

7
2ij



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"**

**"Aplicación del Tratamiento de Biorremediación
para los Sitios Contaminados con Residuos
Peligrosos Homogéneos"**

U N A M
F E S
Z A R A G O Z A



LA PLAZA DE LAS FUENTES

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:

MONICA GONZALEZ BALCAZAR

ASESOR: I. Q. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS

MEXICO, D.F.

1999

277943

**TESIS CON
FALSA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/0044/98

ASUNTO: Asignación de Jurado

C. MÓNICA GONZÁLEZ BALCÁZAR

Presente

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

- Presidente:** *I.Q. Miguel Angel Varela Cedillo*
- Vocal:** *I.Q. José Benjamín Rangel Granados*
- Secretario:** *I.Q. Gabriel Cruz Zepeda*
- Suplente:** *Q. Carlos Salvador Valadez Sánchez*
- Suplente:** *Q. Guadalupe de la C. Corona Vargas*

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F., 23 de Noviembre de 1998

EL JEFE DE LA CARRERA



I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ

Irm

AGRADECIMIENTOS

A los seres que me vieron nacer, crecer, llorar y luchar conmigo en este largo camino para lograr lo que hoy **hemos** conseguido. Sé que no existe en el mundo otra palabra que encierre tanto amor y gratitud
"Gracias Papá y Mamá".

A mi Padre **L. Antonio** por ser el pilar donde crecí, y que aún con las dificultades continuaste con tu labor de Padre. Gracias por ser paciente.

A mi Madre **Ma. Guadalupe** porque compartiste conmigo desvelos, angustias, hambres y preocupaciones todo por ser mejor cada día, a costa de muchos sacrificios. Gracias por tu apoyo y protección desde que nací.

A mi Hermana **Julieta** por ser siempre el modelo a seguir, porque me enseñaste a creer en mí y luchar por lo que anhelaba. Gracias por tu paciencia y comprensión.

A mi hermano **José Antonio** porque contigo descubrí lo que era superarse por las personas que quieres y motivarme a seguir adelante pese a todo lo que aconteciera y principalmente por tu sonrisa constante hacia mí.

A mis abuelos **José y Antonio** que aunque hoy no lo vean, esto también es para ellos, en el lugar que se encuentren, Gracias por protegerme. A mi abuela **Leonila** porque además de los hijos, también los nietos podemos continuar dando un camino de satisfacciones.

A mis padrinos **Gloria y Lino** porque gracias a sus oraciones, comprensión y apoyo he llegado hasta aquí.

A todos mis Tios y primos paternos **González** por mostrarme que todo se puede lograr.

A todos mis Tios y primos maternos **Balcázar, Rosiles, López** que aunque la distancia nos separe el corazón nos une siempre.

A un ser *demasiado especial* que sin su ayuda no hubiese logrado esta meta, porque me ha brindado todo lo que una persona puede dar, con el fin de ver siempre una sonrisa y mucho amor alrededor, **"Mil Gracias"**
Fernando.

Al Ing. J. Benjamín Rangel G. mi más grande agradecimiento por su colaboración y dedicación para la realización de esta tesis.

A mis **sinodales** gracias por su tiempo, paciencia y comentarios para la mejora de este trabajo, gracias por ayudar a los jóvenes a superarse.

A **Isabel Rios M.** porque siempre tuvo las palabras exactas para hacerme continuar en este camino. Gracias.

A todos los **profesores** que por amor a nuestra Universidad brindan sus conocimientos y experiencias en la formación de nuevos hombres.

A la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza** porque me dio la oportunidad de cultivarme en su Campus II.

A mis amigos de toda la carrera **Tolita, J. Alejandro, Irma y Fabian, Miguel, Panchito, Teles, Edith, Angélica, Jaime** y a todos los que me brindaron su apoyo y ayuda en el recorrido de este camino.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente tuvieron que ver en la realización de éste trabajo.

A mi amigo inseparable en la buenas y en las malas a mi luz en la oscuridad.

DIOS GRACIAS por permitirme llegar a este punto porque aquí inicia otro camino.

ÍNDICE

	Pág.(s)
Objetivo general	III
Objetivos particulares	IV
Resumen	V
<u>CAPÍTULO 1 EL SUELO Y SU CONTAMINACIÓN</u>	
1. EL SUELO GENERALIDADES	
<i>1.1.1 Origen y Composición</i>	1
<i>1.1.2 Importancia y Propiedades del suelo</i>	4
<i>1.1.2.1 Aspectos importantes del suelo</i>	4
<i>1.1.2.2 Propiedades Físicas</i>	4
<i>1.1.2.3 Propiedades Químicas</i>	5
<i>1.1.2.4 Propiedades biológicas</i>	6
1.2 LA CONTAMINACIÓN	7
<i>1.2.1 Definición</i>	7
1.3 CONTAMINACIÓN DEL SUELO	7
<i>1.3.1 Clasificación de la contaminación del suelo</i>	8
1.4 CONTAMINACIÓN DEL MANTO FREÁTICO	10
1.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO, AGUA SUBTERRÁNEA	12
1.6 CONTAMINANTES MÁS FRECUENTES EN LOS SUELOS	18
1.7 CASOS DE AFECTACIÓN DE SUELOS	19
<u>CAPÍTULO 2 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SITIOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS PELIGROSOS</u>	
2. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SITIOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS PELIGROSOS	
2.1 TRATAMIENTOS FÍSICOS	22
2.2 TRATAMIENTOS QUÍMICOS	23
2.3 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	23
2.4 TRATAMIENTO TÉRMICO	24
2.5 APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DEPENDIENDO DE LOS CONTAMINANTES	33
2.6 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEPENDIENDO DEL TIPO DE SUELO	33
2.7 SELECCIÓN DE LA BIORREMEDIACIÓN	39
<u>CAPÍTULO 3 BIOTECNOLOGÍA Y BIORREMEDIACIÓN</u>	
3. BIOTECNOLOGÍA	40
3.1 ANTECEDENTES DE LA BIORREMEDIACIÓN	42
3.2 CONCEPTOS Y DEFINICIONES	43
3.3 UNA VISTA A LA BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS	45
3.4 TIPOS DE BIORREMEDIACIÓN	49
3.4.1 BIORREMEDIACIÓN IN SITU DE SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA	49
3.4.2 TERRENO DE CULTIVO O LANDFARMING	52
3.4.3 BIOVENTED	53
3.4.4 BIOREACTORES	54
3.4.5 COMPOSTEO	55
3.4.6 FASE SÓLIDA	56
3.4.7 AIR SPARCING	58

3.4.8 EXTRACCIÓN DE VAPORES DEL SUELO "SOIL VAPOR EXTRACTION"	60
3.4.9 ELECTRON ACEPTOR ALTERNATIVO	60
3.4.10 BIORREMEDIACIÓN NATURAL	60
3.5 MARCO INTERNACIONAL DE LA BIORREMEDIACIÓN	67

CAPÍTULO 4 DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS POR MICROORGANISMOS

4. DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS POR MICROORGANISMOS	
4.1 GENERALIDADES	70
4.2 DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS, ALIFÁTICOS Y OTROS	71
4.3 FENOL (COMO COMPUESTO AROMÁTICO)	74
4.3.1 GENERALIDADES DEL FENOL	74
4.3.2 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS	74
4.3.3 DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DEL FENOL	76
4.3.3.1 INTRODUCCIÓN	76
4.3.3.2 HISTORIA	76
4.4 OTROS ESTUDIOS	78
4.5 MECANISMO DE DEGRADACIÓN DEL FENOL	79
4.6 CASOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON FENOLES	81

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍAS AUXILIARES PARA LA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y SITIOS CONTAMINADOS

5. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN MÁS ADECUADA AL PROBLEMA	82
5.1 PLANEACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DE DETALLE	87
5.2 METODOLOGÍA PARA EL MANEJO DE SITIOS CONTAMINADOS POR LA LEGISLACIÓN ALEMANA	90
5.3 CASO EX-REFINERÍA 18 DE MARZO AZCAPOTZALCO	100
5.3.1 ANTECEDENTES	101
5.3.1.1 Características del Sitio	102
5.3.1.2 Localización geográfica	102
5.3.1.3 Topografía	102
5.3.1.4 Climatología	102
5.3.1.5 Hidrología	102
5.3.1.6 Geología	104
5.3.1.7 Geohidrología Regional	104
5.3.1.8 Desarrollo Histórico	104
5.3.2 ZONAS DEL SUBSUELO	108
5.3.2.1 Pozos de Monitoreo y abastecimiento	108
5.3.3 RECONOCIMIENTO DE LA ZONA	108
5.3.4 TECNOLOGÍAS POSIBLES DE EMPLEAR	117
5.3.5 MONITOREO Y PRUEBAS	119

CONCLUSIONES	124
BIBLIOGRAFÍA	127
GLOSARIO	133
SIGLAS	137
ANEXOS	138

OBJ

OBJETIVO GENERAL:

Aplicación del tratamiento de Biorremediación para los sitios contaminados con residuos peligrosos homogéneos, en base a una investigación previa del estado del sitio, para lograr la remediación del mismo.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- ◆ Seleccionar una técnica de tratamiento aplicable a las condiciones del sitio a tratar.
- ◆ Presentar una metodología general para la aplicación de una técnica de tratamiento del sitio.
- ◆ Presentar el o los tratamiento(s) biológico(s) llamado(s) Biorremediación.

RESUMEN

RESUMEN

Uno de los mayores problemas que actualmente enfrenta el mundo, es la contaminación de tierras, aguas subterráneas, lodos, aguas superficiales y aire, con productos químicos nocivos para el ambiente y el hombre. La necesidad de detener esta contaminación ha llevado a la ciencia a desarrollar nuevas tecnologías de tratamiento particularmente para el caso de la contaminación de tierras, a causa de derrames, fugas, accidentes u otros factores que conlleven al deterioro de la naturaleza del medio ambiente.

No se trata de quitar y llevar a otro lado la contaminación, o eliminar el contaminante a costa de una mayor afectación. Si no de una búsqueda de soluciones de acuerdo a los contaminantes, por medio de estudios previos del lugar, condiciones predominantes, grado de afectación, entre otros muchos factores a considerar para una adecuada eliminación o reducción del problema.

Por otra parte la toma de decisión en la selección y procura de las tecnologías de control de residuos peligrosos son generalmente basadas en la economía, las reglamentaciones gubernamentales, la adaptabilidad de la tecnología, la localización etc.

Por ello, se pretende mostrar un panorama de las alternativas que actualmente se tiene conocimiento y que han sido aplicadas en varios países, principalmente la llamada *Biorremediación* que es un proceso de empleo de microorganismos para transformar los componentes químicos peligrosos de un suelo contaminado en un producto final no peligroso, como dióxido de carbono y agua principalmente.

Dentro de los objetivos de la biorremediación se encuentran:

1. Incrementar la velocidad y la extensión de la biodegradación de los contaminantes. Algunos de los microorganismos, especialmente bacterias y hongos, pueden biodegradar una amplia variedad de compuestos orgánicos, a través de diferentes velocidades.
2. Utilizar o descubrir organismos que sean capaces de sobrevivir a los efectos tóxicos de los contaminantes.
3. Utilizar los microorganismos en una forma en que los productos de los procesos de degradación no sean tóxicos.

Entre algunas de las ventajas de la biorremediación se encuentran:

- ◆ Los residuos o los subproductos del proceso biológico (CO_2 , H_2O) son empleados geoquímicamente circulados al ambiente como productos de utilización.
- ◆ Microorganismos como bacterias y hongos, tienen una amplia gama de habilidades para metabolizar los diferentes químicos.
- ◆ Hasta donde es posible las tecnologías son desarrolladas para utilizar y provocar que microorganismos nativos degraden los contaminantes del sitio. En

otro caso, los microorganismos conocen el metabolismo de los contaminantes y pueden ser introducidos para probar la biodegradación.

Así también se presenta una metodología general para una mejor selección, y aplicación de la biorremediación. Entre algunos aspectos necesarios son:

- ◆ Parámetros de monitoreo (del contaminante y del suelo) como: composición concentración, solubilidad, dirección de flujo, pH, temperatura, propiedades geológicas etc.
- ◆ Evaluación de las condiciones del sitio y del contaminante para aplicar el tratamiento
- ◆ Evaluación de la viabilidad de un tratamiento biológico dentro del sitio (in-situ) o fuera (ex-situ).
- ◆ Aplicación del tratamiento
- ◆ Control y monitoreo.

Se mencionan algunos de los microorganismos más empleados en la biodegradación de compuestos como: hidrocarburos y compuestos aromáticos particularmente el fenol en el cual se centrará la atención como un residuo peligroso homogéneo.

En un inicio la contaminación de sitios no presentaba ninguna afectación al medio ambiente y por consiguiente al hombre, pero existen casos a nivel mundial donde a largo plazo han creado serios problemas.

En México se tienen muchos casos de sitios contaminados por varios años y que actualmente están presentando sus efectos al ambiente, los casos aquí expuestos no son los únicos, como lo es La Ex-Refinería 18 de Marzo, la cual tiene más de 40 años de suelo contaminado.

En materia Legal en México, aún se encuentra en proceso evolutivo y tomando conciencia las autoridades (SEMARNAP, INE, PROFEPA, etc.) de ello se están realizando estudios para dar paso a la aplicación de estas tecnologías como una solución viable para combatir la contaminación del suelo.

También se pretende despertar una conciencia ecológica por todo cuanto nos rodea ya que, así como es importante la industria de la transformación, los procesos, de la creación de nuevos y mejores productos para la evolución y beneficio del hombre. De igual importancia conservar aquellas materias primas que han sido empleadas por el hombre durante siglos y que en la actualidad es importante su conservación, ya que tienen que seguir siendo la base de todo ser viviente.

La biorremediación no es una panacea, que resuelva todos los problemas de contaminación de residuos peligrosos, pero en algunos casos es una alternativa viable para la disminución del problema.

CAPÍTULO I



EL SUELO Y SU
CONTAMINACIÓN

1. EL SUELO

1.1 GENERALIDADES

1.1.1 Origen y Composición

La capa que cubre la superficie de la tierra es el *suelo*; es un material poroso de muy diversas propiedades. Las rocas constituyen el material de origen del suelo. Éstas, se van fragmentando como resultado de los diversos procesos de intemperización (exposición a lluvias, vientos, cambios de temperatura, efectos de los elementos químicos del ambiente) y a la desintegración gradual que origina el establecimiento sobre ellas de organismos como los líquenes, mismos que dan oportunidad al establecimiento de organismos cada vez más complejos, que a su vez, aceleran la formación del suelo.

El *suelo* está formado por distintas capas denominadas horizontes, estos se forman como resultado de complejas interacciones a través de los procesos que ocurren durante la descomposición de la roca por los agentes atmosféricos, cuya secuencia desde la superficie hacia abajo se conoce como perfil del suelo. **Fig 1.1**

Los *suelos* se desarrollan y maduran con lentitud. Los suelos maduros varían mucho en color, composición, tamaño de poro, acidez (pH) y espesor.

La fracción sólida de un suelo típicamente productivo es aproximadamente 5% de materia orgánica y 95% de materia inorgánica. Algunos suelos pueden contener más del 95% de material orgánico y por el contrario otros menores del 1%.

El suelo contiene espacios de aire y generalmente tienen una textura suelta. **Fig 1.2.**

Los suelos son sistemas abiertos que sufren continuos cambios de materia y energía con la atmósfera, hidrosfera y biosfera.

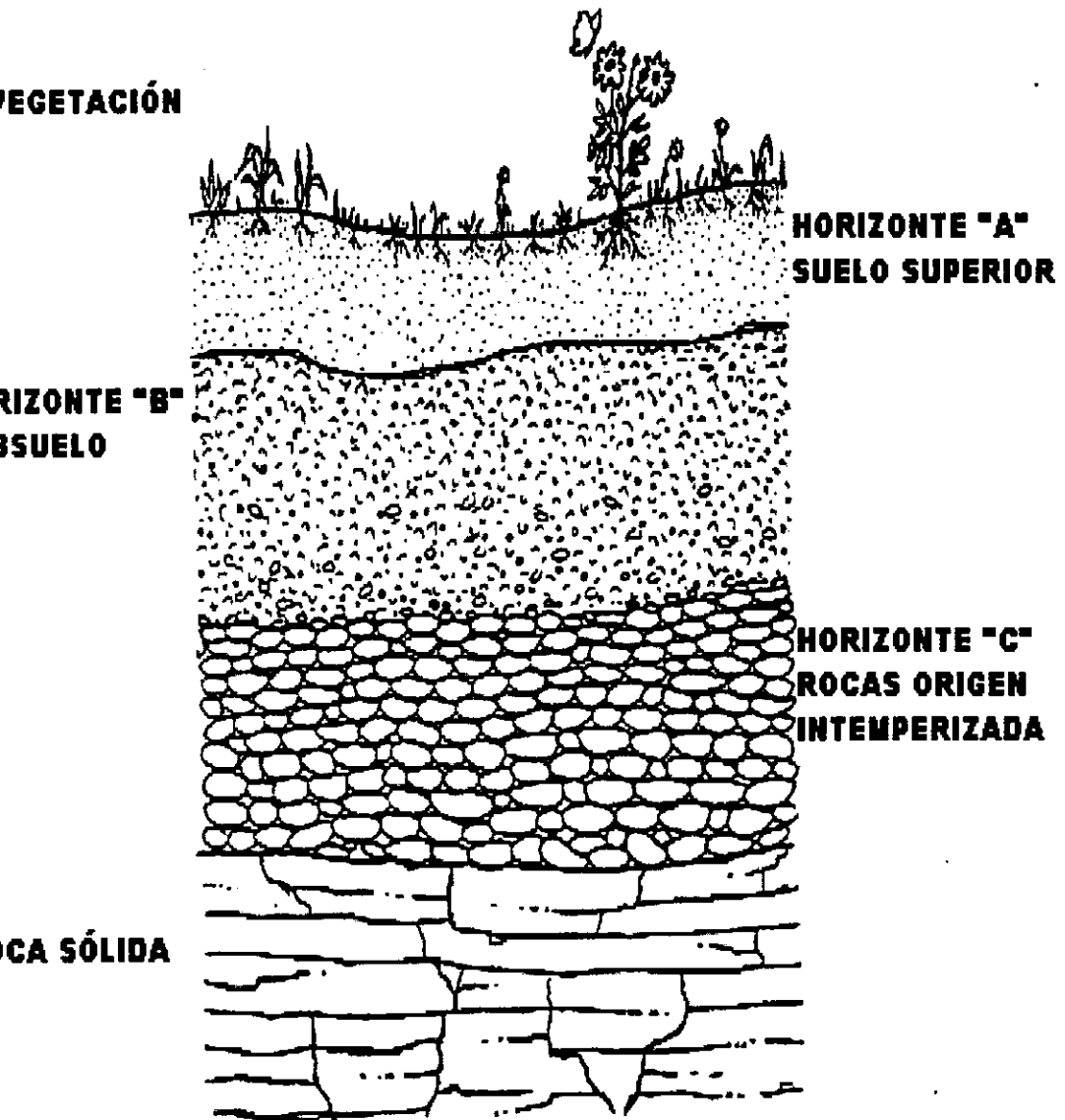
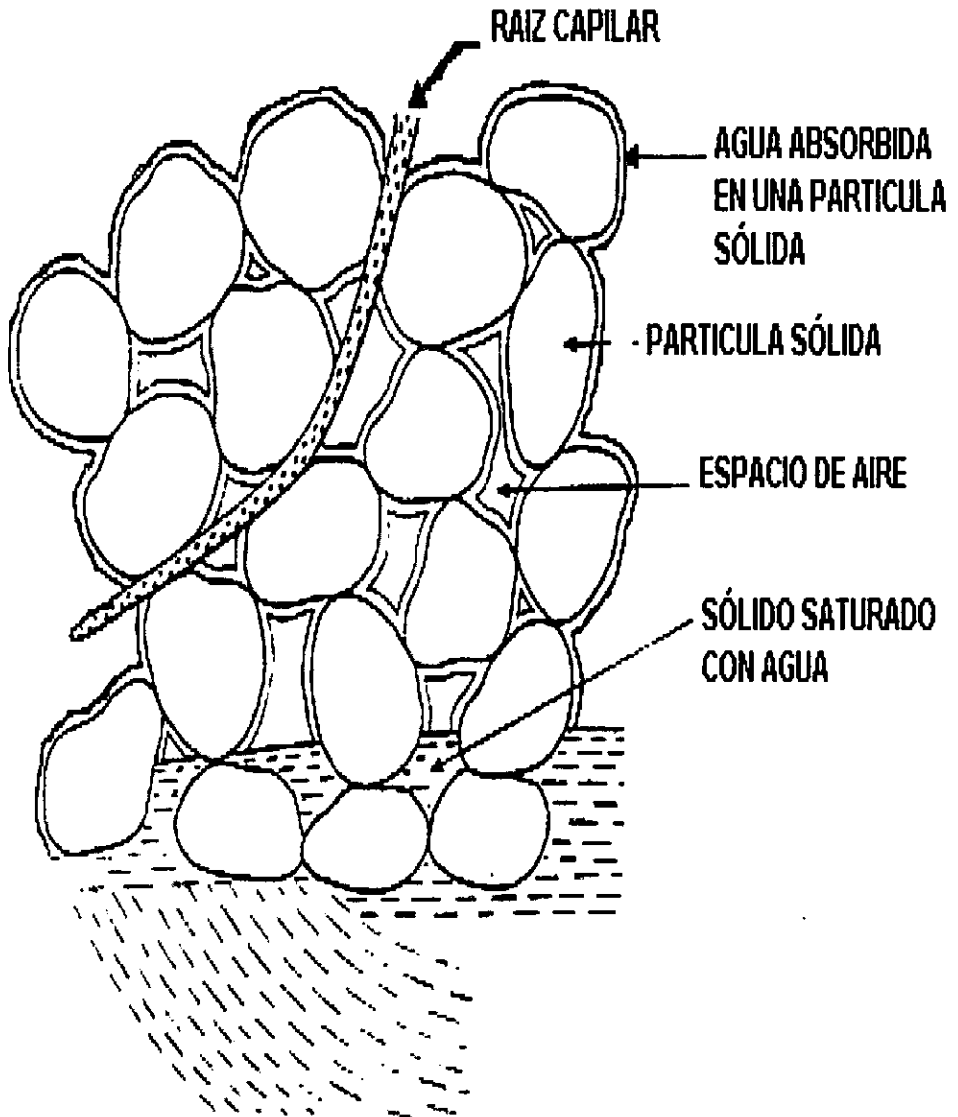


