidrocarburos, derrames en los procesos de explotación del petróleo, así como derrames accidentales o por mal manejo de hidrocarburos en patios de mantenimiento de diferentes medios de transporte.

El tercer capítulo se refiere a los procesos que determinan el transporte que siguen los hidrocarburos tanto en la zona no saturada como en la zona saturada, asimismo se abarca la cuestión hidrogeológica. En este capítulo se hace referencia a un modelo matemático que toma en cuenta dichos procesos de transporte de contaminantes.

Para el cuarto capítulo se hace notar los impactos negativos que provoca la contaminación del suelo y agua subterránea, dichos impactos están referidos al medio ambiente natural y al social, de igual manera se mencionan los efectos tóxicos y los daños a la salud.

En el quinto capítulo se describen las tecnologías de remediación como medidas para atenuar o mitigar los impactos al medio ambiente, asimismo se señalan los pasos a seguir para caracterizar un suelo y acuíferos contaminados.

Para el sexto y último capítulo se dan las conclusiones y recomendaciones, las conclusiones hacen mención a los puntos más importantes del presente trabajo.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

I. GENERALIDADES SOBRE LOS HIDROCARBUROS

I.1 COMPUESTOS HIDROCARBONADOS.

Los compuestos más sencillos de la química orgánica o química de los compuestos del carbono, también llamada así debido a que todas las materias o compuestos orgánicos poseen átomos de carbono en sus moléculas, son los formados por carbono e hidrógeno, los cuales reciben el nombre de **hidrocarburos**. Estos compuestos se clasifican en Saturados o Alcanos y No Saturados, éstos últimos a su vez se dividen en Alquenos y Alquinos, en función de si presentan doble o triple ligadura, respectivamente.

Cabe recordar que el átomo de carbono es un elemento que en su último nivel de energía tiene 4 electrones, cada uno en su respectivo orbital, por lo que dichos electrones están desapareados, ya que se requiere que en un orbital existan dos electrones para que tenga una configuración estable, en consecuencia el carbono tiene 4 valencias y forma compuestos orgánicos mediante enlaces covalentes, es decir, por electrones compartidos, cada uno de éstos son aportados por los átomos que intervienen en el enlace. Cuando dos electrones desapareados de un átomo se comparten con otros dos de otro átomo, se dice que existe una ligadura doble, cuando son tres los electrones desapareados, la ligadura entre los dos átomos es triple.

Hidrocarburos Saturados.

En los hidrocarburos saturados o alcanos, los carbonos se unen entre sí por ligaduras sencillas y las valencias libres se saturan con hidrógeno, es decir, los electrones desapareados o en condiciones de unirse se enlazan con los electrones de los átomos de hidrógeno.

El nombre de los alcanos o hidrocarburos saturados se forman de la siguiente manera: los primeros cuatro de la serie tienen nombre especial, el prefijo met indica uno, et, dos, prop, tres y but, cuatro átomos de carbono. De éstos prefijos y de la terminación ano se derivan los nombres comunes de los primeros cuatro hidrocarburos saturados; del quinto en adelante se forma con el ordinal griego seguido de la terminación ano. Si el hidrocarburo es lineal, es decir, los átomos de carbono están unidos en forma secuencial (uno seguido del otro), se antecede la letra n, que significa normal.

Nombre	Fórmula semiestructural	Fórmula estructural
METANO	CH_4	<pre> H H-C-H H </pre>
ETANO	$\text{CH}_3 - \text{CH}_3$	<pre> H H H-C-C-H H H </pre>
PROPANO	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$	<pre> H H H H-C-C-C-H H H H </pre>
BUTANO	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$	<pre> H H H H H-C-C-C-C-H H H H H </pre>

Si a un hidrocarburo le privamos de un hidrógeno, se obtiene un grupo llamado radical alquilo y se le da nombre cambiando la terminación ano del hidrocarburo saturado por la terminación il o ilo. Asimismo, existen hidrocarburos saturados, en los cuales, los carbonos se ramifican formando radicales y dando lugar a los alcanos arborescentes.

Algunos ejemplos de Radicales Alquilo son:

Radical	Nombre
CH ₃ -	Metil o metilo
CH ₃ - CH ₂ -	Etil o etilo
CH ₃ - CH ₂ - CH ₂ -	Propil o propilo
CH ₃ - CH ₂ -CH ₂ - CH ₂ -	Butil o butilo

Algunos ejemplos de Alcanos Arborescentes son:

$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	2,2- dimetilbutano
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	2- metilpentano

La fórmula general de los hidrocarburos saturados o alcanos es : C_nH_{2n+2}
 en la que n es el número de carbonos en la cadena.

Los hidrocarburos saturados o alcanos son sustancias muy estables, presentan dificultad para reaccionar con otras sustancias, por lo que también se le llama parafinas, que significa poca afinidad. En la naturaleza se encuentran en los tres estados físicos: del metano al butano son gases, del pentano al eptadecano son líquidos y del octadecano en adelante son sólidos.

No son muy solubles en agua, pero sí lo son en disolventes orgánicos tales como alcohol, éter y benceno. Son combustibles, y mientras mayor número de carbonos tenga la molécula mas luminosa será la flama.

Hidrocarburos No Saturados

Los hidrocarburos no saturados se caracterizan por tener doble o triple ligadura; a los de doble ligadura se les llama Alquenos y a los de triple ligadura Alquinos.

Los Alquenos se consideran derivados de los hidrocarburos saturados por sustracción de dos hidrógenos en carbonos contiguos. También se les llama olefinas por el aspecto aceitoso de algunos de ellos; pueden ser gases, líquidos o sólidos, su punto de ebullición es mayor que el de los alcanos, arden con flama más luminosa.

Para nombrarlos se cambia la terminación ano del alcano por la terminación eno e indicando el número del átomo de carbono más cercano al extremo de la cadena que lleva la doble ligadura.

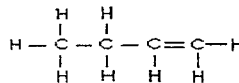
En los hidrocarburos Alquenos se presenta el fenómeno de polimerización, el cual consiste en la condensación de varias moléculas de un compuesto para formar otra molécula de compuesto más complejo, es decir, se crean polímeros o moléculas gigantes, las cuales son cadenas largas, ordenadas y peculiares que enlazan a moléculas más pequeñas. La materia prima viva (la célula, el protoplasma y el núcleo de los tejidos animales y vegetales) está constituida por polímeros.

La síntesis de polímeros ha dado lugar a la creación de las importantísimas industrias de los plásticos, de las fibras, del caucho sintético, y con ellas se ha desarrollado la industria de la petroquímica, que tanto han revolucionado al hombre actual.

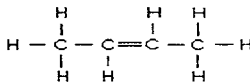
Algunos ejemplos de alquenos y sus fórmulas semidesarrolladas son:



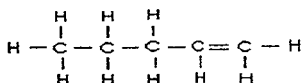
Eteno



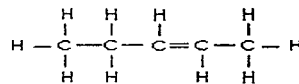
1-Buteno



2-Buteno



1-Penteno



2-Penteno

La fórmula general de los alquenos es: C_nH_{2n} , donde n es el número de átomos de carbono que hay en la molécula.

Alquinos. Son los hidrocarburos no saturados que tienen triple ligadura; se consideran derivados de los alcanos por sustracción de cuatro hidrógenos en dos carbonos contiguos. Su nombre se forma sustituyendo la terminación ano del alcano por la terminación ino.

CAPITULO I. GENERALIDADES SOBRE LOS HIDROCARBUROS

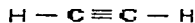
También se les llama acetilénicos por llamarse acetileno el primer compuesto de la serie. El acetileno y el propino son gases; del cuarto al decimocuarto son líquidos, y los demás son sólidos.

El grupo funcional de los alquinos es: $-C \equiv C-$. Su nombre se forma anteponiendo el número del **carbón** que corresponde a la triple ligadura, empezando a contar los átomos de carbono a partir del extremo de la cadena más cercano a la ligadura.

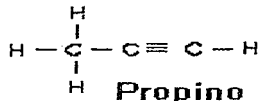
La triple ligadura les da menor estabilidad que a los demás hidrocarburos, por lo que se descomponen con facilidad dando compuestos de adición.

La fórmula general de los alquinos es: C_nH_{2n-2} , donde n es el número de carbonos.

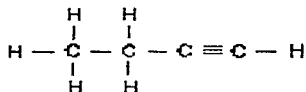
Las fórmulas de los alquinos más sencillos son:



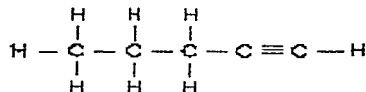
Etino



Propino



Butino



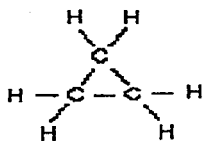
Pentino

Cuando la cadena de átomos de carbono que conforman un hidrocarburo es cerrada, los hidrocarburos se llamarán de **cadena cerrada** o también **compuestos cíclicos**. Cuando éstos estén unidos por ligaduras sencillas se llamarán **ciclanos** o **alíciclicos**. Cuando derivan de la cadena de seis átomos de carbono con tres dobles ligaduras se llamarán **aromáticos** o **bencénicos**.

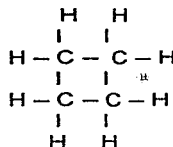
Los **ciclanos** se forman a partir del cierre de los átomos de carbono de un alcano; por lo que para nombrarlos se antepone el prefijo **ciclo** al nombre del alcano que le corresponde, así:

Si el alcano es propano, el ciclorano será: **ciclo propano**

La fórmula general de los ciclanos es: C_nH_{2n}

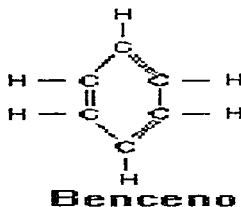


Ciclo propano



Ciclo butano

Hidrocarburos aromáticos. El anillo de seis carbonos en el que hay tres dobles ligaduras, recibe el nombre de anillo bencénico; las tres dobles ligaduras están alternadas y a cada carbón está unido un átomo de hidrógeno, de modo que la fórmula condensada del benceno será: C_6H_6



Las tres dobles ligaduras se encuentran alternadas y a cada carbón está unido un hidrógeno.

Los compuestos derivados del benceno forman la mayor parte de los compuestos llamados aromáticos. Algunos ejemplos de éstos son:

Metil benceno o tolueno.
Etilbenceno.
Nitro benceno.
Fenoles.
Xilenos.
Naftalenos.

1.2 Fuentes naturales de hidrocarburos.

Aunque los hidrocarburos se encuentran en el carbón, madera, gas natural y granos, el petróleo es hoy su fuente principal.

El petróleo es un recurso natural de gran valor constituido por una mezcla natural de hidrocarburos; la palabra petróleo quiere decir aceite de piedra. Es un aceite mineral que se encuentra en yacimientos en el interior de la tierra, casi siempre asociado con la presencia de gas natural.

El petróleo está compuesto por una mezcla de hidrocarburos principalmente saturados, tanto gaseosos como líquidos y sólidos, conteniendo además, en cantidades variables, según sea la región de que se trate, hidrocarburos no saturados, cíclicos (ciclanos y bencénicos), nitrógeno, azufre y sus compuestos, y CO₂.

La industria encargada de descomponer y separar los hidrocarburos del petróleo en productos básicos, intermedios y acabados según sea el grado de procesamiento; es la petroquímica. Los principales mercados que abastece la industria de la petroquímica, son la industria del caucho, la del amoníaco y la de los plásticos.

1.3 Principales hidrocarburos del petróleo

De los cientos de hidrocarburos del petróleo que se obtienen en los diferentes procesos en que está sometido éste, los más importantes por su utilidad y mayor aplicación son: metano, etileno o eteno, propileno o propeno, butileno o buteno y benceno, que no dan ni el tres por ciento del rendimiento del proceso de refinación, no obstante que sus productos representan más de dos tercios de las sustancias orgánicas utilizadas. Ellos dan más de la mitad de las fibras y plásticos, dos tercios del caucho sintético, dos tercios de los jabones y detergentes, amén de encontrarse en casi todos los cosméticos, productos farmacéuticos e insecticidas.

1.4 Procesos del petróleo

Uno de los procesos a que está sometido el petróleo, es la refinación; debido a que el petróleo, tal y como sale de los pozos, es un producto muy heterogéneo, que trae en solución gases inflamables; el primer paso de dicho proceso consiste en mandarlo a tanques separadores en donde es liberado de la fase gaseosa (hidrocarburos gaseosos y ácido sulfhídrico); el segundo paso es la operación de desalado para quitarle el agua salada que contiene. El tercer paso es la destilación fraccionada, ésta operación se lleva a cabo en una torre de fraccionamiento, que es un gigantesco alambique en donde cada componente del petróleo destila según su punto de ebullición; los de más bajo punto destilan en la parte superior de la torre y los de más alto punto quedan como residuo.

De la primera parte del proceso de refinación se obtienen los siguientes productos.

Fracción gaseosa. En ésta fracción se obtienen los hidrocarburos gaseosos, que mezclados, forman el gas combustible; el gas sulfhídrico se separa por un proceso especial y se recupera en forma de azufre.

Primera fracción líquida. Formada por hidrocarburos que destilan entre 35 y 200° C; comprende desde el pentano al nonano. Por destilación posterior se separan los siguientes productos:

Bencina: de 35 a 80° C

Nafta: de 60 a 100° C

Gasolinas: de 45 a 200° C

Segunda fracción líquida. Formada por hidrocarburos que destilan entre 200 y 275° C, constituida por querosina, que reciben los nombres comerciales de tractomex o petróleo diáfano.

Tercera fracción líquida. Formada por hidrocarburos que destilan entre 250 y 300° C, dicha fracción es llamada gas oil y conocida comúnmente con el nombre de diesel, por constituir el combustible de éstos motores.

Cuarta fracción líquida. Destila arriba de 300° C, está constituida por aceites ligeros, medianos y pesados junto con la parafina. Por tratamiento posterior y mediante enfriamiento y filtración se separa la parafina.

Al descomponer al petróleo crudo en sus componentes, parte de la gasolina y de la nafta así obtenidas se trata en la misma refinería para obtener cinco grandes hidrocarburos: benceno de la gasolina, y metano, etileno, propileno y butileno de la nafta, los cuales, como se dijo anteriormente, son los hidrocarburos más útiles en la industria petroquímica.

Para obtener benceno se calienta la gasolina; en el reactor, la mayoría de sus moléculas de cadena se convierten en anillos, los que se separan por peso hasta que la mezcla se convierta en benceno y gasolina de alto octano.

A la nafta se le calienta hasta que se descompone en moléculas menores que se separan por peso y luego son licuados por frío, comprimidas y purificadas por lavado y secado; en seguida son separadas y enfriadas a fin de producir los otros cuatro hidrocarburos.

1.5 Productos derivados de los cinco grandes hidrocarburos (metano, etileno, propileno, butileno y benceno).

El metano, obtenido a partir de la nafta, es la base de casi un centenar de productos, así, por adición o sustracción de un átomo de otro elemento a una molécula de otra sustancia y por el fenómeno de polimerización, se obtienen productos tales como: plásticos, explosivos, anticongelantes, disolventes de grasa, caucho de neopreno, gas para soldar, fibras acrílicas, pinturas vinílicas, teflón, urea para alimento de ganado, etc.

Por su adaptabilidad y la cantidad de productos finales, el etileno o eteno es lo máximo entre los hidrocarburos básicos. La polimerización por adición rompe el enlace doble entre los átomos de carbono y

convierte el etileno en polietileno. Como película transparente se usa para envolver mercancías. Más pesado, sirve para hacer recipientes, y moldeado, se usa para juguete y tubería.

También se convierte en glicoletileno que es base de muchos anticongelantes; en alcohol etílico, usado como disolvente de lacas y cosméticos y que también es base de sulfu drogas y explosivos; y en estireno, para plásticos resistentes a golpes, en pinturas de látex y, sobre todo, en caucho sintético.

El propileno y el butileno, se convierten con facilidad en moléculas gigantes o polímeros porque ambos tienen un doble enlace entre sus átomos de hidrógeno (tal y como se vio anteriormente). La polimerización por adición rompe éste enlace y une a las moléculas pequeñas, convirtiendo al propileno en polipropileno, su producto más conocido, con el que se hacen fibras, películas y plásticos moldeados.

El butileno, que es la base de un gran porcentaje del caucho sintético que se produce, tiene dos formas: la de cadena ramificada, isobutileno, que al polimerizarse en cantidades, pequeñas de isopreno da el caucho butílico empleados en neumáticos y cámaras, y la de cadena recta, n-butileno, que se puede convertir en butadieno, y combinándose con acrilonitrilo forma cauchos nitrílicos resistentes al aceite. Combinado en diferentes proporciones con el estireno, el butadieno entra también en la fórmula de muchas pinturas látex.

La estructura anular, hace del benceno una base valiosísima de productos tan variados como la aspirina y los insecticidas.

Cuando se usa el calor o los catalizadores para abrir el anillo y lo convierten en una cadena, cambia las características de la molécula y la hacen muy útil para la producción de materiales como el nylon y espuma de poliuretano, un sustituto del hule espuma.

1.6 Principales propiedades de los hidrocarburos más empleados y que pueden contaminar al suelo y agua subterránea.

Como se ha señalado anteriormente, el petróleo es la principal fuente de hidrocarburos con que dispone el hombre, el cual es una mezcla heterogénea de hidrocarburos, principalmente saturados. Como tal es un líquido que normalmente ofrece una coloración variable desde un amarillo pajizo hasta un negro de pez, más o menos viscoso cuya densidad a 15°C varía de 0.733 a 1.029 en función de los componentes que lo forman.

Todos los productos del petróleo tienen básicamente propiedades químicas semejantes; ninguno de los compuestos que normalmente forman parte del petróleo, son muy reactivos o corrosivos. Esto es, los hidrocarburos derivados del petróleo no reaccionan o reaccionan con dificultad con agentes típicamente oxidantes o de reducción. La mayoría de los compuestos volátiles reaccionan con el oxígeno, pero las reacciones tienen desprendimiento de energía, y requiere de algunas formas de iniciación.

Los hidrocarburos tienen propiedades físicas similares, sin embargo, difieren en la magnitud. Desde el punto de vista de remediación, las propiedades físicas más importantes son: volatilidad, solubilidad en agua, gravedad específica o densidad y viscosidad cinemática.

Volatilidad. La volatilidad es la tendencia de una molécula a dejar la superficie de un líquido. Un compuesto con gran volatilidad es un compuesto que evapora fácilmente. Las sustancias que tienen gran volatilidad, tienen un bajo punto de ebullición. Algunos productos derivados del petróleo como las gasolinas, son enteramente volátiles, vaporizan fácilmente, y tienen un punto de ignición a baja

temperatura. Los productos que son altamente viscosos, como los aceites lubricantes, vaporizan con dificultad y tienen un punto de ignición por arriba de los 300°F. El punto de ignición es proporcional a la presión de vapor, la cual a su vez depende del peso molecular.

Tabla I.1.- Volatilidad, punto de ignición y flamabilidad de algunos hidrocarburos.

Producto	Volatilidad (a 70°F en psia)	Punto de ignición		Limite de flamabilidad % por volumen
		en °C	en °F	
Gasolina ¹	4 - 8	-30 - -43	-36 - -45	1.4 - 7.6
Benceno	1.6	-11	-12	1.3 - 7.9
Tolueno	1.9	4	40	1.2 - 7.1
Etilbenceno	2.2	18	68	Relativamente no flamable.
Xilenos ²	2	27	81	1.1 - 7.0
n-Hexano	1.5	-40	-40	1.2 - 7.1
Diesel	0.009	40 - 65	100 - 130	1.3 - 6.0
Querosina	0.011	40 - 75	100 - 160	1.4 - 6.0
Aceite combustible ligero	< 10 ⁻³	40 - 100	100 - 200	Relativamente no flamable
Aceite combustible pesado	< 10 ⁻³	65 - 130	140 - 270	1.0 - 5.0
Aceite lubricante	< 10 ⁻³	> 100	> 200	Relativamente no flamable

1 Valores en función del tipo de gasolina

2 Este valor corresponde a m-xileno

Solubilidad. Desde el punto de vista químico, los hidrocarburos derivados del petróleo son virtualmente insolubles, pero análisis más detallados han encontrado que existen hidrocarburos que sí son solubles en agua, como es el caso del benceno cuya solubilidad en agua es aproximadamente de 1750 ppm (mg/l). Desafortunadamente esta cantidad es suficiente para causar daño a la salud humana, por lo cual es inaceptable en el agua subterránea u en cualquier cuerpo de agua.

La solubilidad es aproximadamente inversamente proporcional al peso molecular, los hidrocarburos más ligeros son más solubles en agua que los compuestos con un gran peso molecular. Los hidrocarburos ligeros, es decir, de los que tienen de 4 a 8 átomos de carbono, incluyendo los aromáticos, son relativamente solubles; los hidrocarburos pesados son casi insolubles. En la tabla I.2 se muestran algunas solubilidades de algunos hidrocarburos más representativos.

Tabla I.2. Solubilidad y viscosidad de hidrocarburos más representativos

Producto	Solubilidad en agua (a 20°C en ppm)	Viscosidad (cST)
Gasolina ¹	50 - 100	0.5 - 0.6
1-Pentano	150	-
Benceno	1,791	0.5
Tolueno	515	0.5
Etilbenceno	75	0.6
Xilenos ²	150	0.6
n-Hexano	12	0.4
Ciclohexano	210	-
i-Octano	8 ppb	-
Querosina	<1	0.8 - 1.2
Diesel	<1	2 - 4
Aceite combustible ligero	<1	1.4 - 3.6
Aceite combustible pesado	<1	5.8 - 194
Aceite lubricante	<1 ppb	400 - 600

1 Las solubilidades de los componentes en forma individual puede ser mayor

2 Los valores corresponden a un promedio de todos los isómeros.

Viscosidad cinemática. La viscosidad cinemática es una medida de la resistencia que tienen los productos para fluir, es decir, es una medida de la facilidad que tienen los hidrocarburos para fluir o migrar a través del suelo. La viscosidad cinemática es aproximadamente proporcional a la presión de vapor y está medida en centistoks, cST. Variando en un rango que va de 1 cST para gasolinas a 638 cST para aceites combustibles. Únicamente la gasolina tiene una viscosidad suficientemente baja como para fluir rápidamente a otras capas del suelo. El diesel podrá fluir pero más lentamente que la gasolina.

Las características más importantes de algunos hidrocarburos obtenidos del proceso de refinación del petróleo se mencionan a continuación en orden de su punto de destilación.

De la primera fracción líquida se obtiene por destilación:

Gasolinas. El producto llamado gasolina es una mezcla compleja de diferentes hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos en una gasolina típica. Dado a que más del 50% de los componentes son alcanos o hidrocarburos saturados, presentan dificultad para reaccionar con otros compuestos. Estudios efectuados por Fleischer et al (1986), enfocados a los trece compuestos más comunes de las gasolinas, los dividió en los 4 grupos siguientes: (1) Compuestos que preferentemente son adsorbidos en la estructura del suelo; (2) los que se volatizan rápidamente; (3) los que pueden causar mayor peligro; (4) los que no tienen un comportamiento de migración definido. Muchos componentes de la gasolina tienen una gran capacidad de solubilidad en agua como se muestra en la tabla I.3.

Los principales componentes químicos de la gasolina incluyen las cadenas de los alcanos, los cicloalcanos y los aromáticos. 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 I.4, se presentan algunos de estos componentes en ciertas gasolinas.

Las gasolinas contienen, entre otros hidrocarburos, el trimetil 2,2,4 pentano o iso octano; este componente da a las gasolinas alta resistencia al encendido espontáneo. Las gasolinas actuales, se miden por sus propiedades antichoque mediante una escala llamada índice de octano.

La gasolina por sí misma es mucho más volátil que los productos derivados de la querosina. No es sorprendente que el método de extracción de vapores, sea el método elegido para tratar suelos contaminados con gasolina, pero no así para suelos contaminados con diesel o cualquier otro hidrocarburo con peso molecular mayor.

Naftas. Estos hidrocarburos destilan en un intervalo de temperatura entre 60°C y 100°C. Consisten principalmente en hidrocarburos de la serie del metano, principalmente pentano y hexanos.

Es transparente, incoloro, altamente inflamable, volátil, de olor característico, no solidifica en frío. Su densidad es de 0.625 a 0.66. Como muchos de los alcanos presenta dificultad para reaccionar con otros elementos.

De la segunda fracción líquida, se obtiene por destilación fraccionada, **querosina**, el cual recibe los nombres comerciales de tractomex o petróleo diáfano. La querosina es una mezcla de hidrocarburos líquidos que van del decano al hexadecano principalmente, destilan entre 200 y 275°C. Es de color amarillo pálido o blanquizo, aceitoso, no tiene un olor del todo desagradable. Su densidad es alrededor de 0.8; su punto de ebullición es entre 175 y 325°C; su punto de ignición es entre 40 y 75°C; es prácticamente insoluble en agua. Se mezcla con otros solventes del petróleo.

La querosina se usa como combustible en lámparas, estufas, como disolvente de grasas y limpiador; también se usa en insecticidas.

Tabla I.3 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
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

De: Fleischer et al., 1986

Tabla I.4 Algunos de los principales constituyentes de tres diferentes gasolinas (adaptada por Perry y modificada por Nyer 1993)

	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	22.0	14.55	18.07
Etilciclopentano	2.03	4.38	2.34
Trimetilciclopentano	3.64	8.12	4.18
AROMÁTICOS			
Benceno	3.27	2.22	3.61
Tolueno	16.19	7.94	12.02

De la tercera fracción líquida se obtiene:

Gasoil o diesel. Es un líquido de color claro y olor característico, fácilmente inflamable. El peso específico varía de 0.82 a 0.83, y su punto de ebullición varía de 180 a 370°C.

Entre los diversos usos del gasoil, destaca su utilización como combustible en los motores diesel, en turbinas de gas y calefacción.

El diesel es una mezcla de parafinas de cadena rota. Los diferentes tipos de hidrocarburos comerciales, entre ellos la gasolina y el diesel, corresponden a cortes de destilación. La gasolina contiene relativamente grandes concentraciones de aromáticos, en contraste con el diesel, en el cual prácticamente no se encuentran presentes.

CAPÍTULO II

CAPITULO II

II. PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS DE HIDROCARBUROS QUE AFECTAN AL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA.

Este capítulo se refiere a aquellas fuentes contaminantes o potencialmente contaminantes por hidrocarburos, principalmente líquidos a temperatura ambiente, que puedan llegar a afectar al suelo y agua subterránea.

En el pasado se asumía que las aguas subterráneas estaban naturalmente protegidas contra la contaminación. Sin embargo, gracias a los avances de las técnicas químicas analíticas a partir de la década de los 70's, se lograron detectar por cromatografía de gases, concentraciones de hidrocarburos en agua subterránea.

Básicamente, los hidrocarburos que están en posibilidad de contaminar al suelo y agua subterránea, son los que provienen de derrames y/o fugas en la exploración y explotación del petróleo, fugas en tanques de almacenamiento y ductos de conducción, derrames en el transporte, y por disposición inadecuada de productos de desechos o desperdicios que son arrojados al suelo en forma irracional. En la tabla 2.1 se resumen las principales fuentes contaminantes por hidrocarburos al suelo y agua subterránea.

**CAPITULO II . PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS DE HIDROCARBUROS
QUE AFECTAN AL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA**

Tabla 2.1 Principales fuentes contaminantes por hidrocarburos al suelo y agua subterránea.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Exploración y explotación del petróleo.	Contaminación de grandes extensiones por derrames de la fosa de decantación. Contaminación directa al suelo a través de la fosa de decantación.
Almacenamiento, conducción y transporte de hidrocarburos.	Contaminación por fugas y/o derrames, debido a corrosión y desperfectos en tanques y tuberías, dislocación y roturas accidentales de ductos por acomodamientos en el terreno, averías en los vehículos de transporte y manejo inadecuado.
Disposición inadecuada de productos de desecho.	Contaminación provocado por la negligencia de quienes arrojan productos de desecho al suelo, tales como lubricantes quemados y disolventes de grasas en las operaciones de mantenimiento a motores.

II.1 Exploración y explotación del petróleo.

La exploración y explotación del petróleo, incluye una serie de actividades que adoptan variantes en función del ambiente en que se desarrollen éstas.

De los tres ambientes en que se puede desarrollar la exploración y explotación del petróleo (marino, lacustre y terrestre o continental), es en el terrestre donde se pueden provocar impactos adversos al suelo y agua subterránea.

En la exploración se incluyen aquellas actividades encaminadas a detectar la existencia de mantos petrolíferos. Básicamente incluye dos tipos de actividades: los estudios de geofísica y la perforación de pozos exploratorios. Esta actividad no causa un impacto adverso al suelo y agua subterránea por contaminación, pero sí lo puede causar al ambiente en general, principalmente por la acción de los efectos sísmológicos, en los cuales se perforan pozos para introducirles dinamita y hacerlos explotar.

Una vez determinada la localización, la apertura de un pozo requiere de un terreno de 80 metros de lado denominado "pera de perforación" y una laguneta con dimensiones similares y una profundidad de uno a dos metros, denominada "fosa de decantación", cuyo objetivo es decantar el desperdicio de la perforación para que después sea quemado a cielo abierto.

Los bordes de la fosa de decantación se construyen con el material excavado, y en uno de sus extremos se instala una tubería de salida para agua.

CAPITULO II . PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS DE HIDROCARBUROS QUE AFECTAN AL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA

Es en esta fosa de decantación donde se pueden producir los problemas de contaminación por hidrocarburos en el suelo y agua subterránea, el problema de contaminación es mayor si la permeabilidad del suelo es alta y la presencia de mantos acuíferos es próxima a la superficie; ya que es aquí donde se deposita el desperdicio del pozo para que después sea quemado a cielo abierto.

Entre los accidentes más comunes en la exploración y explotación de pozos petroleros, están los derrames de las fosas de decantación que contiene los desperdicios de los pozos, esto principalmente provocado por la ocurrencia de precipitaciones pluviales a la que está expuesta la fosa.

Los derrames en dichas fosas son la principal causa de contaminación del suelo de grandes extensiones de terreno, llegando a afectar grandes extensiones de tierra (70 hectáreas por pozo) en lugares donde la precipitación es muy alta.

Una vez extraído el producto del pozo, éste es conducido a las baterías donde se separa el aceite, gas y agua, disponiéndose temporalmente en tanques de almacenamiento. De ahí, el aceite y el gas se conducen a través de ductos hasta las petroquímicas donde se someten a diversos acondicionamientos.

Dentro del proceso de explotación del petróleo se cuenta con un sistema de ductos que hacen llegar el crudo desde los mantos petrolíferos hasta las baterías, en donde se separa el aceite o crudo líquido del gas natural y el agua, para después ser almacenados temporalmente en tanques. Es por esto que otras fuentes potenciales de contaminación por hidrocarburos en el proceso de exploración y explotación del petróleo, son los sistemas de ductos y tanques de almacenamiento, ya que estos están expuestos, además del intemperismo y a los acomodamientos del terreno, a la acción de sustancias corrosivas que se encuentran en el petróleo o que se forman en éste por la presencia de compuestos sulfurados presentes en el petróleo.

Estas fuentes potenciales de contaminación, se pueden convertir en verdaderos focos contaminantes por hidrocarburos al suelo y agua subterránea, si no se tiene un mantenimiento preventivo y correctivo adecuados de las instalaciones de explotación de mantos petrolíferos.

II.2 Almacenamiento, conducción y transporte de hidrocarburos

Almacenamiento. Todos los hidrocarburos tienen un proceso de almacenaje para su posterior conducción y/o transporte hacia los centros donde será acondicionado, procesado o simplemente para su consumo, ya sea como combustible o como materia prima; así el petróleo que es la principal fuente de hidrocarburos, una vez que ha sido extraído y separado de la fase gaseosa y agua, se almacena temporalmente en tanques para después conducirse a las refinerías para fraccionarlo, y así en cada proceso que se realiza sobre el petróleo, éste o sus derivados se almacenan hasta que es consumido ya sea como combustible o como materia prima de muchos productos sintéticos.

Las industrias que emplean hidrocarburos tanto como combustibles para procesar otros productos o como materia prima, tienen la necesidad de almacenar los hidrocarburos en tanques en cantidades relativamente altas para que el funcionamiento de la industria sea continuo.

La sociedad actual no solo ha creado una gran dependencia por el empleo de hidrocarburos en la industria, sino también a nivel doméstico, comercial y agrícola, lo cual ha dado lugar a una enorme cantidad de hidrocarburos que se consumen diariamente. Estos hidrocarburos antes de ser consumidos o procesados, son almacenados, de ahí la importancia que tiene su almacenamiento como una fuente potencial de contaminación, además de que está presente siempre la posibilidad de que ocurran desperfectos en los tanques de almacenamiento que provoquen verdaderos derrames al subsuelo.

De todos los hidrocarburos derivados del petróleo, los que más demanda tienen en el mercado interno son las gasolinas; tan solo en 1993 su participación en el total de ventas, superó la tercera parte del total de ventas realizadas en ese año, alcanzando un total de 493 MBD (millones de barriles diarios)¹. En cambio el diesel representó para es mismo año una proporción relativamente baja en las ventas, el 16% del total de ventas debido a que su uso preponderante fue como combustible automotriz, dado que en México no se utiliza para calentar espacios.

Dado a que es en las grandes ciudades, como en la Ciudad de México, en donde se realizan los mayores consumos de hidrocarburos en forma de combustibles, como son la gasolina y el diesel. Esto da lugar también a que sea en las grandes urbes donde se corre mayor peligro de derrames de hidrocarburos por fugas en tanques de almacenamiento.

Los grandes tanques de almacenamiento de combustibles como gasolinas y diesel que abastecen a las estaciones de servicio de las grandes urbes, además de constituir un verdadero riesgo de provocar una explosión y afectar a toda una población, son grandes fuentes potenciales de contaminación de hidrocarburos al suelo y subsuelo. En la figura 2.1 se ilustra un derramamiento de hidrocarburos en tanques de almacenamiento de una estación de servicio.

Las estaciones de servicio de PEMEX que abastecen de combustible a todos los vehículos que circulan en las grandes ciudades, constituyen un riesgo permanente de contaminación, ya que las averías en sus instalaciones como tanques de almacenamiento puede provocar derrames, los cuales podrían infiltrarse al subsuelo y contaminarlo.

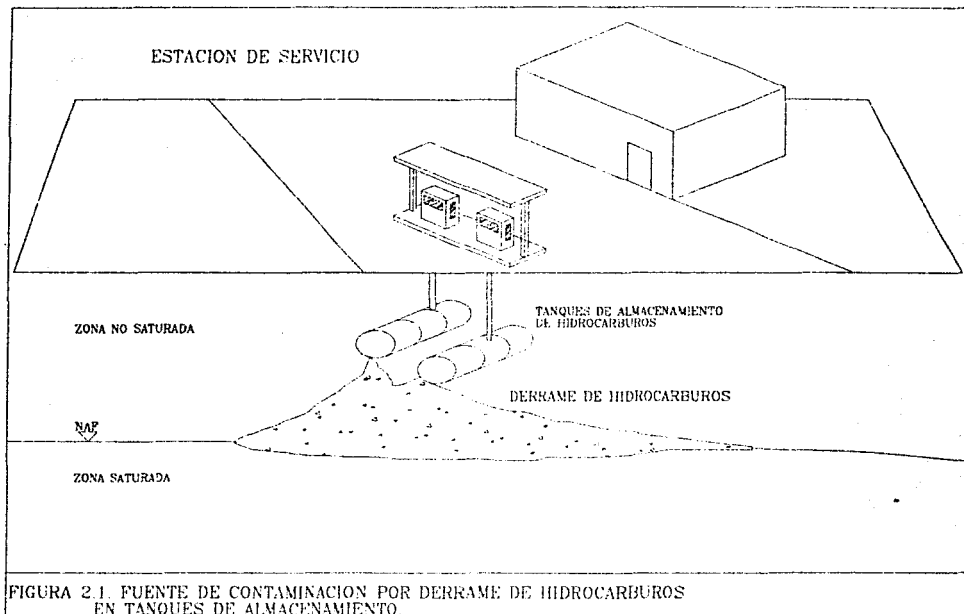
En un estudio realizado a las estaciones de servicio de PEMEX ubicadas dentro de la Ciudad de México por la DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), señala que de las 241 estaciones identificadas en la ciudad de México, alrededor del 40% se concentran en la zona centro, siendo las de mayor antigüedad en sus instalaciones, lo cual las vuelve más vulnerables.

Por los que respecta a la infraestructura hidráulica, en ese mismo estudio se menciona que solamente 7 de un total de 511 pozos de extracción de agua potable pueden ser vulnerables a la contaminación por derrames de hidrocarburos.

Otro de los hidrocarburos que tienen en el Mercado Interno mucha demanda es el combustóleo, el cual representó en el año de 1993 el 26%¹ del total de la demanda de productos petrolíferos.

¹ Fuente: Memoria de labores de PEMEX para el año de 1993.

**CAPITULO II . PRINCIPALES FUENTES GENERADORAS DE HIDROCARBUROS
QUE AFECTAN AL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA**



El almacenamiento del combustible en las plantas termoeléctricas, las cuales representan el principal destino de este combustible, es otra fuente potencial de contaminación por hidrocarburos, pudiendo convertirse en una gran fuente de contaminación en el caso en que los tanques de almacenamiento presenten derrames de combustible al suelo.

La tendencia actual es sustituir el uso de combustible en las plantas termoeléctricas por gas natural, ya que la emisión de contaminantes, como óxidos de azufre, a la atmósfera por el proceso de combustión del combustible, es significativamente más grande que la del gas natural.

Conducción. Las instalaciones petroleras que tienen mayor número de accidentes son las líneas de conducción, debido a su extensión y a la diversidad de ecosistemas que atraviesa. Es por esto que las líneas que conducen hidrocarburos, tanto petróleo como sus derivados líquidos, son potencialmente vulnerables a averías, lo cual provocaría derrames al suelo, propiciando la contaminación de éste y de los acuíferos en caso de que la permeabilidad del suelo lo permita.

Transporte. Muchas industrias consumidoras de hidrocarburos, incluyendo CFE y PEMEX, las cuales conjuntamente consumieron para el año de 1993 el 71%¹ de los combustibles industriales utilizados en el país, necesitan transportar los hidrocarburos por medio de vehículos llamados pipas hasta el lugar de consumo, tal es el caso de las estaciones de servicio de PEMEX, en las que el combustible se surte por medio de pipas.

Cuando la operación de transportar y abastecer a los tanques de almacenamiento se hace por medio de vehículos averiados o se cometen fallas durante la operación, se tienen riesgos de derrames de hidrocarburos al suelo, provocando que éste quede contaminado. Es por lo cual que la operación de transportar hidrocarburos es una fuente potencial de contaminación del suelo por hidrocarburos

II.3 Desechos de productos derivados de los hidrocarburos.

Este tipo de fuente de contaminación por hidrocarburos involucra a todos aquellos derivados del petróleo que no son utilizados como combustibles ni como materia prima, sino que tienen un uso eventual tal como lubricantes (aceites y grasas) y disolventes, principalmente; los cuales una vez que han cumplido con su objetivo son desechados, muchas veces arrojados al suelo en forma irracional provocando su contaminación.

En terminales de diferentes medios de transporte, así como en los talleres mecánicos de reparación o mantenimiento, se manejan hidrocarburos para el lavado de motores y otro tipo de piezas, los que después de su utilización son descargados al sitio más próximo.

CAPÍTULO III

CAPITULO III

III. PROCESO DE CONTAMINACIÓN

III.1 Principios de Geohidrología .

La geohidrología, hidrogeología o hidrología subterránea, son términos que hasta la fecha son motivo de discusión en torno a la mayor o menor adecuación de dichos términos, pero lo cierto es que todos ellos se refieren o tratan sobre las aguas subterráneas y son parte o rama de la ciencia llamada hidrología.

El comité Coordinador del Decenio Hidrológico Internacional, iniciado en 1965 bajo el patrocinio de la Unesco, adoptó la siguiente definición: "La hidrología es la ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en el globo, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, sin olvidar las reacciones a la acción del hombre".

De la misma manera puede adoptarse para la hidrología subterránea o para la hidrogeología la siguiente definición: "Hidrología Subterránea es aquella parte de la Hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre".

Cabe recordar que el reservorio subterráneo es una formación geológica que está constituido por los espacios o poros de las rocas. Estos se encuentran conectados entre sí como si fuera un sistema de pequeñas tuberías, donde el agua se almacena y circula muy lentamente. Aquí los poros están llenos de agua, por lo que también se le denomina zona saturada.

La zona del suelo ubicada sobre el reservorio subterráneo es la zona no saturada. Aquí los poros contienen agua y aire.

El reservorio subterráneo se llama acuífero, cuando se puede extraer de él cantidades apreciables de agua; pero una definición más precisa de acuífero y de otras formaciones geológicas son las que se dan a continuación:

Acuífero. En la hidrología subterránea, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre

pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades.

Los acuíferos se clasifican de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos en: no confinados, semiconfinados y confinados.

Acuíferos no confinados.- También llamados acuíferos libres o freáticos, son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, la cual está en contacto directo con el aire y por lo tanto está a presión atmosférica. Fig. 3.1

Acuíferos confinados.- También llamados cautivos o a presión, son aquellos, en donde el agua de los mismos está encerrada entre dos capas impermeables y por tanto está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Fig. 3.1

Acuíferos semiconfinados.- Constituyen una variedad de los acuíferos confinados, ya que pueden considerarse como un caso particular de dichos acuíferos en los que el muro (parte inferior) y/o el techo (parte superior) que los encierra no es totalmente impermeable sino un acuitardo, es decir, un material que permita una filtración vertical del agua, muy lenta, que alimenta el acuífero principal en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situada encima o debajo del mismo. Como es lógico, este paso vertical de agua es solo posible cuando existe una diferencia de potenciales entre ambos acuíferos (el que recarga y el recargado) y puede hacerse en un solo sentido. Fig. 3.1

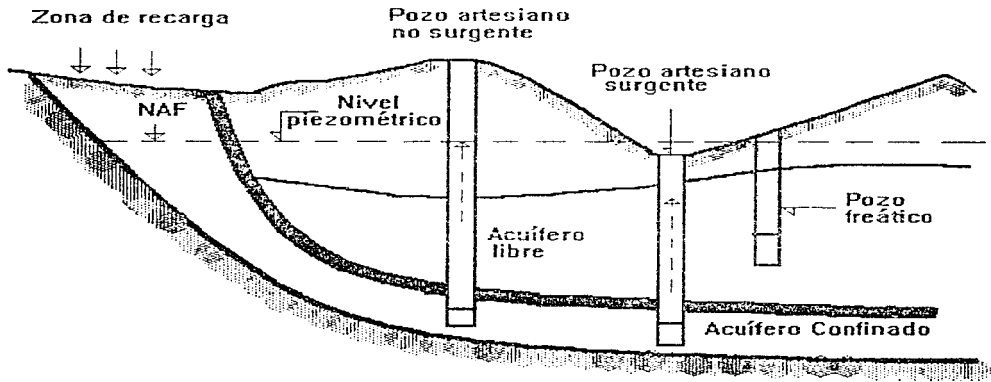


Figura 3.1. Tipos de acuíferos

Acuicludo.- Se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Dentro de éste grupo pueden incluirse cienos y légamos (arcillas por lo general), que a pesar de poseer enormes cantidades de agua (superiores al 50% en volumen) no son hidrogeológicamente aptos para la construcción de captaciones de aguas subterráneas.

Acuitardo.- Este término hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmite muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical a otros acuíferos.

Acuífugo.- Son aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo, un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización.

III.1.1 Formaciones geológicas como acuíferos .

No todas las formaciones geológicas, o rocas en general, poseen, la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables económicamente. Las diferencias, en este aspecto, entre los aluviones de un río y un macizo granítico poco alterado, por ejemplo, son bien evidentes.

Los acuíferos que se presentan con mayor frecuencia están formados por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como arenas, gravas, mezclas de ambos, etc., pudiendo ser su origen geológico muy distinto: fluvial, como los que forman los materiales aluviales de los ríos o las terrazas de los mismos; deltaico, si se trata de depósitos acumulados en la desembocadura de los ríos; depósitos sedimentarios ocasionados por la acumulación de partículas transportadas por la gravedad (piedemontes), viento (dunas y/o loess), hielo (depósitos glaciares), etc.

De entre las rocas sedimentarias consolidadas que encierran el 95% de las aguas subterráneas para el conjunto de la tierra, la más importante es la caliza, roca formada casi exclusivamente por carbonato de calcio, que varía enormemente en densidad, porosidad, y permeabilidad, de acuerdo con el ambiente sedimentario existente en su formación y el desarrollo posterior de zonas permeables por disolución del carbonato, que pueden llegar a formar verdaderos "ríos subterráneos" y toda una morfología especial en los que en algunos casos no cabe hablar de la transmisibilidad y permeabilidad, debido a que no se cumple el régimen laminar por las grandes dimensiones de las fisuras.

En las rocas volcánicas es difícil establecer una clasificación de las mismas respecto si constituyen o no buenos acuíferos, puesto que depende de las características físicas y químicas de las propias rocas, de la erupción que las originó, del grado de alteración, de la edad, etc. ya que si aquella es escoriácea, con grandes intersticios, puede constituir excelentes acuíferos.

Finalmente, en las rocas ígneas y metamórficas tales como granitos, dioritas, gabros, pizarras y esquistos, las únicas posibilidades de formar buenos acuíferos residen en la zona alterada superficial, o en las regiones muy fracturadas por fallas y diaclasas que permitan una

apreciable circulación de agua, pero de todos modos, constituyen los peores acuíferos en cuanto a rendimiento en caudal.

III.1.2 Parámetros hidrológicos fundamentales .

Porosidad.- La porosidad de un material viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total.

Si se considera un cierto volumen de una muestra de una roca o suelo cualesquiera se puede distinguir:

Vs= Volumen de sólidos
Vv= Volumen de vacíos
Vt= Vs+Vv (volumen total)

la porosidad resulta ser:

$$m = Vv/Vt$$

El tipo de empaquetado de las partículas que componen una roca, determina el tipo de poro, y asimismo la porosidad total.

Porosidad eficaz y retención específica. De las reservas en agua del suelo sólo es recuperable mediante captaciones la gravífica que es una parte de la porosidad total.

El agua de retención viene expresada por la capacidad de retención específica del terreno (m_r), definida por la relación:

$$m_r = (Vs/Vt) \times 100$$

donde, Vs es el volumen de agua retenido por la roca inicialmente saturada una vez evacuada el agua gravífica.

El volumen de agua contenido en una roca, liberado por la acción de la gravedad y que se denomina Ve (volumen de agua libre) está determinado por la porosidad eficaz m_e :

$$m_e = (Ve/Vt) \times 100$$

La porosidad total (m_t) resulta de sumar la porosidad eficaz y la capacidad de retención específica. Las reservas útiles de un material acuífero están condicionadas por la porosidad eficaz.

Permeabilidad o conductividad hidráulica.- Se define como el gasto o caudal que pasa por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente también unitario a una temperatura fija o determinada, y viene dada por la siguiente expresión:

$$K = v i \quad [L] [T]^{-1}$$

siendo v la velocidad media e $i=h/l$ el gradiente hidráulico, donde h es la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos separados una distancia l, la cual es la distancia de recorrido que debe realizar el agua.

Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y dependen del tamaño de los poros. Tabla 3.1

Los factores extrínsecos son los que dependen del fluido y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico.

Permeabilidad (m/día)	10^4	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena fina; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla			Arcillas no meteorizadas			
Calificación	Buenos Acuíferos					Acuíferos pobres			Impermeables		
Capacidad de drenaje	Buen drenaje					Drenan mal			No drenan		

Tabla 3.1. Permeabilidad y capacidad de drenaje.

Transmisividad.- El concepto de transmisividad fue introducido por Theis en 1935, y se define como el caudal o gasto que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario a una temperatura fija determinada; y está dado por el siguiente producto:

$$T = K \times b \quad [L]^2 [T]^{-1}$$

donde.

T = Transmisividad
K = Permeabilidad
b = Ancho del acuífero

Coefficiente de almacenamiento.- Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección unitaria y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unitario del nivel piezométrico o de carga hidráulica.

El coeficiente de almacenamiento, representado por S, no tiene dimensiones.

Según la definición, en los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz, es decir, el volumen de agua gravífica extraído de una unidad de acuífero saturado.

En los acuíferos confinados entran en juego los efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua.

Los valores del coeficiente de almacenamiento S son por tanto completamente distintos según se trate de uno u otro caso. Como idea de orden de magnitud, se puede recordar que

varía de 0.05 a 0.3 en condiciones libres y de 10^{-3} a 10^{-5} en condiciones artesianas o confinadas.

III.2 Origen de la contaminación.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el manejo, transporte y almacenaje del petróleo crudo y sus derivados en estado líquido a temperatura ambiente, frecuentemente representan una fuente potencial de contaminación. Es por ello que la contaminación al suelo y agua subterránea se origina en el lugar donde se ha producido un derrame de los hidrocarburos potencialmente contaminantes antes mencionados.

Los hidrocarburos provenientes del petróleo y sus derivados forman una mezcla inmisible, es decir, que no es mezclable, la cual al derramarse o verterse al suelo o subsuelo se va infiltrando en la zona no saturada, en la cual los poros están ocupados por aire y agua.

El tipo de fuente que genera la contaminación al suelo y agua subterránea, constituye un factor de suma importancia para poder entender y determinar el flujo de cualquier componente derivado del petróleo.

III.3 Transporte de contaminantes en suelos y acuíferos.

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

En términos generales, la mezcla inmisible de hidrocarburos que se ha derramado al suelo desciende por gravedad, cuyo movimiento en descenso en general está determinado por sus características fisicoquímicas en las que incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio por donde fluye como son el tipo de suelo, su permeabilidad, el tamaño de las partículas, su contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel de aguas freáticas que guarda con respecto al nivel del terreno. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen la distribución tridimensional y el tamaño del bulbo o pluma de contaminación en una zona específica.

Si las capas del suelo son permeables, entonces la mezcla inmisible de hidrocarburos descenderá hasta alcanzar el nivel de aguas freáticas; debido a que los hidrocarburos líquidos derivados del petróleo son en su mayoría menos densos que el agua, los contaminantes se acumularán en el límite de la zona saturada y la no saturada, esto es, quedarán suspendidas en la parte superior del nivel de aguas freáticas.

De acuerdo a su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor que la del agua se denominan ligeros (LNAPL: Light Non-Aqueous Phase Liquids), mientras que a los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos (Dense Non-Aqueous Phase Liquids). Los hidrocarburos que se pueden

infiltrar al subsuelo y migrar hacia los acuíferos, caen principalmente dentro de los compuestos ligeros (LNAPL's).

Los LNAPL's tienden a formar una capa en forma de "nata" en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección del flujo del agua subterránea, Fig.3.2. Los hidrocarburos más comunes que quedan dentro de esta clasificación son los aromáticos de las gasolinas: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, aceites y petróleo crudo.

Existen algunos compuestos que no son propiamente hidrocarburos, ya que están enlazados con otros elementos como el cloro, bromo u otros elementos, dichos compuestos pueden ser cloruro de metileno, tetracloroetileno, bifenilos policlorados, bencenos halogenados etc. Estos compuestos forman parte de los DNAPL's, los cuales migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección al flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad, Fig.3.3.

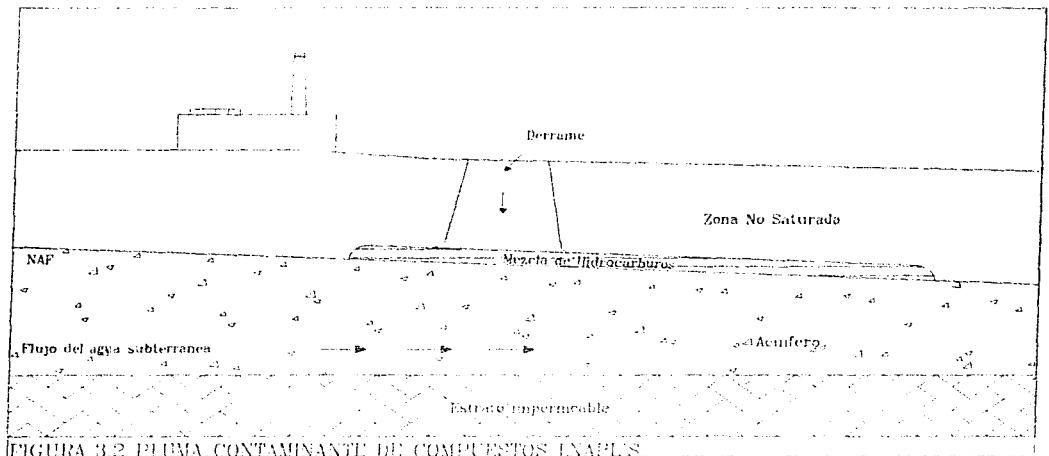
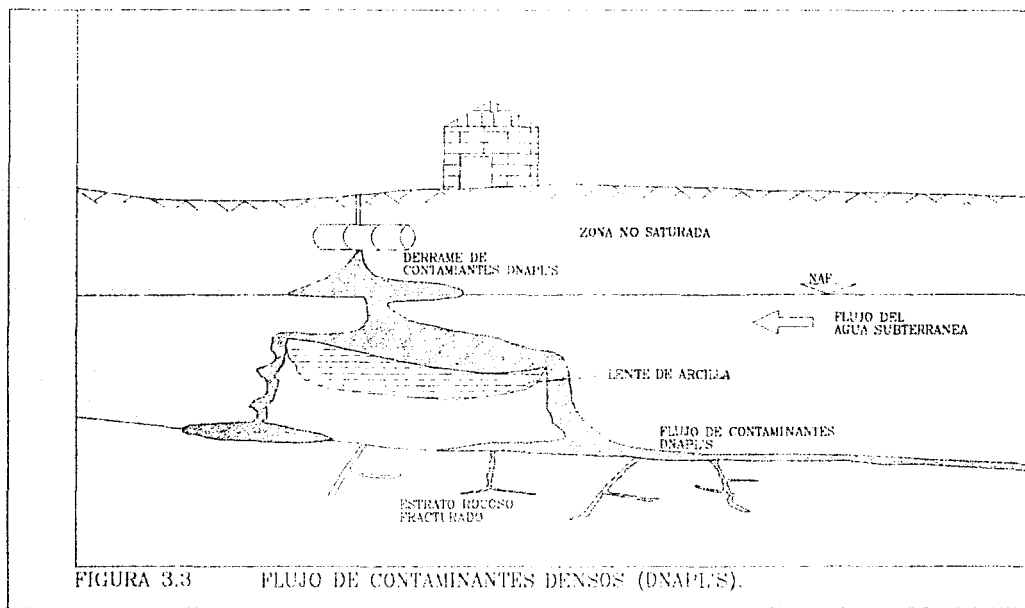


FIGURA 3.2 PLUMA CONTAMINANTE DE COMPUESTOS LNAPL'S.

En el proceso de infiltración de la mezcla inmisible de hidrocarburos al subsuelo en la zona no saturada, dicha mezcla va dejando a su paso, aisladas e inmóviles partículas residuales en forma de pequeñas gotas, las cuales por lo general se puede esperar que sean del orden de 2 a 5% del volumen total de un cierto tipo de suelo o estrato geológico, al cual atraviesan.