FIG. 1.1 CORTE EN PERFIL DE LOS HORIZONTES DEL SUELO



1.2 ESTRUCTURA FINA DEL SUELO, MOSTRANDO EL SÓLIDO, AGUA Y AIRE

El *suelo* consta de dos zonas hidrogeológicas: *la zona vadosa o no saturada* y *la zona saturada*; la *zona no saturada* incluye a la capa capilar, consta del agua que se encuentra arriba del nivel freático y se considera como agua no recuperable. La *zona saturada* es la que se encuentra abajo del nivel freático, éste último se define como el nivel de agua en que la presión del fluido en los poros del suelo es exactamente la atmosférica; asimismo, el nivel freático también representa el nivel que alcanza el agua en un pozo abierto poco profundo.

1.1.2 Importancia y Propiedades del suelo

Además del aire y el agua, el suelo es considerado como el tercer componente más importante del medio ambiente; provee una plataforma para las actividades de los animales terrestres y la raza humana. El suelo, desde un punto de vista ambiental, ejerce varias funciones: una como componente del medio bajo el aspecto ecológico; otras como participe de funciones Socioeconómicas y en la utilización para cubrir necesidades básicas (como alimentación y vivienda) del hombre.

1.1.2.1. Aspectos importantes del suelo

Los aspectos más importantes del suelo son:

- *Sustrato para la producción de biomasa*, aporta aire, agua y elementos básicos para el metabolismo de los vegetales.
- *Filtro*, retiene materias y productos que podrían dañar otros sectores.
- *Tampón*, trata de minimizar las alteraciones incorporando productos, transformándolos, etc.
- *Transformador de productos*, por su acción biológica, bioquímica y química, el suelo degrada muchas sustancias para transformarlas en productos inocuos.
- *Fuente de materias primas*, extracción de recursos minerales.
- *Reserva de agua*.
- *Bases para la habitación*, la industria y la infraestructura.
- *Zonas agrícolas* de producción de alimentos.
- *Preservación de bosques*, selvas y praderas.
- *Conductor* de la recarga natural de los acuíferos.

1.1.2.2 Propiedades Físicas

Dentro de las propiedades físicas del suelo relacionadas con su sistema depurador se tiene:

Estructura; se define como la forma que tienen los elementos minerales y orgánicos del suelo, para agruparse en agregados o estructuras no estáticas. La composición química de los vertidos afecta la estructura. Si por ejemplo las aguas son ricas en sodio, se produce una modificación de la estructura por dispersión y

ruptura de los agregados, mientras que los cationes polivalentes facilitan la floculación de las arcillas. En general una baja concentración de electrolitos facilita la dispersión, y una concentración elevada provoca la floculación.

Porosidad; la condición física de un suelo depende, en gran medida de la porosidad y del tamaño de los poros. En los suelos de textura fina, abundan más la microporosidad frente a la macroporosidad, dominante esta última en los suelos constituidos por gravas. En ambos casos los poros presentan poca variación en sus dimensiones. En los suelos agregados la porosidad es de carácter intermedio (poros grandes y pequeños).

Movimientos del Agua; en el suelo actúan dos fuerzas de origen diferente: por una parte la fuerza gravitacional, causa del movimiento descendente del agua a través de los horizontes edáficos y otra, las fuerzas de succión, de origen capilar, que provocan los movimientos ascendentes del agua, ayudados por los procesos de evaporación o de absorción a nivel radicular. La absorción es mayor en los suelos de estructura fina que en los de estructura gruesa, aumentando la capacidad de absorción por muchos productos en función del mayor contenido de materia orgánica del suelo receptor.

Gases en el suelo; el mecanismo más frecuente de intercambio de gases es el de difusión. El contenido en oxígeno de la atmósfera del suelo es ligeramente inferior al de la atmósfera libre, variando de unos suelos a otros según su estructura.

Intercambio de calor; de la misma forma que existe atmósfera, también se caracteriza éste por un microclima específico, dado por las variaciones del grado de humedad y las variaciones de temperatura.

La conductividad térmica del suelo, variable de unos suelos a otros, es un factor limitante del intercambio de calor, dependiendo las variaciones de temperatura de esta conductividad térmica y de la transferencia y captación del calor por el suelo.

Cuando un suelo seco recibe aguas, aumenta al máximo la conductividad térmica, y va decreciendo a medida que nos acercamos a la saturación.

1.1.2.3 Propiedades Químicas

Reacciones de intercambio; la fracción mineral del suelo mantiene una estrecha relación con la base de la nutrición mineral de ésta, y es aprovechada por las plantas en forma iónica.

La disponibilidad de estos elementos minerales es función de su solubilidad, y ésta es muy diferente para cada elemento por existir en el suelo en forma de combinaciones más o menos estables, formando parte del complejo absorbente;

pueden participar en procesos de cambio reversibles, constituyendo la fuente esencial de los elementos asimilables por las plantas a nivel radicular.

Intercambio de aniones cuya intensidad de intercambio aniónico es bastante menor que la de los cationes. Sin embargo, ciertos suelos retienen los aniones en forma intercambiable, como ocurre con Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y PO_4^{3-} . En los suelos ácidos, por ejemplo los ricos en hidróxidos, es donde la intensidad de intercambio de aniones es mayor, sobre todo si existe caolinita.

Intercambio de cationes; los principales cationes de cambio son: Al^{3+} , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} y Mn^{2+} siendo dominantes los cuatro primeros en suelos ácidos, y el Mg^{2+} y el Ca^{2+} en suelos básicos. El Na^+ es el catión más importante como elementos intercambiables en suelos salinos.

Acidez; la acidez de un suelo depende de varios factores: a) El pH (acidez activa que expresa la concentración de iones H_3O^+ , disociados de las soluciones del suelo); b) La Capacidad de Intercambio de Cationes (C.I.C.); c) El grado de saturación del complejo de cambio con Aluminio (acidez de reserva).

Salinidad; un exceso de sales solubles en el suelo, sobre todo de Na, reduce el poder de infiltración, puesto que estas sales actúan mediante presión osmótica, frenando la absorción tanto del agua como de otros iones presentes en el suelo.

Mecanismos de sorción y precipitación; se presentan frecuentemente en todo tipo de suelos los siguientes mecanismos: de adsorción, absorción y precipitación, teniendo preferencia alguno de estos según las circunstancias de cada caso.

1.1.2.4 Propiedades biológicas

Descomposición de los residuos orgánicos, una de las principales funciones de los organismos del suelo. El tipo de suelo favorece o dificulta la actividad microbiana (las arcillas aumentan el grado de crecimiento de la población microbiana).

Formación de humus.

Mejora de las propiedades físicas del suelo.

Transformación de elementos inorgánicos básicos.

1.2 LA CONTAMINACIÓN

1.2.1 Definición

Se entiende por *contaminación*, a la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.¹

Un *contaminante* es 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 natural, altere o modifique su composición y condición natural.¹

1.3 CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La contaminación al suelo es una de las consecuencias más graves ocasionadas por las actividades industriales. En general, la contaminación al suelo puede ser definida como un cambio perjudicial en sus características físicas, químicas y/o biológicas. Dicho cambio puede afectar o afectará nocivamente la vida humana o la de especies beneficiosas, animales o vegetales y puede malgastar y deteriorar los recursos de materias primas. Los elementos contaminantes son los residuos de la fabricación de un producto o los subproductos generados durante los procesos de manufactura y también las infiltraciones de sustancias hacia el suelo.

Todo suelo tiene cierta capacidad para recibir determinada cantidad de contaminantes sin sufrir consecuencias graves o permanentes, sin embargo, una vez rebasada dicha capacidad, los contaminantes ocasionan modificaciones y deterioro en los procesos naturales de los suelos. La forma en la cual los contaminantes depositados, adicionados o infiltrados afectan los procesos naturales de los suelos es muy variada y se manifiesta en distintas formas.

La adición de sustancias altamente tóxicas y/o corrosivas afecta indiscriminadamente a las plantas y animales que viven en y del suelo, modificando sus características fisicoquímicas, y favoreciendo la desertificación a largo plazo.

Otras sustancias no tienen graves efectos a corto plazo, no obstante puede ocasionar problemáticas de tipo retardado, cuando se hace evidente las consecuencias de su incorporación paulatina al suelo. En ocasiones afectan selectivamente a ciertas especies animales o vegetales, en detrimento de otras, afectando de esta forma el equilibrio natural preexistente.

1.3.1 Clasificación de la contaminación del suelo

Por otra parte la contaminación del suelo ha recibido menos atención que la contaminación del aire y de los cuerpos de agua. En muchos casos, los métodos utilizados para el control de la contaminación del aire y agua son los responsables de contaminar el suelo. Una forma de clasificar la contaminación del suelo es la siguiente:

- Por aplicación directa de químicos tales como pesticidas y fertilizantes.
- Por disposición de residuos antropogénicos.
- Por derrames accidentales.
- Por deposición de contaminantes atmosféricos.

El daño causado a los suelos depende de la cantidad, como de la naturaleza física y química del contaminante.

Los sitios donde normalmente se han contaminado los suelos, o se tiene alta probabilidad de contaminarlos cuando no se tienen instalaciones adecuadas son:

- Industrias
- Centros poblacionales
- Sitios de almacenamiento (tanques de almacenamiento de combustibles, aceites, solventes, lubricantes, pesticidas, etc.)
- Vehículos de transporte de químicos.
- Sitios de disposición final de los residuos municipales e industriales.

Con base en esta clasificación, podemos distinguir tres diferentes fuentes de generación de residuos: la primera consta de los sitios donde originalmente se producen, es decir, las industrias y los centros poblacionales. Ambos están íntimamente ligados por la dependencia económica que exista entre uno y otro. La segunda fuente la constituyen, potencialmente, los medios físicos que sirven para transportar, tanto los productos como los residuos industriales y municipales. La tercer fuente la constituyen los sitios de almacenamiento, ya sea temporal, como el caso de los productos comercializables y de los combustibles, o final, como es el caso de los sitios de disposición final de residuos sólidos.

El suelo puede contaminarse, vía descargas intencionales o accidentales de líquidos, sólidos o gases (este último como fugas de gasoductos, amoníaco, entre otros). Los contaminantes del suelo, al igual que los del agua y aire, pueden sufrir transformaciones químicas y desplazarse en dirección horizontal y vertical. Debido a que hay varios tipos de suelos, el comportamiento de un contaminante determinado depende de la composición y características físicas (como la porosidad) de los mismos.

Existen otras clasificaciones de la contaminación del suelo como se muestra a continuación por actividades industriales.

**TABLA 1.1 CONTAMINACIÓN DEL SUELO
POR ACTIVIDADES INDUSTRIALES**

Origen	Perturbación	Efecto
Atmosférico	<p>Acidificación del suelo por depósitos ácidos.</p> <p>Aporte de productos tóxicos (productos minerales y productos orgánicos).</p>	<p>Cambios en la actividad del suelo por inmisiones de SO_x y de NO_x.</p> <p>Acidificación del agua.</p> <p>Alteración de los procesos biológicos.</p>
Aguas	<p>Vertidos de origen industrial.</p> <p>Vertidos accidentales.</p> <p>Uso inadecuado de aguas residuales.</p>	<p>Intoxicaciones o degradación de áreas determinadas.</p> <p>Aporte de metales pesados.</p> <p>Intoxicación puntual.</p> <p>Degradación de áreas forestales o de cultivos.</p> <p>Colmatación de poros.</p> <p>Alteración de la biota del suelo.</p> <p>Aporte de metales pesados.</p> <p>Reacciones de intercambio iónico negativas.</p> <p>Alteración de las transformaciones de los elementos presentes.</p>
Sólidos	<p>Ocupación de suelos.</p> <p>Impermeabilización del suelo</p> <p>Lixiviados en depósitos de materias primas de residuos</p>	<p>Impacto visual.</p> <p>Orientación inadecuada de la basura.</p> <p>Contaminación del suelo.</p> <p>Contaminación de acuíferos.</p> <p>olores</p> <p>Intoxicación del suelo en ciertos casos.</p>

FUENTE: ECOLOGÍA INDUSTRIAL, ED. MUNDI PRENSA, 1990.

1.4 CONTAMINACIÓN DEL MANTO FREÁTICO

El agua existente bajo la superficie del terreno es agua subterránea. Las rocas y suelos que poseen la propiedad de permitir el paso del agua, u otras sustancias como el petróleo y el gas, se dicen que son permeables a ese determinado fluido. Las arenas gruesas y limpias son permeables para casi todos los fluidos.

Las aguas subterráneas proceden principalmente de la infiltración de las aguas meteóricas, tales como la lluvia y el hielo fundido, y de los escapes por filtración de cursos de agua, lagos, balsas, canales, embalses u otros depósitos de agua. Las aguas profundas no se constituyen de agua químicamente pura, sino de soluciones o suspensiones de sustancias diversas, las cuales pueden variar desde contenidos muy débiles hasta concentraciones muy altas. Las aguas subterráneas pueden contener también aire y otros gases, bien en disoluciones de ellas o bajo forma de pequeñas burbujas, generalmente microscópicas

Considerando el caso más sencillo de una región de superficie llana con una cobertura de suelos más o menos uniforme por encima de la roca. A profundidades diversas bajo la superficie del terreno existe una zona de saturación, en la que el agua llena todos los poros de los suelos y todas las cavidades de las rocas infrayacentes. El agua existente en la zona de saturación se designa por lo general, como agua freática y su superficie superior es el nivel freático. Cuando las condiciones geológicas y topográficas son más complejas podrá haber más de una zona de saturación y por consiguiente, más de un nivel freático en una localidad determinada.

Como ya se había mencionado las aguas vadasas son las aguas que existen entre la superficie del terreno y el nivel freático. Una parte de las aguas vadasas es atraída por el suelo o por las partículas rocosas. Otra parte del agua vadosa es de carácter gravitatorio, es decir, no se encuentra sometido a las fuerzas de atracción ocasionadas por la absorción del medio. El exceso de agua vadosa, no sometido a fuerzas de atracción desciende lentamente hasta alcanzar la superficie freática.

El nivel de las aguas freáticas no es horizontal, ni es sentido longitudinal, es decir en la dirección del flujo, ni en dirección transversal y cuando tiene lugar en suelos, su conformación sigue, a menudo, de manera atenuada, la de la superficie del terreno suprayacente. Debido a esto el agua subterránea en el nivel freático se encuentra en movimiento constante, excepto en puntos aislados. La **Figura 1.3** muestra la distribución general en el agua subterránea.

El flujo de agua subterránea es generalmente muy lento y, por lo regular laminar, en contraste con las aguas superficiales que son turbulentas por lo general. Sin embargo, pueden presentarse excepciones en lo referente al flujo del agua subterránea, que se vuelve turbulento en los grandes conductos o pasadizos subterráneos formados en rocas tales como la caliza cavernosa.