En los casos de derrames pequeños o sitios con una zona no saturada muy gruesa, los hidrocarburos líquidos podrían ser retenidos enteramente en la zona no saturada.

Tanto el aire como el agua que se infiltra, atraviesan la zona ocupada por los hidrocarburos derramados, es decir, atraviesan tanto a la mezcla como a los residuos que se desprenden de ésta. Este movimiento está acompañado por el desprendimiento de componentes volátiles y solubles de los hidrocarburos derramados. Los componentes volátiles fluyen por advección en respuesta al gradiente de presión, y por difusión en respuesta al gradiente de concentración, éstos gases pueden ascender y escaparse de la zona no saturada, provocando contaminación a la atmósfera y a la superficie terrestre, o bien, pueden trasladarse lateralmente dentro del mismo subsuelo, alejándose de la zona ocupada por la mezcla; cuando el suelo se llega a congelar o a cubrir por nieve, el flujo y traslado de contaminantes lateralmente se incrementa. En el proceso de flujo de los gases desprendidos, éstos pueden volver a entrar en la mezcla de hidrocarburos, es decir, se pueden llegar a disolver dentro de ésta. La concentración de los componentes volátiles dentro de la mezcla, dependerá del grado de solubilidad en particular de cada contaminante volátil y de la cantidad.



El agua que se infiltra y que se contamina al disolver componentes de la mezcla de hidrocarburos y de sus residuos, puede secuencialmente alcanzar la zona saturada, debido principalmente al movimiento en descenso que tiene el agua procedente de la lluvia o nieve que se infiltra al subsuelo; ésta acción puede provocar contaminación a una distancia más alejada de la fuente que origina la descarga o derrame de hidrocarburos.

En adición a la dispersión lateral, los hidrocarburos que alcanzan la parte superior de la zona saturada, se moverán en sentido vertical, debido a las fluctuaciones del nivel del agua freática. Esto provoca una dispersión vertical de los contaminantes aproximadamente igual a la profundidad en que varía el NAF. Así, los hidrocarburos se podrán presentar como una zona de gotas residuales aisladas e inmóviles de productos derivados del petróleo, las cuales se extenderán lateralmente y algunas veces se esparcirán verticalmente en intervalos determinados por las condiciones geohidrológicas de cada lugar.

El agua que se infiltra adquiere por disolución contaminantes provenientes de hidrocarburos derivados del petróleo, tales como bencenos, xilenos y toluenos, los cuales sí son solubles en agua, así por ejemplo, la solubilidad del benceno en agua es de 1740 mg/l y el límite recomendado para agua potable es de 0.2µg/l. Es por esto que la razón principal de contaminación al suelo y agua subterránea, lo constituyen éstos compuestos orgánicos disueltos, ya que en sí la mezcla inmisible de hidrocarburos que es derramada al suelo ocupa un volumen finito o bien delimitado, el cual es relativamente pequeño en la mayoría de los casos, siendo no mayor de 20 a 30 veces que el volumen derramado desde la fuente generadora.

Con excepción de grandes derrames y por lo dicho en el párrafo anterior, la mezcla de hidrocarburos por sí misma no representa una seria contaminación al subsuelo por diseminación y dispersión de contaminantes provenientes de los hidrocarburos.

La mayor causa de contaminación en el agua subterránea es, como ya se mencionó, por la disolución de compuestos orgánicos provenientes de la mezcla de hidrocarburos derramada.

De todos los hidrocarburos que conforman a la mayoría de los compuestos derivados del petróleo, el benceno, etilbenceno, tolueno y xileno son los que están en la lista de contaminantes prioritarios de la EPA (Environmental Protection Agency), debido a que los límites aceptables de concentración de éstos compuestos para agua potable son muy bajos, y un pequeño derrame de hidrocarburos en agua subterránea podría provocar la contaminación de un gran volumen de agua del acuífero; ya que tomando como ejemplo al benceno, el cual representa de 1 a 2% del volumen total de una gasolina, podría contaminar 100 000 m³. de agua subterránea si se derrama en el acuífero un litro de gasolina.

La concentración de hidrocarburos en la fase líquida dependerá sobre todo de la solubilidad de dichos contaminantes, de la proporción en que son transferidos los hidrocarburos a la fase líquida y del tiempo de contacto entre el agua que fluye y la mezcla de hidrocarburos.

El agua que se infiltra, al atravesar a la mezcla inmisible de hidrocarburos o al hacer contacto con las gotas residuales, se puede producir una reacción, la cual será proporcional al área de contacto que exista entre los hidrocarburos y la fase líquida.

La zona que contiene un número grande de gotas residuales de hidrocarburos, es la zona donde fluctúa el NAF, y es por esto que es aquí donde el área de contacto entre la fase líquida y los residuos es más grande, y la disolución de contaminantes también lo es.

Cabe mencionar que las gotas residuales de hidrocarburos (droplets) que quedan en la zona no saturada, al paso de la mezcla contaminante, se debe a que éstos son atrapadas en los poros o espacios entre partículas de suelo, por tensión superficial, y muchas otras son retenidas por adsorción en materiales orgánicos y partículas de suelo químicamente activas. Estos compuestos pueden llegar a descomponerse por medio de la oxidación y la actividad bacteriana.

Debido a que la interfase de los hidrocarburos y la fase líquida es muy compleja, resulta extremadamente difícil cuantificar la cantidad de compuestos que se disuelven. Es por esto que los valores de solubilidad de los hidrocarburos en agua subterránea en condiciones ambientales reales, no son fáciles de determinar. Los valores de solubilidad que aparecen en la literatura técnica especializada, generalmente son representativos de mediciones hechas en agua destilada y a una temperatura estándar de 25 °C. Sin embargo, la solubilidad de muchos de los hidrocarburos derivados del petróleo, frecuentemente varían con la temperatura, la salinidad, la presencia de otros hidrocarburos y la cantidad de materia orgánica disuelta. Por ejemplo, la solubilidad de varios compuestos del petróleo en forma pura, es decir, disueltos cada uno en las condiciones antes mencionadas, es más grande que la solubilidad de esos compuestos en agua en contacto con gasolina.

La tabla 3.2 proporciona valores de solubilidad en agua equilibrada de algunos compuestos seleccionados, obtenidos a partir de una muestra de gasolina regular sin plomo.

Compuesto	Compuesto en agua pura (ppm)	Solución líquida en contacto con gasolina (ppm)
Benceno	1 740	65
Tolueno	554	34
2-Buteno	430	2.4
2-Penteno	203	1.4, 0.88, 2.4
Etilbenceno	131	4.8
O-Xileno	167	5.4
P-Xileno	157	13.8
M-Xileno	134	8.9
Butano	61.4	2.7
1,2,4 Trimetilbenceno	51.9	1.1
2-Metilbutano	48	3.7
Pentano	39.5	1.0

Tabla 3.2. Solubilidad de algunos hidrocarburos representativos.

Aunque los valores de solubilidad obtenidos en una solución líquida en contacto con gasolina, son mucho menores que los valores obtenidos con hidrocarburos disueltos en agua pura, ellos siguen siendo muy grandes en comparación con los valores permisibles en agua subterránea.

Un buen ejemplo para entender la complejidad de los procesos de transporte hidrocarburos en el subsuelo son las gasolinas, las cuales son una mezcla de hidrocarburos de baja densidad y de características no-polares que generalmente no penetran en el nivel freático sino que flotan sobre él, pero algunos de ellos presentan una parcial solubilización por lo que también es posible encontrarlos en el agua subterránea. Una vez que las gasolinas son derramadas en la superficie rápidamente se expanden a través de la zona no saturada formando grandes bulbos o plumas de contaminación. Cuando los suelos son muy porosos como la grava, arena o roca fracturada, las gasolinas se mueven hacia abajo por acción de la gravedad, dejando una vecindad a saturación baja. La fracción volátil se evapora ocupando la fase gaseosa del suelo y después migra por difusión y en ocasiones por advección. La difusión y la sorción en la fase gaseosa son mucho más rápidas que en la fase líquida, por lo que la rapidez del transporte es mayor en la zona no saturada con respecto a la zona saturada.

Básicamente, haciendo un resumen, los procesos de transporte que determinan el movimiento de los hidrocarburos tanto en la zona no saturada como en la saturada son: Procesos hidrodinámicos, abióticos y bióticos; tal como se muestra en la tabla 3.3

Procesos hidrodinámicos:	Procesos abióticos:	Procesos bióticos:
<ul style="list-style-type: none"> · Advección · Dispersión 	<ul style="list-style-type: none"> · Sorción · Intercambio iónico · Solución-precipitación · Oxidación-reducción · Volatilización 	<ul style="list-style-type: none"> · Degradación biológica
<p>Características del medio:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Permeabilidad · Contenido de agua · Carga hidráulica · Porosidad 	<p>Características de los contaminantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Solubilidad · Presión de vapor · Coeficiente de adsorción 	<p>Factores de influencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Contenido de agua · Temperatura · pH · Materia orgánica

Tabla 3.3. Procesos de transporte de contaminantes.

III.3.1 Procesos hidrodinámicos.

Una vez que los hidrocarburos se han infiltrado y han alcanzado la zona saturada, los procesos físicos que controlan el flujo de dichos contaminantes derivados del petróleo en el acuífero, son los mismos que siguen la mayoría de los contaminantes disueltos en la fase líquida. Los procesos hidrodinámicos que siguen los hidrocarburos, han sido objeto de muchas investigaciones durante las pasadas tres décadas, aunque muchas de estas investigaciones y estudios han resultado ser de gran utilidad, aún siguen siendo incompletas, debido a que solo se han hecho estudios en ciertos lugares que presentan una geología bien determinada, como es el caso de los acuíferos en suelos arenosos.

Los procesos hidrodinámicos más importantes que determinan el flujo de los contaminantes derivados del petróleo, principalmente en la zona saturada, son: advección y dispersión. La advección es el resultado del movimiento abultado de toda la masa de agua en la zona saturada, es decir, es producto del movimiento o flujo de todo el volumen de agua en el acuífero, y en la ausencia de otros procesos, podría causar el frente de una pluma contaminante, la cual fluye a una velocidad igual al promedio del flujo del agua subterránea. La dispersión es el proceso que causa mezclado, y se puede presentar superpuesta al proceso de advección. La dispersión es principalmente el resultado de dos fenómenos que son la difusión molecular que ocurre por el movimiento de contaminantes de zonas de alta concentración a zonas de baja concentración de contaminantes y el mezclado que se da por el flujo del agua subterránea.

Los acuíferos de baja profundidad o someros que no están confinados por algún estrato impermeable, son más susceptibles a contaminarse por hidrocarburos derivados del petróleo. Esos acuíferos no confinados o libres están comúnmente formados por arena no consolidada y depósitos de grava. Debido a que el flujo de agua subterránea es aproximadamente horizontal en esos depósitos, el proceso de transporte por advección causa o produce zonas en las cuales los contaminantes disueltos se expanden lateralmente en la dirección del flujo. Dado a que el agua subterránea fluye lentamente, comúnmente de 0.05 a 5 metros por día en acuíferos granulares de arena y grava, los efectos adversos de los derrames o fugas de hidrocarburos derivados del petróleo no se muestran rápidamente en las fuentes de abastecimiento como pozos o en áreas donde el agua subterránea emerge tal como manantiales, o donde el agua subterránea representa el flujo base de ríos y arroyos. Esto da lugar a que pasen muchos meses o años y en algunos casos décadas, desde que se originó la descarga de hidrocarburos en el suelo hasta que es detectada la contaminación en alguna fuente.

La velocidad del flujo de agua subterránea, usualmente puede ser determinada con algún grado razonable de certidumbre en acuíferos granulares de baja profundidad; así también, los niveles del NAF y la distribución de la carga hidráulica, pueden ser fácilmente determinados usando una batería de pozos o piezómetros. Esta información indica la dirección del flujo subterráneo, y cuando éstos se combinan con otros parámetros medidos, como conductividad hidráulica o permeabilidad y porosidad, proporciona un promedio de la velocidad del flujo subterráneo (Freeze y Cherry, 1979).

La dispersión causa concentraciones de hidrocarburos en la pluma contaminante más bajas que en la concentración del origen de la contaminación, pero también provoca que los contaminantes ocupen un gran volumen del acuífero. La concentración aceptable de contaminantes en agua subterránea es a menudo la concentración límite especificada por los estándares para agua potable, donde la máxima posible concentración para un contaminante en particular en la pluma es 5 a 10 veces menor que la concentración aceptable de toda la mezcla de hidrocarburos. La franja o los márgenes de la zona que está contaminada o tiene parámetros inaceptables, generalmente, no son substancialmente mayores que los márgenes que podrían ser calculados con las bases del proceso de advección únicamente. Para bencenos, toluenos y xilenos (BTX) y muchos otros compuestos orgánicos, las concentraciones aceptables son generalmente de diferentes magnitudes, pero menores que las concentraciones que se tienen para otros compuestos.

El proceso físico de dispersión puede ocasionar que la franja o márgenes que delimitan a la pluma contaminante, se extienda mas allá de la distancia que pudiera ser prevista, si solamente se tomara en cuenta el proceso físico de advección para el cálculo de dicha distancia.

Debido a que los contaminantes derivados del petróleo que han alcanzado la zona saturada y han sufrido los procesos físicos de dispersión, logran contaminar un gran volumen del acuífero, con la consiguiente disolución de los compuestos solubles en agua, como bencenos, es por lo que se hace énfasis en el proceso de dispersión, el cual no debe ser ignorado dentro de los procesos físicos que sigue la pluma contaminante.

La dispersión puede ocurrir o presentarse tanto en la dirección del flujo (dispersión longitudinal) y en la dirección transversal a la dirección del flujo del agua subterránea. En acuíferos de material granular (gravas y arenas), la dispersión longitudinal es un proceso mucho mas intenso que la dispersión en la dirección transversal al flujo. Así en estos acuíferos, la pluma contaminantes por hidrocarburos, tiende a hacerse mas alargada en la dirección del flujo, es decir, tiende a dispersarse más en esta dirección, y lo contrario sucede en la dirección transversal al flujo, en donde la concentración de contaminantes se hace mayor que en la dirección del flujo. El ancho angosto y espesor pequeño de la pluma contaminante, a menudo hace que el monitoreo sea en espacios muy cerrados; sin embargo los efectos de la dispersión son reconocidos y continúa siendo controversia lo relativo a la determinación de los coeficientes de la magnitud y de medición de dicho proceso, así también resulta controvertido los modelos matemáticos que intentan representar el proceso físico de la dispersión.

III.3.2 Procesos abióticos

Los procesos abióticos forman parte de los procesos que determinan el movimiento de contaminantes, tanto en la zona saturada como en la zona no saturada (Mackay, 1985). En general los procesos abióticos son procesos químicos que retardan el avance de los contaminantes en el flujo subterráneo, es decir, dan como resultado que la mayoría de las sustancias disueltas fluyan a una velocidad menor que la del agua subterránea.

Los procesos abióticos en el subsuelo incluyen: adsorción-desorción de solutos hacia la superficie de los materiales; intercambio iónico; hidrólisis; reacciones de solución-precipitación; reacciones ácido-base; oxidación-reducción (Morris, 1982).

Las propiedades físicas que influyen en los procesos abióticos son: solubilidad, presión de vapor y coeficientes de partición.

La solubilidad se refiere a la tendencia de una sustancia química a moverse del sólido a la solución, y se expresa como la concentración de una solución saturada en equilibrio con exceso de sólido.

El proceso abiótico de mayor influencia en el transporte de contaminantes orgánicos es el de adsorción, el cual se refiere a la retención de un soluto en la fase sólida por medio de una partición entre la fase sólida y la acuosa. El soluto se adsorbe fuertemente en la superficie del material, de tal forma que retarda su movimiento a través de las zonas no saturada y saturada. Hay características físicas y químicas tanto del adsorbente (suelo) como del adsorbato (solute) que influyen en la magnitud de la adsorción.

Si se considera tanto los procesos físicos hidrodinámicos, como los bióticos y abióticos, la ecuación de transporte que se puede utilizar para describir el flujo de contaminantes en una dimensión, bajo condiciones de saturación, no consolidación y homogeneidad es la siguiente:

$$dC/dt = -u \, dC/dx + D \, d^2C/dx^2 - r/n \, dS/dt + (dC/dt) \, m \quad 3.1$$

donde

u = velocidad promedio del fluido (LT^{-1})
 C = concentración de soluto en la fase acuosa (ML^{-3})
 x = dirección del flujo (m)
 D = coeficiente de dispersión (L^2S^{-1})
 r = densidad del suelo (ML^{-3})
 n = porosidad
 S = masa de soluto adsorbida por unidad de masa del suelo (MM^{-1})
 t = tiempo (T)
 m = reacciones químicas y/o degradación.

El coeficiente de dispersión D , que aparece en esta ecuación y está determinado por el proceso de dispersión, se determina en campo a través de mediciones con trazadores.

Si se considera que la transferencia de masa del soluto a la adsorción es lineal, se tiene que

$$dS/dC = K_d \quad 3.2$$

donde

S = masa de soluto adsorbido por unidad de masa de suelo (MM^{-1})
 C = concentración de soluto en la fase acuosa (ML^{-3})
 K = coeficiente de distribución ($L^{-2}M$)

Si se considera que la dispersión, la biodegradación y las reacciones químicas son despreciables, entonces la ec. 3.1 se convierte en:

$$dC/dt = -u \, dC/dx - r/n \, dS/dt \quad 3.3$$

sustituyendo la ec 3.2 en la 3.3,

$$-u \, dC/dx = dC/dt(1 + rK_d/n) \quad 3.4$$

o

$$-u \, dC/dx = dC/dt \, R_f \quad 3.5$$

donde

$$R_f = (1 + rK_d/n)$$

y se define como el factor de retardo.

El factor de retardo está influido por el coeficiente de distribución, K_d , cuyo valor se determina con base en las interacciones soluto-suelo. A mayor afinidad del soluto con la fase del suelo, el soluto será adsorbido en mayor grado y el valor de K_d será mayor.

Los solutos que se adsorben más son aquellos que presentan un comportamiento hidrofóbico acentuado, es decir, aquellos que están constituidos principalmente por hidrocarburos.

A mayor contenido de carbón orgánico en el suelo o sedimento corresponde mayor valor de K_d ; por lo tanto, existe una proporción lineal entre el contenido de carbón orgánico en el suelo y el coeficiente de distribución (K_d), el cual se mide por el coeficiente de partición octanol/agua (K_{ow}), siempre que el contenido de carbón orgánico sea mayor de 0.1 por ciento (Karickhoff, 1979).

De esta manera, K_d puede estimarse como

$$K_d = 6.3 \times 10^{-7} (\text{foc}) (K_{ow}) \quad 3.6$$

donde

foc = Fracción de carbón orgánico.

K_{ow} = Coeficiente de partición octanol-agua.

La sorción es un proceso que reduce la movilidad del contaminante con respecto al flujo del agua subterránea; esta reducción se calcula mediante el factor de retardo antes definido, pero es necesario destacar que dicha definición considera condiciones de equilibrio que generalmente no se cumplen.

Los métodos más utilizados para estimar el retardo (Mackay, 1990) son:

a) Prueba de campo de lavado

Permite observar directamente el comportamiento del retardo dentro de las plumas contaminantes. La escala física de esta prueba toma en cuenta el efecto de heterogeneidad del acuífero.

b) Prueba de campo a pequeña escala

Gillham et al (1990) desarrollaron un aparato (instalado por medio de una perforación) que aísla una porción del acuífero y conduce una prueba de trazador a pequeña escala. El retardo puede observarse por el transporte que se presenta sobre algunas decenas de centímetros. Este aparato ofrece la posibilidad de estudiar la cinética de desorción.

c) Correlación entre la capacidad de sorción y otras características del medio del subsuelo

Se ha pensado que la sorción puede estimarse con base en el contenido de carbón orgánico del medio. Sin embargo, la evidencia sugiere que este método resulta inadecuado sobre todo para casos donde el contenido de carbón orgánico es menor de 0.1 por ciento; por ejemplo, en la mayoría de los acuíferos arenosos.

d) **Capacidad de sorción a través de muestras de suelo.**

En diversos estudios sobre sorción, se determina el retardo del contaminante por medio del análisis en laboratorio de muestras de suelo. El problema en este tipo de prueba es que no se considera la variación espacial del acuífero.

De lo anterior se deduce que lo más apropiado para caracterizar la movilidad de los contaminantes en agua subterránea son las pruebas a gran escala y con trazadores a pequeña escala.

III.3.3 Procesos bióticos.

Los procesos bióticos comprenden los procesos de biodegradación, que de una forma u otra afectan el movimiento de los contaminantes tanto en la zona no saturada como en la zona saturada, estos procesos son realizados tanto por organismos aerobios, como anaerobios.

La biodegradación amenudo representa la forma más deseable de atenuación de la contaminación, debido al proceso natural de la reacción irreversible que se presenta. En la mayoría de los casos, la alteración bioquímica es un mecanismo de desintoxicación, y en el caso de algunos compuestos complejos es el único mecanismo que lleva fácilmente a la completa mineralización.

En acuíferos no confinados de baja profundidad, la población bacteriana activa, se asume generalmente que se encuentra fija en la superficie de los materiales sólidos. A fin de que las bacterias puedan sobrevivir, ellas deben encontrar sus requerimientos metabólicos que las hacen existir. Esos requerimientos metabólicos incluyen los nutrientes, de los cuales, los principales son: carbono, nitrógeno y fósforo, y una fuente de energía. La energía es obtenida a partir de la oxidación de los compuestos orgánicos o de los inorgánicos reducidos como hierro, nitrógeno y azufre, para ese proceso se requiere de la transferencia de electrones que se dan en los enlaces químicos, a fin de completar el par requerido de electrones en un cierto orbital. Los requerimientos de nutrientes y energía, son aportados por la biomasa contenida en el flujo subterráneo, así como por los minerales y materia orgánica contenida en la fase sólida.

Considerando el caso de un derramamiento de hidrocarburos en un acuífero no confinado, el grado de degradación biológica de los hidrocarburos derramados, dependerá de su concentración, de la estructura química y propiedades físicas de los hidrocarburos derramados, de la población bacteriana, de las condiciones físicas del acuífero y de la disponibilidad de los elementos que son requeridos por las bacterias para seguir creciendo, dichos elementos se analizarán con más detalle en el capítulo V.

La degradación bacteriana de los hidrocarburos es generalmente en presencia de oxígeno y para lograr una extensa y rápida remoción de la concentración de hidrocarburos, se requiere que el oxígeno esté siempre presente. En la zona saturada, la máxima concentración de oxígeno disuelto está limitada por su capacidad de disolución en agua subterránea, la cual generalmente está entre los 8 y 12 mg/l. En situaciones donde la demanda de oxígeno total es mayor que la que concentración de oxígeno disuelto presente en el agua subterránea, la biodegradación en condiciones aerobias estaría limitada. Generalmente la demanda de oxígeno

en lugares cercanos al lugar donde se produjo el derrame de hidrocarburos es mucho mayor que el oxígeno disuelto en forma natural presente en el acuífero.

El oxígeno suficiente que requieren las bacterias, puede ser proporcionado a ellas en una de las siguientes formas: a través de pozos o de procesos naturales; en una u otra forma el suministro es en forma directa. Existen varios procesos naturales que pueden proporcionar una provisión de oxígeno disuelto al agua subterránea. El proceso de dispersión puede dar como resultado que se mezcle la pluma contaminante, en la cual el oxígeno está agotado, con la franja que esta afuera de dicha pluma, la cual está enriquecida con oxígeno disuelto. Alternativamente, el oxígeno disuelto proveniente del movimiento advectivo del agua subterránea, puede ser adsorbido por los hidrocarburos presentes en la pluma contaminante, y así proporcionar una cantidad de oxígeno disuelto equilibrada con la población bacteriana. La difusión de oxígeno proveniente de la zona no saturada a la zona saturada, es decir, el oxígeno presente en la zona no saturada que llega a ser absorbido en la fase líquida, puede dar como resultado que la capa que está directamente por debajo del NAF, se oxigene. Sin embargo este mecanismo tiene limitaciones importantes, debido a que el proceso de difusión es bajo.

En el caso de reacciones bioquímicas que están limitadas por la disponibilidad de nutrientes, los mecanismos de obtención de oxígeno pueden ser o no importantes dependiendo de factores complicados, tales como la adsorción.

La degradación microbiana de bencenos, toluenos, xilenos y otros hidrocarburos aromáticos simples, amenudo da como resultado una mineralización completa de dichos compuestos. Bajo condiciones favorables y en concentraciones suficientes de esos compuestos, éstos pueden ser utilizados como la única fuente de carbón que necesitan las bacterias para crecer y realizar su función metabólica.

CAPÍTULO IV

CAPITULO IV

IV.- IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

Antes de entrar en el tema de impacto ambiental, conviene precisar algunos conceptos referentes al medio ambiente, en especial, señalar sus componentes desde el punto de vista de los impactos ambientales. Los dos grandes componentes del medio ambiente son:

- a) El medio ambiente natural y
- b) El medio ambiente social.

El medio ambiente natural está constituido por cuatro sistemas interrelacionados: la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera, esta última también llamada ecósfera, la cual es el conjunto de todos los ecosistemas y en ella se incluye el hombre.

Un grupo de individuos de una misma especie de organismos es llamado población y las poblaciones viviendo en una misma área forman una comunidad. La comunidad y el medio geofísico con el cual interactúan es un ecosistema.

El medio ambiente social queda definido por el conjunto de infraestructuras materiales construidas por el hombre y los sistemas sociales e institucionales que ha creado. El medio social define, pues, la forma en que las sociedades humanas se han organizado y funcionan para satisfacer sus necesidades básicas, las cuales comprenden las necesidades físicas (alimentación, salud, vivienda y vestido) y las necesidades sociales: educación, trabajo, libertades individuales y posibilidad de participar en el sistema social existente.

Se dice que hay un impacto ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración en el medio o en alguno de los componentes del medio. Por lo tanto, la variable fundamental en estos estudios es la cuantificación de la alteración, dicha alteración puede ser favorable o desfavorable; cuando es desfavorable, el término adecuado es deterioro o degradación ambiental.

El estudio del impacto ambiental es una actividad diseñada para identificar y predecir la modificación de los componentes biogeofísico y socioeconómico del ambiente, para interpretar

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

y comunicar información acerca de los impactos, así como de la forma de atenuar o minimizar los impactos adversos.

En la definición de impacto ambiental se abarca dos grandes áreas, como ya se mencionó: el medio natural y el medio social, destacando dos aspectos:

- a) El ecológico, principalmente orientado hacia los estudios de impacto físico y geobiofísicos, y
- b) El humano, que contempla las facetas sociopolíticas, socioeconómicas y culturales.

Se puede definir como factores ambientales, las consecuencias ambientales de ciertas acciones sobre el medio ambiente. Puede haber muchas clasificaciones, pero en resumen pueden indicarse los factores siguientes:

- a) Factores correspondientes al impacto geobiofísico
- b) Factores correspondientes al impacto socioeconómico

Para el caso del impacto ambiental del suelo y agua subterránea, se analizarán aquellos factores o consecuencias ambientales que resulten del derrame e intrusión de hidrocarburos tanto en la zona no saturada como en la saturada.

IV.1 Impacto ambiental que produce la contaminación de hidrocarburos en el suelo

Una de las consecuencias ambientales derivadas de la acción de contaminar con hidrocarburos al suelo, es la toxicidad que se produce en muchos de los gusanos de tierra y otros microorganismos que viven en la zona no saturada, dicha toxicidad va a depender de la concentración de hidrocarburos y del coeficiente de sorción de la fase sólida. Muchos de éstos organismos que habitan en la zona no saturada y saturada, tienen la función de reincorporar los nutrientes que requieren los vegetales a través de un proceso de degradación.

Otra consecuencia o factor ambiental que se ve afectado, es la alteración de la cubierta vegetal, ya que la concentración de hidrocarburos en niveles altos, resulta ser tóxico para la mayoría de las plantas y demás especies vegetales que se desarrollan en la capa superficial del suelo, esto provoca que el suelo se erosione y no sea apto para la agricultura y la ganadería.

Al ser afectada la cubierta vegetal, con la consiguiente erosión del suelo, se produce una alteración al ecosistema, especialmente en su biocenosis (flora y fauna). Otra alteración al ecosistema debido a la destrucción de la cubierta vegetal, es en la humedad y temperatura, ya que la evapotranspiración se reduce.

Por lo que respecta a los factores correspondientes al medio socioeconómico, la presencia de hidrocarburos en el suelo da como resultado los siguientes impactos:

- Cambios y modificaciones en el uso del suelo, ya que los suelos que antes eran aptos para actividades agrícolas y ganaderas, se vuelven terrenos ociosos en los que la flora y la fauna se han visto alteradas en forma negativa.

- Destrucción o alteración del paisaje, provocado por la destrucción de la cubierta vegetal y erosión del suelo.

- Estas afectaciones al suelo destinado a la agricultura y ganadería, provoca que la gente que vive de estas actividades, tenga que emigrar a las ciudades o a otras comunidades en busca de fuentes de empleo, esto da como resultado que se modifique el estilo de vida de la población que ha emigrado por las razones antes expuestas.

-Reducción de las fuentes de empleo en las zonas afectadas por la contaminación, debido a la inutilización del campo como fuente de trabajo.

- Disminución en el valor del terreno dañado por la presencia de hidrocarburos, debido a que el suelo contaminado se vuelve inadecuado para cualquier actividad, ya sea agrícola, ganadera o de recreación, además de que representa una fuente altamente potencial de contaminación al agua subterránea, por lo que probablemente, dichos acuíferos están contaminados o están a punto de contaminarse.

IV.2 Impacto ambiental que produce la contaminación del agua subterránea por hidrocarburos.

Debido a que el agua subterránea constituye una importante fuente de abastecimiento, y en algunas zonas es el único recurso para satisfacer las necesidades requeridas por la población; y que los límites máximos de concentración recomendados para agua potable de ciertos compuestos hidrocarbonados derivados del petróleo son muy pequeños; el agua subterránea contaminada por hidrocarburos representa un grave problema para la comunidad que requiere de agua de buena calidad para satisfacer dichas necesidades.

La contaminación de un acuífero es un daño prácticamente irreversible, debido a que los procesos son muy costosos y algunas veces poco eficientes. Las técnicas existentes de remediación y/o mitigación existentes hasta el momento tienen un costo elevado y generalmente son dificultosas o poco prácticas. Su recuperación podría ocurrir en forma parcial o total, solo después de muchos años y luego de un largo tratamiento. Existen casos de extrema gravedad que hasta sería mejor abandonarlos.

Un caso práctico lo constituye el siguiente:

En el año de 1982, ocurrió un derramamiento de productos químicos en la costa norte de Puerto Rico. El volumen derramado fue de 57 m³ de producto, que contaminaron el acuífero.

Esta situación generó un gasto de 10 millones de dólares, invertidos en 3 años de estudios, tentativas de limpieza y búsqueda de otras fuentes de abastecimiento de recurso que pudieran remplazar a los pozos abandonados. Estas medidas han conducido a que la contaminación haya disminuido; sin embargo aún persiste.

Los efectos geobiofísicos derivados de la contaminación de un acuífero son:

- Alteración a la calidad del agua, con daños a la agricultura y a la ganadería, cuando dicha agua ha sido extraída para esas actividades.
- Alteración del ecosistema, debido principalmente a la toxicidad que se puede presentar en los organismos que viven en la zona saturada y a otros organismos que de una u otra manera aprovechan las aguas del subsuelo.
- Alteración de la cubierta vegetal en zonas donde el nivel de aguas freáticas tiene poca profundidad, provocada por el agua contaminada que asciende por el fenómeno de capilaridad.
- Toxicidad y daños a la salud, por ingerir agua contaminada con hidrocarburos.

Por lo que respecta a los factores socioeconómicos derivados de la contaminación en el agua subterránea, pueden citarse los siguientes:

- Migración de las comunidades afectadas a otros lugares, donde puedan disponer de otras fuentes de abastecimiento, cuando el agua subterránea fuera la única fuente.
- Pérdidas económicas en zonas donde el agua subterránea constituye un insumo en la obtención de productos o es parte del producto final, debido a que tratar las aguas así contaminadas requiere de fuertes inversiones.
- Desempleo, provocado por el cierre de fuentes de empleo en donde utilizan agua subterránea de buena calidad.
- Incremento en los costos de productos e insumos, en donde los procesos para obtenerlos requiere agua de buena calidad.

En la tabla 4.1 se hace un resumen de los principales impactos ambientales, debido a la contaminación del suelo y agua subterránea por hidrocarburos.

IV.3 Toxicidad y efectos a la salud.

La toxicidad y los efectos adversos sobre la salud por la exposición a los hidrocarburos derivados del petróleo, están bien ejemplificados con evidencias documentadas. Cabe mencionar que a pesar de que muchos de los productos derivados del petróleo están legalmente regulados como no tóxicos, diversos productos derivados del petróleo son en efecto enteramente tóxicos, es por esto que muchas de las características peligrosas de los hidrocarburos son pasadas por alto.

Los hidrocarburos derivados del petróleo son peligrosos desde tres diferentes puntos de vista:

- 1.- Peligro de incendio o de explosión- (la gasolina es un líquido altamente flamable)

2.- Toxicidad a la salud humana.

3.- Daño al medio ambiente, especialmente al agua potable.

Peligro de fuego o explosión. Únicamente la gasolina y los productos derivados de la querosina, son altamente peligrosas bajo condiciones normales encontradas en las actividades de remediación de suelos o acuíferos, pero como es de notarse, la gasolina es el contaminante más comúnmente encontrado. Es usual encontrar gasolina en la zona vadosa o al excavar un suelo en el cual la gasolina pudiera estar comprimida. Es posible obtener una gran concentración de vapor que pudiera llegar a ser un peligro durante las operaciones de limpieza del suelo.

Los productos que tienen una gran presión de vapor, tales como la gasolina, tienen un gran potencial de crear serios problemas en estructuras que están debajo de la superficie, como sótanos, alcantarillas y las cimentaciones en general. La concentración de vapor requerida para provocar un incendio o una explosión, está generalmente expresada en porcentaje con relación a un volumen de aire. Por ejemplo, el límite mas bajo de explosividad del benceno es de 13 ml por un litro de aire (1.3% por unidad de volumen de aire). Similarmente, la concentración de hidrocarburos volátiles que producen una aguda intoxicación por inhalación, está dada en el rango de ppm (partes por millón). Por ejemplo, en lugares donde se trabaja con hidrocarburos un promedio de 8 horas, el límite de exposición al benceno es de 10 ppm (mg/l) en aire (NIOSH).

Contaminación por hidrocarburos	Impacto Geobiofísico	Impacto Socioeconómico
En el suelo.	<ul style="list-style-type: none"> - Toxicidad a microorganismos - Destrucción de la cubierta vegetal. - Erosión del suelo. - Alteración del Ecosistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cambios y modificaciones en el uso del suelo. - Deterioro del paisaje. - Migración de comunidades. - Reducción de fuentes de empleo. - Disminución en el valor del predio.
En el agua subterránea.	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro de la calidad del agua. - Alteración del ecosistema. - Toxicidad a microorganismos que viven en la zona saturada. - Alteración a la cubierta vegetal. - Toxicidad y daños a la salud humana. 	<ul style="list-style-type: none"> - Migración de comunidades. - Pérdidas económicas. - Desempleo en actividades relacionadas con el uso de agua de buena calidad. - Incremento en el costo de insumos y productos que utilizan agua de buena calidad. - Cambio en el estilo de vida.

Tabla 4.1. Impacto ambiental por contaminación del suelo y agua subterránea hidrocarburos.

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

Para trabajadores cotidianamente expuestos a los vapores de los hidrocarburos, la forma más común de contaminación es por inhalación. La exposición por periodos largos a la gasolina ha sido asociada con enfermedades crónicas del riñón y otros efectos, es por esto que los trabajadores involucrados en actividades de remediación de suelos y acuíferos, y/o en otras actividades donde están en contacto con hidrocarburos, podrían tener niveles altos de benceno en pruebas realizadas en la sangre.

Los trabajadores que laboran en las operaciones de remediación y que no dispongan del equipo respiratorio de protección necesario al entrar en excavaciones altamente contaminadas con gasolina, podrían padecer los siguientes signos de intoxicación: vértigo, pérdida de la coordinación y del conocimiento.

Toxicidad. La toxicidad por hidrocarburos puede tener un efecto agudo o un efecto crónico. La toxicidad aguda se presenta en periodos cortos con grandes niveles de exposición, mientras la toxicidad crónica está definida como una intoxicación durante periodos largos a niveles bajos de exposición. Los efectos de la toxicidad aguda aparecen de minutos a horas o a lo sumo en pocos días, mientras los efectos crónicos toman años para aparecer y amenudo son difíciles de correlacionar con la exposición original.

Los efectos y síntomas derivados de la exposición a hidrocarburos son difíciles de cuantificar en un análisis clínico básico debido a: primero, no hay un límite fuertemente marcado entre los efectos a la toxicidad crónica y a la aguda, lo de periodo largo o corto a la exposición es algo subjetivo; segundo, la sensibilidad de las personas a los hidrocarburos varía grandemente; tercero, puede ser difícil distinguir entre un síntoma provocado por la exposición de un hidrocarburo y otra sustancia que no sea un hidrocarburo. Es por esto, que es particularmente importante monitorear a los trabajadores que laboran en actividades de remediación de suelos y que rutinariamente están expuestos a hidrocarburos. El monitoreo puede consistir en revisiones médicas periódicas, en identificar los diversos efectos a la salud o simplemente estimando valores de exposición semanalmente.

Los efectos a la salud por la acción de hidrocarburos, están resumidos en la tabla 4.2. La columna que aparece en dicha tabla, llamada como efectos potenciales a la salud, intenta resumir los síntomas y efectos y no así los diagnósticos. Muchos de los síntomas enlistados en la tabla 4.2 se pueden confundir con síntomas producidos por otras situaciones como estrés, gripe, resfriado y/o cualquier otra enfermedad. Los síntomas deben ser evaluados dentro del contexto de la actividades de los trabajadores como son: tiempo de exposición, frecuencia o regularidad a la exposición y otras actividades que podrían tener una posible afectación sobre la salud. Si el efecto adverso a la salud debido a la exposición es sospechado, entonces el trabajador debería ver inmediatamente a un médico con experiencia en estos casos.

Los hidrocarburos ligeros, incluyendo en éstos al benceno y a los alquilbencenos, son depresores del Sistema Nervioso Central en concentraciones relativamente moderadas. El ciclopropano fue usado alguna vez como anestésico en las salas de operación, pero nunca fue usado ampliamente debido a los riesgos obvios de incendio o de explosión. Los síntomas generales debidos a la depresión del Sistema Nervioso Central son entre otros: pérdida de la coordinación, somnolencia, vómito y vértigo. Efectos más severos en periodos cortos, incluye: pérdida del conocimiento, hemorragias internas en el pulmón e intestinos, y en algunos casos

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

se puede llegar hasta la muerte, debido a una falla del sistema circulatorio. Algunos de los elementos constitutivos de la gasolina, especialmente los bencenos, son asociados con problemas agudos y crónicos, los cuales se han discutido en forma separada.

Los hidrocarburos son buenos disolventes de grasas sólidas, es por esto que son usados para elaborar productos aditivos comerciales, tales como desgrasadores. Desafortunadamente, dentro de las sustancias sólidas no líquidas, se incluye a los lípidos, los cuales componen la membrana de las células de los tejidos. Las células de la piel están bien protegidas por una capa impermeable llamada queratina, pero los tejidos epiteliales tales como los que cubren a la garganta y a los pulmones son mucho más sensibles. Es por esto que la inhalación de los vapores de hidrocarburos puede causar graves daños al tejido pulmonar y por ende al pulmón.

El tejido del estómago es relativamente impermeable a los hidrocarburos, es por esta razón, que la ingestión de hidrocarburos, aún la gasolina, usualmente da como resultado una pequeña absorción; sin embargo, el vómito incrementa la oportunidad de introducir hidrocarburos y sus vapores en los pulmones. El tejido pulmonar no es resistente a los efectos de hidrocarburos solventes, por lo que el contacto de estos solventes con el pulmón causa un gran daño.

Existe una gran dificultad en el diagnóstico de problemas agudos asociados con la exposición a hidrocarburos, debido a que muchos de éstos síntomas son los mismos que los producidos por estrés u otros padecimientos relativamente menores, dichos síntomas comunes son: mareo, vértigo, náusea, vómito, diarrea, irritabilidad, pérdida del apetito. Es por ello que es esencial que los trabajadores que realizan labores de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, sean cuidadosos de llevar un monitoreo de los niveles de exposición y de realizarse chequeos periódicos de salud.

Compuestos aromáticos. El benceno y sus alquilbencenos, son considerados generalmente como los componentes más tóxicos de la gasolina. Estos compuestos se pueden presentar en concentraciones tan altas como el 50% del peso de una gasolina premium sin plomo, y pueden producir una intoxicación tanto aguda como crónica en humanos. La principal dificultad con el benceno es que el pequeño anillo bencénico es muy difícil de oxidar bioquímicamente.

Todas las moléculas o sustancias que han sido ingeridas o inhaladas, pasan a través del hígado, donde un grupo de enzimas intenta oxidar a las moléculas de tal forma que se puedan disolver en agua. La mayoría de las moléculas que han sido altamente oxidadas, son generalmente más solubles en la sangre, la cual es esencialmente una solución acuosa. Muchas de las moléculas solubles en agua, son más fáciles que entren al flujo sanguíneo, donde eventualmente son filtradas por los riñones y excretadas en la orina. El benceno no se combina fácilmente con las enzimas del hígado, por lo que éste no puede fácilmente deshacerse de los excesos del benceno, lo que da lugar a que se almacene en el tejido graso. La resistencia del benceno a la oxidación puede explicar la capacidad que tiene éste para causar daños al hígado durante un periodo de tiempo.

Los efectos agudos por intoxicación debido a la inhalación de hidrocarburos, incluyen los síntomas típicos debidos a una depresión de Sistema Nervioso Central como son: dolor de cabeza, náusea, entre otros. Una exposición de 5 a 10 minutos de benceno en una

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

concentración de 20 000 ppm (mg/l) en el aire, tiene consecuencias fatales. Concentraciones de 3 000 a 7500 ppm y una hora de exposición, es suficiente como para producir síntomas por intoxicación. Para exposiciones de 50 a 250 ppm, los efectos son dolor de cabeza y vértigo, pero es rápidamente recuperable con solo tomar aire fresco. Las exposiciones con concentraciones menores de 25 ppm, no han reportado efectos.

La evidencia de absorción en la piel es fácilmente detectable en cualquiera que haya derramado gasolina en sus manos, el olor puede durar algún tiempo aún después de varias lavadas debido a la absorción. El contacto directo en concentraciones elevadas puede causar imitación o dermatitis. La absorción en la piel por cortos periodos de tiempo no es considerada la forma más viable de hacer introducir hidrocarburos al organismo.

Los efectos crónicos debidos a la exposición al benceno tiene entre otros: daño a la médula espinal y posible propagación de cáncer. Los primeros síntomas en aparecer debidos a una exposición crónica al benceno son reversibles, es decir, son recuperables, dichos síntomas son entre otros: leucopenia (decremento de los glóbulos blancos), anemia (decremento de los glóbulos rojos) o trombocitopenia (decremento en la cantidad de plaquetas); los niveles de concentración más bajos capaces de producir esos efectos son de 40 a 50 ppm por un periodo de años.

El efecto crónico más importante debido a la exposición del benceno es la destrucción de las células de la médula espinal. Una continua exposición da lugar a un daño severo a la médula espinal, lo que a su vez tiene como consecuencia una pancitopenia, una deficiencia de todos los elementos constitutivos de la sangre y un incremento en la susceptibilidad de contraer infecciones y producir hemorragias. Eventualmente, si la exposición es en forma continua, se puede presentar algún tipo distintivo de leucemia.

La OSHA ha definido los límites máximos de exposición al benceno en lugares donde se trabaja con hidrocarburos en un promedio de 40 horas a la semana, cuyo límite máximo resulta ser de 10 ppm (NIOSH).

El tolueno forma parte de una gasolina de un 4 a un 7%. El principal riesgo asociado a una exposición aguda por concentraciones de tolueno en grandes niveles es una depresión del Sistema Nervioso Central. El tolueno se presenta como mucho menos tóxico que el benceno debido a que las encimas del hígado pueden oxidar tolueno en forma más eficiente. Una exposición controlada en humanos a razón de 200 ppm (200mg/l) durante 8 horas produce una leve fatiga, debilidad, confusión, lagrimeo y comezón de la piel; para exposiciones del orden de 600 ppm los síntomas adicionales son: euforia, dolor de cabeza, vértigo, pupilas dilatadas y náusea; los síntomas producidos por exposiciones de 800 ppm son más severos y requieren de varios días para desaparecer. Los tiempos de reacción al tolueno más críticos han sido observados en humanos después de 20 minutos a una exposición de 300 ppm y después de 7 horas para una exposición de 200 ppm. La irritación en los ojos es detectada para niveles de concentración de vapores de tolueno del orden de 300 a 400 ppm.

**CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL
SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.**

Tabla 4.2 Efectos a la salud de algunos compuestos representativos de hidrocarburos y las concentraciones límites promedio a las cuales producen dichos efectos.

Producto	Compuesto	Concentración	Efecto potenciales a la salud.
gasolina	Benceno	10	Nausea, vómito y puede causar cáncer.
	Tolueno	100	Depresión del Sistema Nervioso Central, fatiga, debilidad, irritación de ojos.
	Xilenos	100	Depresión del Sistema Nervioso Central, irritación de la piel.
	Etilbencenos	100	Depresión del Sistema Nervioso, náusea, vómito, daño del hígado y del riñón.
	n-Hexano	50	Nausea, vértigo, vómito, severas parálisis pero recuperables.
	Otros hexanos isómeros	500	Irritación de la piel y de las mucosas.
	Octano	300	Debilidad, fatiga, dolor de cabeza, náusea, vómito, anorexia y diarrea.
	Etilbenceno dibromado	0	Puede desarrollar cáncer
	Etileno diclorado	10	
	Tetraetilo de plomo	0.1	Debilidad, fatiga, dolor de cabeza, náusea vómito, anorexia, diarrea.
	Tetrametilo de plomo 0.15		
De mediana destilación.	Naftaleno	10	Debilidad, agitación, vértigo, vómito
	Benzo antraceno	0	Puede desarrollar cáncer
	Benzo pireno	0	Puede desarrollar cáncer
	Crisoles y Fenoles	5	Irritación de las mucosas, piel y ojos.
Combustibles residuales	Benzo antraceno	0	Puede desarrollar cáncer.
	Benzo pireno	0	Puede desarrollar cáncer.
	Criseno	0	Puede desarrollar cáncer.

Los xilenos representan aproximadamente del 6 al 8% del peso de las gasolinas. Los efectos adversos a largo plazo en humanos por exposición a xilenos son debidos principalmente por inhalación en grandes niveles en sitios contaminados. Los principales efectos son similares a los efectos producidos por otros alquilbencenos, dichos efectos son: depresión del Sistema Nervioso Central, pérdida de la coordinación, náusea, vómito y dolor

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

abdominal. Los xilenos tienen un efecto narcótico sobre el Sistema Nervioso Central, exposiciones del orden de 90 ppm causa una pérdida de los reflejos. Los xilenos tienen efectos variables sobre el hígado y el riñón, además de que es un irritante del tracto gastrointestinal; tanto en estado líquido como gaseoso son irritantes a la piel y a los ojos.

Los efectos crónicos debidos a la exposición de xilenos son parecidos a aquéllos que se deben a una exposición del tipo agudo, pero éstos últimos son más severos. Dolor de cabeza, irritabilidad, fatiga, desorden digestivo y somnolencia, son algunos síntomas que han sido reportados debido a la exposición de xilenos. La inhalación de una gran concentración de xilenos puede causar agitación, pérdida de la memoria, debilidad, vértigo, dolor de cabeza y anorexia.

El etilbenceno irrita la piel, ojos y la parte superior del tracto respiratorio. La absorción sistemática provoca depresión del Sistema Nervioso Central. No existe mucha información acerca de casos de exposición en humanos, por lo que dicha información esta limitada. En concentraciones de 200 ppm el vapor irrita los ojos, para una concentración de 2 000 ppm, la irritación de ojos y el lagrimeo son inmediatos.

Alcanos. Los hidrocarburos alifáticos en general, y los alcanos en particular tienen un efecto depresivo o narcótico sobre el sistema nervioso humano, la absorción puede ocurrir a través de la piel o los pulmones, pero es mucho más rápido a través de los pulmones. Los síntomas debidos a la intoxicación por hidrocarburos alifáticos, son parecidos a los producidos por los hidrocarburos aromáticos, los cuales son: vértigo, náusea y pérdida de la coordinación; los síntomas son reversibles si se respira aire fresco. Los alcanos son buenos disolventes de lípidos y pueden disolver los tejidos lípidos y las membranas celulares si son aspirados por los pulmones.

El n-hexano es el más tóxico de los alcanos, este compuesto está presente en un 11% a un 13% en relación al peso de una gasolina. Una aguda exposición ocurre a través de la inhalación. Vértigo, dolor de cabeza y náusea son los primeros síntomas en ser notados debidos a la exposición. En grandes concentraciones provoca depresión del Sistema Nervioso Central hasta caer en un estado narcótico. Los efectos previos al estado narcótico ocurre con una concentración de vapor de 1 500 a 2 500 ppm.

La exposición crónica a los vapores del n-hexano provoca daños al sistema nervioso. El primer signo clínico por daño al sistema nervioso es el sentir entumidos los dedos de los pies y manos. Una exposición más prolongada provoca un incremento en la entumidés y pérdida de la flexibilidad y sensibilidad de los músculos. La recuperación de la parálisis es gradual, y se puede lograr de 6 a 12 meses después del cese de la exposición, mientras que los casos más severos toman años para recuperarse.

El octano es un hidrocarburo, también presente en la gasolina, que inhalado puede llegar al interior de los pulmones, y puede causar una muerte rápida debido a un paro cardiaco, paro respiratorio y/o asfixia. El octano tiene un efecto narcótico similar al hexano, una prolongada exposición sobre la piel causa quemaduras y ampollas.

El isopentano es un depresor del Sistema Nervioso Central, los efectos debidos a una toxicidad aguda son similares a los efectos debidos a la intoxicación por alcohol, los cuales

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

incluye: exaltación, vértigo, dolor de cabeza, náusea, confusión y pérdida de la coordinación; una prolongada exposición provoca pérdida del conocimiento.

Existen algunas sustancias que no son propiamente hidrocarburos por contener algunos elementos como el plomo, el bromo, el cloro. El plomo se agrega a la gasolina para proporcionarle mayor octanaje a través de dos compuestos: el tetraetilo de plomo y el tetraetilo de plomo. Existen otros dos compuestos que se agregan a la gasolina para evitar la acumulación de depósitos en válvulas, dichos compuestos son el etileno diclorado y el etileno dibromado.

El tetraetilo de plomo puede ser absorbido por la piel, inhalado como vapor o ingerido, en niveles bajos de concentración se requiere de un largo tiempo para producir síntomas, para niveles de exposición del orden de 100 mg/m^3 por hora se producen síntomas agudos. Una leve exposición al plomo produce debilidad, fatiga, jaqueca, náusea, vómito y diarrea, mientras que una prolongada exposición provoca confusión, delirio, excitación, catatonía, pérdida del conocimiento y hasta la muerte.

El etileno dibromado ha sido identificado como una sustancia cancerígena, en experimentos realizados en animales; el etileno diclorado tiene las mismas características, aunque en menos grado. Los síntomas agudos producidos por una exposición al etileno dibromado son: vómito, diarrea, dolor abdominal y depresión del Sistema Nervioso Central.

Dentro del proceso de destilación del petróleo crudo, hay algunos compuestos que destilan a temperaturas medias, en relación al resto de los compuestos obtenidos de la destilación. Estos compuestos incluyen a la querosina, combustibles para avión, diesel y aceite combustible No 1 y 2, los cuales a su vez están formados por parafinas (alcanos), cicloparafinas (cicloalcanos), aromáticos y olefinas (alquenos) desde aproximadamente C_9 a C_{25} ; los compuestos aromáticos incluyen los alquilbencenos, toluenos y naftalenos.

La querosina tiene la mayor cantidad de hidrocarburos aromáticos en relación con los otros compuestos de mediana destilación, como alquilbencenos y naftalenos, siendo éstos los principales componentes. La querosina produce irritación en la piel y en las membranas de la mucosa.

Los combustibles diesel incluyen un gran porcentaje de hidrocarburos aromáticos como: naftalenos, acenafthalenos, antracenos y fenantrenos; la exposición del diesel sobre la piel es tóxica, en especial para los riñones cuando ha sido absorbido.

El aceite combustible No 2 (combustible para calentadores), contiene un gran porcentaje en relación al volumen de bencenos y naftalenos, en comparación con otros compuestos como la querosina y el diesel.

Todos éstos productos tienen formas similares de entrada al organismo: ingestión, absorción e inhalación. A semejanza con los hidrocarburos ligeros, la exposición por inhalación produce efectos muy serios. Grandes niveles de vapor son irritantes para los ojos, las membranas de las mucosas y el tejido pulmonar. Los riesgos más grandes de exposición lo tienen la gente que trabaja con combustibles o que están involucrados en las actividades de remediación de suelos contaminados.

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL QUE PRODUCE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA POR HIDROCARBUROS.

Los efectos agudos tóxicos son similares a los efectos por exposición a hidrocarburos alifáticos, los síntomas son: náusea, dolor de cabeza, confusión e irritación del sistema respiratorio. Los vapores son irritantes a los ojos, las mucosas y al tejido pulmonar y puede tener un efecto adverso sobre la piel debido al efecto solvente.

Los efectos crónicos son principalmente debidos a la exposición de compuestos aromáticos, tales como los que se encuentran en combustibles usados en aeronaves militares y en el aceite combustible No. 2.

Resumiendo, la toxicidad y los efectos adversos a la salud debidos al derrame de hidrocarburos en el suelo y agua subterránea se dan principalmente en los trabajadores que laboran en las actividades de remediación, ya sea por inhalación o por absorción en la piel. también pueden haber casos de ingestión cuando el agua subterránea contaminada ha sido ingerida directamente o usada para riego. Los efectos pueden ser agudos o crónicos, según el tiempo y grado de exposición. Casi todos los síntomas presentan una depresión del Sistema Nervioso Central y en casos crónicos puede desarrollar cáncer.

IV.4 Ejemplos de casos en los que se ha presentado derrames de hidrocarburos.

El miércoles 11 de septiembre de 1996, se publicó un artículo en el periódico el Norte, en el cual se culpa a Petróleos Mexicanos y a la empresa Zapata Internacional de hacer un mal manejo de los lodos con hidrocarburos generados en la mayoría de los 120 pozos de extracción de gas natural, los cuales se ubican en el municipio de Dr. Coss, del Estado de Nuevo León.

El Norte publicó además que son alrededor de 4 500 hectáreas que están contaminadas con chapopote y aguas aceitosas, lo que amenaza a la salud de los animales de agostadero y perjudica la economía de los ganaderos.