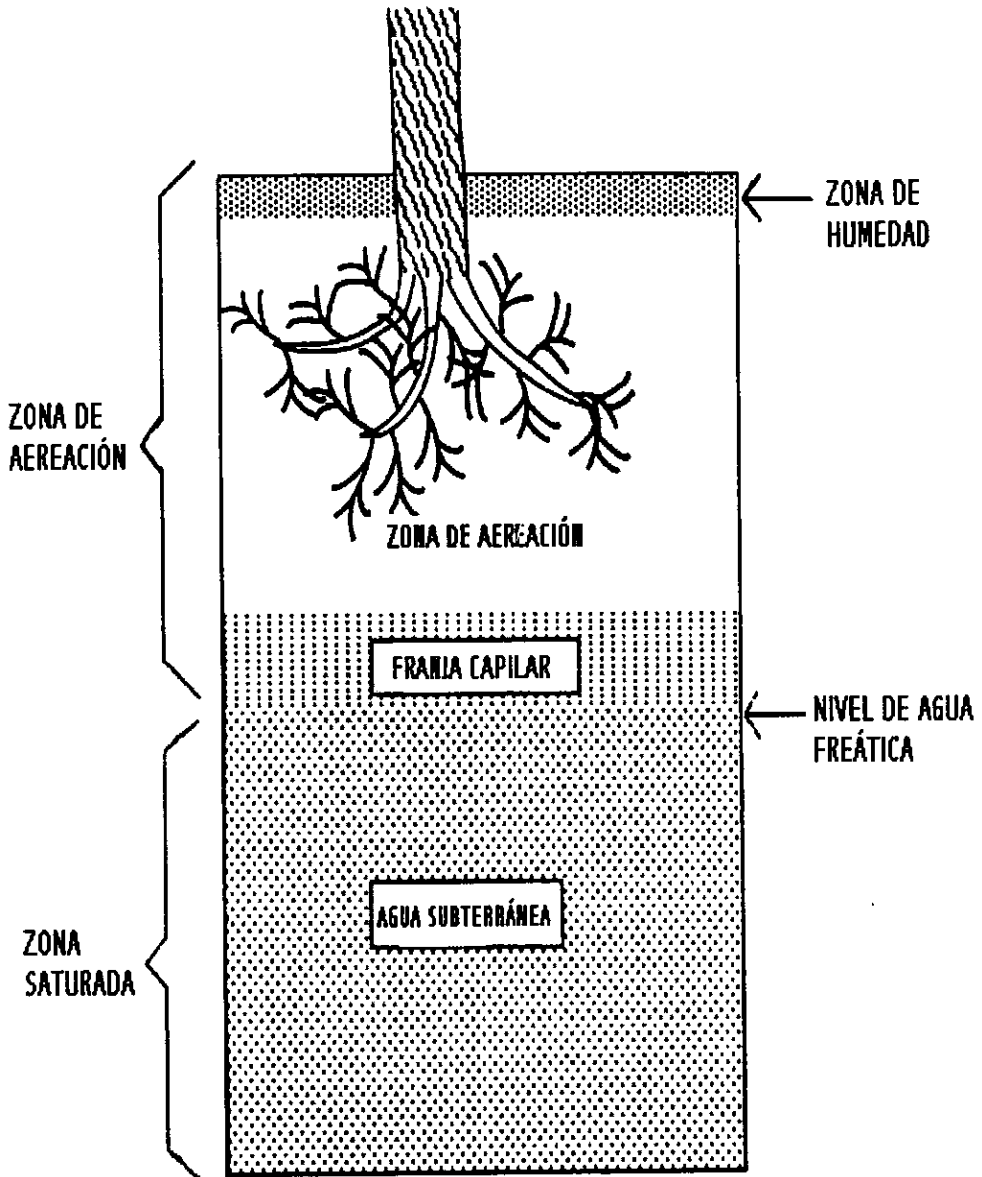


FIG. 1.3 ZONAS PRINCIPALES DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los depósitos o cuencas de agua subterráneas constituyen áreas con límites geológicos. Una cuenca de agua subterránea puede tener longitudes y anchuras variables.

En general las aguas subterráneas sufren el fenómeno de la contaminación cuando los elementos presentes en los suelos, migran hacia el manto freático. Aunque alguna parte de los contaminantes quedan inmovilizados en la zona no saturada, o vadosa del terreno, una vez que se agota la capacidad de inmovilización de materiales del suelo, el siguiente paso, es la llegada de los materiales al manto freático.

Existen condiciones muy diversas que pueden acelerar o retardar lo anterior, entre otras, el tipo de suelo existente y sus respectivos estratos, la profundidad del nivel del manto freático, la disposición del acuífero, la característica del acuífero, tipo de contaminantes presentes y aspectos tan variados como la precipitación pluvial, o la existencia de influencias hidrológicas en la zona, que propicien la movilización de los contaminantes.

1.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO, AGUA SUBTERRÁNEA

La localización de la contaminación en la subsuperficie; algunos puntos importantes son la naturaleza química y propiedades químicas de los contaminantes y sus interacciones con materiales geológicos.

En la zona insaturada, la contaminación puede existir en cuatro fases (Huling and Weaver, 1991)²:

- (1) fase aire-vapor en los espacios de los poros;
- (2) fase adsorbida-subsuperficie sólida adsorbente;
- (3) fase acuosa- disuelta en agua;
- (4) fase líquida-Fase Líquidos No Acuosos (Liquid Phase-Nonaqueous Phase Liquids, NAPLs).

La contaminación en un material saturado puede existir como un adsorbente de saturación residual los sólidos acuíferos, disueltos en agua, o como NAPL. La transportación ocurre en la fase vapor, acuosa y en la fase NAPL. La interacción entre las propiedades físicas de los contaminantes influye la transportación (densidad, presión de vapor, viscosidad e hidrofobicidad) y estos sobre el ambiente subterráneo (geológico, mineralogía y forma orgánica e hidrología) determina la naturaleza y la extensión de la transportación.

La *fase líquida no acuosa* (NAPL) existe como una fase continua inmisible tiene el potencial de ser móvil, resultando una contaminación esparcida. La saturación residual es la porción del volumen de líquido dependiente por las fuerzas capilares

²KERR ROBERT

en los poros de la subsuperficie del material; la NAPL no es una larga fase continua pero existe como aislado, glóbulos residuales. La fase de saturación residual puede actuar como una fuente continua de contaminación en cualquier material saturado o insaturado debido a la disolución en el agua infiltrada o subterránea o volatilización en los espacios de las esporas.

Los líquidos menos densos que el agua, como los hidrocarburos de petróleo, son llamados *líquidos ligeros de fase no acuosa* (Light Nonaqueous Phase Liquids, LNAPLs) estos pueden viajar verticalmente hasta que se agote la saturación residual del líquido o hasta que la franja del capilar sea enriquecida. Algunos esparcimientos del volumen del líquido pueden ocurrir hasta el origen de la infiltración del líquido suficientes para penetrar al nivel de agua freática. Fig. 1.4

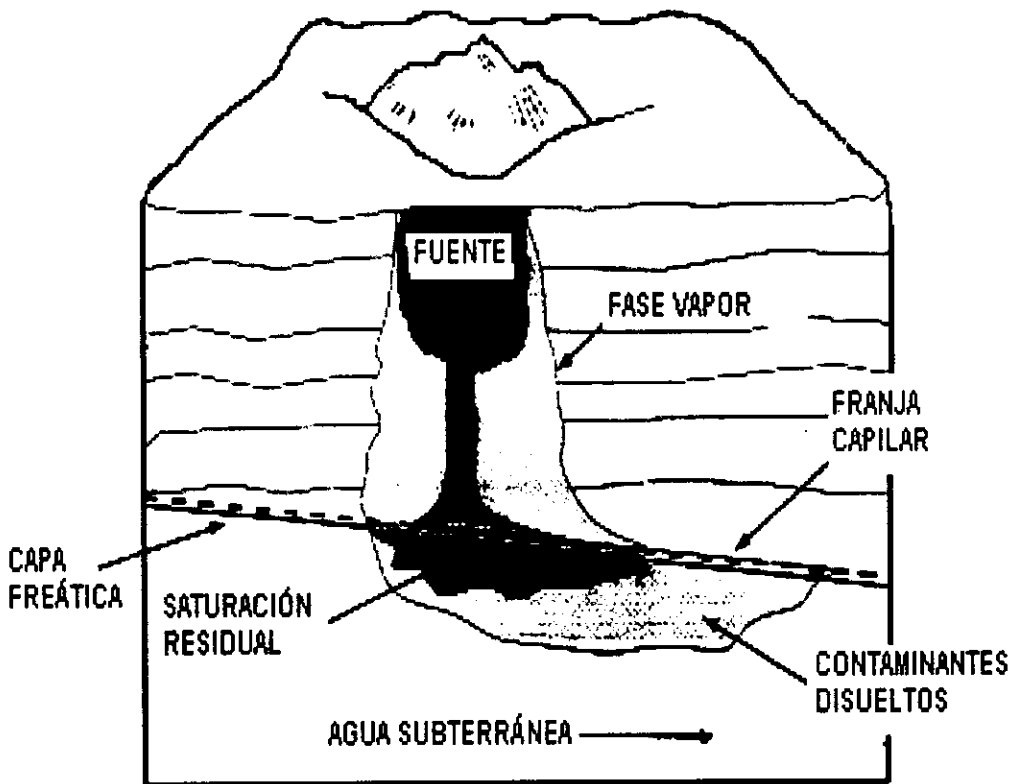


FIG. 1.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS HIDROCARBUROS (HC) EN LA SUBSUPERFICIE

Los hidrocarburos pueden extenderse lateralmente y flotar en la superficie del nivel de agua freática, formando un montículo que llega a ser compensado en lentes de extensión debido a la presión ascendente del agua (Hickee y Reisinger, 1987)³. Las fluctuaciones del nivel freático del agua se deben a variaciones estacionales, bombeo o recarga pueden resultar en un movimiento adicional del volumen del líquido a la subsuperficie con una contaminación residual significativa presente debajo del nivel de agua freático.

Los constituyentes más solubles pueden disolverse en el volumen del líquido del agua y serán transportados con la migración del agua subterránea.

La migración vertical de la fase líquida densa no acuosa (Dense Nonaqueous Phase Liquids, DNAPLs) puede continuar a través del suelo y los materiales insaturados bajo las fuerzas de la gravedad y la atracción capilar hasta que la franja capilar o una zona de baja permeabilidad capilaridad sea enriquecida. El volumen de líquido esparcido hasta la entrada es enriquecido por la penetración en la franja capilar del nivel de agua freática. Debido a que la densidad de solventes clorados es mayor que la del agua, La contaminación de la fase líquida no densa DNAPLs pueden continuar bajando dentro del acuífero hasta que una capa impermeable sea alcanzada (Fig. 1.5).

La contaminación de DNAPL en ambientes subterráneos heterogéneos (Fig. 1.6) es difícil de identificar y remediar.

³ VER GLOSARIO

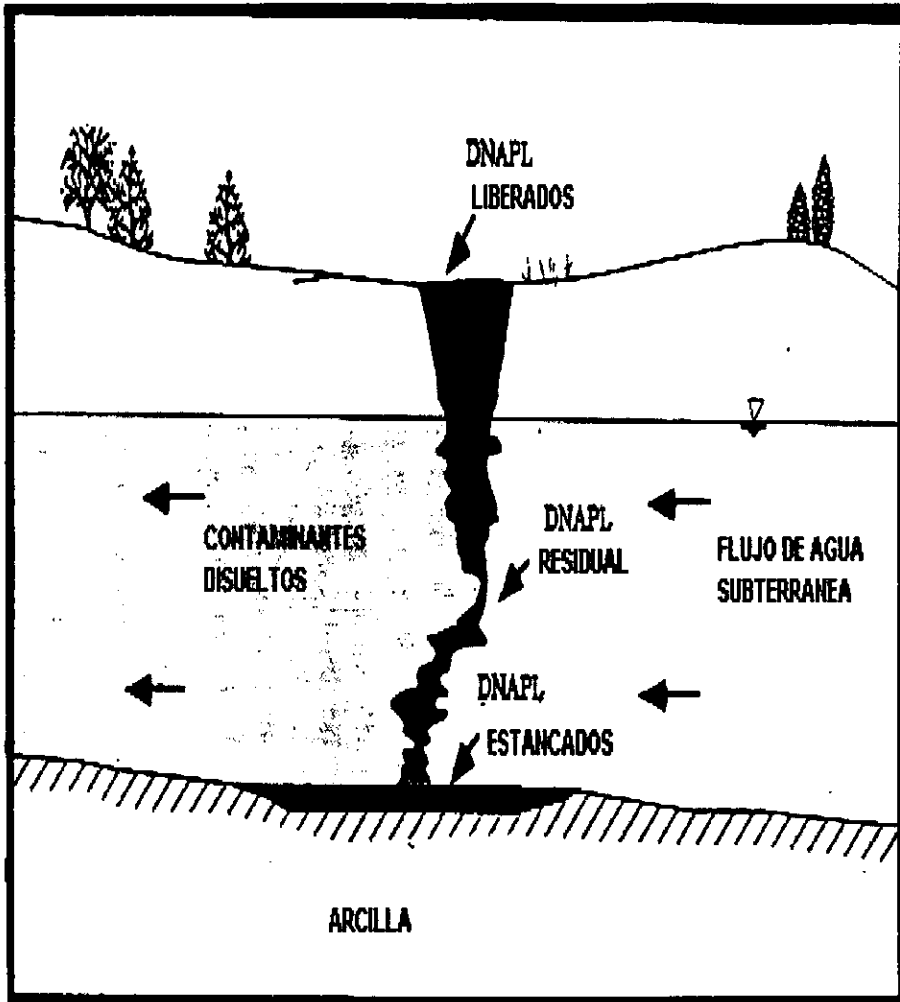


FIG 1.5 MIGRACIÓN DE DNAPL A TRAVÉS DE LA ZONA VADOSA A UNA ZONA IMPERMEABLE EN UNA SUBSUPERFICIE RELATIVAMENTE HOMOGÉNEA (HULING & WEAVER, 1991).

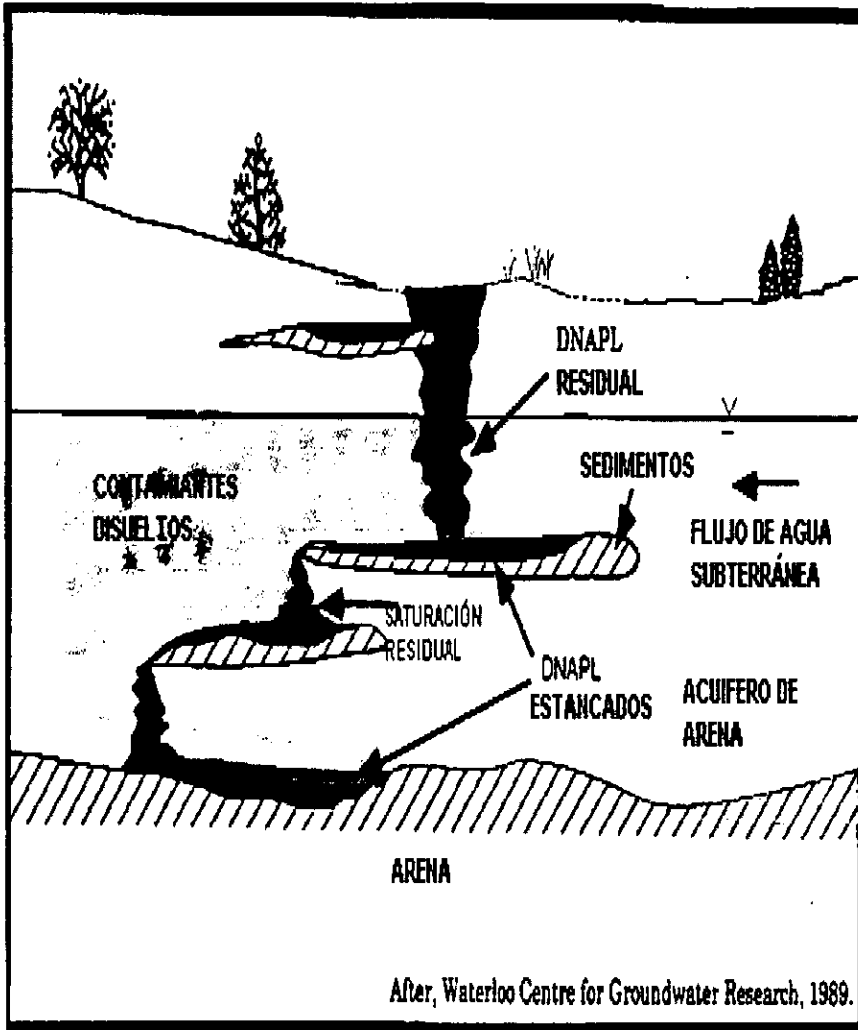


FIG 1.6 SITIO Y PROFUNDIDAD DE LOS DEPÓSITOS DE DNAPL DESDE SU MIGRACIÓN A TRAVÉS DE MATERIALES DE SUBSUPERFICIE HETEROGENEA

FUENTE: HANDBOOK OF BIOREMEDIATION

La figura 1.7 muestra, las posibles fuentes de contaminación. La más obvia es la lixiviación de rellenos que contienen residuos peligrosos. En algunos casos, los materiales líquidos peligrosos son colocados en lagunas, que van a dar al acuífero. Otro caso es el alcantarillado que puede resultar contaminado, con la descarga de pozos sépticos. Los residuos esparcidos en la tierra pueden resultar en la contaminación del acuífero por lixiviación. Algunos residuos peligrosos son deliberadamente depositados bajo tierra en confinamientos; en estos depósitos puede resultar un intercambio de agua contaminada entre la superficie del agua y el manto freático a descarga y carga de estos puntos.

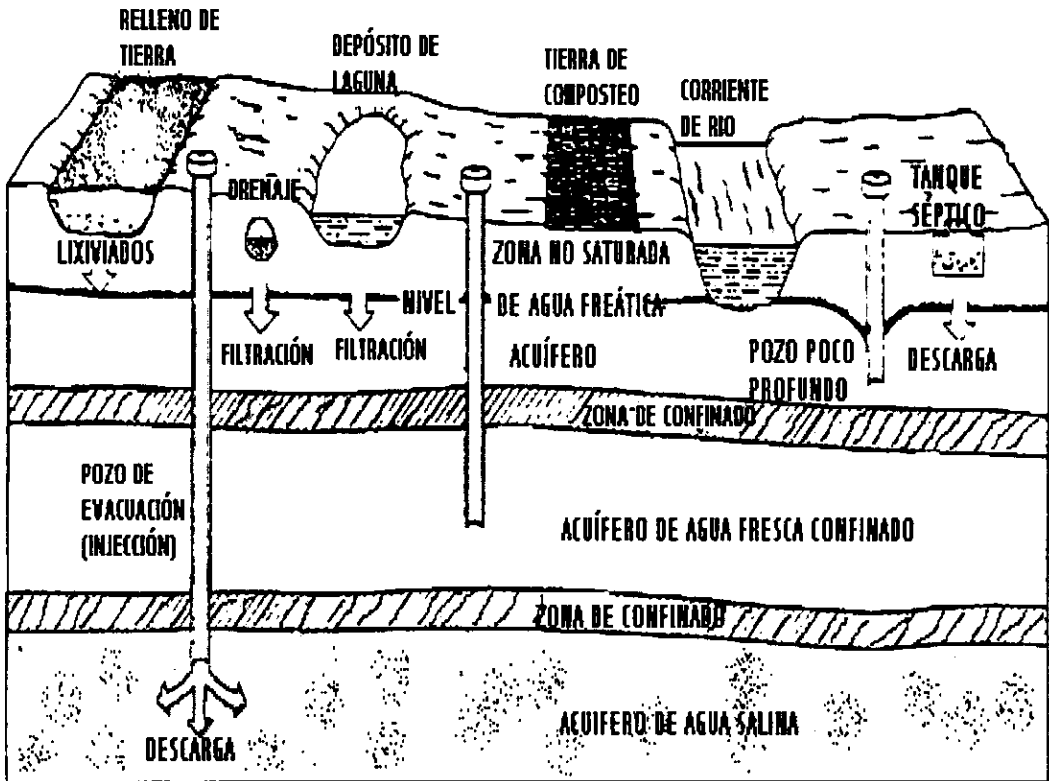


FIG 1.7 FUENTES, DISPOSICIÓN Y MOVIMIENTO DE LOS RESIDUOS EN LA TIERRA

1.6 CONTAMINANTES MÁS FRECUENTES EN LOS SUELOS

La necesidad del mundo en conocer sobre los posibles efectos que causan los productos químicos en el hombre y el medio ambiente, se centra en unas pocas clases de compuestos (según EPA), como son:

- Pesticidas.
- Compuestos aromáticos.
- Compuestos alifáticos halogenados
- Nitroaromáticos
- Bifenilos policlorados
- Hidrocarburos policíclicos aromáticos
- Nitrosaminas

En la siguiente tabla se mencionan algunos de los ejemplos de compuestos orgánicos que se han detectado en el suelo y cuya presencia representa un peligro para el ecosistema, ya que de algunos de ellos se sabe, o se sospecha, que son carcinogénicos, teratogénicos⁴ y/o mutagénicos. Los compuestos más problemáticos en este sentido son los aromáticos con algún grupo halógeno sustituyente (especialmente cuando el halógeno es el grupo cloro), siendo los bifenilos policlorados y los clorobenzenos ejemplos claros de contaminantes.

TABLA 1.2 EJEMPLOS DE CONTAMINANTES MÁS FRECUENTES EN LOS SUELOS

TIPO DE COMPUESTO	EJEMPLOS
Alifáticos (halogenados)	Tricloroetano Cloruro de metileno
Alifáticos (no-halogenados)	Acrilonitrilo
Aromáticos (no-halogenados)	Tolueno Fenol Benceno Cresol Nitrobenceno
Aromáticos (halogenados)	Pentaclorofenol Hexaclorofenol Clorobenzoato Diclorofenol
Policíclicos (no-halogenados)	Naftaleno Bifenilo Antraceno Benzoantraceno
Policíclicos (halogenados)	Bifenilos policlorinados y polibromados

FUENTE: RUIZ SILVA, I.

⁴VER GLOSARIO

1.7 CASOS DE AFECTACIÓN DE SUELOS

A continuación se citan algunos casos de contaminación de suelos desde metales, pesticidas, derrames accidentales y otros a través de los años se han acrecentado y hasta hoy se tiene conocimiento de su afectación. Los países citados no son los únicos y no sólo presenta un caso, sino muchos y muy variados, pero aquí se mencionan algunos para dar una visión general a escala mundial de este problema.

Alemania

Existe gran cantidad de sitios contaminados en Nothrhine Wesfalia por las plantas de coque y de sus industrias químicas petroquímicas. En Alemania las fábricas de coque son muy antiguas de 50 u 80 años. Especialmente durante la guerra los lugares de llenado y transportación fueron bombardeados y ahora en nuestros días, están altamente contaminadas tanto en suelo como en agua. Cabe mencionar, que muchas de las sustancias orgánicas que se empleaban en las fábricas de coque son cancerogénicas, las concentraciones tolerables de estas sustancias en el suelo y el agua son extremadamente bajas.

Brasil

La contaminación causada por un complejo industrial abandonado en la Región metropolitana de Sao Paulo. Este complejo fue una de las primeras industrias químicas de Brasil fundada en 1932 y que producía principalmente hexacloro-ciclohexano, pesticidas, sosa cáustica y cloro por medio de un proceso electrolítico con celdas de mercurio. En 1986 fue cerrada y lista para demoler pero está inmersa en zonas residenciales y comerciales.

La principal fuente de contaminación es la dispersión del mercurio dentro de las celdas de la planta de formación de la sosa. Estos formaron pequeñas manchas de mercurio en la superficie y causando infiltración en el suelo.

Estados Unidos

Durante el periodo de 1940 a finales de 1980, el toxafeno⁵ fue empleado como un baño de ganado en la Navajo Indian Reservation alrededor de 200 sitios esparcidos a través de 20 000 millas cuadradas en Nuevo México y Arizona.

En 1983 la EPA prohibió el uso del toxafeno y la aplicación del pesticida prácticamente cesó. Sin embargo, el toxafeno se degrada muy lentamente, el rocío anual del ganado causó la concentración del pesticida en los suelos el cual se incrementó con el tiempo. El mayor problema que presenta la exposición de éste, es cáncer en la piel y sistema respiratorio, y en segundo por consumir carne de ganado contaminado.

Japón

En Japón la contaminación de suelos se convirtió en un problema sumamente grave por primera vez, cuando las descargas con metales pesados provenientes de las minas contaminaron los terrenos agrícolas, afectando seriamente las cosechas y la salud de los agricultores de la zona.

Ante esta situación, en 1971 se estableció la Ley sobre la Prevención de la Contaminación de Suelos para Terrenos Agrícolas, de la cual se derivaron las normas para el manejo de cadmio, cobre y arsénico en ese país.

Se ha descubierto que en estudios previos a la reutilización de sitios de fábricas o industrias demolidas, los niveles de contaminación de suelos y la calidad de agua (de acuerdo a la Ley sobre Control de la Contaminación del Agua), presentan un aumento en los últimos años

En 1994, se registraron un total de 232 casos de contaminación del suelo, de los cuales 109 casos perjudicaban los entornos ambientales tales que como aguas subterráneas, ríos, etc. El principal problema era la contaminación de las aguas subterráneas por tricloroetileno y tetracloroetileno.

México

Dentro de los programas de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Distrito Federal (SEMARNAP, INE), se han efectuado 84 visitas de verificación (estaciones de servicio de gasolina en su mayoría), de las cuales 13 casos se detectó suelo contaminado con hidrocarburos fase líquida sobre el nivel freático, 67 sitios contaminados sin hidrocarburos en fase líquida y cuatro sin afectación, donde las principales causas de fugas de hidrocarburos se debe a la antigüedad de los recipientes de almacenamiento y líneas de conducción, falta de mantenimiento y corrosión.

Durante el mes de agosto de 1996, se detectó un problema de derrame y fuga de combustible en una estación de servicio ubicada al noroeste del D.F., ocasionando afectación a las instalaciones de la Interestación Panteones-Tacuba del Sistema de transporte Colectivo Metro, en lo referente a infiltraciones al muro de contención con la contaminación de dos registros y un cárcamo de bombeo.

La transportación por ductos de productos derivados de la actividad petrolera, ha generado inquietudes de tipo ambiental y de seguridad, debido fundamentalmente a fugas de los hidrocarburos. Tal es el caso del 14 de enero de 1997, donde se reportó una fuga de hidrocarburo por el descontrol de una toma clandestina en el estado de Veracruz.

Se realiza un desarrollo residencial en la Zona metropolitana (Ecatepec), en un sitio ocupado anteriormente por la industria acerera. Los estudios presentaron la presencia en el suelo de arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc, concentraciones que superan los criterios para uso residencial utilizados en Canadá, E.U., Países Bajos y Reino Unido. Lo que implica un riesgo por los efectos cancerígenos.

La empresa Cromatos de México, S. A. Se instaló en 1958 en Lechería, en el municipio de Tultitlán, Estado de México, la cual transformaba el mineral de cromita insoluble a compuestos de cromo hexavalente solubles, era ineficiente, por lo que los residuos generados contenían gran cantidad de cromo VI adsorbido. Los vecinos emplearon algunos de estos residuos para llenar calles y pavimentar, lo que con lluvias y con el tiempo se comenzó a lixiviar el cromo contaminando de aguas profundas y suelos. La fábrica fue clausurada y en 1982 se construyó un cementerio en donde se dispusieron todos los residuos que se pudieron recolectar.

CAPÍTULO 2

A stylized, high-contrast black and white graphic of a palm tree. The trunk is a thick, dark vertical line. The fronds are represented by several thick, curved black bands that sweep upwards and outwards from the trunk, creating a silhouette of a palm tree. The graphic is positioned in the background, behind the title text.

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SITIOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS PELIGROSOS

2. TECNICAS DE TRATAMIENTO DE SITIOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS PELIGROSOS

La remediación ambiental, específicamente la limpieza de suelos contaminados, y diversos cuerpos de agua, es uno de los problemas técnicos y sociales que se presenta actualmente. Los contaminantes tienen diversos orígenes y causan una serie de problemas que inclusive se presentan lejos del sitio de contaminación. Existen numerosas tecnologías de tratamiento para remediar estos sitios contaminados. Las tecnologías desarrolladas para estos procesos de remediación se clasifican como: *físicos*, *químicos*, *biológicos* y procesos de *destrucción térmica*. Generalmente estos son específicos para el tipo de residuo peligroso a controlar. Más adelante se muestra un resumen de estas tecnologías. Muchas de estas han sido usadas en varios lugares y basados en estas experiencias pueden ser adaptadas a la limpieza de sitios. Ninguna de estas tecnologías, sin embargo, es universalmente adaptable a todos los sitios debido a la complejidad y variabilidad de los residuos.

2.1 TRATAMIENTOS FISICOS

Los tratamientos físicos no pueden destruir los residuos peligrosos. Más bien cambian la peligrosidad del residuo, a través de los cambios en las propiedades de los contaminantes, mientras la naturaleza química de los compuestos se mantiene inalterable. Las propiedades físicas de los contaminantes son manipuladas para facilitar la remoción de la contaminación de la fuente donde se encuentre (para una forma más conveniente de disposición). Sus ventajas son: simplicidad, costo relativamente bajo y amplio intervalo de aplicación.

El tratamiento físico toma en cuenta únicamente las propiedades físicas (viscosidad, densidad, pH, solubilidad, etc.), para su separación sin llevar a cabo ninguna reacción. La mayoría de las operaciones físicas generalmente producen dos corrientes separadas. Una de esas corrientes es, generalmente, un líquido no peligroso o material sólido que puede ser depositado fácilmente. La otra corriente producida por el tratamiento físico es usualmente un volumen reducido de concentración del residuo peligroso que además debe tener un tratamiento

adicional o destrucción térmica, e incluso, en un sitio de disposición final de residuos peligrosos. Típicamente la remoción compuestos inorgánicos como son los metales pesados durante los trabajos de remediación de sitios puede producir lodos o sólidos que deben mandarse a sitios para su disposición final. La *Separación* produce compuestos volátiles que pueden ser destruidos por técnicas térmicas antes de descargarlos a la atmósfera. Por ejemplo la *Adsorción con Carbón* cuyo costo es elevado, puede remover grandes cantidades de compuestos orgánicos de los sistemas acuosos.

2.2 TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Los tratamientos químicos manipulan las propiedades químicas de los contaminantes para facilitar la remoción o degradación de los mismos del área afectada. Los productos finales del proceso de descomposición química pueden entonces ser fácilmente separados, (en algunos casos pueden ser dañinos por la destrucción de los constituyentes o por cambios químicos). La neutralización y precipitación son técnicas de tratamientos químicos ampliamente empleados para remover residuos inorgánicos de corrientes acuosas. Ambos procesos son capaces de producir lodos peligrosos que deben ser dispuestos en una mejor forma ambientalmente hablando. Otras técnicas de tratamiento químico incluyen la oxidación aire-húmedo, la cual involucra la combinación de reacciones que ocurren en la fase líquida a través de la adición de un oxidante como el ozono o permanganato de potasio.

2.3 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos son aquellos donde se efectúan reacciones aerobias y anaerobias para la eliminación o reducción de contaminantes empleando para ello microorganismos.

Los procesos de tratamiento biológico utilizan mecanismos bioquímicos y biológicos para llevar a cabo un cambio químico en las propiedades de los contaminantes de interés. Las propiedades químicas son alteradas bajo la acción de una amplia variedad de microorganismos para causar la descomposición del compuesto. Este metabolismo de los compuestos orgánicos produce mayor masa biológica como la energía necesaria para la vida de los microorganismos. Así, los contaminantes sirven de "alimento" para los microorganismos.

Los productos finales de la degradación microbiana son células nuevas, monóxido de carbono, agua, haluros, nitrógeno (elemental), sulfuro, calor y energía en exceso. Frecuentemente, la descomposición de compuestos orgánicos no es completa, formándose compuestos de bajo peso molecular, tales como: alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos. Sin embargo, estos compuestos son de baja toxicidad para los microorganismos y son fácilmente biodegradables bajo condiciones apropiadas.

Los sistemas de tratamiento biológico son altamente sensibles a cambios en la temperatura, contenido de oxígeno, y la carga de los contaminantes tóxicos en el sistema.

2.4 TRATAMIENTO TÉRMICO

EL tratamiento térmico usa altas temperaturas (800-1000°C, más de 1500°F) como mecanismo principal para destruir los residuos peligrosos. Durante la incineración, las moléculas orgánicas son oxidadas cuando son calentadas a altas temperaturas. En este tratamiento se reduce la masa y el volumen del residuo, hasta convertirlo en cenizas. Este proceso debe realizarse en lugares controlados, sin que se presenten daños al ambiente o a la salud. Otras técnicas de destrucción térmica están en desarrollo para proveer mayor eficiencia y remover los residuos.

Las tecnologías "on site" están divididas en dos amplias categorías:

A. Las tecnologías "In situ" (realizadas sin excavación del suelo dentro del sitio):

- ◆ *Volatilización*
- ◆ *Biorremediación*
- ◆ *Lixiviación "Soil Leaching"*
- ◆ *Separación/Contención*
- ◆ *Vitrificación*
- ◆ *Remediación pasiva*

Las siguientes tecnologías in situ consta de tratamientos biológicos, físicos y químicos para efectivamente reducir la magnitud y movilidad de los contaminantes:

◆ *Volatilización*, la cual involucra una simple evaporación de los componentes volátiles y es conveniente para hidrocarburos ligeros.

◆ *Biorremediación*, la cual involucra mediciones artificiales para aumentar la actividad biológica con ello degrada de manera natural los hidrocarburos en el suelo.

◆ *Lavado del suelo "soil leaching"*, la cual involucra la extracción de los hidrocarburos de los poros del suelo por medio de filtración de agua, posiblemente mezclado con surfactantes, a través del suelo.

◆ *Vitrificación*, la cual involucra la fusión del suelo contaminado, empleando el calor provisto por la energía eléctrica.

◆ *Remediación Pasiva*, no incluye alguna acción de remediación específica para destruir, inmovilizar o contener contaminantes. Solo aplica cuando el contaminante no es movable.

B. Las tecnologías "ex situ" (desarrolladas después de que el suelo es excavado):

- ◆ *Biorremediación superficial*
- ◆ *Biorremediación enaltecida "Enhanced"*
- ◆ *Temperatura térmica baja de separación*
- ◆ *Extracción Química*
- ◆ *Solidificación/Estabilización*
- ◆ *Separación/Contención*

Cada tecnología ex situ cuenta con la excavación del suelo contaminado para un tratamiento "on site". El suelo tratado es depositado fuera en un sitio de disposición final.

- ◆ La *biorremediación superficial* y la *biorremediación enaltecida o profunda*, ambas están basadas en el proceso natural de la bacteria la cual reduce los hidrocarburos a CO₂ y H₂O. La bioremediación superficial consiste en rociar y colocar una delgada capa de suelo de 12 a 24 pulgadas donde se tengan nutrientes y condiciones adecuadas para acelerar la degradación.
- ◆ *Temperatura baja térmica*, implica el calentamiento del suelo contaminado alrededor de 400 a 500°C, la cual enaltece la volatilización de compuestos orgánicos.
- ◆ La *extracción química*, fue primeramente desarrollado para aguas residuales y tratamientos de lodos, actualmente está en fase de desarrollo para remover los hidrocarburos del suelo. Emplea agentes químicos de extracción para separar los suelos contaminados bien sea en fase sólida, orgánica y agua.
- ◆ La *solidificación/estabilización*, involucra la adición de materiales que físicamente (solidificación) o químicamente (estabilización) decrecen la movilidad de los hidrocarburos.
- ◆ La *separación/contención*, (encapsulamiento) aunque reduce la movilidad del contaminante no así su toxicidad. Ambos relacionan la mezcla del suelo con cemento, asfalto, silicato o plástico para formar un producto sólido que puede resistir la liberación del contaminante por la abrasión, presión, rompimiento y ataque químico.

La **tabla 2.1** muestra un resumen de los tratamientos tanto físicos, químicos y biológicos que se conocen para residuos peligrosos, mostrando su aplicación y limitaciones. La **tabla 2.2** muestra la comparación de técnicas de remediación para hidrocarburos.

TABLA 2.1 RESUMEN DE LOS TRATAMIENTOS FISICOS, QUIMICOS Y BIOLÓGICOS Y EL PROCESO DE INCINERACIÓN
PROCESO **VENTAJAS** **DESVENTAJA** **LIMITACIONES**

TRATAMIENTO FÍSICO

ABSORCIÓN CON CARBÓN	Aplicable a muchos compuestos orgánicos alto grado de flexibilidad en operación y diseño, y en efectividad Bajo costo	Regeneración o disposición del carbón empleado, pretratamiento para sólidos suspendidos, grasas y aceites altos costos de operación y mantenimiento Generación de lodos para disposición	Muchos compuestos inorgánicos y algunos orgánicos son pobremente absorbidos
FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN	Se ha desarrollado por mucho tiempo Se ha desarrollado por mucho tiempo; barato Alto potencial de remoción	Es necesario el control de las corrientes de aire Generación de lodos para disposición	Aplicable sólo para algunos contaminantes orgánicos volátiles
SEPARACIÓN FLOTACIÓN		Genera lodos para disposición, pretratamiento para sólidos suspendidos o ajustar el pH, caro	La variabilidad en el flujo del residuo y la composición afecta el desarrollo del tratamiento.

TRATAMIENTO QUÍMICO

NEUTRALIZACIÓN/ PRECIPITACIÓN	Amplio rango de aplicación, barato Puede recuperar metales con alta eficiencia	Producción de lodos peligrosos Genera lodos para disposición, pretratamiento para remover sólidos suspendidos, caro	Agentes complejos reduce la efectividad Remueve algunos constituyentes pero no todos
INTERCAMBIO IÓNICO	Buena para residuos demasiado diluidos para incineración o muy concentrados o tóxicos para tratamiento biológico	La oxidación no es tan completa como la térmica o incineración; puede producir nuevas especies peligrosas; son requeridas pruebas; alto capital de inversión; alto nivel de operación; requiere posttratamiento.	Pobre destrucción de compuestos organoclorados; moderada eficiencia de destrucción

FUENTE: WENTZ, CHARLES. Hazardous Waste Management 1989.