El delegado estatal de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente en Nuevo León, dijo que el principal problema detectado por él y sus inspectores es el mal manejo de los lodos que se obtienen de los pozos de extracción de gas.

En el mismo artículo, se hace mención de que los registros públicos por problemas con hidrocarburos en suelo nuevoleonés se remontan hasta 1987, cuando cerca de 3 millones de litros de diesel y gasolina se fugan de un ducto y dañan un rancho en el municipio de Cadereyta, N.L.

A nivel internacional se han presentado algunos derrames como los que a continuación se mencionan:

En Calgary, Alberta, Canadá se suscitó un serio derrame de productos derivados del petróleo en una planicie inundable de una planta de asfalto.

En un acuífero no confinado y arenoso, situado en Borden, Ontario, Canadá, se presentó un derrame de hidrocarburos (bencenos, toluenos, etilbencenos y xilenos). Las tecnologías de remediación aplicadas en estos dos últimos casos se verán en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

CAPITULO V

V.- MEDIDAS DE ATENUACIÓN Y MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES.

Para atenuar y mitigar los impactos que provoca la contaminación del suelo y agua subterránea por hidrocarburos, se procede a la realización del saneamiento o remediación del sitio contaminado, para ello es necesario efectuar una caracterización del suelo y agua contaminados y posteriormente se aplica uno o varios métodos de remediación para cada una de las fases de la contaminación.

Antes de entrar en materia de éste capítulo es necesario abordar lo referente a la legislación que tienen que ver directamente con la contaminación de suelos y agua subterránea y su remediación.

V.1 Marco legal para la remediación de suelos en México.

Los residuos peligrosos son aquellas sustancias y agentes que tienen características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables o biológico-infeccioso (propiedades CRETIB). Muchos de los hidrocarburos presentan algunas de estas características, por lo tanto se les considera residuos peligrosos.

La legislación vigente en la materia indica que el responsable de llevar a cabo las actividades de remediación de sitios contaminados por residuos peligrosos ocasionados por fuga o derrame, corresponde al que ocasionó dicha acción.

La remediación de sitios contaminados tiene sus base legales dentro de la Ley General del Equilibrio Ecológico, dentro de sus artículos que hacen mención al tema están los siguientes:

- Artículo 1. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente, en el territorio nacional y la zonas sobre las que nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por

- Fracción III** La preservación, la restauración y el mejoramiento al ambiente.
- Artículo 5** Son asuntos de alcance general de la nación o interés de la Federación.
- Fracción IV** Las acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción federal.
- Fracción XIX** La regulación de las actividades relacionadas con materiales o residuos peligrosos.
- Artículo 98** Para la protección de aprovechamiento de suelo se consideran los siguientes criterios.
- Fracción V** La realización de las obras públicas o privadas que por si mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración.
- Artículo 134** Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:
- I. Corresponde al estado y a la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
 - II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;
 - III. Es necesario racionalizar la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; e incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje;
 - IV. La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas.
- Artículo 135** Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:
- I. La ordenación y regulación del desarrollo urbano;
 - II. La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;
 - III. La autorización para la instalación y operación de confinamientos o depósitos de residuos; y
 - IV. El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.
- Artículo 136** Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:
- I. La contaminación del suelo;
 - II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;
 - III. Las alteraciones en el suelo que alteren su aprovechamiento, uso o explotación.

IV. Riesgos y problemas de salud.

Artículo 151 La instalación y operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos, requerirá de la autorización previa de la Secretaría.

Reglamento en materia de Residuos Peligrosos:

Artículo 42 Cuando por cualquier causa se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos peligrosos, durante cualquier operación que comprenda su manejo, el generador y, en su caso, la empresa, que preste el servicio, deberá dar aviso inmediatamente de los hechos a la Secretaría, aviso que deberá ser ratificado por escrito dentro de los tres días siguientes al día en que ocurren los hechos, para que dicha dependencia esté en posibilidades de dictar o en su caso promover ante las autoridades competentes, la aplicación de las medidas de seguridad que procedan sin perjuicio de las medidas que las mismas autoridades apliquen en el ámbito de sus competencias.

Fracción VI Medidas adoptadas para la limpieza y restauración de la zona afectada.

Artículo 10 Se requiere la autorización de la Secretaría para instalar y operar sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos, así como para prestar servicios en dichas operaciones sin perjuicio de las disposiciones aplicables en materia de salud y de seguridad e higiene en el trabajo.

En base a lo expuesto, es importante llevar a cabo los procedimientos técnicos-administrativos necesarios para que las empresas que ofrezcan sus servicios para realizar la remediación de suelos, se desarrollen dentro del marco jurídico que señala la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, sus Reglamentos en materia de Impacto Ambiental, Residuos Peligrosos y la Normatividad correspondiente. En el anexo A se muestra el procedimiento administrativo para la restauración de suelos en México.

V.2 Caracterización de suelos y agua subterránea contaminados por hidrocarburos.

La caracterización de la contaminación es la fase inicial de todo proyecto de saneamiento para conocer las condiciones actuales de los contaminantes, sus fases, así como las características físicas del suelo y del agua subterránea más relevantes y que afectan tanto a los mecanismos de migración como las técnicas adecuadas para su saneamiento.

Las características antes mencionadas tienen los siguientes puntos relevantes en la caracterización:

- 1.- Capacidad contaminante.
- 2.- Tipo de hidrocarburos y su toxicidad.
- 3.- Capacidad de migración de los contaminantes y sus fases.
- 4.- Geohidrología y su relación entre los mecanismos de migración y las técnicas de

saneamiento.

- 5.- Riesgos a la salud y al ecosistema.
- 6.- Riesgos de explosión.
- 7.- Medidas de emergencia.
- 8.- Selección de las tecnologías y equipos de saneamiento.
- 9.- Tiempos y costos de saneamiento.

Para lograr la caracterización del sitio contaminado se requiere de la recopilación de información e inspección preliminar así como de la investigación inicial de la contaminación, lo cual incluye exploración y delimitación de la pluma contaminante. En los siguientes apartados se describen las etapas de la caracterización del sitio contaminado. En la Figura 5.1 se muestra el diagrama de flujo para la caracterización de un suelo y acuífero contaminados.

V.2.1 Recopilación de información.

La información que debe recopilarse de la zona contaminada es la siguiente:

- Plano de implantación de las instalaciones potencialmente contaminantes por hidrocarburos.
- Descripción de las operaciones llevadas a cabo e identificación de áreas.
- Actividades llevadas a cabo en el pasado potencialmente contaminantes y sus instalaciones.
- Relación de hidrocarburos manejados.
- Almacenamiento y distribución de hidrocarburos.
- Existencia de instalaciones enterradas.
- Datos geohidrológicos, fundamentalmente profundidad de los mantos freáticos, dirección del flujo del acuífero y parámetros hidráulicos, si se dispone de ellos.
- Explotación de los acuíferos, número y características de pozos existentes, gastos de extracción, población afectada.
- Perfiles estatigráficos, si se dispone de ellos.
- Lineamientos medioambientales locales.

V.2.2 Inspección preliminar

La inspección preliminar del sitio consiste en las actividades que se enlistan a continuación:

- Contrastar en campo toda la información recabada.
- Definir la áreas visiblemente contaminadas.
- Identificar instalaciones o zonas potencialmente contaminadas (en uso o fuera de operación).
- Comprobar espacios para traslado de maquinaria y vías de acceso.
- Verificar áreas pavimentadas.
- Comprobar la disponibilidad de agua y energía eléctrica.

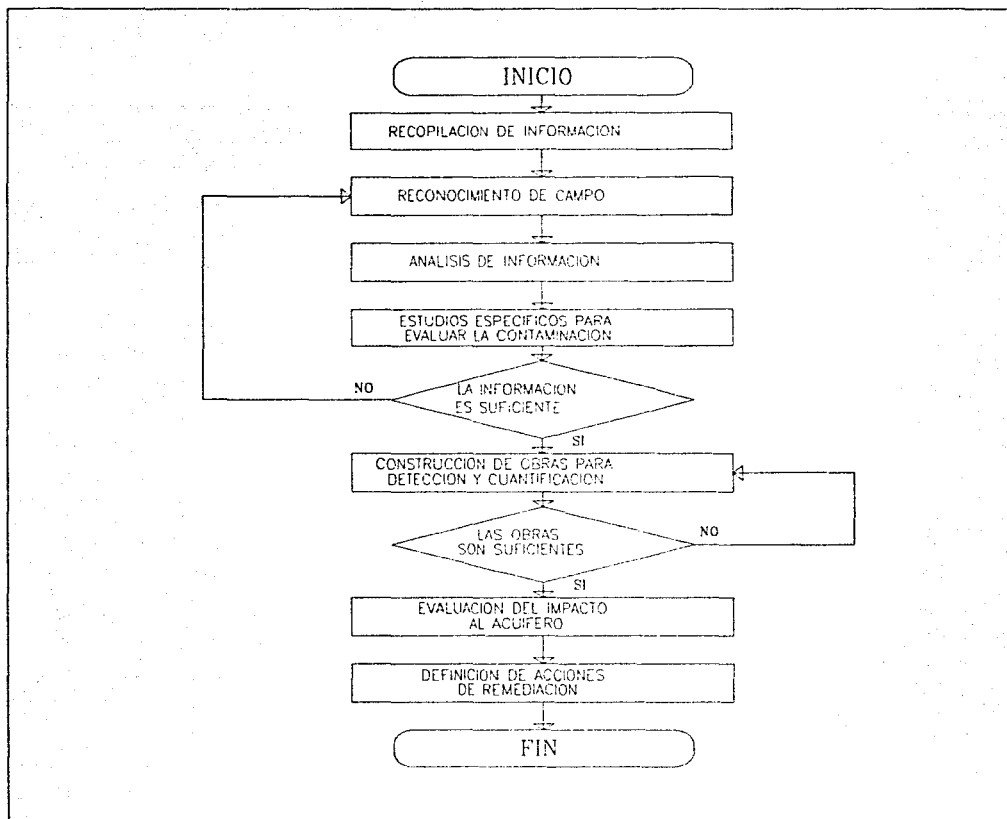


FIG.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CARACTERIZACION DE UN SUELO Y ACUIFEROS CONTAMINADOS.

V.2.3 Investigación inicial de la contaminación.

Esta parte de la caracterización consiste en tratar de determinar el lugar idóneo donde serán perforados los pozos de monitoreo y el lugar donde se tomarán muestras de suelo y agua subterránea, para ello es necesario apoyarse en métodos de investigación preliminar de la contaminación del subsuelo, tales como los que a continuación se explican.

Métodos de captación activa de gases del subsuelo. Consisten en la succión de los gases del subsuelo mediante perforación con sonda hueca en diferentes puntos del sitio. Los gases son analizados, normalmente "in situ" mediante un cromatógrafo de gases portátil.

Métodos de captación pasiva de gases del subsuelo. Consisten en la adsorción de los gases del subsuelo en carbón activado, mediante la instalación de tomamuestras en campo y su posterior análisis en laboratorio por espectometría de masas.

Dentro de los métodos de captación pasiva de gases del subsuelo, se encuentra la tecnología PETREX, la cual presenta las siguientes ventajas:

- Se detectan todos los compuestos.
- Alta sensibilidad.
- Identifica compuestos pesados semivolátiles y mezclas complejas (Diesel y Gasolina).
- Se captan gases aún en condiciones meteorológicas adversas (frío, lluvia, viento) y en suelos poco permeables.
- Mínima interrupción de las operaciones que se llevan a cabo.
- Instalación con herramientas manuales. Acceso a zonas difíciles.
- Operación que se lleva a cabo de forma muy discreta.

Métodos geofísicos y sísmicos. Consisten en la creación de una onda compresional sísmica en un punto y la medición del tiempo de llegada de las ondas a una red de geófonos.

Entre los métodos geofísicos el más popular es el resistivo que consiste en la introducción de corriente eléctrica en el suelo y la medición del voltaje de respuesta entre los dos electrodos a diferentes distancias de los mismos. Estos métodos, aunque pueden localizar la contaminación no permiten la identificación de los contaminantes ni su cuantificación.

Una vez identificados los sitios idóneos donde se perforarán los pozos de monitoreo, se procede a su perforación.

La perforación de pozos someros de monitoreo, se puede realizar mediante muestreadores manuales o perforadoras sencillas. Son comunes los rotomartillos accionados por energía eléctrica. El rotomartillo inca barras de acero inoxidable generalmente de 3/4" de diámetro. La perforación de este tipo de pozos generalmente alcanza de 2 a 6 metros de profundidad.

Mayores profundidades requieren máquinas perforadoras especiales que incluyen tuberías para perforación y muestreo de suelo, denominadas "augers".

Una vez perforados los pozos someros, se pueden realizar mediciones in situ de hidrocarburos volátiles (HCV), oxígeno, explosividad y dióxido 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.

Debido a que los microorganismos consumen oxígeno y desechan bióxido de carbono durante el proceso de degradación, la medición y mapeo de éstos parámetros 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 que se encuentran flotando sobre el nivel freático.

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

Muestras de suelo. Con el objeto de definir la estratigrafía 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.

Para el muestreo a profundidades mayores de 10 metros, generalmente se utilizan máquinas perforadoras rotatorias, equipadas con tuberías de perforación especiales para muestreo, denominadas como ya se mencionó "augers".

Muestras de gas. Una forma de obtener muestras de gas en los pozos someros se realiza colocando un tubo de 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. También son comunes los cromatógrafos portátiles que pueden realizar el análisis en el sitio.

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.

V.3 Remediación de suelos y agua subterránea

Una vez que se ha hecho la caracterización del suelo y agua subterránea contaminados, se procede a dar inicio a las operaciones de remediación.

Como ya se mencionó en el capítulo III, existen muchos factores que afectan la migración o flujo de los contaminantes, por lo que los requerimientos de remediación frecuentemente se necesitan en más de un solo sistema para cada caso. En el descenso de los

hidrocarburos en el subsuelo pueden pasar tres cosas: que el contaminante sea adsorbido por las partículas de suelo, intercepción por una capa impermeable del suelo o llegar al acuífero. Los hidrocarburos menos densos que el agua llamados LNAPL'S (aromáticos de las gasolinas y petróleo crudo), flotarán sobre el nivel freático al llegar al acuífero, mientras que los más densos que el agua llamados DNAPL'S migrarán hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección del flujo del agua subterránea.

El problema reside en que el material adsorbido en las partículas de suelo es difícil de encontrar y remover. Además, los componentes del derrame cambian debido a la volatilización y solubilidad en agua; también pueden transformarse por la biota del suelo. Las bacterias en el suelo pueden cambiar la estructura de los compuestos orgánicos. Por lo tanto, los compuestos orgánicos encontrados en el suelo pueden ser diferentes de los originalmente descargados.

El hidrocarburo se puede remover de varias formas. Para contaminación a poca profundidad se puede excavar el material y quemarlo en rellenos sanitarios controlados o darle algún tratamiento de separación del material. Los métodos más usados en contaminación a profundidades más grandes, pueden ser el lavado, recuperación, recarga o los tratamientos in situ.

La elección de los métodos de tratamiento o de remoción de hidrocarburos va a depender de la caracterización del suelo y agua subterránea contaminados que se haya realizado.

El criterio que se debe seguir para la elección de los métodos de remediación radica en que además de eliminar o mitigar el problema, deben de hacerse en un tiempo razonable y que sean económicamente aceptables.

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

Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de diferentes países establecieron como una actividad prioritaria el desarrollo de técnicas de todo tipo para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos.

Las actividades de investigación realizadas dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo fisicoquímico, como la incineración y la solidificación/estabilización. Posteriormente surgieron otras innovativas como la extracción con vapor, el lavado de suelo y la extracción con solventes.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente aplicaron el composteo y el biocultivo (land-farming), así como el uso de reactores con cepas puras de microorganismos degradadores combinado con el de bombeo e inyección del agua subterránea. Posteriormente se aplicaron otras técnicas innovativas como la bioestimulación y el bioventeo.

De manera simultánea al desarrollo de tecnologías de remediación se dio el auge de técnicas para la caracterización y monitoreo geohidrológicos. De esta manera se desarrollaron

diferentes arreglos de piezómetros que permiten conocer de una manera rápida la conductividad hidráulica, así como técnicas de perforación para permitir la toma de muestras inalteradas, sin dejar atrás el desarrollo de modelos matemáticos y de paquetes de cómputo para generar mapas tridimensionales de la distribución de contaminantes.

Algunas técnicas de remediación o saneamiento para suelos y acuíferos contaminados, se describirán en los párrafos siguientes.

V.3.1 Excavación y extracción.

Una medida para la eliminación del problema de contaminación de suelo y agua subterránea por hidrocarburos, es la excavación y extracción del material del subsuelo, el cual es transportado a otra zona en donde recibe el tratamiento necesario para no producir nuevamente contaminación. La zona excavada es rellenada con material arcilloarenoso libre de contaminantes.

Una variante del método es la llamada separación por gravedad, que es quizás la más simple de todas las técnicas cuando se trata de tratamiento de suelo. El suelo es excavado y recolectado en grandes depósitos. Los hidrocarburos migran a través de él debido a las fuerzas de gravedad, y son recolectados en los depósitos con un contenedor en la base. El problema de remover los hidrocarburos residuales adsorbidas por las partículas de suelo permanecerá (este método puede ser fácilmente combinado con composteo para separar el resto de los hidrocarburos).

La aplicación de éste método se encuentra limitado por la magnitud del área por excavar, así como por el tipo de construcciones que existen en los alrededores.

El primer paso consiste en ubicar el área afectada. Las zonas donde el volumen por excavar es poco, son más factibles de atacar por este método que las áreas donde la extensión de la mancha es grande.

Otro factor directamente involucrado en la factibilidad de aplicación de éste método es la permeabilidad de los materiales. En sitios con permeabilidad media a alta, el hidrocarburo puede circular rápidamente y abarca grandes extensiones, lo que vuelve inapropiado al método de excavación.

Otra variante de éste método sería el uso de trincheras o diques como medio de intercepción del hidrocarburo derramado. Este método solo es práctico cuando el nivel de agua no se encuentra a más de tres metros de profundidad, aproximadamente. Esta limitación se impone por el equipo disponible para el dragado, la extensión en la cual el terreno soportará las paredes del dique sin derrumbarse, y la cantidad de tierra que debe ser removida. Por ejemplo los diques en terrenos no consolidados deben tener paredes de pendiente suave provocando que sea removida una cantidad excesiva de tierra.

La trinchera de intercepción debe ser construida a lo largo de todo el frente de la pluma contaminante y estar tan cerrada como sea posible (Fig. 5.2), sin perjuicio para cualquier construcción en la cual el producto haya penetrado. El dique necesita ser solo lo suficientemente ancho para acomodar las bombas y los dispositivos de remoción del hidrocarburo necesarios. La membrana impermeable, aunque usualmente innecesaria, puede

ser instalada aguas abajo en la pared, para prevenir el flujo progresivo del hidrocarburo, pero que permita el paso del agua.

Hay dos tipos principales de sistemas de recuperación por trinchera. El primero es una trinchera abierta donde se utiliza un desnatador para remover la sustancia. Aunque este método produce virtualmente agua libre de hidrocarburos, la proporción de recuperación es muy lenta ya que depende del gradiente natural que transporta el hidrocarburo a la trinchera. El segundo sistema usa una bomba para remover la sustancia de la trinchera. Este sistema es más efectivo por la rápida recuperación que se da a través de los gradientes creados hacia la trinchera. Algunas veces se pueden emplear pozos de inyección para alterar el gradiente hidráulico y así mejorar la recuperación.

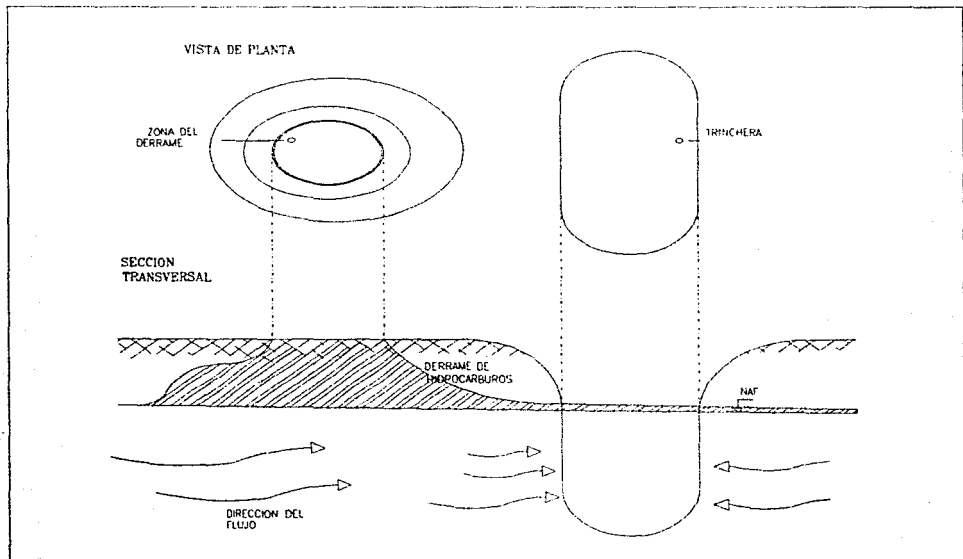


FIGURA 5.2

INTERCEPCION DE UN DERRAME
MEDIANTE TRINCHERAS.

Existen varias ventajas en el uso de trincheras de recuperación de hidrocarburos: los materiales y equipos necesarios para instalar el sistema están usualmente disponibles localmente; este método es sencillo y puede ser relativamente rápido. La trinchera, sin embargo, puede bisectar el ancho total del derrame haciendo esta técnica solo factible para derrames de extensión limitada.

Debido a que los productos volátiles presentan riesgos de explosión y/o pueden producir mezclas sofocantes, se deben llevar a cabo pruebas de explosión antes de que los trabajos comiencen y mientras están en progreso. Cuando la calidad del aire sea insegura, se deben usar aparatos de respiración, mientras se llevan a cabo las operaciones de remediación.

Se debe tener cuidado de que esas excavaciones no rompan a través de capas impermeables en el subsuelo (tal como capas de arcilla), ya que esto puede causar que el derrame penetre más abajo en el subsuelo. Además, cualquier excavación debe ser hecha tan pronto como sea posible después de que ha ocurrido el derrame para minimizar la cantidad de suelo que debe ser removido. Finalmente, se recomienda que la excavación solo sea hecha cuando existen fundamentos o bases obvias de contaminación. La remoción de cuantiosas cantidades de suelo contaminado resulta tener un costo elevado, y deben tomarse en cuenta primero los métodos de tratamiento in situ, a menos que existan riesgos a la salud.

V.3.2 Volatilización.

Este método puede ser de utilidad cuando el contaminante tiende a volatilizarse, como las gasolinas. Aprovechando esta propiedad, el método de eliminación del contaminante consiste en inyectar aire al subsuelo a través de pozos. El aire inyectado es succionado y extraído mediante otro pozo y en su trayecto arrastra compuestos volátiles. Este método llega a ser efectivo y de bajo costo en ciertas condiciones de porosidad y permeabilidad.

Un ejemplo de sistema utilizado para la ventilación del subsuelo y el arrastre de compuestos volátiles se muestra en la figura 5.3. Para lograr un incremento en el grado de volatilización, se preinyecta aire con una cierta temperatura. En dicha figura se puede observar un calentador de aire y un ventilador con el cual el aire es inyectado al subsuelo a través de una serie de pozos. El aire y los hidrocarburos volátiles arrastrados a su paso por el subsuelo, son extraídos mediante otra serie de tuberías y pozos.

En la figura 5.4 se muestra un sistema de aireación para la extracción de volátiles del subsuelo en el cual se incluyen cuatro pozos centrales en los que se inyecta aire y nueve pozos exteriores a través de los cuales se extrae aire y compuestos volátiles del subsuelo.

Una variante de este sistema es la llamada ventilación del subsuelo; frecuentemente los hidrocarburos volátiles (como las gasolinas) permanecen en el subsuelo en forma de vapor y migran a los cimientos de construcciones en el área de derrame. Esto será más grave en sótanos o cobertizos donde los materiales de tierra naturales están aún expuestos dentro de la estructura. El problema puede mitigarse instalando una serie de respiradores artificiales pasivos para eliminar los vapores, técnica que es especialmente útil durante los meses de invierno cuando las heladas impiden que los vapores escapen de forma natural a través de los sedimentos de la superficie. Se puede equipar también si es necesario con un ventilador de succión.

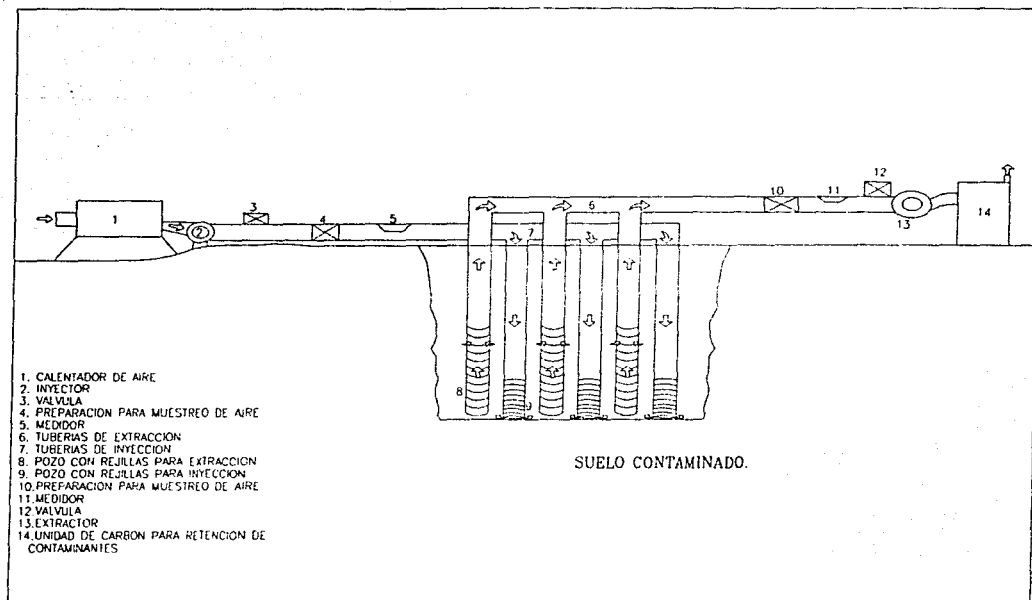


FIGURA 5.3 VENTILACION DEL SUBSUELO Y ARRASTRE DE HIDROCARBUROS VOLATILES

Una limitante del método de ventilación, se presenta cuando el derrame de hidrocarburos contiene baja cantidad de volátiles, debido a que se requiere el empleo de vapor o aire caliente.

Para suelos de alta a mediana permeabilidad y porosidad, este sistema se considera factible. El sistema de extracción de vapores usando pozos ha sido exitoso en suelos con un rango de permeabilidad de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s. Puede requerirse de un separador de aire-agua para proteger al soplador contra el agua, en el aire extraído.

Cuando el tipo de suelo es una arcilla y por ende de baja permeabilidad, se requiere de una tecnología de modificación de la conductividad hidráulica para facilitar el flujo de los volátiles.