TABLA 2.1 RESUMEN DE LOS TRATAMIENTOS (CONTINUACION)

PROCESO	Ventajas	Desventajas	Limitaciones
CLORINACIÓN	<p>Esencialmente destrucción completa; usada en otras aplicaciones</p> <p>Puede destruir compuestos orgánicos</p>	<p>Especializada en cianuros</p>	<p>Interfiere en los constituyentes de los residuos, puede tener límite de aplicación o efectividad.</p>
OZONACIÓN	<p>Puede destruir compuestos orgánicos</p>	<p>La oxidación no es tan completa como la térmica o incineración; puede producir nuevas especies peligrosas; se requieren pruebas de oxidación; alto capital de inversión; alto nivel de operación y mantenimiento.</p>	
REDUCCIÓN	<p>Alta destrucción</p>	<p>Especializado en cromo</p>	<p>Interfiere en los constituyentes de los residuos, puede tener límite de aplicación o efectividad.</p>
LECHOS DE TRATAMIENTOS PERMEABLE	<p>Requiere un límite de excavación, no costoso</p>	<p>Continua en desarrollo; requiere reemplazo periódico o tratamiento medio.</p>	<p>Solo ha sido aprobada para una sección limitada; la efectividad esta influenciada por las variaciones en los flujos de los mantos subterráneos.</p>
INYECCIÓN QUÍMICA	<p>No requiere excavación; no requiere bombeo.</p>	<p>Todavía en desarrollo; requiere pruebas extensivas</p>	<p>Necesita una composición homogénea del residuo.</p>

TABLA 2.1 RESUMEN DE LOS TRATAMIENTOS (CONTINUACION)

PROCESO	Ventajas	Desventaja	Limitaciones
TRATAMIENTO BIOLÓGICO			
TRATAMIENTO CONVENCIONAL	Aplicable a muchos residuos de vapores orgánicos; alta remoción de orgánicos; barato; bien entendido y ampliamente usado en otras aplicaciones.	Puede producir lodos peligrosos que pueden ser manejados; requiere un pretamiento antes de la descarga.	Los microorganismos son sensibles a los niveles de oxígeno, temperatura, carga tóxica, flujo interno, algunos contaminantes orgánicos son difíciles de tratar, las variaciones de flujo y composición pueden reducir la eficiencia.
BIODEGRADACIÓN IN SITU	Destruye los residuos en el sitio; muy común para especies orgánicas que no son fáciles de biodegradar.	Experiencia limitada; requiere pruebas extensivas.	La aereación es difícil a profundidades mayores de dos pies; necesita la combinación adecuada de residuos y características hidrogeológicas; mezcla adecuada de contaminantes, organismos y nutrientes necesarios.
INCINERACIÓN			
INCINERACIÓN CONVENCIONAL	Destruye los residuos orgánicos	Requiere disposición de residuos; prueba de flama; operadores expertos; es caro	
INCINERACIÓN ON-SITE	Destruye residuos orgánicos; no requiere transportación de residuos.	Requiere disposición de residuos, preparación de los ladrillos del horno en el sitio; requiere prueba de flama; operadores expertos; es caro.	Los incineradores móviles tienen baja velocidad de flujo.

FUENTE: WENTZ, CHARLES. Hazardous Waste Management 1989.

TABLA 2.2. DE COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN (APLICACIÓN Y LIMITACIÓN)

IN - SITU	TÉCNICA	APLICACIÓN	LIMITACIÓN Y/O DESVENTAJAS
VOLATILIZACIÓN IN-SITU	<p>Químicos (Q) - Hidrocarburos solo volátiles</p> <p>Área de extensión (A. e.) - limitada, aunque la ventilación es muy difícil de controlar para áreas muy superficiales.</p> <p>Condición del sitio (C. s.) - Conducente para áreas desarrolladas o no desarrolladas.</p> <p>C.s.- Debe existir una de las siguientes condiciones: la degradación aumenta cuando la temperatura aumenta; arena o grava impermeables, el agua del subsuelo poco profunda (50 pies o menos).</p>	<p>Q.- Compuestos orgánicos, hidrocarburos ligeros, crudos pesados.</p> <p>A.e.- Cuando la contaminación tiene extensión hasta el manto freático, existe suficiente volumen o profundidad debajo de la superficie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve solo compuestos orgánicos. • No es efectivo debajo del nivel freático. • El desarrollo puede afectar las condiciones del suelo, (p.e. Baja permeabilidad, estratificación no uniforme). • Largo tiempo de duración. • No puede siempre ser tratada una solución completa de contaminación por compuestos orgánicos volátiles (VOC). Por ejemplo, los constituyentes menos volátiles en los hidrocarburos no pueden ser removidos.
BIORREMEDIACIÓN IN SITU	<p>Q.- Compuestos orgánicos, hidrocarburos ligeros, crudos pesados.</p> <p>A.e.- Cuando la contaminación tiene extensión hasta el manto freático, existe suficiente volumen o profundidad debajo de la superficie.</p>	<p>Q.- No existe limitación en el tipo de hidrocarburos. Los compuestos orgánicos volátiles pueden causar requerimientos para el control de las emisiones.</p> <p>A.e- No hay limitación para la superficie a cubrir. El costo en el corte de las paredes de la subsuperficie puede incrementarse con la profundidad.</p> <p>C.s- Se prefieren condiciones abiertas. Para la subsuperficie se requiere baja permeabilidad de la zona, preferentemente debe haber separación de la zona contaminada y del agua subterránea.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Toma años remediar el sitio. • No pueden ser posibles bajos niveles de limpieza. • Posible taponeo de la estructura del suelo con los aditivos o residuos biológicos, decreciendo la porosidad. • Pérdida de eficiencia en suelos contaminados con metales, compuestos orgánicos volátiles (VOC), algunos pesticidas y herbicidas y con pH <5.5. • La confirmación de la limpieza puede ser difícil. • Posible migración de contaminantes.
SEPARACIÓN IN-SITU PAREDES DE CONTENCIÓN (ISOLATION/ CONTAINMENT)	<p>Q.- No existe limitación en el tipo de hidrocarburos. Los compuestos orgánicos volátiles pueden causar requerimientos para el control de las emisiones.</p> <p>A.e- No hay limitación para la superficie a cubrir. El costo en el corte de las paredes de la subsuperficie puede incrementarse con la profundidad.</p> <p>C.s- Se prefieren condiciones abiertas. Para la subsuperficie se requiere baja permeabilidad de la zona, preferentemente debe haber separación de la zona contaminada y del agua subterránea.</p>	<p>Q.- No existe limitación en el tipo de hidrocarburos. Los compuestos orgánicos volátiles pueden causar requerimientos para el control de las emisiones.</p> <p>A.e- No hay limitación para la superficie a cubrir. El costo en el corte de las paredes de la subsuperficie puede incrementarse con la profundidad.</p> <p>C.s- Se prefieren condiciones abiertas. Para la subsuperficie se requiere baja permeabilidad de la zona, preferentemente debe haber separación de la zona contaminada y del agua subterránea.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El proceso no destruye los hidrocarburos, este solo previene su movimiento. • La excavación a través de los suelos contaminados puede ser difícil y posiblemente peligroso por la exposición a hidrocarburos y químicos asociados. • Verificación en la continuidad de algunos tipos de paredes de corte. • Largos periodos de integración de algunos de los materiales usados en las estructuras de separación y contención (aún no han sido ampliamente demostradas).

FUENTE: CALABRESE Edward J., Hydrocarbon Contaminated Soils, 1991.

TABLA 2.2 DE COMPARACION DE TECNICAS DE REMEDIACION (CONTINUACION)

TECNICA	APLICACION	LIMITACION Y/O DESVENTAJAS
<p>VITRIFICACION IN SITU</p>	<p>Q.- Metales pesados, inorgánicos (nitritos, fluoruros, sulfatos, etc.), hidrocarburos con altos puntos de ebullición (aceites ligeros y pesados). C.s.- La viabilidad del proceso depende altamente de las condiciones del sitio como son: la permeabilidad, presencia de agua, combustibles sólidos y líquidos, etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limitada a 50 pies. • Experiencia limitada en compuestos orgánicos volátiles. • Es costoso. • Materiales que contienen más del 15% de orgánicos no pueden ser tratados. • Contenido y profundidad de metales. El tiempo de retención de estos no puede ser suficiente si están localizados cerca de la superficie. • Combinación con alta permeabilidad del suelo y presencia de agua subterránea. • Combustibles líquidos y/o sólidos pueden incrementar la velocidad de generación de la combustión de los gases, por lo que limitan la capacidad del sistema de gas de salida.
<p>REMEDIACION PASIVA</p>	<p>Q.-Hidrocarburos menos volátiles y pesados (generalmente tienden a ser absorbidos por las partículas sólidas en la zona insaturada.. La composición química de los hidrocarburos es fácilmente influenciada por esta remediación. A.e- Ilimitada. Sin embargo la velocidad de algunos procesos de este tipo puede reducirse a grandes profundidades. C.s.- Permeabilidad del suelo, profundidad del manto freático, velocidad de infiltración, la temperatura puede influenciar la velocidad de volatilización y biodegradación. La localización del sitio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo de remediación puede ser largo. • Bajos niveles de limpieza, pueden ser influenciados por las condiciones del suelo. • Restricciones para el uso futuro del sitio y reducción del valor del estado real • Pueden ocurrir algunos riesgos potenciales debido a que los contaminantes son dejados en el suelo.

TABLA 2.2 DE COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN (CONTINUACIÓN)

EX - SITU	TÉCNICA	APLICACIÓN	LIMITACIÓN Y/O DESVENTAJAS
<p>BIORREMEDIACIÓN</p> <p>TERRENO DE CULTIVO (LANDFARMING)</p>	<p>Q.- Productos de hidrocarburos, productos ligeros (gasolina, diesel y aceites calientes). A.e.- La profundidad de la zona de tratamiento no debe exceder la capacidad de los equipos a la exposición de las secciones de profundidad para el aire (oxígeno) y mezcla con nutrientes. C.s.- La temperatura afecta la velocidad de degradación. Las temperaturas de humedad son conducentes para una velocidad de degradación más rápida.</p>	<p>Q.- Compuestos orgánicos, hidrocarburos ligeros. A.e.- El volumen del suelo es restringido por el tamaño de la unidad de tratamiento. C.s.- La temperatura del aire influencia la velocidad de biodegradación,</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Largo tiempo de duración. • Requiere una área de tratamiento relativamente larga. • Metales, sales inorgánicas, orgánicos clorados, pesticidas, herbicidas pueden ser tóxicos para la bacteria. • La superficie de biorremediación es restringida por la regulación en algunas áreas. • Bajos niveles de limpieza pueden no ser prácticos. • Puede requerir grandes cantidades de agua. • La baja permeabilidad del suelo restringe la remediación. • El control de emisiones es difícil (si se requiere).
<p>BIORREMEDIACIÓN</p> <p>EX SITU</p> <p>ENALTECIDA</p>	<p>Q.- Compuestos orgánicos, hidrocarburos ligeros. A.e.- El volumen del suelo es restringido por el tamaño de la unidad de tratamiento. C.s.- La temperatura del aire influencia la velocidad de biodegradación,</p>	<p>Q.- Orgánicos volátiles. A.e.- Limitada por la excavación. C.s.- Es necesaria una área abierta es para excavar, apilar y excavar el suelo. El rango del área del equipo es de 50 por 20 pies a 100 por 100 pies.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradación de algunos hidrocarburos pesados. • Metales, sales inorgánicas, orgánicos clorados, pesticidas, herbicidas pueden ser tóxicos para la bacteria. • Baja permeabilidad del suelo. • Bajos niveles de limpieza no pueden ser siempre alcanzados.
<p>BAJA TEMPERATURA</p> <p>TÉRMICA</p>	<p>Q.- Orgánicos volátiles. A.e.- Limitada por la excavación. C.s.- Es necesaria una área abierta es para excavar, apilar y excavar el suelo. El rango del área del equipo es de 50 por 20 pies a 100 por 100 pies.</p>	<p>Q.- Orgánicos volátiles. A.e.- Limitada por la excavación. C.s.- Es necesaria una área abierta es para excavar, apilar y excavar el suelo. El rango del área del equipo es de 50 por 20 pies a 100 por 100 pies.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve solo compuestos orgánicos volátiles. • La atmósfera con el equipo debe ser controlada para prevenir explosiones. • Altas concentraciones de contaminantes (>10,000 ppm TPH) pueden limitar algunos sistemas. • Suelos con pH <5 y >11 causan corrosión. • Altos contenidos de mezcla reducen la eficiencia del tratamiento. • Altos contenidos de arcilla y sedimento y un suelo denso decrecen la eficiencia del tratamiento.

TABLA 2.2 DE COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN (CONTINUACIÓN)	
TÉCNICA	APLICACIÓN
EXTRACCIÓN QUÍMICA	<p>Q.- Residuos que contengan hidrocarburos. A.e.- Limitada por la excavación C.s.- Los factores que influyen la adsorción incluyen el contenido de arcilla (<30% a 20%), contenido orgánico y de agua.</p>
SOLIDIFICACIÓN/ ESTABILIZACIÓN	<p>Q.- Gasolina, diesel, aceites gastados, suelos contaminados de aceites de petróleo crudo, aceites de petróleo, residuos de ácidos, todos, solventes, metales pesados, PCBs. A.e.- Limitado por las paredes de excavación. C.s.- Área abierta para excavar. El tamaño del equipo puede depender en el proceso del tratamiento seleccionado, el tipo y volumen del material a ser tratado.</p>
SEPARACIÓN /PAREDES	<p>Q.- Hidrocarburos de petróleo. A.e.- Área de extensión de la separación la disponibilidad del espacio abierto al sitio. C.s.- Son preferibles condiciones abiertas.</p>

FUENTE: CALABRESE Edward J., Hydrocarbon Contaminated Soils, 1991.

NOTA: A.e.=ÁREA DE EXTENSIÓN; Q= COMPUESTOS QUÍMICOS; C.s.= CONDICIÓN DEL SITIO.

2.5 APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DEPENDIENDO DE LOS CONTAMINANTES

Una vez analizadas las diferentes técnicas y procesos para el tratamiento de sitios contaminados con residuos peligrosos, se muestra a continuación en la **tabla 2.3** la aplicación de algunas de ellas a los diferentes tipos de contaminantes y medios en donde se encuentran.

TABLA 2.3 APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE SITIOS CONTAMINADOS (SUELOS)

CONTAMINANTES	EXTRACCIÓN DE VAPORES	SOLIDIFICACIÓN ESTABILIZACIÓN	BIORREMEDIACIÓN	BIOLVENTO Y REHABILITACIÓN BIOLÓGICA	LAVADO DE SUELOS	OTRAS APLICACIONES FÍSICO-QUÍMICAS
HALÓGENOS VOLÁTILES Y SEMVOLÁTILES	■	■	■	■	■	■
NO HALÓGENOS VOLÁTILES Y SEMVOLÁTILES	■	■	■	■	■	■
PCBs		■	■		■	■
PESTICIDAS		■	■		■	■
CIANUROS		■				■
METALES		■			■	■
EXPLOSIVOS			■			
MEDIO						
AGUA SUPERFICIAL		■				■
AGUA SUBTERRÁNEA	■	■	■	■		■
SUELOS	■	■	■	■	■	■
LODOS		■	■		■	■

FUENTE: ANTEPROYECTO DE NORMA OFICIAL, 1997.

2.6 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEPENDIENDO DEL TIPO DE SUELO

El tratamiento del suelo no debe ser separado del tratamiento del agua subterránea. La **tabla 2.4** presenta varios de los tratamientos y sistemas de limpieza de suelos. La información permite evaluar la efectividad de algunas de ellas. Los sistemas listados en la tabla tienen una doble evaluación, una por la efectividad del tratamiento y otra por la facilidad de implementación del sistema. Adicionalmente la tabla esta dividida en dos partes que permiten evaluar las soluciones más aplicables para los sitios inactivos (cerrados o situación de reconstrucción) y los que son más efectivos para los sitios activos. La evaluación está hecha con respecto al tipo de suelo de los sitios.

TABLA 2.4. ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN (SITIOS INACTIVOS)

TIPO DE SUELO	BORREMIACIÓN		CONTENCIÓN	ENCAPSULADO	INGENERACIÓN	LAVADO	SEPARA VAPOR
	SUPERFICIAL	IN SITU					
GRAVA	r3	r3	m3	b1-r2	b3	b1	b1
ARENA	b1-r2	b1-b3	m2	b1-r2	b2	r1	b1
ARENA FINA	b1-r2	b1-r3	m2	b1-r2	b2	r2	b1
ARENA LODOSA	b1-r2	b2-r3	r3	b2-r3	b2	r3	b2
ARCILLA Y LODO	b3	b2-r3	r2	r3-m3	b2	r3-m3	r2
ARCILLA	b3	b2-r3	b2	m3	b2-b3	m2	r2
ARCILLA MUY APRETADA	b3	b3-r3	b3	m3	b3	m3	r3
AGUA SUBTERRANEA							
AI SLADA	b3-r3	b3-r3	r2-b3	m3	b3-r3	m3	r3
ESTRUCTURA DE LENTE EN EL SUELO	b3-r3	b3-r3	r3-m3	m3	b3	r2-r3	r2-r3

GRAVA	Lo mismo	r3	Lo mismo	in	Inconveniente	b1	b1
ARENA	de arriba	b1-r3	de arriba	in	a flama	r1	b1
ARENA FINA	si los	b1-r3	pero puede	in	Abierta	r2	b1
ARENA LODOSA	volumenes	b2-r3	haber	in	y espacio	r3	b2
ARCILLA Y LODO	son pequeños	b2-r3	dificultades	in	requerido	r3-m3	r2
ARCILLA	mover fuera de	b3-r3	para	in	in	m2	r2
ARCILLA MUY APRETADA	Sitio	b3-r3	desarrollar	in	in	m3	r3
AGUA SUBTERRANEA			la				
AI SLADA		b3-r3	excavación	in	in	m3	r3
ESTRUCTURA DE LENTE EN EL SUELO		b3-r3	requerida	in	in	r2-r3	r2-r3

FUENTE: CALABRESE EDWARD, Hydrocarbon Contaminated Soils 1991.

Resultado del tratamiento: b= bueno; r= regular; m= malo; in = inconveniente. Fácil de implementar. 1=bueno; 2=regular; 3=difficil.

A continuación se describen más detalladamente las clasificaciones de la tabla anterior.

- **Resultado/Éxito del Tratamiento:**
 - **Bueno (b):** El tratamiento puede ser aplicado para la descontaminación de suelos, dejando un nivel aceptable de contaminación residual o ninguna del todo.
 - **Regular(r):** El tratamiento puede ser aplicado generalmente para la descontaminación de suelos, pero puede dejar altos niveles de residuos o puede dejar cavidades de contaminación que requieren en un futuro de un trabajo adicional.
 - **Malo (m):** Considerar algo más. El tratamiento es inadecuado para la tarea a realizar. Por ejemplo: el lavado de suelos es una pobre elección para los suelos arcillosos debido a que la arcilla no es un material permeable.

- **Fácil de ejecutar o realizar:**
 - **1= Fácil de realizar.** Esta tecnología es ampliamente entendida y por muchos pioneros en este campo, y los contratistas están generalmente familiarizados con las técnicas en mano y pueden eficaz y eficientemente desarrollar el trabajo a un costo mínimo. Ejemplos incluyen la excavación de suelos a una estación inactiva. Todos los contratistas han realizado la excavación del material y transportado del lugar.
 - **2= Más difícil de realizar** (y más difícil de implementar y desarrollar). Los contratistas están ligeramente familiarizados con las soluciones y tienen gran dificultad en ejecutar la tarea. Ejemplos incluyen la excavación de suelos de arcilla y lodo comparados con la de suelos de grava y arena.
 - **3= Muy difícil de realizar.** El contratista puede ejecutar la solución con gran dificultad y mayor precio. Ejemplos: incluyen la excavación de suelos donde existen plumas de agua subterránea aislada (el agua requiere bombeo y otros), y la biorremediación in situ en arcillas muy apretadas donde la tecnología es difícil de ejecutar debido a que se dificulta el tener agua y oxígeno para proveer de nutrientes a los microorganismos.
 - *In = Inconveniente. Buscar otra tecnología.*

TABLA 2.4 CONTINUACIÓN

ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN (AGUAS SUBTERRÁNEAS, ACTIVO O INACTIVO)

TIPO DE SUELO	BIORREMEDIACIÓN SUPERFICIAL	BIORREMEDIACIÓN IN SITU	CONTENCIÓN	ENCAPSULADO	ATERRAZÓN DIRECTA	SEPARA TORRE	ADSORCIÓN
GRAVA	B1/b1	b1/b1	No	No	b3/b1	b1/b1	b1/b1
ARENA	B1/b1	b1/b1	Es un	Es un	b3/b1	b1/b1	b1/b1
ARENA FINA	B1/b1	b1/b1	Opción	Opción	b3/b1	b1/b1	b1/b1
ARENA LODOSA	B1/b1	b1/b1	De	De	b3/b1	b1/b1	b1/b1
ARCILLA Y LODO	R1/r1	r1/r1	Tratamiento	Tratamiento	r3/r1	r1/r1	r1/r1
ARCILLA	R1/r1	r1/r1			rm3/rm2	rm1/rm1	rm1/rm1
ARCILLA MUY APRETADA	Rm1/rm1	rm1/rm1			m3/rp2	m1/rm1	m1/rm1
AGUA SUBTERRÁNEA	Rb1/rb1	rm1/rm1			r3/r1	rm1/rm1	rm1/rm1
ASLADA	bm1/bm1	bm1/bm1			r3/r1	rm1/rm1	rm1/rm1

EN EL SUELO

Resultado del tratamiento: b = bueno; m = malo; in = inconveniente. Fácil de implementar: 1 = bueno; 2 = regular; 3 = difícil.

* Alternativas como: la excavación, gasificación, incineración y otras, son inconvenientes o inapropiadas para este caso.

La información presentada es similar a la tabla anterior (2.4). Excepto que existen dos juegos o grupos de números; el primero se refiere a la habilidad del sistema de tratamiento para alcanzar un efluente en el rango de partes por billón; el segundo grupo de números se trata de la habilidad del sistema de tratamiento para alcanzar una concentración de efluente en partes por millón descarga deseable.

A continuación se muestra la figura 2.1 que representa la aplicación de algunos de estos tratamientos en diferentes medios en E. U. en 1991. (Saylor G., Environmental Biotechnology, 1991).

La figura 2.2 muestra una gran variedad de tecnologías de limpieza disponibles para tratamiento de suelos subsuelos, agua subterránea in situ y ex situ.

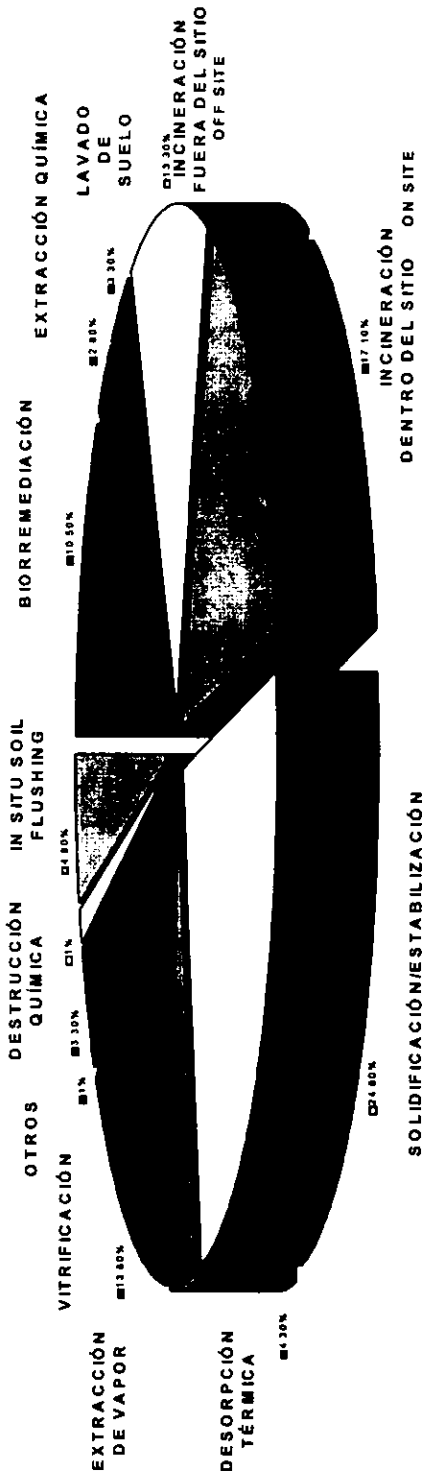


FIGURA 2.1 PORCENTAJES DE LOS TRATAMIENTOS EMPLEADOS EN E.U. EN SÓLIDOS, SUELOS, LODOS Y RESIDUOS LÍQUIDOS, NO INCLUYE EL AGUA SUBTERRÁNEA O AGUA RESIDUAL

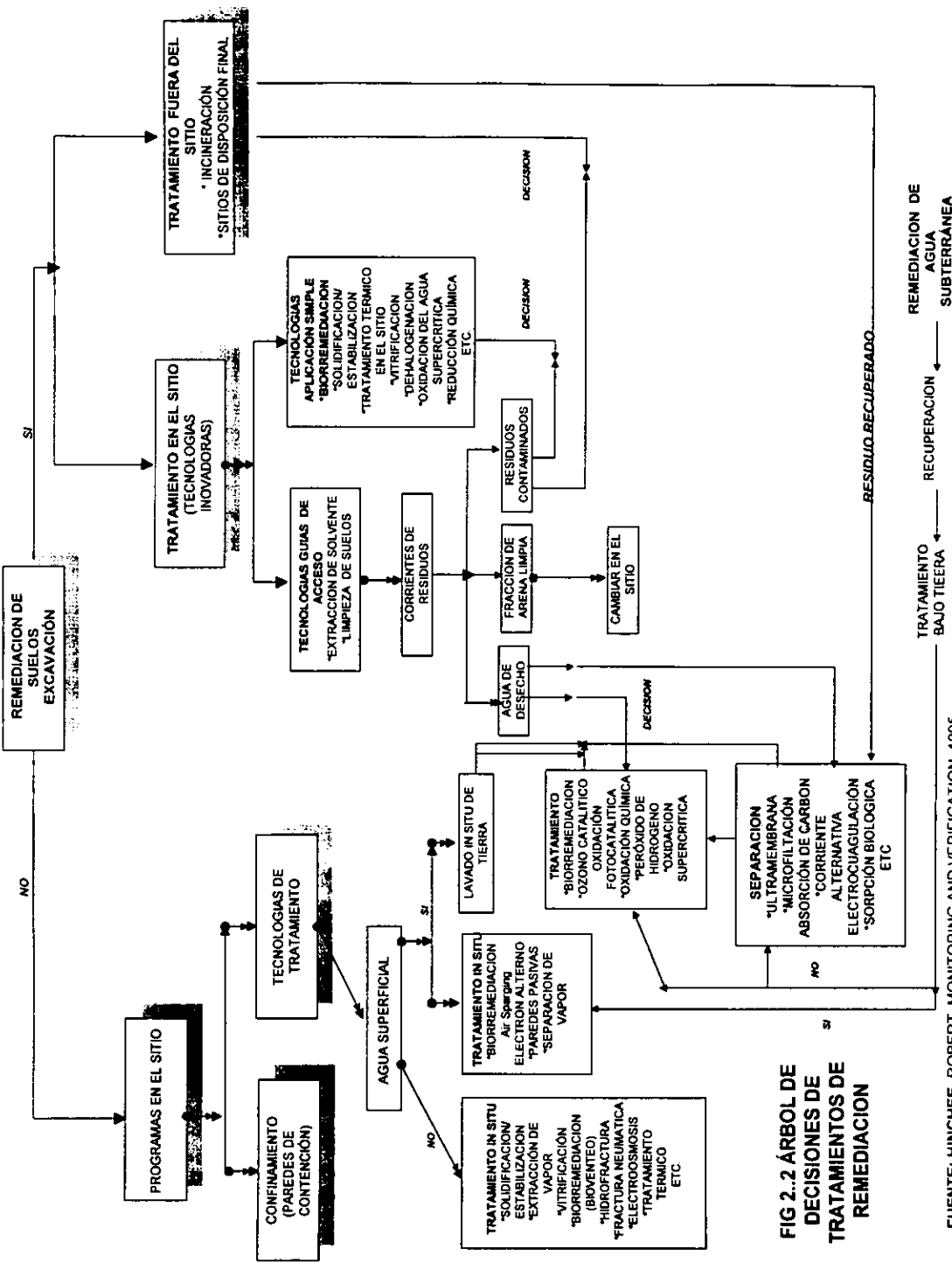


FIG 2.2 ÁRBOL DE DECISIONES DE TRATAMIENTOS DE REMEDIACION

FUENTE: HINCHEE ROBERT, MONITORING AND VERIFICATION, 1995.

2.7 SELECCIÓN DE LA BIORREMEDIACIÓN

La limpieza o saneamiento de residuos peligrosos por medio de la biorremediación está ganando popularidad. Una razón pública es su alto grado de aceptación, con respecto a otras alternativas como la incineración. Otra razón es el costo y los beneficios de una degradación microbiológica. En muchos casos la biorremediación ofrece el mejor costo-efectivo en la descontaminación de sitios.

Mientras la biorremediación se empleó como un tratamiento exclusivo, ahora es visto como parte integral de un sistema de tratamiento. Combinado con diferentes tecnologías, particularmente con la de "air sparging" y "bioventeo" pueden ayudar a alcanzar los objetivos propuestos al menor costo posible.

La biorremediación no puede manejar aún metales y algunos compuestos orgánicos clorados (actualmente se estudia su degradación con algunos sistemas especializados de bacterias), si puede destruir muchos compuestos peligrosos incluyendo aquellos que son resistentes a otras tecnologías.

La aplicación de esta tecnología requiere del entendimiento y aplicaciones propias de tres áreas expertas: la microbiología, regulaciones y leyes y principios de ingeniería (fenómenos de transporte, química orgánica, transferencia de masa, entre otras), incluyendo la combinación de biotratamientos y procesos convencionales. Los ingenieros que se involucren en el manejo y disposición de residuos deben tener conocimientos básicos para entender estas áreas.

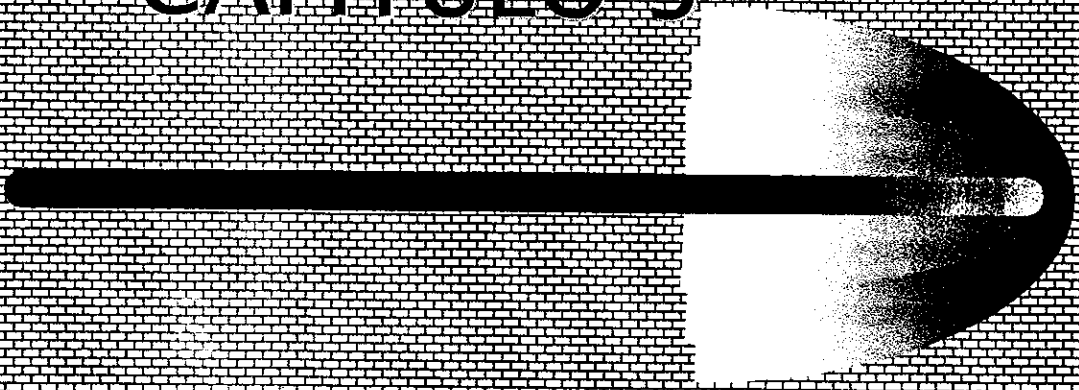
En la **figura 2.1** se observa la Biorremediación ocupa el casi el 11% de los sitios tratados, después del 24.80% de la estabilización/solidificación y 17.10% de la incineración.

Otra de las razones por las cuales se centrará el presente estudio hacia la Biorremediación es por la búsqueda de nuevas soluciones aplicables a la conservación de nuestros recursos naturales, ya que técnicas como la incineración son efectivas porque eliminan el contaminante, pero lo transportan a otro medio como a la atmósfera; así en el caso de la estabilización se observa que presenta ciertas anomalías ya que los contaminantes no son totalmente aislados del medio.

Es por ello que este estudio presenta una visión de la técnica de tratamiento llamada Biorremediación, como una técnica de tratamiento de sitios contaminados que se está aplicando en muchos países con buenos resultados y para más contaminantes, lo que ha logrado con ello despertar el interés en las nuevas generaciones y en los medios regulación como en nuestro país. Así como en la búsqueda de más campos de aplicación en los cuales se puede desarrollar el Ingeniero Químico.

En el siguiente capítulo se expondrá el tema con mayor amplitud.

CAPÍTULO 3



**BIOTECNOLOGÍA Y
BIORREMEDIACIÓN**

3. BIOTECNOLOGÍA

La figura 3.1 nos muestra que la *Biotecnología* es un campo multidisciplinario y que tiene sus raíces en las ciencias como la Biología, Química e Ingeniería, siendo principalmente líderes la Genética molecular, la bioquímica y en general del área químico-biológicas.

En 1987 nació la necesidad de relacionar estas ramas pero en el ámbito ambiental naciendo la *Biotecnología Ambiental* de los residuos peligrosos, basada en cada una de las interrelaciones de las diferentes ciencias.

Es por ello, que mantener la calidad ambiental ha sido un problema continuo desde la aparición de la civilización. Siendo la *biotecnología* la ciencia que le interesa el control y mantenimiento de la calidad ambiental. Esto es manifestado a través del mejoramiento e innovación de los procedimientos de tratamiento de desechos, así como el aumento del uso de la *biotecnología* en la industria química y agrícola.

Las industrias están rápidamente desarrollando nuevas técnicas que emplean el uso de microorganismos para producir sistemas de reciclamiento, control de efluentes, fuentes alternativas de energía y productos químicos de uso industrial, así como un nuevo aprovechamiento de la agricultura. En los países subdesarrollados, esta actividad, conocida como tecnología apropiada, podría brindar un incremento sustancial en el estándar de vida y más importante, en la calidad de vida de muchas personas.

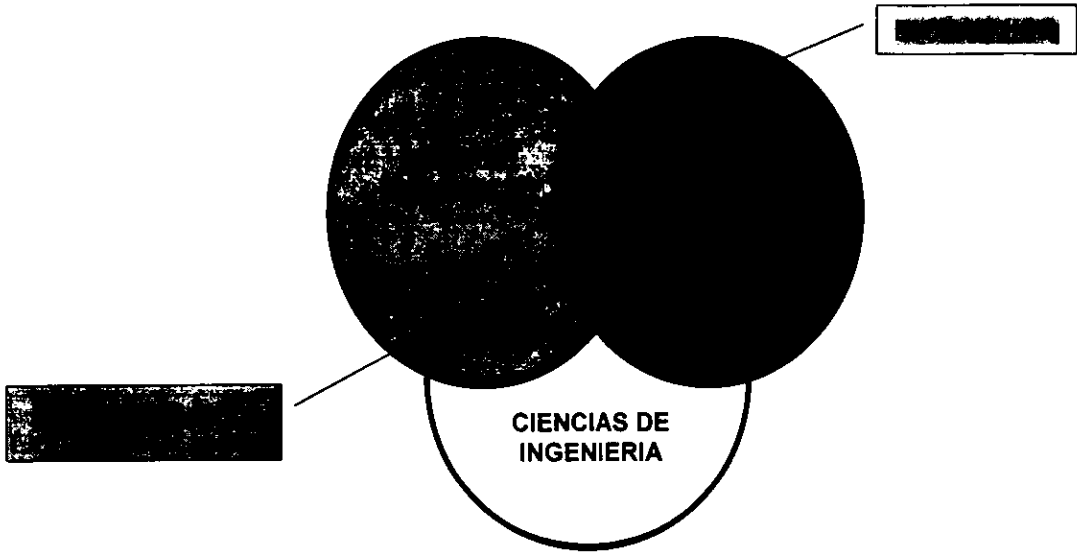


FIG 3.1 NATURALEZA MULTIDISCIPLINARIA DE LA BIOTECNOLOGÍA

La *Biotecnología* se define como:

- La aplicación de principios científicos y de ingeniería al tratamiento de materiales mediante agentes biológicos para la producción de bienes y servicios.⁶
- Toda aplicación tecnológica que utilice recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos.⁷

Con la *biotecnología* no sólo se puede disponer de materias prima energéticas de gran importancia sino que, además estas materias son renovables. Por otro lado, el tratamiento de los productos de desecho por medios biológicos permite que estos materiales no sean contaminantes (o que se puedan eliminar con cierta facilidad) lo que incide de manera directa sobre los aspectos cada vez más apreciados de la calidad de vida.

⁶LONG GILBERT & SHELDON
⁷YOUNG MOO

3.1 ANTECEDENTES DE LA BIORREMEDIACIÓN

Los avances tecnológicos y eventos en materia de regulación desde 1970 y 1980 han influenciado el desarrollo y empleo de la biorremediación con el gran crecimiento en los sistemas de limpieza de petróleo, residuos industriales y peligrosos ocurrida en los años anteriores. La **tabla 3.1** muestra algunos de estos sucesos.

TABLA 3.1 ANTECEDENTES DE LA BIORREMEDIACIÓN

DECADA	EVENTO
1970'S	<ul style="list-style-type: none"> • Las grasas y efectos de los hidrocarburos de petróleo. • Los pioneros en biotratamiento realizaron trabajos en lugares con residuos de petróleo, hidrocarburos pesticidas y otros orgánicos, • Fertilizantes oligotrópicos fueron desarrollados para desarrollar la degradación del petróleo en ambientes marinos. • Se formó la Agencia de Protección del Ambiente (EPA). • El primer Día de la Tierra donde se enfocó la atención pública en la preservación de las fuentes naturales. • Un congreso mostró the Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) la cual incluyó un programa de manejo de residuos peligrosos.
1980's	<ul style="list-style-type: none"> • Una bacteria de degradación de petróleo fue el primer organismo patentado creado por la tecnología de ingeniería genética. • Se crearon regulaciones (normas, leyes) ambientales por la necesidad del costo-efectividad de las tecnologías para tratar compuestos orgánicos en suelos y agua. • Fue descrita la transformación anaeróbica y el cometabolismo de degradación de solventes clorados en presencia de varias oxigenasas. • Exitosamente, la biorremediación a escala completa de hidrocarburos en suelos llevo a ser un lugar común. • El Tanque de transportación de petróleo, Valdez, naufragó en las costas de Alaska, causando gran atención la biorremediación marina y derrames de petróleo • Los estados comenzaron a promulgar sus propias legislaciones y programas de gobierno en cuanto a limpieza de sitios peligrosos, manejo, estándares de limpieza y herramientas de ejecución.

Fuente: Compeau (1993). Hincsee & Kitter, Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons.

3.2 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

La contaminación de tierras, aguas subterráneas, sedimentos, aguas superficiales y el aire con químicos tóxicos es uno de los mayores problemas que enfrenta el mundo. La necesidad de “**remediar**” (reparar un daño o perjuicio, librar de un riesgo o peligro, minimizar el problema), estos sitios han servido para implementar *nuevas tecnologías* que enfatizan la desintoxicación y la destrucción de los contaminantes siendo una de estas tecnologías la **Biorremediación**.

A continuación se citan algunas de las definiciones empleadas por diferentes autores para los siguientes conceptos:

La **biorremediación** la cual emplea microorganismos, para convertir materiales tóxicos específicos en una biomasa no tóxica, dióxido de carbono y agua.

La **biorremediación** es el proceso de degradación en suelos y/o agua subterránea dentro de los productos de degradación con la producción final de dióxido de carbono y agua empleando para ello microorganismos autóctonos (propios del sitio a tratar, de la región).

La **biorremediación** es el proceso de limpieza de sitios contaminados a través del empleo de microorganismos para su degradación y destrucción de los contaminantes.

La **restauración** es el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

Cabe mencionar que la remediación solo involucra el eliminar el problema y la restauración va más allá involucrando acciones de reforestación, plantaciones y búsqueda de flora y fauna que existían en el sitio antes de se presentara el problema.