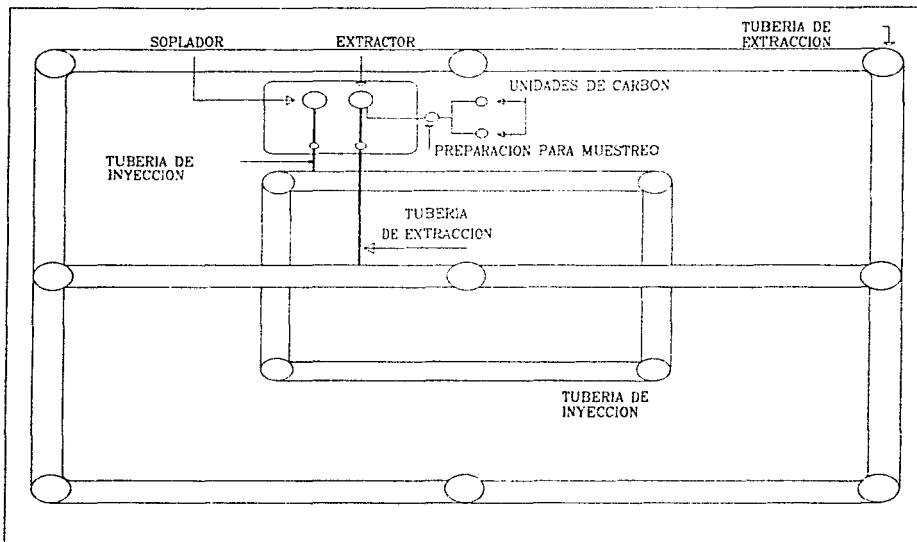


FIGURA 5.4

SISTEMA EXPERIMENTAL DE VOLATILIZACION

Después de que el vapor es dispersado a través de los poros del suelo, puede ocurrir que dichos gases escapen a la atmósfera, se adsorban en las partículas de suelo, se destruyan por degradación, o se vuelvan a disolver dentro de la percolación de agua de lluvia.

Los gases venteados que escapan a la atmósfera pueden no ser aceptables y se puede requerir la recuperación de los vapores. La extracción de aire se puede auxiliar mediante un extractor. Los hidrocarburos volátiles ya en la superficie pueden ser retenidos mediante un filtro de carbón activado. Se puede emplear un evaporador/condensador como un sistema de recuperación del producto antes de la columna de carbón activado.

V3.3 Biodegradación

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

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

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

La biodegradación o degradación biológica de hidrocarburos implica su descomposición por microorganismos para finalmente producir células microbiales, dióxido de carbono y agua. La biodegradación en el suelo y agua subterránea depende de varios factores que influyen en el grado de crecimiento de los microorganismos y en su actividad microbiana, dichos factores son:

- * Disponibilidad y tipo de aceptor final de electrones.
- * Disponibilidad de nutrientes y micronutrientes.
- * Disponibilidad y biodegradabilidad del hidrocarburo a degradar, el cual puede ser usado como sustrato.
- * Presencia y concentración de productos tóxicos (arsénico, cianuro).
- * pH, temperatura y disponibilidad de agua, los cuales afectan directamente la actividad de las enzimas encargadas de la degradación.
- * Competencia entre sustratos.

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

El aceptor final de electrones es el que define la vía metabólica de respiración que utilizan los microorganismos involucrados y debe asegurarse su presencia en las concentraciones requeridas para estimular la actividad degradadora. De acuerdo al aceptor final de electrones, el metabolismo microbiano puede ser aerobio cuando se lleva a cabo en

presencia de oxígeno, o bien anaerobio cuando compuestos inorgánicos oxidados como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono actúan en lugar del oxígeno.

Lo primero que debe hacerse para evaluar la posibilidad de aplicar una tecnología de biorremediación es realizar una caracterización microbiológica. Esto permitirá identificar el tipo de metabolismo que sigue la población microbiana, es decir, el aceptor final de electrones preferido para la degradación del contaminante de interés.

En general existe una baja población de microorganismos en el suelo, se dice que hay de 1 a 10 millones de bacterias por gramo de sólidos, los cuales se encuentran adheridos a las partículas de suelo.

Los tipos de microbios que atacan a los hidrocarburos incluyen bacterias, hongos, algas y protozoarios; todos se encuentran comúnmente en la superficie del suelo y en el agua. Las bacterias son las principales degradadoras, tienen una gran población y son los microorganismos del suelo más bioquímicamente activos. Su muy pequeño tamaño les permite llegar al subsuelo. Han sido encontradas bacterias aerobias a profundidades de varios miles de pies, aunque tienen más limitada la actividad en esas profundidades debido a los bajos niveles de oxígeno y nutrientes. Las bacterias anaerobias pueden vivir donde se encuentra el oxígeno en compuestos químicos, pero degradan a los hidrocarburos muy lentamente comparadas con las del tipo aerobio.

El oxígeno que requieren los microorganismos para degradar a los hidrocarburos en forma aerobia, es proporcionado usando aire, oxígeno puro, peróxido de hidrógeno u ozono. Además, la rápida degradación del suelo requiere ciertos nutrientes tales como nitrógeno (comúnmente en la forma de nitrato de amonio) y fósforo (comúnmente en la forma de fosfatos). Son necesarios otros nutrientes tales como minerales en pequeñas cantidades, las cuales se encuentran usualmente en el suelo en medida suficiente.

Las bacterias no pueden crecer en suelos completamente secos ya que requieren el agua para transportar el alimento disuelto (en este caso, los hidrocarburos) dentro de las células bacterianas. Ellas crecen mejor en tierra suelta y húmeda.

Como ya se mencionó, la degradación de los hidrocarburos ocurre rápidamente bajo condiciones óptimas de aireación, humedad y nutrientes, condiciones que rara vez se presentan en forma natural. Estas condiciones pueden ser creadas en forma artificial introduciendo aire y nutrientes al subsuelo a través de pozos. Además de proporcionar los nutrientes necesarios, se puede conseguir una degradación más rápida cuando los cultivos de bacterias han sido ya aclimatados para la destrucción de hidrocarburos. Existen productos comercialmente disponibles formados de cultivos de bacterias. El suelo y el agua subterránea ya contienen microorganismos capaces de degradar hidrocarburos; por lo tanto es adecuado, proporcionar la apropiada nutrición, aireación y humedad para estimular su actividad.

En la Fig. 5.5 se muestra un esquema de sistema de biodegradación aplicando nutrientes y oxígeno, en él se muestra un pozo del cual se extrae agua subterránea, la cual es llevada a un tanque donde recibe oxígeno y nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son transportados por el agua al suelo mediante un pozo de inyección.

La proporción de degradación es más grande cerca de la superficie en el área afectada, especialmente si el suelo recibe una adecuada aireación; lo contrario sucede a medida que aumenta la profundidad, ya que el suministro de aire y nutrientes decrece.

Las tecnologías de biorremediación pueden ser in situ, es decir, aquellas que se aplican en el sitio contaminado, y ex situ si el suelo contaminado se lleva a otro lugar para su tratamiento. Generalmente las tecnologías in situ se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que la pluma de contaminación se extienda en el acuífero. Las tecnologías ex situ se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo o bien, la actividad de la población microbiana autóctona no puede asegurar la biodegradación de los contaminantes bajo las condiciones que imperan en el lugar.

En el cuadro 5.1 se enlistan los diversos tipos de tecnologías que pueden ser aplicados para la biorremediación de suelos y acuíferos contaminados y la base de su funcionamiento.

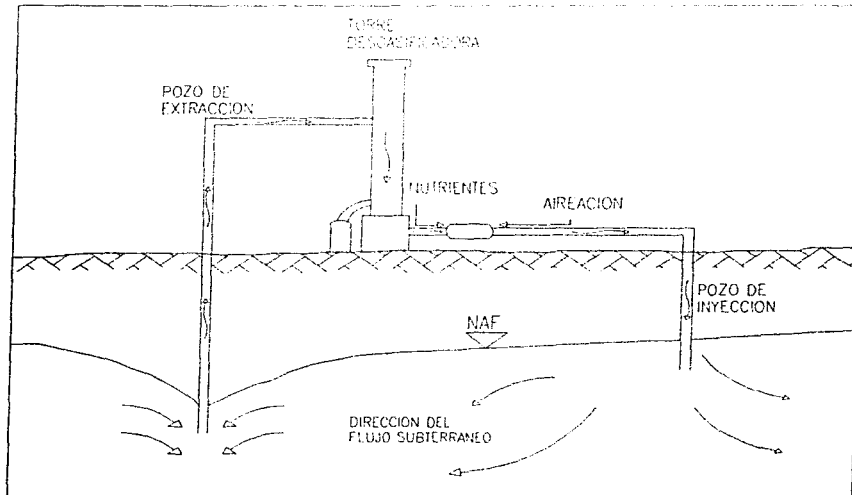


FIGURA 5.5

ESQUEMA DE UN SISTEMA DE BIORREMIEDIACION
APLICANDO NUTRIENTES Y OXIGENO

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

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

Cuadro 5.1 Diversos tipos de tecnologías de biorremediación de suelos y acuíferos.

TIPO DE TECNOLOGÍA	BASE DE FUNCIONAMIENTO
Bioaugmentación	Adición de microorganismos al sitio contaminado cuando la población autóctona carece de capacidad degradadora.
Bioestimulación	Adición de estimulantes de la actividad microbiana autóctona como co-sustratos o aceptores de electrones para la degradación vía anóxica.
Bioventeo	Introducción de oxígeno a través del suelo para estimular la población microbiana netamente aerobia.
Composteo	El material contaminado se coloca sobre la superficie del terreno en forma de pilas que se cubren para crear condiciones termófilas, periódicamente se mezcla para favorecer la aireación.
Biocultivo (land-farming)	Tratamiento en fase sólida que generalmente se realiza en sitios confinados para retener los lixiviados que se forman.

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

9.- Se eliminan costos de transporte ya que se realiza en el sitio contaminado.

10.-Al utilizar la población microbiana autóctona se elimina la necesidad de introducir microorganismos potencialmente peligrosos.

El composteo es otra técnica de degradación biológica, pero es algo diferente a los métodos previamente discutidos. Con el composteo, el suelo contaminado con hidrocarburos se excava y entonces es aireado con mezclado y/o aireación forzada para aumentar la actividad microbiana aerobia. Hay cuatro tipos básicos de sistemas de composteo: sistema cerrado, sistema de tendido en bordos para airearse, aireación forzada y cultivo de tierras. Todos son métodos de tratamiento a largo plazo, toman años para biodegradar a los hidrocarburos, dependiendo de su concentración en el suelo. Así como en las otras técnicas, los microorganismos pueden ser aquellos ya presentes en los desechos u otros introducidos de otras fuentes.

Un sistema de composteo cerrado incluye digestores o depósitos con agitadores o aireadores. El material contaminado es simplemente excavado y puesto en los contenedores y aireado. El contaminante drenará y se colectará en el fondo de los depósitos. El sistema de tendido en bordos es algo similar, excepto que el suelo contaminado es secado y colocado en pequeños montones formados en hileras sobre suelo no contaminado. Este método crea alteraciones sustanciales de la superficie del suelo, pero necesita baja inversión de capital y tiene bajos requerimientos de energía. Se le puede agregar fertilizante al suelo para acelerar la descomposición microbiana de los hidrocarburos. La aireación forzada es una variación del tendido de montones en hileras, en ésta se usa un soplador de aire para arrastrar aire desde la base de la masa orgánica a través de una tubería perforada. Finalmente, el cultivo de tierras incluye el arado del suelo contaminado en la capa superior de tierra, usando labranza convencional o equipos de construcción.

El composteo tiene una aceptación limitada para el tratamiento de suelos, debido a su vulnerabilidad con los cambios del agua, requerimientos de labor y reacción lenta. Sin embargo, debido a que necesita pequeña inversión de capital y puede ser usada in situ, es una alternativa de tratamiento viable para suelo contaminado con hidrocarburos.

De acuerdo a la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) y al Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) las tecnologías de biorremediación se han perfilado como la mejor alternativa para la limpieza de sitios contaminados, ya que requieren de una infraestructura sencilla para su aplicación y el costo de tratamiento es más reducido que cualquier otro tipo de tecnología.

V.3.4 Incineración

La incineración es un método ex situ comúnmente usado para la destrucción de desechos orgánicos, consiste en elevar a muy altas temperaturas el agua y los contaminantes en presencia de oxígeno. El suelo saturado con hidrocarburos puede ser limpiado quemando la mezcla en un horno. Esencialmente todos los compuestos orgánicos incluyendo los hidrocarburos son oxidados a temperaturas de entre 1500 y 2000° F (816 y 1093° C). Cuando el suelo y/o agua subterránea contienen aproximadamente 20% de hidrocarburos, no se requiere de un combustible adicional para la incineración, en caso contrario sí se requerirá.

Uno de los inconvenientes de este método es el alto costo de los incineradores disponibles comercialmente capaces de manejar grandes volúmenes de suelo. Existen pocos incineradores portátiles disponibles, sin embargo, ya existe un prototipo de horno rotatorio que es capaz de procesar de 0.5 a 2 ton/hr de arena con un contenido de 8 a 15% de hidrocarburos, este prototipo está basado en un diseño desarrollado por Treca Ltd. para Environment Canadá y PACE.

Los incineradores se pueden combinar con otros tratamientos. Cualquiera de las tecnologías que separan y concentran el contaminante se puede usar para aplicar factiblemente la incineración.

Una variante del método de incineración es la vitrificación. Se vitrifica a la arcilla utilizando calor generado por electricidad. Estudios experimentales han demostrado que este proceso es efectivo para hidrocarburos presentes en los suelos. Consiste en convertir al suelo en un vidrio o forma cristalina, fundiéndolo por medio de calor proporcionado por corrientes eléctricas. Esta es una técnica de reciente creación que ha sido patentada por el departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se realiza con cuatro electrodos clavados en el suelo, con un arreglo cuadrado, distanciados entre 3.5 y 5.5 metros. Una pequeña cantidad de una mezcla de grafito y vidrio se coloca en forma de x entre los electrodos, en la superficie, con el objeto de proveer un paso conductor. El suelo adyacente se logra fundir cuando la resistencia interna del medio conductor causa un incremento en la temperatura, esto provoca que la materia orgánica tienda a polarizarse creando una zona porosa cerca de la superficie.

V.3.5 Aislamiento

El método de aislamiento no es precisamente una técnica para remediación, más bien es un sistema que complementa a las técnicas de remediación. Consiste en aislar la zona contaminada, para lo cual se forman barreras subterráneas alrededor de ésta zona, ayudando con ello a que la extensión del derrame no prosiga y sea menor el área a tratar. Figuras 5.6 y 5.7.

Estas barreras pueden ser físicas o producto de acciones hidrogeológicas. Las barreras físicas generalmente son construidas con mezcla de cemento, bentonita y arcilla, rellenando zanjas o inyectando por medio de pozos, de tal manera que se bloquee o se impida el paso del flujo del agua subterránea y de los hidrocarburos en el subsuelo. Este método se encuentra limitado por la profundidad a la que sea necesaria la excavación o inyección.

Pueden inyectarse al subsuelo mezclas de arcilla con cemento, bentonita o productos químicos a base de silicatos, tales como el silicato de sodio. La inyección se hace a base de pozos distribuidos a distancias del orden de 0.5 metros y traslapados en la forma como se muestra en la parte superior de la Fig. 5.8

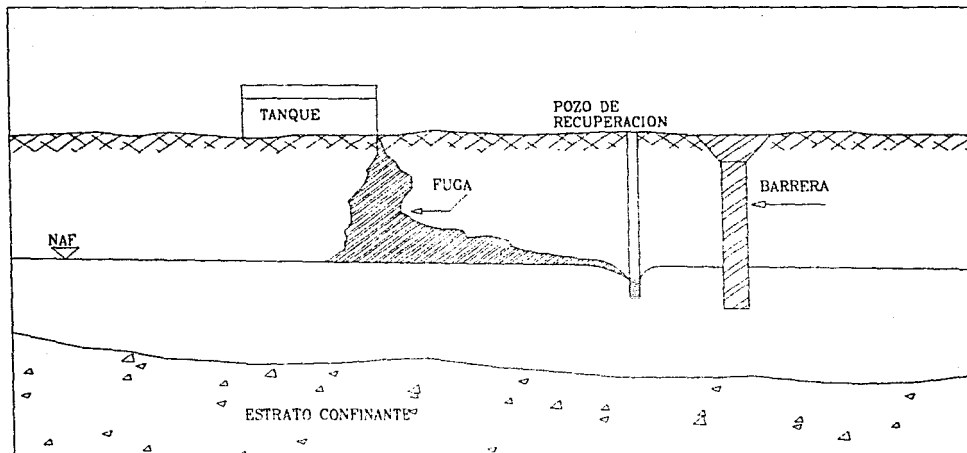


FIGURA 5.6

BARRERA DE AISLAMIENTO DE ZONAS
CONTAMINADAS

La cortina impermeable formada por la inyección de productos en el subsuelo, se distribuye tratando de aislar el área hacia donde fluye el hidrocarburo en el subsuelo. En la parte inferior de la Fig. 5.8 se muestra el área contaminada y dentro de ella un pozo para recuperar el contaminante

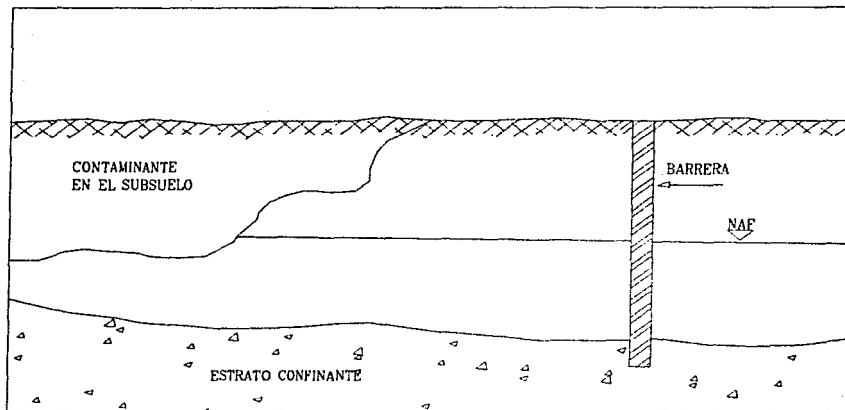


FIGURA 3.7

BARRERA SUBTERRÁNEA PARA IMPEDIR
EL FLUJO DEL HIDROCARBURO

V.3.6 Extracción de agua y tratamiento

Este es un método usual para la extracción y eliminación de hidrocarburos en su fase líquida y menos densos que el agua, los cuales tienden a flotar sobre el nivel de aguas freáticas, como es el caso de las gasolinas.

El agua y la gasolina son bombeados al exterior en dos formas:

La primera forma consiste en bombear, en un pozo, tanto agua como gasolina, las que en la superficie son separadas. La gasolina puede reutilizarse y el agua se trata para eliminar los residuos de hidrocarburos, pudiendo esto realizarse mediante carbón activado. El agua así tratada puede inyectarse al subsuelo para ayudar al flujo del agua y para lavar el medio.

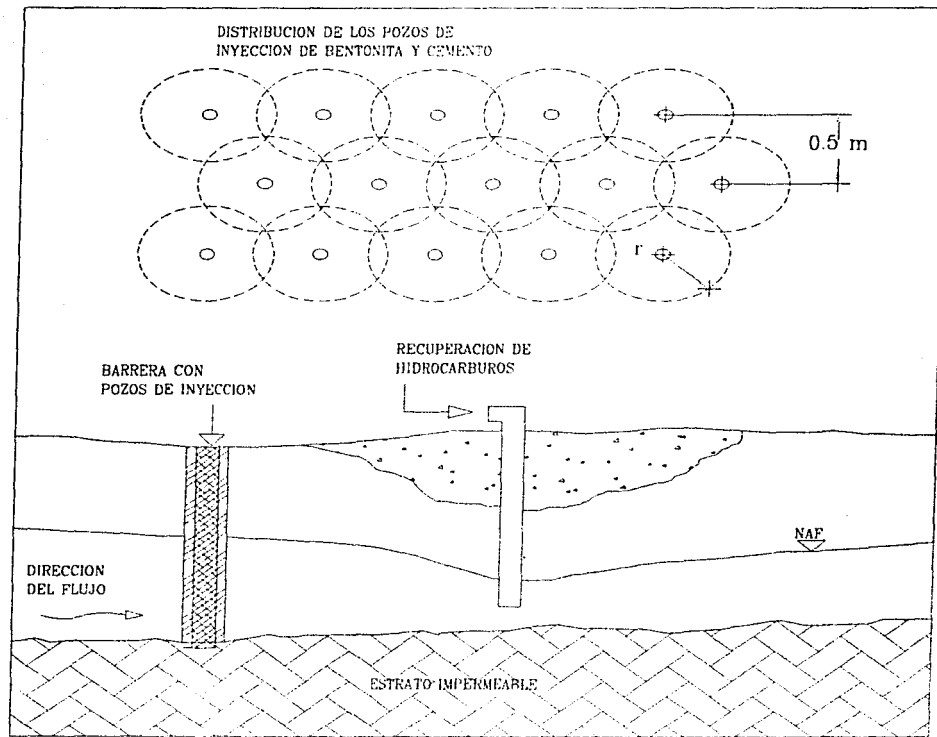


FIGURA 5.8

BARRERA A BASE DE INYECCIÓN DE
BENTONITA Y CEMENTO

La segunda forma consiste en extraer por bombeo el agua y los hidrocarburos del subsuelo, tal como se muestra en la Fig. 5.9. Se hace una perforación de diámetro amplio o pozo a cielo abierto, construido hasta una profundidad bajo el nivel del agua, de manera tal que permita la colocación de dos bombas, una para la extracción del agua, la que se coloca hasta el fondo del pozo y tiene por objeto abatir el nivel del agua y de esta manera provocar un cono de

abatimiento que facilita el flujo de hidrocarburo que flota sobre el nivel estático; el flujo contaminante se dirigirá hacia el pozo donde se formará una capa de hidrocarburos que será extraída por otra bomba. El agua así extraída es pasada a través de una torre desgasificadora.

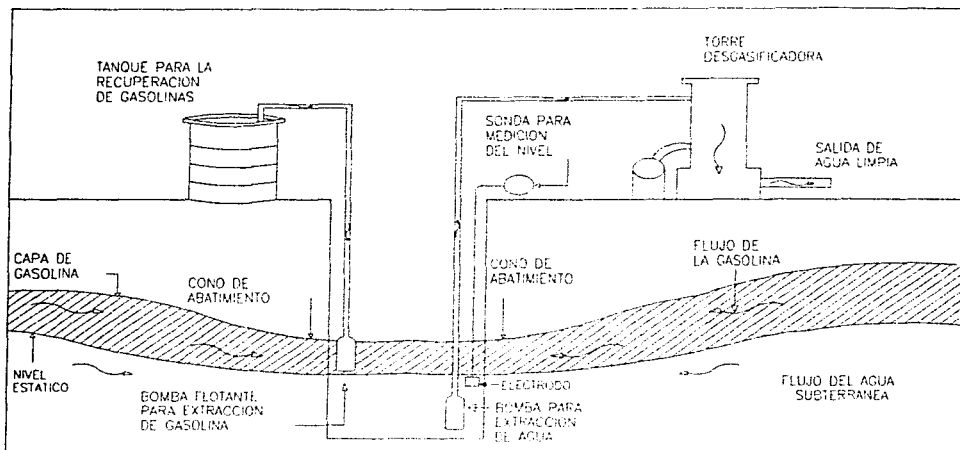


FIGURA 5.9

MÉTODO PARA RECUPERAR GASOLINAS

La recuperación en cilindro es una variante de este método, la cual es usada en áreas donde el movimiento del agua subterránea es pequeño o nulo o donde el agua subterránea está contenida por algunas barreras artificiales y está a menos de cuatro metros de la superficie del suelo. Justo aguas abajo del área de mayor contaminación se realiza la perforación del pozo colocándose cilindros de concreto de aproximadamente 122 cm de diámetro con agujeros de 6 cm de diámetro repartidos en sus paredes, tal como se muestra en la Fig. 5.10. Se usa entonces el sistema de bombeo antes descrito para extracción de agua y del hidrocarburo separadamente. Este método tiene un costo de operación relativamente bajo y puede ser construido con materiales fácilmente disponibles. Sin embargo, el mantenimiento y operación a largo plazo son caros, y se requiere de algún tipo de control automático para prevenir que la bomba del agua extraiga el hidrocarburo.

Sería recomendable combinar este método con el de aislamiento mediante el uso de una cortina, como barrera, construida de un material impermeable tal como una mezcla de bentonita-cemento. La barrera desvía el hidrocarburo al pozo o cilindro de recuperación, tal como se muestra en la Fig. 5.11.

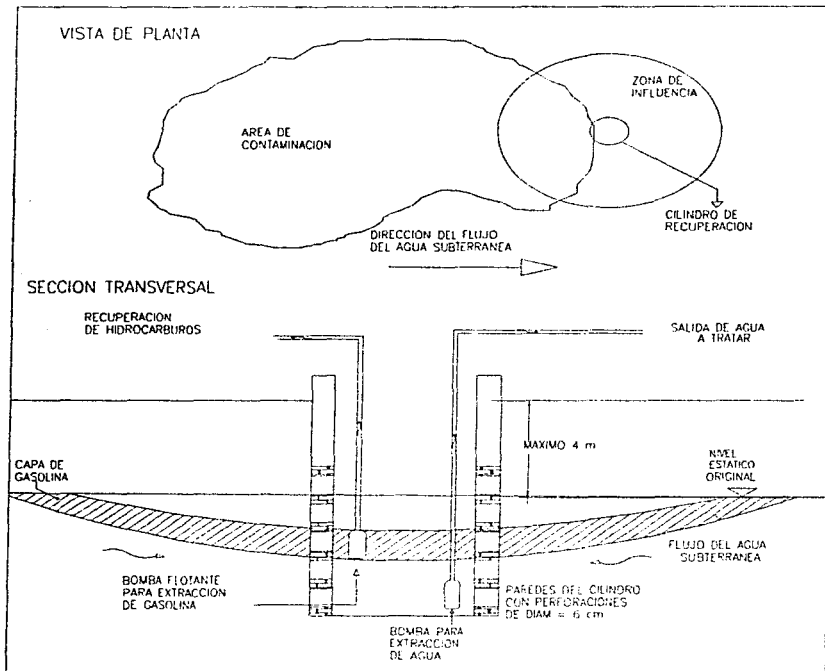


FIGURA 5.10

SISTEMA DE RECUPERACION
POR CILINDRO

Una alternativa usada como forma de acelerar la limpieza y disposición del agua tratada es recargando al acuífero con dicha agua. La recarga también sirve para lavar algo de los hidrocarburos residuales adsorbidos en el suelo y puede ser especialmente atractiva para recuperaciones en grandes extensiones. Hay varias ventajas en esta técnica, una de ellas es que el número de pozos se puede reducir, debido a que el uso de pozos de recarga incrementan la pendiente hidráulica del agua subterránea. Los pozos de recarga estabilizarán los gradientes hidráulicos hacia los pozos de bombeo, aumentando así la proporción de recuperación y reduciendo los costos de operación a largo plazo.

En algunas ocasiones será necesario tratar el agua producida antes de recargarla, lo que se llama un sistema abierto. Esta operación de tratar el agua, está en función de la calidad del agua producida y del método de recuperación, dicho tratamiento para remover componentes disueltos antes de recargarla puede resultar costoso, principalmente si existe una gran cantidad de hidrocarburos disueltos en él. Existen varias consideraciones a ser hechas antes de decidir sobre el tratamiento. El agua tratada puede no ser compatible con el agua del acuífero y puede causar reacción y/o precipitación en él. El control de la calidad del agua tratada y su interferencia con las propiedades de los hidrocarburos lavados debe ser verificada antes de la recarga. Las dificultades asociadas con los sistemas de recarga directa también incluyen el taponamiento, la formación de reacciones y las descargas accidentales de hidrocarburos a través del bombeo de agua. Un sistema de recarga cerrado tiene la ventaja de ser barato, y extremadamente flexible; cada pozo de recuperación asociado con los pozos de recarga pueden ser tratados como sistemas de autocontención.

Una modalidad más en este tratamiento es el lavado. La capacidad del suelo de adsorber hidrocarburos depende en algo de su contenido de humedad, un suelo con alto contenido de humedad tendrá una baja capacidad de retención de hidrocarburos. La técnica de lavado se realiza a través de un mecanismo que incluye deslave de los compuestos hidrocarburos solubles. Se deja que grandes cantidades de agua percolen a través del aceite moviendo los hidrocarburos hacia abajo a un embudo de recolección creado en el acuífero, y de esta forma el agua y los contaminantes se pueden recuperar. Este método es parecido al método de recarga, pero con algunas modificaciones.

Se puede incrementar la temperatura del producto usando agua caliente en la recarga del acuífero, y de esta forma se facilita que el hidrocarburo sea lavado en los pozos de recuperación, dicha agua a su vez puede ser reusada para recargarse nuevamente.

V.3.7 Autoeliminación.

Consiste en la autodepuración del medio permitiendo que en forma natural actúen procesos de biodegradación, volatilización y adsorción en el suelo. La biodegradación se efectúa debido a que todos los suelos constituyen un medio natural de los microorganismos, muchos de los cuales pueden convertir una parte de hidrocarburos en bióxidos de carbono y agua. Otra parte de los hidrocarburos en el suelo son retenidos por adsorción, por las partículas de suelo. Cierta parte de los hidrocarburos se volatiliza y se puede perder en la atmósfera. El paso de agua a través del medio, puede constituir también una fuente natural de lavado de suelos. Cuando la permeabilidad de los suelos es reducida, se favorece la autodepuración, al impedir la fácil o rápida propagación del hidrocarburo.

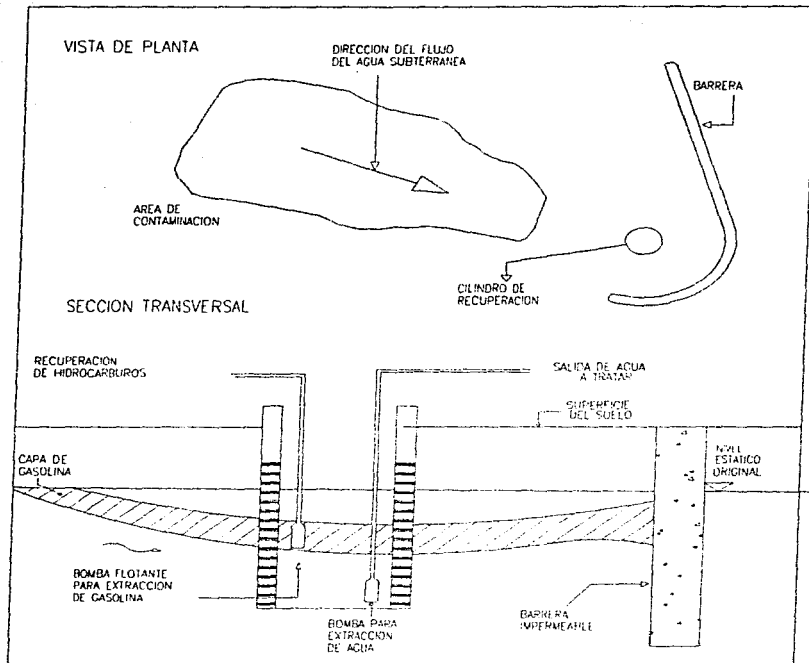


FIGURA 5.11

CILINDRO DE RECUPERACION CON BARRERA DE AISLAMIENTO

V.4 Experiencias en el empleo de tecnologías de remediación.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica ha editado diversos documentos que reúnen las características de las tecnologías de remediación que actualmente están operando a escala de demostración in situ, es decir, a nivel piloto.

En el extranjero se han presentado diversas experiencias de contaminación por hidrocarburos en las cuales algunos métodos de los descritos anteriormente han dado buenos resultados. Por lo que respecta al ámbito nacional, a continuación se mencionarán algunas de las experiencias de una de las empresas* que actualmente hace trabajos de remediación.

- *
- Recuperación de 13 toneladas de gasolina de la fase líquida.
 - Descontaminación de las fases gaseosa y de adsorción de una gasolinera por medio de extracción de vapores, habiendo modificado previamente la conductividad hidráulica en el suelo.
 - Localización precisa de los mecanismos de migración de la contaminación de una gasolinera próxima a una estación del metro. Dicha determinación fue crucial para el control de los riesgos no solamente para mejorar la velocidad de la recuperación de la fase líquida.
 - Detección de fugas activas en dos de los tanques de una terminal de PEMEX.

Un ejemplo de biorremediación, es la biodegradación de BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en condiciones aerobias en el subsuelo mediante la liberación de oxígeno a partir de un compuesto en forma de granos que contiene óxido de magnesio, el cual se entierra a profundidad para estimular la población microbiana presente. Esta tecnología de bioventeo se desarrolló en el acuífero de Borden, Ontario, Canadá, donde el acuífero es no-confinado arenoso y uniforme y el nivel freático varía entre la superficie y 2 m de profundidad.

En Calgary, Alberta, Canadá se suscitó un serio derrame de productos derivados del petróleo en una planicie inundable de una planta de asfalto. Inicialmente se construyó un dique de intercepción a lo largo del límite meridional de la planta y se pensó que el problema estaba resuelto. Sin embargo, en esta etapa anterior no era conocida la extensión total del problema. Subsecuentemente se descargó aceite hidrocarburo en las lagunas del Santuario de aves Inglewood. La necesidad de controlar el escape en el Santuario de aves requirió una acción de emergencia. Se instaló un drenaje interceptor a través de la zona de derrame. Una alcantarilla en forma de cajón y grava enterrada en la trinchera proporcionaron drenaje lateral del aceite a una serie de sumideros. Después de la migración del aceite, el sistema interceptor fue eliminado añadiendo una membrana impermeable a la pared corriente abajo de la alcantarilla. Las paredes aislantes en ambos finales del sistema del interceptor desviaron el aceite dentro del sistema de la alcantarilla de cajón. Esta acción eliminó la fuga de aceite al norte de la laguna.

*Datos proporcionados por la Empresa Operadora Intergrupo S.A. de C.V.

Una investigación detallada del sitio reveló que el aceite se había recolectado en el nivel del agua sobre una área relativamente grande y estaba migrando hacia el santuario de aves siguiendo el gradiente local del nivel del agua.

Debido al tamaño del derrame, el sistema interceptor no bastó para contener y recuperar todo el aceite. Se instaló un sistema de pozo doble (con doble bomba de extracción) en el Santuario de aves. La extracción de agua de los pozos creó el descenso de potencial necesario para mover el aceite dentro de los pozos de recolección del producto. El agua limpia bombeada de los pozos se descargó en los diques interceptores construidos antes en el sitio.

En Montgomery County, Pensilvania, E.U.A., se reportó un caso de biorremediación, donde había sido derramada gasolina de un tanque de almacenamiento subterráneo en una estación de servicio. La pluma contaminante inicialmente contenía arriba de 15 ppm de hidrocarburos disueltos. El sistema de biorremediación utilizado en este sitio consistía de un pozo central de bombeo y una galería de reinyección situada sobre el tanque de almacenamiento subterráneo anterior. El agua subterránea extraída fue pasada a través de una torre de extracción de aire para remover los hidrocarburos volátiles, y entonces oxigenada y enriquecida con nutrientes antes de ser reinyectada en un proceso en serie. La concentración de hidrocarburos en el agua subterránea fue reducida a 2.5 ppm después de 20 meses de operación del sistema.

CAPÍTULO VI

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CAPITULO VI

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1 Conclusiones.

La principal fuente de hidrocarburos con que dispone el hombre es el petróleo. Es por esto que los hidrocarburos que están en posibilidad de contaminar al suelo y agua subterránea, son el mismo petróleo y sus derivados que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente principalmente. Los hidrocarburos viscosos derivados del petróleo que son usados como aceites y lubricantes, solo podrán contaminar una zona limitada, ya que su alta viscosidad no les permite migrar hacia otras zonas con facilidad.

De todos los hidrocarburos, los que mayor demandan tienen en países como el nuestro, son las gasolinas, debido al gran uso que tienen como combustibles. Es debido a esto y a que muchos hidrocarburos constitutivos de las gasolinas son altamente tóxicos y solubles, que las gasolinas constituyen una mezcla de hidrocarburos con gran potencial de contaminación.

Las gasolinas y otros derivados del petróleo, contienen hidrocarburos que están en la lista de contaminantes prioritarios de la EPA (Agencia de Protección Ambiental), debido a que son altamente tóxicos, cancerígenos, solubles en agua, menos densos y además su límite permisible de concentración para agua potable es muy bajo; dichos hidrocarburos son: benceno, etilbenceno, tolueno y xileno (BTEX). Por solo mencionar un ejemplo, la concentración permisible de benceno en agua para uso potable es de 1 ppb (partes por billón), por lo que un pequeño derrame de éstos hidrocarburos en agua subterránea podría contaminar un gran volumen del acuífero.

Los hidrocarburos tienen propiedades físicas y químicas semejantes, pero que difieren en magnitud. Desde el punto de vista de migración de contaminantes y de remediación, las propiedades físicas más importantes son: volatilidad, solubilidad en agua, gravedad específica o densidad y viscosidad cinemática.

En México, aunque no se comenta de manera oficial, es evidente que con frecuencia ocurren derrames accidentales de hidrocarburos en el subsuelo. Las principales fuentes de contaminación son los derrames en los procesos de exploración y explotación del petróleo, fugas que se generan a partir de tanques de almacenamiento y de líneas de conducción, así como en el transporte, manejo y disposición inadecuados, principalmente en patios de mantenimiento de automóviles, autobuses, ferrocarriles y aeropuertos. Es por eso que deben

tomarse acciones inmediatas para evitar que los hidrocarburos alcancen los acuíferos, que constituyen una importante fuente de abastecimiento de agua potable, de lo contrario, se generará un grave problema en un futuro cercano.

Los tanques y conducciones llegan a ser corroídos; acomodamientos en el terreno producen tensiones y dislocaciones; 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 son descargados al sitio más próximo.

El movimiento del hidrocarburo tanto en la zona no saturada como en la zona saturada depende tanto de las características físicas y químicas del hidrocarburo, como del tipo y características del material por el cual migra el contaminante.

Los hidrocarburos comerciales corresponden a cortes de destilación, que van de ligeros y alto grado de volatilización, a pesados o densos. Cuando el hidrocarburo es más denso que el agua, tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia las partes inferiores del acuífero o permanece adsorbido por retención molecular en las partículas de suelo. El hidrocarburo ligero, como puede ser una gasolina, se filtra al subsuelo y tiende a avanzar hasta el nivel freático, donde por presentar una menor densidad que la del agua, flota sobre ella. Parte de esos hidrocarburos se volatilizan ocupando espacios porosos o fracturas arriba del nivel freático. 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 remediación de suelos y acuíferos, reciben especial atención los hidrocarburos ligeros (LNAPL'S), ya que son los más comunes y son los que pueden recibir un proceso de remediación, y no así los contaminantes más densos (DNAPL'S), los cuales se dejan que sigan en el fondo del acuífero y solamente reciben un tratamiento cuando el tirante contaminante llega a ser importante.

La exploración y delimitación de la pluma contaminante se puede realizar mediante la determinación de hidrocarburos volátiles, oxígeno, bióxido de carbono y compuestos BTEX, (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) entre otros, medidos en pozos someros.

Los procesos que determinan el flujo de contaminantes son: hidrodinámicos, abióticos y bióticos y el modelo matemático que representa a estos procesos en condiciones de saturación, no consolidación y homogeneidad es:

$$\partial C/\partial t = -u \partial C/\partial x + D \partial^2 C/\partial x^2 - \rho/n \partial S/\partial t + (\partial C/\partial t) m$$

donde

- u= velocidad promedio del fluido [LT⁻¹]
- C= concentración de soluto en fase acuosa [ML⁻³]
- x= dirección del flujo [M]
- ρ= densidad del suelo [ML⁻³]
- n= porosidad

S= masa de soluto adsorbida por unidad de masa de suelo [MM⁻¹]

t = tiempo [T]

m= reacciones químicas y/o degradación

Los procesos hidrodinámicos incluyen advección y dispersión; los procesos abióticos sorción, oxidación-reducción, solubilización-precipitación, enlace iónico, volatilización; y los bióticos degradación biológica.

De los procesos que gobiernan la migración del contaminante, la advección es el más importante en suelos granulares de alta permeabilidad, como gravas y arenas. La advección y la dispersión son principalmente los procesos que determinan el transporte de hidrocarburos en la zona saturada.

A pesar de que se ha avanzado mucho en relación a la creación de modelos matemáticos que representen el transporte de contaminantes, aún se desconoce mucho acerca del movimiento de los hidrocarburos en el suelo, por lo que dichos modelos siguen siendo motivo de discusión debido a la gran cantidad de variables que intervienen en ellos y a que están elaborados bajo ciertas condiciones que difícilmente se dan en forma natural.

Los métodos apropiados para el saneamiento del subsuelo contaminado por hidrocarburos, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que se encuentra el hidrocarburo, su distribución y las características hidrogeológicas.

El saneamiento del subsuelo puede iniciarse con la extracción del hidrocarburo líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. Para los hidrocarburos que no se pueden remover de la manera anterior, se procede a emplear una segunda etapa, en la cual se emplean técnicas sofisticadas, de alto costo y de largo tiempo de ejecución.

En México, la preocupación por tratar de remediar los suelos contaminados con hidrocarburos se originó a raíz de la explosión de una alcantarilla en la Ciudad de Guadalajara, acontecida en el año de 1992, en la que se asume que la causa fue un derrame de hidrocarburos.

De todas las tecnologías de remediación, la biorremediación es la que se ha perfilado en los últimos años como la opción más viable, debido a que es una tecnología que transforma a los hidrocarburos en compuestos inocuos y tiene la ventaja de tener un costo relativamente bajo en comparación con otras tecnologías.

La aplicación de tecnologías de biorremediación está al alcance de cualquier país, lo que se necesita es voluntad política para tomar acciones y contar con el personal técnico capacitado para la toma de decisiones y realizar las labores.

Para la aplicación de la biorremediación o de cualquier otra tecnología, se requiere de profesionales de alto nivel que además de ser especialistas en una de las áreas involucradas como son: hidrogeología, ingeniería ambiental, geociencias, química analítica, microbiología y biotecnología entre otras, cuenten con una visión integrada para aplicar la biorremediación. Esto podrá lograrse si se forman grupos interdisciplinarios.

La participación del ingeniero civil ambiental, es de suma importancia ya que es el encargado de dimensionar las obras de remediación o de ajustar las que ya existen en función de las condiciones en particular del sitio contaminado, para lo cual necesita de la colaboración de un grupo de especialistas interdisciplinarios.

VI.2 Recomendaciones.

Debido a que cualquier tecnología de remediación resulta ser muy costosa, con largos periodos de ejecución y en algunos casos son poco eficientes, lo más recomendable es prevenir la contaminación del suelo y agua subterránea antes que remediar. Esto se puede lograr intensificando las medidas de seguridad en sitios donde se trabaja con hidrocarburos, así como mejorando y aumentando el mantenimiento preventivo de muchas de las instalaciones en donde se almacena, conduce, transporta y maneja hidrocarburos; pero ante todo concientizando a la población en general, y más a aquellas personas que están relacionadas con el manejo de hidrocarburos y otros contaminantes, de los graves problemas que ocasiona la contaminación del suelo y agua subterránea.

En lo que respecta al marco legal, sería recomendable elaborar una Norma en Mexicana, en la cual se establezca una metodología para identificar el marco de referencia en el desarrollo de criterios generales que determinen los niveles de remediación o limpieza de sitios contaminados por materiales peligrosos, incluyendo en ellos a los hidrocarburos, los cuales representan un impacto negativo a la salud y al ambiente. Hasta el momento, según informes del INE (Instituto Nacional de Ecología), solo se está elaborando una propuesta de anteproyecto de Norma Mexicana. En el anexo B de este trabajo se muestra parte de dicha propuesta de anteproyecto de Norma Mexicana.

En los casos que se tenga que hacer remediación, la tecnología más recomendable es la biodegradación, debido a que resulta ser más económica que otras tecnologías y transforma a los hidrocarburos a sustancias inocuas a diferencia de otras opciones que solo remueven el producto.

Considerando que cualquier nuevo desarrollo podría tomar muchos años de trabajo antes de ser llevado a la práctica, lo más recomendable para nuestro país es adquirir tecnologías extranjeras que han sido probadas en otros sitios y realizar los ajustes necesarios para aplicarla en el sitio a remediar, cuyas características podrían diferir de aquel en donde la tecnología fue desarrollada. Así también es muy recomendable que cada especialista de las diferentes áreas involucradas en la remediación, cuenten con una visión integrada para aplicarla.

Cuando se han introducido al acuífero hidrocarburos densos (DNAPL'S) y si el tirante que se ha depositado en el fondo del acuífero no es muy grande, lo más recomendable es no hacer nada, pero si el tirante contaminante llega a ser importante, se recomienda la inyección de un surfactante, oxígeno o peróxido de hidrógeno para biodegradar a los contaminantes.

Para el personal que labora en las operaciones de remediación es indispensable que estén provistos del equipo necesario de protección contra la inhalación y contacto directo con los hidrocarburos.

Ante todo, la recomendación más importante es fomentar una cultura de concientización en la población de los graves riesgos que conlleva la contaminación del suelo y agua subterránea ya sea por hidrocarburos o cualquier otra sustancia o residuo peligroso.

ANEXO A

PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO PARA LA RESTAURACIÓN DE SUELOS EN MÉXICO

Este procedimiento está elaborado por la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, Unidad Administrativa dependiente del INE (Instituto Nacional de Ecología).

En dicho procedimiento se mencionará los trámites administrativos y legales que deberán realizar las empresas promoventes de servicios para la remediación de sitios contaminados por residuos peligrosos.

Protocolo de los requisitos que deben cumplir dichas empresas.

1.- Introducción.

2.- Objetivos.

3.- Marco Legal.

4.- Requisitos administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la remediación de sitios contaminados por residuos peligrosos.

5.- Procedimiento No. 1: solicitud de oficio de acreditación para la empresa que ofrece servicios de remediación de sitios contaminados.

5.1 Formato Remediación de sitios.

6.- Procedimiento No. 2: Presentación del plan de remediación de sitios contaminados por residuos peligrosos.

7.- Anexo Procesos Térmicos

7.1 Formato LF-CO

8.- Avisos Generales.

1.- Introducción.

La introducción hace una referencia histórica y cuantitativa del problema, es decir, se mencionan las causas y las implicaciones que conlleva la contaminación de sitios con residuos peligrosos. Asimismo se mencionan cuales pueden ser las posibles tecnologías de remediación. Por último se hace hincapié en la necesidad de llevar acabo los procedimientos técnicos-administrativos.

2.- Objetivos.

- Definir las políticas y estrategias para la gestión en la Remediación de Sitios.
- Determinar las técnicas y metodologías más adecuadas para la Remediación de Sitios en función de la problemática específica.
- Elaborar la normatividad.
- Regularizar a las empresas prestadoras de servicio.

3.- Marco Legal.

En él se mencionan los artículos y reglamentos que tienen que ver con la remediación de sitios contaminados, los cuales se desprenden de la Ley General del Equilibrio Ecológico.

4. - Requisitos administrativos que deben presentar los promoventes de servicios para la remediación de sitios contaminados por residuos peligrosos.

Procedimiento No. 1.

Nombre del procedimiento:

Solicitud de Oficio de Acreditación para la empresa que ofrece servicios de Remediación de Sitios.

Unidad administrativa:

Dirección General de Residuos, Materiales y Riesgo.

Descripción del procedimiento:

CONCEPTO	DOCUMENTO	PRODUCTO
Oficio de acreditación de la empresa y la tecnología.	Formato, debidamente requisitado. Anexos: - Descripción de la tecnología. - Certificado de la tecnología (nacional y extranjera). - Autorizaciones de la tecnología en el extranjero. - Experiencias técnicas de proyectos realizados. - Perfil Técnico del personal de la empresa que efectúa la remediación de sitios.	Oficio de Acreditación, en el que se señala que la tecnología propuesta es adecuada para el tipo de remediación.

Procedimiento No. 2

Nombre del procedimiento:

Presentación del Plan de Remediación de Sitios Contaminados por Residuos Peligrosos.

Unidad Administrativa:

Dirección General de Residuos, Materiales y Riesgo.

Descripción del Procedimiento:

CONCEPTO	INFORMACIÓN REQUERIDA	PRODUCTO
Plan de Remediación.	- Origen de la fuente de contaminación. - Caracterización del sitio. - Estudios geológicos y geohidrológicos. - Descripción de las acciones a realizar para la remediación del sitio. - Estudio de riesgo. - Programa de trabajo (calendarizado). - Protocolo de Pruebas. - Propuesta de niveles de limpieza a alcanzar.	Visto Bueno para llevar a cabo el Plan de Remediación y determinación de los niveles de limpieza a alcanzar.

Acciones complementarias:

El Plan de Remediación debe ser avalado por un órgano colegiado (Institución o Centro de Investigación) reconocido en la materia.

CRITERIOS Y REQUISITOS QUE DEBEN SEGUIR LOS PROMOVENTES DE SERVICIOS DE REMEDIACIÓN DE SITIOS.

Después de realizar los estudios de suelo para definir el tipo de contaminante o contaminantes que se encuentren en el sitio, los cuales pueden ser: cantidad, lugar (área y profundidad), concentración, así como temperatura promedio, humedad relativa, precipitación pluvial, etc. Se continúa con la determinación sobre el destino del sitio:

- Parque nacional de recreo.
- Zona habitacional.
- Zona agrícola.
- Zona industrial.

Efectuados los estudios de suelos se evalúa la peligrosidad del o los contaminantes:

- Toxicidad.
- Movilidad.
- Solubilidad.

Ejecutado lo anterior, se solicitan o se desarrollan propuestas de tecnologías de acuerdo con el tipo de contaminante.

Entre las tecnologías más usuales se encuentran:

- Tratamiento físico.
- Tratamiento químico.
- Tratamiento físico-químico.
- Tratamiento biológico.

Las alternativas de tecnología deberán cumplir por lo menos con:

- 1.- Descripción de la tecnología.
- 2.- Descripción del equipo a usar.
- 3.- Requerimientos de energía, espacio e infraestructura.

4.- Tiempo para ejecución de los trabajos.

5.- Costos totales.

6.- Programa calendarizado de actividades.

Selección de la tecnología más viable:

Se elaborará una matriz con las alternativas de tecnología propuestas y los siguientes parámetros:

- Factibilidad de la tecnología.

 Eficiencia esperada.
 Factibilidad de reciclaje.

- Seguridad y riesgo.

- Tiempo de ejecución.

- Ventajas.

- Desventajas.

- Costo.

- Probabilidad de aumento de costo.

Determinación de la alternativa más viable:
(Se recomienda seleccionar dos alternativas)

La tecnología seleccionada indicará los criterios adoptados de la evaluación de las mejores tecnologías, especificándose claramente las ponderaciones para la evaluación.

La mejor alternativa deberá presentar la siguiente información:

1.- Protocolo de pruebas a nivel laboratorio.

- a) Procedimiento.
- b) Bitácora del protocolo de pruebas.
- c) Tabla de resultados de la tecnología a nivel laboratorio.
- d) Presentar las principales variables del proceso y su control.
- e) Deberá presentar discusión de resultados.
- f) Posibles cambios de las variables del proceso con el fin de mejorar eficiencias.
- g) Control de la calidad de las mediciones.
- h) Todos los puntos anteriores avalados por un organismo colegiado y sus medidas de seguridad.

i) Conclusiones.

Protocolo de pruebas en campo.

- Aspectos generales del proyecto.
- Objetivos de la prueba.
- Responsable de la prueba.
- Aval de la prueba.
- Resultado de la prueba.
- Laboratorio de análisis.
- Duración de la prueba de campo.
- Generalidades:
 - a) Antecedentes.
 - b) Estrategias.
 - c) Parámetros de control de la prueba.
 - d) Condiciones del terreno.
- Procedimientos de análisis de laboratorio.
 - e) Reacciones de la prueba.
 - f) Consideraciones iniciales:
 - Definición del terreno para realizar la prueba.
 - Volumen a tratar.
 - Duración de la prueba.
 - g) Procedimiento propuesto con programa de seguridad.
 - h) Emisiones al aire.
 - i) Emisiones al agua.
 - j) Cuadro de resultados.
 - k) Propuesta final, si hay cambios en los parámetros de control para aumentar la eficiencia.

ANEXO PROCESOS TÉRMICOS.

Para los casos en que se lleve a cabo la Remediación de Sitios por Procesos Térmicos, se deberá tramitar la Licencia de Funcionamiento e Inventarios de Emisiones.

Unidad Administrativa:

Dirección General de Regulación Ambiental en el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, y en el resto del país, en las Delegaciones SEMARNAP correspondientes.

Descripción:

CONCEPTO	DOCUMENTO	PRODUCTO
Solicitud de Licencia de Funcionamiento.	Formato LF-CO, debidamente requisitado.	Licencia de Funcionamiento.
Solicitud de Inventario de Emisiones	Formato LF-CO, debidamente requisitado.	Inventario de Emisiones.

Acciones complementarias:

- Pago de derechos por Licencia de Funcionamiento.
- El Inventario de Emisiones, debe ser actualizado anualmente en forma de Cédula de Operación

ANEXO B

PROPUESTA DE ANTEPROYECTO DE NORMA MEXICANA.

"RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS: METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CRITERIOS DE LIMPIEZA EN BASE A RIESGOS."

Esta propuesta de anteproyecto fue elaborada por el INE (Instituto Nacional de Ecología) en su Unidad Administrativa de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.

Introducción.

Esta Norma Mexicana ha sido elaborada con el fin de establecer una metodología para identificar el marco de referencia en el desarrollo de criterios generales que determinen los niveles de restauración o limpieza de sitios industriales contaminados por materiales o residuos peligrosos, o no peligrosos, los cuales representan un impacto negativo a la salud o al medio ambiente. El establecimiento de criterios de limpieza busca satisfacer la necesidad de contar con una herramienta para promover el desarrollo de actividades enfocadas a la restauración de suelos.

Estos criterios podrán y deberán ser modificados y adaptados a las condiciones y características específicas del lugar que se esté considerando para una remediación o restauración incluyendo otros sectores diferentes al industrial como por ejemplo, sectores donde se localizan áreas residenciales y comerciales, en donde habrá que considerar la duración, frecuencia y exposición de la población.

Sería imposible describir cada situación en donde exista la necesidad de una remediación y expresarla en un documento. En su lugar esta norma pretende establecer los mínimos requisitos que se requieren para enfrentar todas las situaciones de contaminación del suelo, que pudieran presentarse en nuestro país, así Dosisificación como proveer los mecanismos para identificar requerimientos adicionales que aseguren la protección de la salud humana y del medio ambiente.

Consideramos que los problemas de contaminación del medio ambiente ocupan un lugar prioritario en las preocupaciones de la comunidad por lo que estamos seguros, que esta Norma Mexicana tendrá un impacto social positivo, ya que ofrece la oportunidad de desarrollar proyectos de limpieza de suelos contaminados de manera expedita, efectiva y consistente. De esta forma, las iniciativas de restauración de áreas contaminadas que se pretendan realizar podrán seguir la metodología aquí presentada sin necesidad de esperar a que la autoridad emita recomendaciones o parámetros aplicables para dicha remediación.

1.- Objetivo y campo de aplicación.

Esta Norma Mexicana ha sido elaborada con el propósito de establecer una metodología para identificar el marco de referencia que apoye al desarrollo de criterios generales para la determinación de los niveles de remediación o de limpieza de sitios contaminados por materiales o residuos peligrosos o no peligrosos los cuales representan un impacto negativo a la salud o al medio ambiente.

2.- Referencias.