El desarrollo de las tecnologías de remediación en el mundo inició en los países desarrollados hace unos diez años. El interés surgió después de encontrar en los acuíferos abastecedores de agua a poblaciones, residuos de compuestos considerablemente peligrosos.

Las tecnologías más recientes son la vitrificación, la encapsulación y el venteo seguido de condensación. Las técnicas con base microbiológica inicialmente se aplicaron al composteo y el biocultivo, así como el uso de reactores con cepas puras de microorganismos degradadores combinado con el bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Más tarde, aparecieron las técnicas de bioestimulación y bioventeado.

De manera simultánea al desarrollo de tecnología de remediación se dio el auge de técnicas para caracterización y monitoreo hidrogeológicos.

Surgieron diferentes arreglos de piezómetros que permitían conocer en forma 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 paquetes software para generar mapas tridimensionales de la distribución de los contaminantes.

La presencia prolongada de contaminantes en los suelos ocasiona que muchos microorganismos desarrollen su propia capacidad bioquímica para degradarlos.

Esto es la base de las tecnologías de biorremediación que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados.

Una de las principales características de la **biorremediación** es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar, como sucede en 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 un lugar contaminado. Dichas condiciones pueden llegar a ser adversas para su sobrevivencia; sin embargo, las diferentes poblaciones se adaptan entre sí organizando una actuación cinérgica, con lo cual se logra la degradación del compuesto contaminante.

Las tecnologías de **biorremediación** involucran como se mencionó la biodegradación de contaminantes por estimulación de poblaciones microbianas del suelo o por la adición propia de especies microbianas naturales.

La biorremediación es aplicable sólo en el tratamiento de contaminantes orgánicos. Puede utilizarse diferentes tipos de tecnologías de **biorremediación** en el tratamiento de residuos peligrosos, y pueden clasificarse en dos categorías: superficiales o **Ex-Situ e In-Situ**.

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.

Las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en el acuífero. Las tecnologías **Ex-Situ** incluyen: fase de lodo, tratamiento de suelo, fase sólida contenida, composteo. Estos puntos se desarrollaran más adelante.

3.3 UNA VISTA A LA BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS

Una parte de los hidrocarburos son empleados como solventes, combustibles en industrias como textiles farmacéuticas y de plástico. Estos representan uno de los petroquímicos más empleados en el mundo.

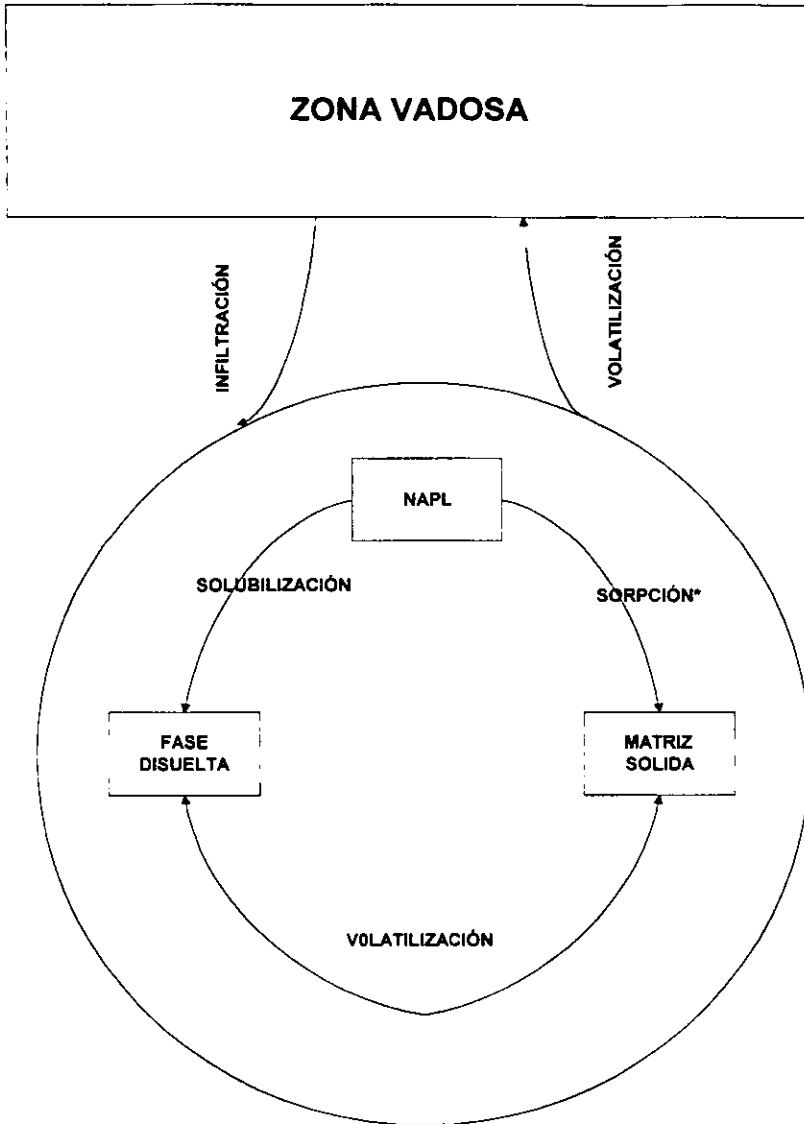
Los productos de los hidrocarburos son transportados por diferentes vías, como son: marítimas, férreas y carreteras para facilitar su distribución donde estos son depositados en tanques empleando redes de tuberías. Durante cada una de estas operaciones pueden existir gran probabilidad de introducir estos productos al ambiente. Además de posibles liberaciones de productos durante la transportación y almacenaje de los mismos.

Muchos de estos productos frecuentemente producen residuos que requieren una disposición o métodos de disposición a través del cual los hidrocarburos pueden ser introducidos al ambiente. No es sorprendente que esta clase usada en la petroquímica constituya una gran porción de la contaminación alrededor del mundo.

Los hidrocarburos por su naturaleza presentan diferentes características fisicoquímicas como son: su peso molecular (variando desde bajos a altos pesos moleculares), así como también el caso del punto de ebullición. Pueden ser muy fluidos o muy viscosos, muy volátiles o relativamente volátiles, altamente solubles o prácticamente insolubles, más densos que el agua, etc. Esta variabilidad en sus características fisicoquímicas son causa del comportamiento individual de los hidrocarburos y mezclas de los diferentes hidrocarburos en la superficie del ambiente.

Una vez introducidos en la superficie, los hidrocarburos comienzan inmediatamente a interactuar con la roca (matriz aglomerante) a través de la cual se mueven. Las interacciones y el grado en el cual ocurre son funciones de las características de los propios hidrocarburos y de los alrededores. En la zona vadosa los hidrocarburos tienden a volatilizarse y convertirse en parte de la atmósfera de la zona vadosa. Estos tienen una alta afinidad por la roca sólida a través de la cual emigran.

Los hidrocarburos que son altamente solubles en agua tienden a disolverse en la zona del agua subterránea o agua vadosa. Como la fase líquida de los hidrocarburos hace el camino a través de la zona vadosa esta cubre las partículas sólidas y se mueven dentro de los poros creando una fase residual Fig 3.2.



**FIGURA 3.2 MODELO CONCEPTUAL DIVISORIO
AGUA SUBTERRÁNEA.
NAPL= FASE NO ACUOSA LÍQUIDA**

*Ver glosario

Si el volumen de hidrocarburos introducido en la subsuperficie, excede la capacidad residual de la zona vadosa del suelo, ésta continuará moviéndose verticalmente hasta que esta se enriquezca el nivel de agua freática o a una unidad de baja permeabilidad, donde este se acumulará y se dispersará lateralmente. Este cuerpo de **Hidrocarburos Fase-Separada (Phase-Separated Hydrocarbons) PSH**, con el hidrocarburo residual en la zona vadosa, también sirve como una fuente de contaminación para el agua subterránea subyacente.

Como los PHS descansan en el agua o más correctamente en la superficie del borde capilar, este corre verticalmente con fluctuaciones estacionales del agua. Estas fluctuaciones crean una zona de altas concentraciones de hidrocarburos frecuentemente referidas como la zona de remoldeo.

Los PHS en los poros de los suelos de esta zona son sumergidos y rodeados por aguas subterráneas por al menos parte del año. Esto típicamente es más bien inmóvil y crece con esta asociación íntima con el acuífero, actúa como una fuente muy significativa de disolver la contaminación.

Los hidrocarburos entran al agua subterránea creando una fase disuelta como resultado de la solubilización. El grado de solubilización es una función de la solubilidad de los compuestos de hidrocarburos. Compuestos con altas solubilidades -compuestos hidrofílicos-disueltos para crear una fase disuelta de alta concentración. En contraste, con los de baja solubilidad- compuestos hidrofóbicos- disueltos escasamente el agua subterránea. Aunque el grado en el cual un compuesto (individual) podría disolverse en el agua subterránea es una función de la solubilidad de los compuestos acuosos, no es el caso de la mezcla de hidrocarburos.

Una vez disueltos los hidrocarburos viajan con el flujo del agua subterránea vía transportación advectiva dispersiva (movimiento horizontal de esparcimiento desordenado). Los hidrocarburos disueltos, sin embargo, son transportados a menor velocidad que la velocidad del agua. El grado en el cual la velocidad de los compuestos de hidrocarburos es retardada es una función de esta interacción con la matriz sólida a través de la cual emigran, más específicamente es una función del grado de interacción con lo que ocurre naturalmente en los compuestos orgánicos.

Los compuestos con baja afinidad a la matriz sólida se mueven a velocidades que son mayores que aquellos compuestos con alta afinidad. Esta retardada variación causa la separación de los compuestos en la pluma de la fase-disuelta – una transportación diferencial- es análoga a la cromatografía de laboratorio (Hinchee & Reisinger 1987). Los compuestos hidrofílicos y oleofílicos tienden a ser encontrados en el borde superior de la fase disuelta de la pluma, mientras que los hidrofóbicos y oleofóbicos tienden a ser encontrados cerca de la fuente de hidrocarburo. La **FIG 3.3** muestra un modelo conceptual de la interacción de los hidrocarburos en la fase disuelta.

Algunos compuestos de hidrocarburos potencialmente traen efectos nocivos al ser humano y trastornos al medio cuando son introducidos al ambiente; además, existe frecuentemente la necesidad de remediar. En la década pasada, el conocimiento de la remediación de hidrocarburos había tenido una evolución extensiva.

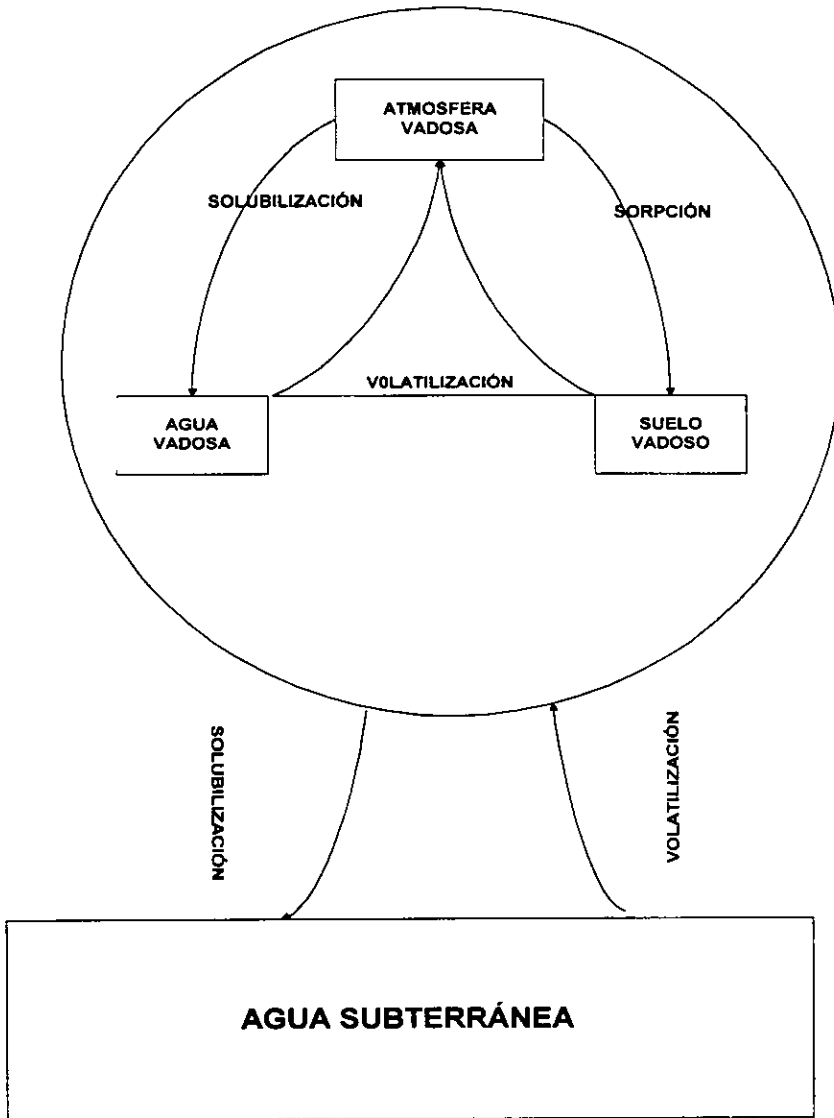


FIGURA 3.3 MODELO CONCEPTUAL TRES SECCIONES VADOSAS-DIVISORIAS

3.4 TIPOS DE BIORREMEDIACIÓN

Existen básicamente cinco tipos de biorremediación: bioreactores, tratamiento fase sólida, composteo, terreno de cultivo (landfarming) y tratamiento in situ. Todas estas tecnologías tienen sus usos y son generalmente aplicadas para bioremediar, efluentes y lodos de refinerías, suelos contaminados y agua subterránea.

Entre los tipos de biorremediación más frecuentemente empleados se encuentra la biorremediación in situ y el terreno de cultivo o "landfarming"

3.4.1 BIORREMEDIACIÓN IN SITU DE SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA

La Biorremediación in situ envuelve a la tecnología más prometedora y barata de remediación de sitios contaminados donde estos últimos se encuentran a profundidad y en donde otras tecnologías no son aplicables.

Hasta hace unos años atrás, la literatura describía que no existían microorganismos más allá de la zona vadosa. Esta teoría consideraba que cualquier muestra de suelo tomada a profundidades mayores de 20 pies era estéril. Hoy sabemos que los organismos pueden existir para desarrollar las enzimas necesarias para tratar los contaminantes que el hombre colocó ahí.

En 1970, se realizaron pruebas para evaluar la degradación biológica de hidrocarburos de petróleo en acuíferos. Los resultados de estos exámenes demostraron que la biorremediación in situ puede reducir los niveles de hidrocarburos en los acuíferos, y se publicó gran información concerniente al proceso que toma lugar y los requerimientos necesarios para manejarlos.

Aunque se requiere de una variedad de minerales por los microorganismos, es necesario generalmente añadir sólo nitrógeno y fósforo.

El electrón aceptor más comúnmente empleado en la biorremediación es el *oxígeno*. Estequiométricamente, aproximadamente tres partes (libras) del oxígeno son requeridas para convertir una libra de hidrocarburo a dióxido de carbono.

Generalmente existen dos tipos de mecanismos para la biorremediación. El tratamiento *aeróbico* y el tratamiento *anaeróbico*. Este último, se realiza en un ambiente de oxidación-reducción, es generalmente tratado en la degradación de compuestos polinucleares clorados y no clorados, esto es substancialmente más difícil de manejar, y este tiene bajas velocidades de reacción que un tratamiento aeróbico. Sin embargo, muchos compuestos que son tóxicos o altamente resistentes a la degradación por compuestos aeróbicos pueden ser degradados por tratamientos *anaeróbicos*.

Los sistemas de biorremediación in situ para acuíferos típicamente consisten en la extracción de puntos como son paredes o trincheras, y paredes de inyección o niveles de infiltración. En muchos casos, el agua extraída es tratada anteriormente para la adición de oxígeno y nutrientes, seguida por una reinyección subsecuente.

Los puntos críticos para el diseño de un sistema de biorremediación in situ son la velocidad del flujo del agua subterránea y la dirección del flujo. Este flujo debe ser suficiente para dar los nutrientes requeridos y el oxígeno de acuerdo a la demanda de organismos, el agua subterránea tratada debe limpiar el área requerida en el tratamiento.

Una superficie de emisión sugerida para tratamientos in situ es una conductividad hidráulica al menos de 10^{-4} cm/seg. (100 pies/yarda).

Los sistemas de biorremediación in situ son regularmente integrados con otras tecnologías de remediación aún secuencialmente o simultáneamente.

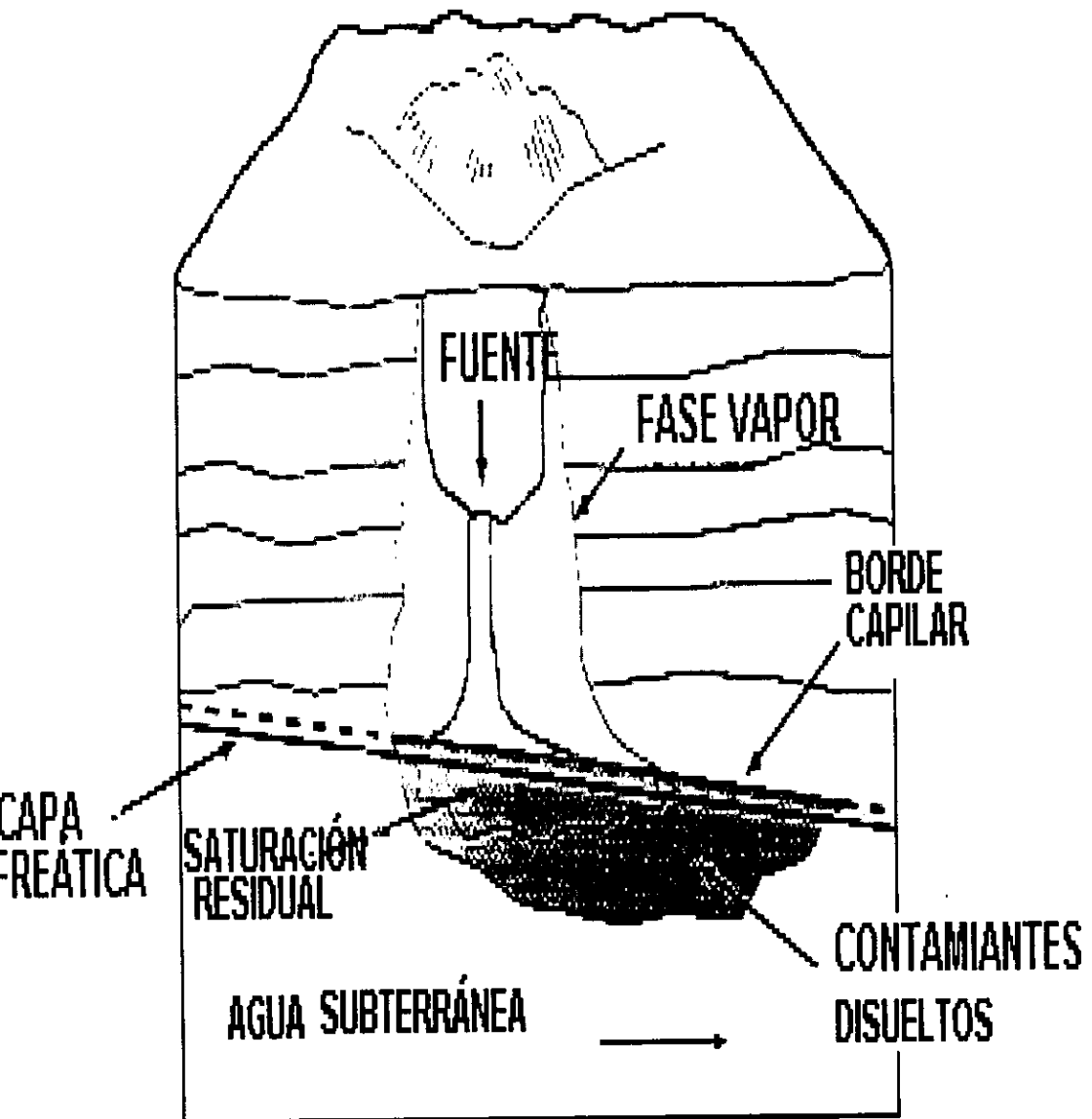
Los hidrocarburos son biodegradables. Los miembros más ligeros son generalmente biodegradados más rápidamente y a menores niveles residuales que los pesados. Así los compuestos monoaromáticos como son: el benceno, tolueno, etilbenceno, y los xilenos son más rápidamente degradados que los de dos anillos como el naftaleno, y así sucesivamente.