NMX-AA-89/1-1986: Protección al Ambiente-Calidad del Agua-Vocabulario-Parte 1.

NMX-AA-23-1986: Protección al Ambiente-Contaminación Atmosférica-Terminología.
LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN
AL AMBIENTE.

3.- Definiciones y términos.

3.1 Acuífero.

Cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación uso o aprovechamiento.

3.2 Adsorción.

Unión de una sustancia a un sólido por fuerzas moleculares superficiales.

3.3 Agua subterránea.

Porción de agua ubicada por debajo de la superficie del suelo y dentro de la zona de saturación en la cual toda la parte porosa de una formación geológica está ocupada por agua.

3.4 Ambiente.

El conjunto de elementos naturales, artificiales o inducidos por el hombre, físicos, químicos y biológicos, que propicien la existencia, transformación y desarrollo de organismos vivos.

3.5 Criterios de limpieza.

Combinación de una serie de metodologías, parámetros, variables y normas preestablecidas en base a estudios y juicios profesionales en relación a un contaminante o grupo de ellos para determinar niveles de aceptación.

3.6 Contaminante.

Toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento ambiental, altere o modifique su composición natural y degrade su calidad.

3.7 Dosificación de referencia.

Es la dosificación diaria a la que una persona puede estar expuesta durante su vida, y por lo cual, no se espera un efecto fisiológico adverso.

3.8 Factor de cáncer.

Límite superior en la concentración de una sustancia o material químico que pueda desarrollar un cáncer en la persona, y al cual ha estado expuesto un individuo durante su vida.

3.9 Gradiente.

Cambio de una variable intensiva del suelo con respecto a su profundidad.

3.10 Lixiviado.

Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

3.11 ppb.

Partes por billón, microgramos por litro o microgramos por kilo.

3.12 Remediación.

Acciones necesarias para llevar a cabo la limpieza de cualquier descarga o sospecha de descarga de contaminantes, incluyendo mas no limitado a la realización de una evaluación preliminar, investigación del sitio, determinación del alcance del problema, estudio de factibilidad y acciones correctivas.

3.13 Restauración.

Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

3.14 Rutas de Exposición.

Manera en que un agente físico o químico entra en contacto con un organismo vía ingestión, inhalación o contacto con la piel.

3.15 Sitio contaminado.

Cualquier porción del medio ambiente (agua, suelo, aire) que contenga uno o más contaminantes en concentraciones que excedan cualquier nivel o criterio de limpieza aplicable.

4. Marco de referencia.

El marco de referencia de esta norma mexicana, está formado por elementos que proveen del soporte técnico y la justificación para el desarrollo de los criterios de limpieza de suelos contaminados en base al riesgo que pudieran representar para las personas y el medio ambiente.

Para el desarrollo de esta Norma Mexicana se siguieron los lineamientos de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos presentados en la Guía para la Evaluación de Riesgos del Superfondo (Risk Assessment Guidance for Superfund) y el acta 451 del Estado de Michigan los cuales, contienen los avances más recientes en materia de Evaluación de Riesgo con algunas modificaciones para poder considerar su aplicación en sitios de México.

Dichos elementos son: Un modelo conceptual del sitio, las Ecuaciones para el cálculo de los criterios de limpieza en base a riesgo y la justificación de las vías de exposición asumidas para el cálculo de los criterios de limpieza.

4.1 Modelo conceptual del sitio.

En el modelo conceptual del sitio se hace una descripción de las condiciones sobre las cuales se basan los Criterios de Limpieza, incluyendo las vías potenciales de exposición y las poblaciones potencialmente expuestas.

4.1.1 Vías potenciales de exposición.

La vía de exposición describe el mecanismo mediante el cual un organismo o una población se expone a un agente químico o físico. Cada vía de exposición considera la fuente, el punto y la ruta de exposición. Si el punto de exposición difiere de la fuente entonces se debe considerar la intervención de un medio de exposición por transporte (por ej. aire).

Las vías potenciales de exposición que se contemplan son: Inhalación, Ingestión y Contacto con la Piel.

Inhalación: Aspiración de gases, sólidos o líquidos pulverizados. La posibilidad de exposición por inhalación, depende de una serie de factores específicos del sitio por ej., perfil de contaminación del suelo, tipo de suelo, cantidad de vegetación en sitio, naturaleza de los contaminantes, y contaminantes naturales propios del sitio.

Ingestión: La introducción de contaminantes vía boca.

Contacto con la Piel: Penetración superficial de un gas o un líquido. En el cálculo de la exposición por esta vía, el resultado que se obtiene representa una estimación de la dosis absorbida y no de la cantidad del contaminante que ha estado en contacto con la piel.

4.1.1.1 Suelo.

El criterio de limpieza aplicable a suelo, considera exposiciones via ingestión accidental y absorción por la piel, el desarrollo de un criterio para la limpieza del suelo para proteger contra la exposición por inhalación típicamente considera una serie de factores específicos del sitio por ej. tipo de suelo y perfil de constituyentes presentes, cantidad de vegetación etc.

4.1.1.2 Agua.

Se asume que en un escenario de uso de suelo industrial existe una vía de exposición al agua del subsuelo, de aquí la necesidad de desarrollar criterios para la limpieza del suelo que proteja al agua subterránea en aquellos casos que el agua subterránea sea fuente de agua potable.

4.1.1.3 Aire.

Aunque existe la posibilidad de una exposición de constituyentes del suelo por inhalación, esta se considera relativamente baja, en comparación con ingestión y absorción por la piel. Esta posibilidad se considera para el caso de compuestos orgánicos volátiles y partículas posiblemente presentes en el aire.

Para desarrollar criterios que protejan contra la exposición de contaminantes en el aire a través de su inhalación se deberá considerar las condiciones específicas del sitio, por eje. la existencia o no de vegetación, tipo de suelo y contaminantes presentes en el mismo.

4.1.2 Población expuesta.

La identificación de la población expuesta se basa en el conocimiento del uso del suelo, actividades de la población potencialmente expuesta, y juicios profesionales referentes a parámetros de comportamiento de la población. El criterio de limpieza que se presenta en esta norma se desarrolló en base a un escenario de uso de suelo industrial.

4.1.2.1 Suelo.

En la evaluación de la exposición potencial de las personas hacia el suelo contaminado bajo el escenario de uso de suelo industrial, se identifican las siguientes poblaciones potencialmente expuestas:

- Operadores de Manufactura y Mantenimiento: Personal involucrado en actividades de producción y servicios generales.
- Personal de Oficinas: Personal no involucrado directamente en actividades de producción y mantenimiento.
- Visitantes al sitio.

Aunque la posibilidad de exposición existe hacia el personal de oficinas y visitantes, en promedio se asume que la exposición es en un grado mucho menor en comparación con la de los operadores por lo que solo se considera la exposición a los operadores de manufactura y mantenimiento.

4.1.2.2 Agua.

Se considera que existe la posibilidad de filtración de contaminantes presentes en el suelo hacia el manto acuífero, por lo que también se presentan criterios para su protección contra efectos adversos identificándose las siguientes poblaciones potencialmente receptoras:

- Operadores de Manufactura y Mantenimiento: Personal involucrado en actividades de producción y servicios generales.
- Personal de Oficinas: Personal no involucrado directamente en actividades de producción y mantenimiento.
- Visitantes al sitio.

En este caso se considera que la posibilidad de exposición existe hacia el personal de oficinas y visitantes. En promedio se asume que la exposición es un grado mucho menor en comparación con la de los operadores por lo que solo se considera la exposición a los operadores de manufactura y mantenimiento.

4.2 Ecuaciones utilizadas para el cálculo de los criterios de limpieza en base a riesgo.

Como se menciona en el punto 4.1.1., el contacto directo de una persona con el suelo, a través de la ingestión, contacto con la piel, e inhalación de partículas y contaminantes presentes en el suelo además de la ingestión de agua subterránea se considera como vías potenciales de exposición en un modelo genérico de uso de suelo industrial.

En esta parte se describe las ecuaciones y las vías de exposición consideradas para calcular el criterio de limpieza del suelo y agua subterránea para cada caso.

4.2.1 Suelo.

4.2.1.1 Ingestión y contacto con la piel.

El criterio de protección en base a riesgo de la exposición por ingestión y contacto con la piel hacia los suelos contaminados fue calculado utilizando una ecuación consistente con los lineamientos de la EPA presentados en la Guía para la Evaluación de Riesgos del Superfondo (RAGS) Partes A y B. La ecuación de contacto directo con el humano se presenta a continuación.

Ecuación:

$$\text{Criterio de Limpieza} = \frac{(DRo) \times (PC) \times wazzu \times (FC)}{FE \times DE \times SC \times [(IS \times EAi) + (SP \times FA \times EAp)]}$$

Donde:

- DRo**= de Referencia (mg/kg./día).
DRo para carcinógenos= 10^{-5} /Factor de Cáncer (FCA) y
DRo para no-carcinógenos= Dosis Oral de Referencia (DoR).
- PC** = Peso del cuerpo (kg.).
- TP** = Tiempo promediado (días).
- FC** = Factor de conversión (10^6 mg./kg.) .
- FCA**= Factor de cáncer, por cada químico (mg./kg./día)⁻¹.
- FE** = Frecuencia de exposición (días/año).
- DE** = Duración de la exposición (años).
- SC** = Fracción de suelo contaminado (sin unidades).
- IS** = Proporción de ingestión de suelo (mg.).
- SP** = Superficie de piel (cm²).
- FA** = Factor de adherencia del suelo (mg./cm.²).
- Eai** = Eficiencia de absorción por ingestión.
- EAp**= Eficiencia de absorción por la piel.

4.2.2 Exposición por inhalación.

Como se menciona en el punto 4.1.1.4 para el caso de compuestos orgánicos volátiles y partículas posiblemente presentes en el aire, se debe desarrollar un procedimiento de selección para su caracterización el cual deberá considera factores específicos del sitio en cuestión. Este procedimiento puede aplicarse para determinar si se requiere desarrollar criterios de limpieza para suelo para la protección de la exposición por inhalación en un sitio específico.

El criterio de selección se presenta para cada uno de los contaminantes en el aire: compuestos volátiles y polvos fugitivos. A continuación se hace una descripción del criterio utilizado.

Extensión del área de Suelo Contaminado.

El propósito de esta evaluación es el de desarrollar un método para estimar la dispersión de los contaminantes volátiles y polvos fugitivos que pueden ser inhalados estimando también las concentraciones presentes en el aire en un punto en donde una persona residente cerca del área contaminada está mayormente expuesta.

El tamaño del área contaminada más pequeño utilizado en esta evaluación fue de 2025 m². De acuerdo a esto, para el caso de los sitios que tengan una área de contaminación menor que 2025 m² no se requiere realizar una evaluación para exposición por inhalación.

Características físicas de químicos liberados.

La exposición para la inhalación de compuestos orgánicos volátiles en el suelo puede ser significativa solo para aquellos compuestos con una constante de la Ley de Henry mayor a 1 x

10^{-6} atm-m³/mol y con un peso molecular menor a 200 g/mol. Los compuestos orgánicos volátiles que no cumplan las características físicas descritas anteriormente requerirán ser evaluados debido a su emisión potencial a través de polvos fugitivos.

Profundidad de la contaminación.

El derrame de compuestos orgánicos volátiles de estructuras subterráneas, tales como tanques enterrados, tuberías etc. no se considera que tengan un riesgo importante o significativo para una inhalación. Por lo tanto si el derrame se dirige al subsuelo (a una profundidad mayor de 1.21 m) no será necesaria una evaluación para exposición de compuestos orgánicos volátiles vía inhalación.

La emisión de polvos fugitivos se presenta por la erosión de los suelos provocada por el viento. Por lo tanto, si ocurre una liberación de compuestos semi-volátiles y metales al suelo a una profundidad mayor de 0.30 m., no será necesaria una evaluación adicional para la exposición por inhalación de polvos fugitivos.

Presencia de una cubierta limpia u otras barreras.

No se espera una emisión significativa de compuestos volátiles provenientes de suelos contaminados cubiertos por una capa de suelos limpios de por lo menos 0.6 m. De hecho, los modelos de transporte utilizados para estimar emisiones volátiles de suelos contaminados, asumen que esta contaminación de suelos es uniforme desde la superficie hasta una cierta profundidad. Además una barrera permanente tal como el pavimento previene estas emisiones. Por lo tanto un suelo contaminados con compuestos volátiles y cubiertos con al menos 0.60 m. de este tipo de barreras no requerirá de evaluación adicional.

Toxicidad por inhalación de químicos derramados.

Los criterios de limpieza que se busca para protección por exposición por ingestión y contacto con la piel son conservadores y la exposición estimada recibida a través de estas vías sería mucho mayor que la exposición estimada a través de la inhalación. En consecuencia los criterios de limpieza buscados para la protección de exposición vía ingestión y absorción por la piel de la mayoría de los compuestos protegerán la exposición vía inhalación.

Si el procedimiento de selección descrito anteriormente indica que la inhalación es una vía significativa de exposición en el sitio, se deberán desarrollar los criterios de limpieza para dicha vía de exposición, para los cuales se consideran varios modelos de dispersión de emisiones, los cuales serán utilizados para desarrollar factores de volatilización (para compuestos volátiles) y emisión de partículas (para compuestos semi-volátiles y metales).

Los factores de volatilización definen la relación entre la concentración de los contaminantes en el suelo y los contaminantes volatilizados en el aire. Existen varios modelos de dispersión de emisiones, la selección del modelo apropiado dependerá de la variedad de los factores existentes en el sitio.

El factor de emisión de partículas (FEP) relaciona la concentración de contaminantes en el suelo con la concentración de partículas respirables (PM₁₀) en el aire debidas a las emisiones fugitivas de polvo proveniente de las superficies de suelos contaminados.

4.2.3 Agua.

Para el desarrollo del criterio de suelo para la protección del agua subterránea, se utilizó una metodología consistente en dos componentes:

El primero consiste en la aplicación de un factor genérico relacionado con los constituyentes que potencialmente pueden escurrir del suelo hacia el agua subterránea. Para relacionar la concentración de un químico en escurrimiento con la concentración correspondiente en el suelo se utiliza un factor de 20. En otras palabras, si la concentración de un químico en escurrimiento es de 1 ppb, la concentración en el suelo podría esperarse que 20 ppb.

El factor de 20 se basa en el volumen del radio de agua del suelo usado en pruebas de escurrimiento. El factor de 20 es relativamente conservador, ya que asume que el 100% del constituyente del suelo escurrirá hacia el agua. Esta técnica general ofrece una estimación razonable del potencial de un químico de escurrir hacia el agua subterránea al no contar con información específica del sitio y de los contaminantes.

El factor de 20 se refiere solo a los compuestos que se espera se filtren del suelo. Muchos compuestos, tales como los hidrocarburos aromáticos polinucleados (HAPs) y bifenilos policlorados (BPCs) son altamente adsorbidos por la materia orgánica del suelo. La adsorción de un químico por materia orgánica del suelo es una función principalmente del coeficiente de partición del carbón en los químicos (Koc). Aquellos químicos con valores relativamente altos de Koc no se espera que generen un lixiviado del suelo. Por lo tanto la aplicación del factor de 20, descrito en el párrafo anterior a los químicos con alto coeficiente Koc es inapropiado.

El segundo componente de esta técnica general para el desarrollo del criterio de protección del agua subterránea consiste en la aplicación de un factor atenuante de dilución (FAD) para explicar el proceso de atenuación durante la migración de los componentes a través de las zonas insaturadas y saturadas. Básicamente este factor (FAD) representa una reducción en la concentración de un constituyente que se espera se presente durante su movimiento entre las zonas insaturadas y saturadas. El valor más bajo posible para este factor es de 1, el cual correspondería a una situación en donde no hay una dilución o atenuación.

Este concepto (FAD) se basa en los lineamientos presentados en el documento de la EPA titulado "Guía para un Plan de Protección de un suelo, Sept. 29, 1983". Los valores FAD fueron desarrollados por la EPA usando un modelo de transporte que simula el movimiento de un contaminante de su fuente a través de las zonas insaturadas y saturadas a un pozo de agua potable localizado en el gradiente inferior del límite del punto contaminado. Una vez que el contaminante se libera del suelo, la migración del contaminante a través de la zona insaturada normalmente se ve afectada por procesos de atenuación tal como la adsorción. Además, las concentraciones del contaminante se reducen después por atenuación y dilución una vez que el contaminante alcanza la zona saturada. Los factores FAD han sido desarrollados para explicar estos procesos de atenuación.

El documento Guía para un Plan de Protección del Suelo, recomienda un valor (FAD) de 10 para áreas contaminadas hasta de 40.469 Ha. y un valor de 100 para áreas de 0.4 Ha. o menos.

En base a la información anterior, el criterio del suelo para la protección del agua subterránea se desarrolla utilizando la siguiente fórmula:

Criterio de limpieza para suelo (mg./kg.) = $C_w \times 20 \times FAD$

Donde:

C_w = Criterio de limpieza aceptable para agua del subsuelo (mg./L).

20 = Factor de explicación por el potencial de contaminación por escurrimiento (sin unidades).

FAD= Factor atenuación/dilución para la explicación del movimiento de contaminantes a través de zonas saturadas e insaturadas (sin unidades).

Se hace notar que la multiplicación del factor de 20 para el criterio aceptable para agua potable es aplicable siempre y cuando el valor resultante no exceda el límite de solubilidad del químico pertinente.

4.2.4 Agua subterránea.

4.2.4.1 Exposición por ingestión.

El criterio en base a riesgo para la protección de exposiciones por ingestión de químicos en el agua subterránea se calcula utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación:

$$\text{Criterio de limpieza} = \frac{DRo \times PC \times TP}{FE \times DE \times Glap \times EAI}$$

Donde:

DRo = Dosificación buscada (mg./kg./día).

DRo para carcinógenos = 10^{-5} /Factor de cáncer (FCA) y

DRo para no-carcinógenos = Dosis Oral de Referencia (DoR).

PC = Peso del cuerpo (kg.)

TP = Tiempo promediado (días).

FCA = Factor de cáncer, por cada químico (mg./kg./día)⁻¹

FE = Frecuencia de exposición (d/año).

DE = Duración de la exposición (años).

Glap = Grado de ingestión de agua potable (litros/día).

EAI = Eficiencia de absorción vía ingestión.

5. Justificación de las vías de exposición asumidas.

Estos factores de exposición se han estimado en base a un juicio profesional de información disponible en la literatura y en los lineamientos de la Agencia para la Protección al Ambiente de los Estados Unidos. En los casos en donde se utilizó un juicio profesional para la determinación de algún valor, se presenta la información de soporte para el mismo. Esta norma asume que los parámetros de comportamiento en las responsabilidades de los trabajadores estadounidenses son los mismos para los trabajadores en México. Sin embargo deberán ser evaluados para determinar si son aplicables a las condiciones y características del lugar que esté siendo estudiado.

5.1 Escenario de uso de suelo industrial.

De acuerdo a normas de EPA el peso promedio para una persona adulta es de 70 Kg. (U.S. EPA, 1989).

Para suelo se establece un nivel de ingestión de 50 mg./día en la población de trabajadores. Aún no se terminan estudios que midan específicamente la cantidad de ingestión por suelo por los trabajadores en una industria.

Para agua se establece un nivel de ingestión de 1 litro/día en la población de trabajadores. No se han realizado estudios específicos sobre la ingestión de agua en áreas de trabajo por lo que la EPA estableció un valor de la mitad de su norma basada en datos históricos de la Armada de los Estados Unidos los cuales indican que la cantidad de agua por día que requiere una persona en el campo es de 2 litros.

Considerando que la persona no estará en su lugar de trabajo más de medio tiempo de su periodo de trabajo, un valor para consumo de agua de 1 litro por día se considera una cantidad estimada razonable para aplicarse a un trabajador en México.

Para estimar la superficie de exposición de la piel se utilizó el manual de lineamientos de la EPA y se consideró a nivel nacional un clima tibio en promedio por lo que la persona estará usando camisa de manga corta y pantalones largos. Por lo tanto, las partes expuestas de la persona serían la cara, manos y antebrazos. Estas condiciones nos dan una superficie de exposición de 2570 cm².

El factor de adherencia de la tierra en la piel se estimó en 1.0 mg./cm², y está basado en el siguiente estudio:

Documento guía sobre la piel de la EPA: En este estudio se indican los rangos de adherencia de la tierra a la piel de 0.2 a 1.5 mg./cm². Este rango de valores se obtuvo a través de medir la adherencia de la tierra a la piel utilizando las manos. Al utilizar las manos en este estudio se puede sobrestimar la adherencia de la tierra a la piel en otras partes del cuerpo ya que las manos cuentan con un mayor número de pliegues y dobleces en los cuales se puede atrapar la suciedad. Por lo tanto, el valor de 1.0 mg/cm² representa un valor razonablemente alto y es recomendado por la EPA si no se cuenta con la información específica del sitio.

La frecuencia de exposición para casos extremos, se estableció en 117 días por año considerando que el trabajador desarrolla responsabilidades dentro y fuera de las instalaciones. Este valor se obtuvo a partir de una frecuencia típica de exposición laboral de 250 días por año. Considerando vacaciones, paros de planta y enfermedad, resultan 235 días de exposición potencial en un año.

Se considera también que un trabajador pasa aproximadamente 4 horas de sus 8 horas de trabajo en actividades fuera de las instalaciones. Esto significa que pasa la mitad de su tiempo laboral en contacto directo con el medio (suelo). Por lo tanto esto da por resultado una frecuencia de exposición de 117 días por año.

El valor de (FC) fracción contaminada refleja el grado en el cual el trabajador está involucrado en actividades que lo llevan a tener un contacto directo con los suelos contaminados.

En situaciones en las que el área o áreas contaminadas están alejadas de las instalaciones actuales, el uso de un valor (FC) menor a 1 dará un estimado más razonable del grado de exposición a los suelos contaminados del sitio.

En la exposición a compuestos carcinógenos, se utiliza un tiempo promedio de 25550 días (70 años a 365 días/año). En el caso de compuestos no carcinógenos se utiliza un tiempo promedio igual a la duración de la exposición (21 años a 365 días/año).

6. Caracterización de riesgo.

La exposición a contaminantes de un sitio no debería ser evaluada en base a niveles máximos de concentración, en su lugar, las exposiciones deberían ser estimadas en base a los contaminantes con los cuales pudiera hacerse contacto en el tiempo. La exposición a contaminantes de un sitio en un periodo largo de tiempo (crónico) se representa más adecuadamente por un promedio aritmético. Puesto que existe cierta incertidumbre con la estimación de un promedio de concentración de exposición en un sitio, se deberá usar un 95% como límite de confianza superior (UCL) en la media aritmética para estimar concentraciones de exposición. En otras palabras, para demostrar cumplimiento con los criterios de limpieza establecidos en este documento, el criterio de limpieza del suelo debería ser comparado con el 95% UCL de la media aritmética de la concentración del contaminante en el suelo. El 95% UCL de la media aritmética, asumiendo que los datos tienen distribución normal, pueden ser calculados usando la siguiente ecuación:

$$UCL = X + t\{s/n^{1/2}\}$$

Donde:

UCL = Límite superior de confianza.

X = Dato identificado.

t = Student-t.

s = Desviación estándar de los datos.

n = Número de muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- José Luis Mateos G.
Química Orgánica.
UNAM. Dirección General de Publicaciones.
México, D.F. 1982.
- M.C. Miguel O. Chávez Lomelí.
Memoria del Simposio sobre Energía y Medio Ambiente.
Organizado por la UNAM y SEDUE.
México, D.F. 1984
- Alfonso García Vargas.
Vulnerabilidad de la infraestructura urbana por el riesgo asociado al manejo de combustibles.
DGOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica).
México, D.F.
- Rene Dubos, Henry Margenau, C.P. Snow.
Moléculas Gigantes.
Lito offset Latina, S.A. Colección Time-Life.
México, D.F. 1978.
- G. Mattney Cole.
Assessment and Remediation of Petroleum.
E.U.A. 1990.
- Juan Manuel Lesser I.
Prospección y Saneamiento de subsuelo contaminado con gasolina.
Apuntes del curso de biorremediación de suelos y acuíferos. PUMA. UNAM.
México, D.F. 1996.
- PEMEX.
Memoria de labores de PEMEX en 1993.
México, D.F. 1994.
- Custodio E. Llamas M.
Hidrología Subterránea.
Barcelona, España. Omega, 1976.
- John H. Vandermeuten, Steave Hrudehy.
Oil in Freshwater.
Proceeding of the symposium of oil pollution in freshwater.
Alberta, Canadá.
- Susana Saval.
Pruebas de Biofactibilidad y Tecnologías de Biorremediación.
Apuntes del curso de biorremediación de suelos y acuíferos. PUMA. UNAM.
México, D.F. 1996.

-
- Rosario Iturbe Argüelles, Ana Elisa Silva Martínez.
Agua Subterránea y Contaminación.
Series del Instituto del Ingeniería Civil de la UNAM.
México, D.F. 1992.
 - Ma. Teresa Estevan Bolea.
Las Evaluaciones del Impacto Ambiental.
Cuadernos del CIFCA.
Madrid, España.
 - Cornelis A. M. Van Gestel, Wei-Chun Ma.
Development of QSAR'S in soil ecotoxicology: Earthworm toxicity and soil sorption.
National Institute of Public Health and Environmental Protection.
Arnhem, The Netherlands, 1992.
 - Ma. Patricia Echeverría Vaquero.
Contaminación de acuíferos.
Tesina para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica.
UNAM. 1995.
 - Juan Manuel Nieto Calleja.
Caracterización Geohidrológica de un Sitio Contaminado.
Apuntes del curso de biorremediación de suelos y acuíferos. PUMA. UNAM.
México, D.F. 1996.
 - R.A. Freeze, J.A Cherry.
Groundwater.
Prentice-Hall, Inc.
New Jersey, E.U.A. 1979.
 - R.A. Gillman, J.A Cherry.
Contaminant migration in saturated unconsolidated geologic deposits.
Recent Trends in Hydrogeology. The Geological Society of America.
Boulder, Colorado, E.U.A. 1982.
 - S.W. Karickhoff.
Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediment and soils.
Chemosphere 10:833-846.
1981.
 - Ramón Pérez Córdova.
Biorremediación de sitios contaminados con gasolina.
Apuntes del curso de biorremediación de suelos y acuíferos. PUMA. UNAM.
México, D.F. 1996.
 - D.M. Mackay, J.A Cherry.
Implementation of a field experiment on groundwater transport of organic solutes.
Conf. Environmental Engineering, ASCE, University of Colorado.
Colorado, E.U.A. 1983.

-
- S.W. Karickhoff.
Organic pollutant sorption in aquatic systems.
J. Hydraul. Eng.
1984.

 - Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
Diario Oficial de la Federación.
28 de enero de 1988.
México, D.F.

 - Evan k. Nyer.
Groundwater treatment technology.
Van Nostrand Reinhold.
New York, E.U.A. 1985.

 - Alfonso Tomás Martínez.
Diagnóstico y limpieza de un sitio contaminado con diesel.
Apuntes del curso de biorremediación de suelos y acuíferos. PUMA. UNAM.
México, D.F. 1996.

 - Stephen M. Testa, Duane L. Winegardner.
Restoration of petroleum contaminated aquifers.
Lewis Publishers.
Michigan, E.U.A. 1991.

 - Report EpS 2/PN/1.
Detection, Prevention and Remediation of Leaks from Underground Storage Tanks.
Canadá, 1989.

 - American Petroleum Institute.
Cost Model for Selected Technologies for Removal of Gasoline Componentes from
Groundwater. API publication.
Washington, D.C. E.U.A. 1986.

 - David C. Noonan, Jame T. Curtis.
Groundwater Remediation and Petroleum, A guide for underground storage tanks.
Lewis Publishers.
Michigan, E.U.A. 1990.