Los hidrocarburos poliaromáticos están presentes en las mezclas pesadas de hidrocarburos y particularmente en el carbón, lodos de refinarias y tratamientos químicos de madera. Estos compuestos tienen una solubilidad limitada en agua, absorbidos fuertemente por los suelos, y degradan a velocidades mucho más lentas que los monoaromáticos.

Los solventes no clorados usados en varias industrias por ejemplo, los alcoholes, cetonas, éteres, ácidos carboxílicos son fácilmente biodegradables pero pueden ser tóxicos para la microflora existente a altas concentraciones debido a su alta solubilidad.

Compuestos ligeramente clorados como son clorobenceno, diclorobenceno, fenoles clorinados y ligeramente clorinados PCBs son típicamente biodegradados bajo condiciones aeróbicas. Los más altamente clorados son más recalcitrantes (resistentes a la biodegradación) bajo condiciones aeróbicas pero más susceptibles a la degradación bajo condiciones anaeróbicas.

La **figura 3.4** muestra la localización de los contaminantes tratados por la biorremediación in situ.



**FIG 3.4 LOCALIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES
TRATADOS POR BIORREMEDIACIÓN IN SITU**

3.4.2 TERRENO DE CULTIVO O LANDFARMING

Este es de los sistemas que se emplean en la superficie, en el cual el suelo contaminado es sembrado y labrado con abono y fertilizantes para permitir la degradación de compuestos del petróleo en él.

Cuando son removidos tanques de almacenamiento enterrados y la contaminación es visible, el suelo es colocado en pilas para removerse o para cultivarse. El proceso fomenta la degradación aeróbica de los contaminantes en el suelo. Para un apilamiento típico de suelo contaminado, el tratamiento que se realiza es el siguiente:

a) El suelo es esparcido en capas uniformes generalmente menores de 1 pie de espesor sobre una membrana impermeable.

b) Si se requiere, se añade al suelo abono de caballo o vaca y fertilizantes para proveer el balance de los nutrientes e incrementar el crecimiento de la masa de microorganismos en el suelo. Los fertilizantes usados para la adición de nutrientes sostienen una proporción de nitrógeno, fósforo y potasio **N:P:K** en el orden de 10:2:2. Los nutrientes principales son ajustados para alcanzar una proporción de carbono, nitrógeno, fósforo (**C:N:P:**) aproximadamente de 10:5:1.

c) Cuando el abono y el fertilizante se han añadido, el suelo es trabajado y labrado hasta que el material es combinado. Esto generalmente requiere varios pasos con un tractor de arado, finalmente es regado y se deja en reposo.

d) El suelo es muestreado periódicamente en contenido de hidrocarburos, mezcla del suelo, nutrientes, temperatura y otros que son evaluados y localizados en un plano del terreno.

e) La degradación más rápida toma lugar en el verano cuando la temperatura es alta; en caso contrario en invierno tiende a cesar. A su vez, la rápida degradación puede ocurrir cuando el suelo es mantenido en una mezcla constante, ni tan seco ni tan húmedo. Esto es determinado a nivel laboratorio o por expertos.

f) Para una velocidad óptima de remoción debe mantenerse un mezclado periódicamente y labrado (o trabajado) en intervalos entre seis semanas y tres meses.

El terreno de cultivo o "landfarming" mejorado con la adición de abono puede incrementar la cantidad de microorganismos en la masa del suelo, y en esta forma la biodegradación puede completarse en semanas la cual por lo normal requeriría meses o años sin estos nutrientes.

3.4.3 BIOVENTEO

Es el proceso de suministrar aire u oxígeno al suelo para estimular la biodegradación aeróbica de los contaminantes. Esta tecnología es aplicable para contaminantes en la zona vadosa y regiones contaminadas de un acuífero justamente debajo del nivel del agua freática. Fig. 3.5.

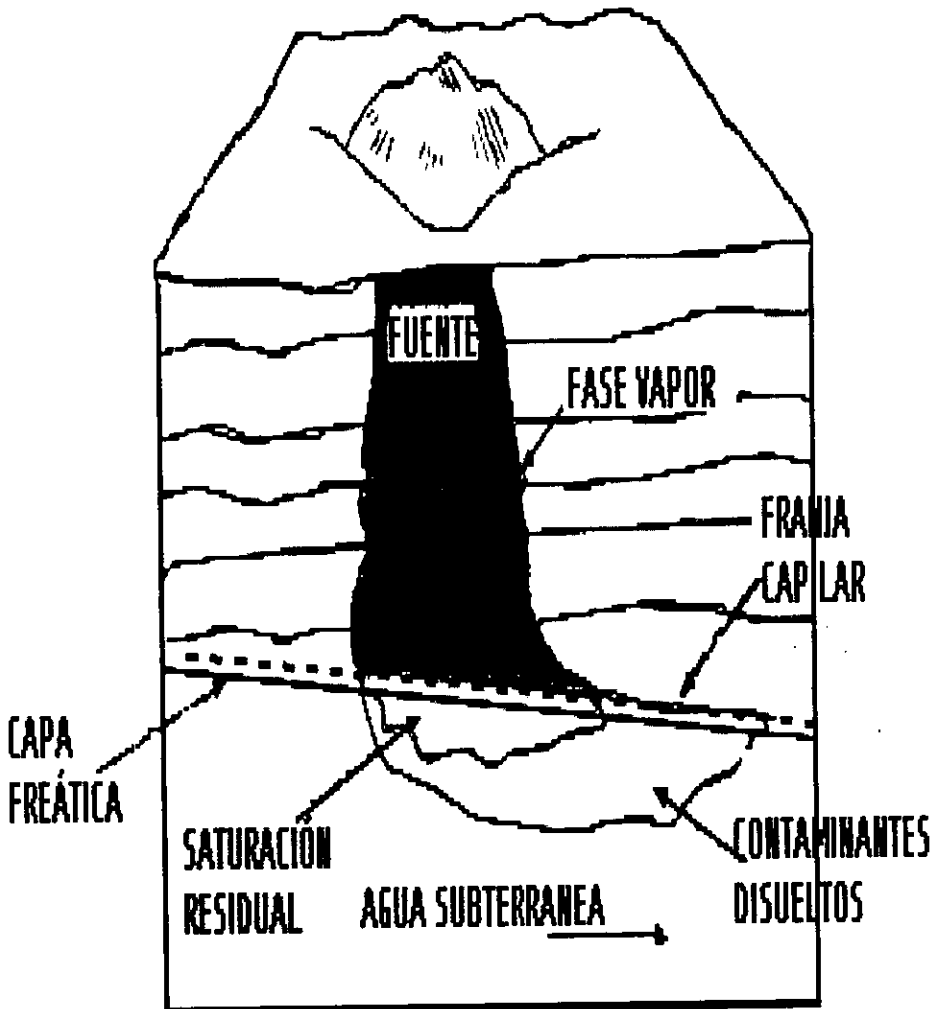


FIG 3.5 LOCALIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES TRATADOS POR BIOVENTEO

En este proceso in situ debe ser aplicada a la zona vadosa también como a una extensa zona insaturada causada por decantación. El bioventeo es una modificación de la tecnología referida como extracción sólida a vacío "soil vacuum extraction", extracción a vacío, extracción de gas sólido, y volatilización in situ.

En investigaciones de laboratorio y demostraciones de campo involucran al bioventeo a principios de los 80's, con particular énfasis en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Tempranamente los investigadores concluyeron que la ventilación no debería sólo remover gasolina por formas físicas, pero si podía provocar la actividad microbiana y promover la biodegradación de la gasolina. Mucho del éxito de esta tecnología es debido al uso del aire como transportador de oxígeno mil veces más eficiente que el agua. Está estimado que varias formas de bioventeo han sido aplicadas a más de mil sitios alrededor del mundo, sin embargo, debe de realizarse un pequeño esfuerzo para las optimizaciones de estos sistemas.

El bioventeo es potencialmente aplicable para cualquier contaminante que es más rápidamente biodegradable aerobicamente que en condiciones anaerobicas. Se han reportado aplicaciones para acetonas, tolueno y mezclas de naftalenos así como Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons) PAH. En muchas aplicaciones, la razón más importante es la biodegradabilidad contra la volatilidad. Si la velocidad de volatilización significativamente excede la velocidad de degradación, esencialmente se convierte en un proceso de volatilización.

En general compuestos con bajas presiones de vapor (menos de 1mm Hg) no pueden ser satisfactoriamente removibles por volatilización y pueden solamente ser biodegradados en una aplicación del bioventeo. En el caso de presiones mayores son gases a temperatura ambiente y además volatizan más rápidamente para ser biodegradados por este sistema. En un rango intermedio caen los hidrocarburos de petróleo de mayor interés como el benceno, tolueno, xileno, que pueden ser tratados por bioventeo.

3.4.4 BIOREACTORES

Son la alternativa más compleja y costosa. Pueden limpiar agua sola contaminada o sólidos mezclados con agua (bioreactores fase lechada). Los líquidos son tratados generalmente con procesos de lodos activados o una capa fija. Los bioreactores de fase lechada requieren de gran energía, sistemas de suspensión de sólidos diseñados para tratar lodos en un rango de 10 y 30% de sólidos.

El reactor puede ser configurado para existir en tanques de almacenamiento, tanques de depósitos o cerrados (sí se requiere control de las emisiones). Por su operación pueden ser por lotes, semicontinuos, o continuos.

Su alto costo es justificado por su corto tiempo de tratamiento (en el orden de horas a días) también como la habilidad de degradar los contaminantes en matrices de suelos difíciles de tratar.

Los reactores sobre la superficie del suelo "Aboveground bioreactors (AGB)", han sido diseñados para trabajar con la contaminación ya sea en la fase líquida o en la fase sólida presente como un lodo, y requiere la misma tecnología como la empleada en los fermentadores. El concepto de estos bioreactores es muy útil para suelos cuando estos han sido excavados, debido a que el costo de excavación es en gran parte proporcional al costo total para los suelos o bioreactores de fase lechada.

Los diseños de estos reactores usan el crecimiento suspendido de microbios o el crecimiento en un soporte sólido preparado. El medio de soporte suspendido pueden ser carbón activado, esferas de plástico, vidrios, o tierras diatomáceas, etc. Dos ventajas de tener los microorganismos atacando la superficie en una biomembrana son la reducción en la cantidad de lodo producido y una mayor rapidez en la velocidad de biodegradación probablemente debido a la gran superficie de contacto.

Los diferentes medios como carbón activado granular pueden proveer una mejor biomembrana de soporte para digestores de operación anaeróbica.

Dependiendo de la naturaleza química de los contaminantes, estos reactores (AGB) pueden ser operados en forma aeróbica o anaeróbica (en su mayoría han operado en forma aeróbica). No es de asombrarse que puedan considerarse dos bioreactores en serie con el primero operando en forma anaeróbica (p.e. en la deshalogenación de un compuesto) y el otro reactor en modo aeróbico (para mineralizar los productos resultantes de los metabolismos).

En cuanto a la aplicación en la remediación de agua subterránea se tienen trabajos en 1988 por Frick y colaboradores quienes reportaron la biorremediación de pentaclorofenol (PCP) en una planta de tratamiento de Minnesota.

Los reactores batch de secuencia SBR (Sequencing Batch Reactors), son elegidos frecuentemente porque permiten que uno opere sobre un rango grande de concentraciones de contaminantes (del orden de 2 -3 de magnitud) y velocidades de flujos irregulares. Aunque muchos lodos son generados en un reactor de este tipo, este diseño permite ser mucho menos susceptible a cambios que los diseños anteriores. Las lixiviaciones de rellenos químicos o municipales se tratan con alta eficiencia en esta clase de reactores.

3.4.5 COMPOSTEO

Otras formas de tratar sólidos (suelos y lodos) incluyen el composteo y el terreno de cultivo. El composteo ha sido ampliamente empleado por años por agricultores, jardineros y otros.

Es un tratamiento biológico superficial de fase sólida en el cual un material estructuralmente firme se adiciona a un material contaminado para lograr la descomposición de compuestos orgánicos. Se agregan agua, oxígeno y nutrientes también para facilitar el crecimiento microbiano.

En 1989 Williams y colaboradores biorremediaron un suelo de explosivos (como TNT, RDX, HMX), los cuales fueron biodegradados en un 90% en 80 días. Obviamente, el composteo debería considerarse más a menudo como una forma de remediar altas concentraciones de residuos difíciles de degradar que son frecuentemente encontrados en lodos, fondos de tanques y suelos viejos.

3.4.6 FASE SÓLIDA

Cuando un suelo contaminado o el lodo de lagos ha sido excavado, este puede ser incinerado, posiblemente depositado en un relleno o biorremediado.

Este tipo representa una variedad e procesos similares a los de cultivo de tierra, pero provee mejores procesos de control. Aunque este sistema ha sido utilizado en Europa, no se ha empleado en E.U.

Los suelos excavados se mezclan, se agregan correctores del suelo (agua, nutrientes, modificadores de pH, modificadores de textura y microorganismos), y el suelo ya acondicionado se coloca en un contenedor como una construcción, un tanque o una cama modificada. De esta manera se mejora el control del proceso por eliminación de agua por drenado-evaporación, por moderación de la temperatura, permitiendo un mayor control de la humedad y la emisión de compuestos orgánicos volátiles.

A continuación se muestra la **Tabla 3.2** donde se citan algunas de las tecnologías d biorremediación con sus ventajas y desventajas.

TABLA 3.2 ALGUNAS TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN

TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TERRENO DE CULTIVO LANDFARMING	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puede ser empleado ex situ o in situ, dependiendo del tipo de contaminante y tipo de suelo ▪ Poco o no se generan corrientes o vapores de desperdicio. ▪ Ampliamente usado y comprobado para muchos compuestos de petróleo (gasolina, diesel). <p>Puede ser empleado como un tratamiento inicial seguido de un lavado de suelo "soil washing".</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Destrucción moderada dependiendo del tipo de contaminante. ▪ Periodos largos de tratamiento en comparación con otros. ▪ Se emplea in situ solo cuando la contaminación está a dos pies de la superficie. ▪ Es para grandes terrenos, áreas dedicadas para el tratamiento de celdas.
BIOVENTEO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excelente eliminación de compuestos volátiles de la matriz del suelo. ▪ Dependiendo del método de vapor, no existen o muy pocos residuos para su disposición. ▪ Tiempo moderado de tratamiento. ▪ Puede ser empleado para tratamiento in situ o ex situ dependiendo del tipo de contaminante y suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tratamiento de vapor empleando carbón activado puede ser caro a altas concentraciones de contaminantes. ▪ El sistema requiere un permiso de operación del aire.
BIOREACTOR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ayuda a la separación de muchos contaminantes del suelo. ▪ Destrucción excelente y eficiente de contaminantes. ▪ Tiempo rápido de tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta movilización y costos de desmovilización para proyectos pequeños. ▪ Manejo de materiales incrementa el costo. ▪ El tratamiento de sólidos debe ser en seco. ▪ Aplicaciones a gran escala sólo llegan a ser comunes en años recientes.
IN SITU	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puede tener bajo costo (según condiciones) ▪ Velocidad de reacción baja (a pesar que el volumen de suelo tratado por unidad es alto). ▪ Investigaciones en procesos anaerobios (reducen la dechloración) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplica sólo a suelos que cumplan ciertos requisitos como: alta permeabilidad, pH, potencial de redox, temperatura, conc. de Fe y Mn, metales pesados, nutrientes N y P, oxígeno disuelto etc. ▪ Aplica para hidrocarburos. ▪ Apropiado diseño para la contaminación del agua. ▪ Se dificulta identificar las características del suelo si éste varía ampliamente. ▪ Se dificulta mantener un medio homogéneo de oxígeno y nutrientes.

Fuente: Chemical Engineering, June 1993.

A continuación se presentan otras formas de biorremediación pero que por ser "nuevas" presentan aún limitaciones o por faltas de estudios en campo se restringe su uso, pero se mencionan para mostrar su existencia. Otras en su defecto pueden emplearse como complemento para la biorremediación en cuanto al suministro de oxígeno (bioventeo, air sparging, soil vapor extraction).

3.4.7 AIR SPARCING

Es la inyección de aire bajo presión debajo del nivel de agua freática para crear una transiente porosidad de aire-relleno por desalojamiento en la matriz del suelo. Es aplicable a acuíferos contaminados de suelos, y materiales de la zona vadosa La figura 3.6 muestra la localización de los contaminantes tratados por éste.

Esta es una tecnología nueva la cual enaltece la biodegradación por el incremento de oxígeno transferido al agua subterránea mientras promueve la remoción física de los orgánicos por volatilización directa. Esta tecnología ha sido extensamente aplicada en Alemania desde 1985 y ha sido introducida en E.U. sólo hasta años recientes.

Cuando esta tecnología es aplicada, los resultados son una compleja división de contaminantes entre el absorbido, disuelto, y el estado vapor. También una compleja serie de mecanismos de remoción son introducido, incluyendo la remoción de volátiles desde la zona insaturada, biodegradación y la división y remoción de volátiles de la fase fluida.

Los mecanismos responsables para la eliminación son dependientes de la volatilidad de los contaminantes. Con uno altamente volátil, por ejemplo, la división o seccionamiento primario es en la fase vapor y el primer mecanismo de separación es a través de la volatilización. En contraste, los contaminantes de baja volatilidad de partición en la fase adsorbida o disuelta, el primer mecanismo de separación es a través de la biodegradación.

Uno de los problemas en la aplicación de esta metodología es controlar el proceso. En la bioventilación o extracción del agua subterránea, los sistemas estaban bajo control debido a que los contaminantes son atraídos al punto de colección, en contraste el sistema "air sparging" causa que los contaminantes y agua se muevan lejos del punto de inyección el cual puede acelerar y agravar la distribución de la contaminación.

Como en cualquier tecnología, existen limitaciones, la primera está asociada con el tipo de contaminantes a remover, los cuales deben ser relativamente volátiles y relativamente insolubles, el segundo es la aplicación dependiendo de las características geológicas del sitio, siendo la más importante la homogeneidad del sitio. Otra cuestión es la profundidad mínima de 4 pies y máxima de 30 pies.

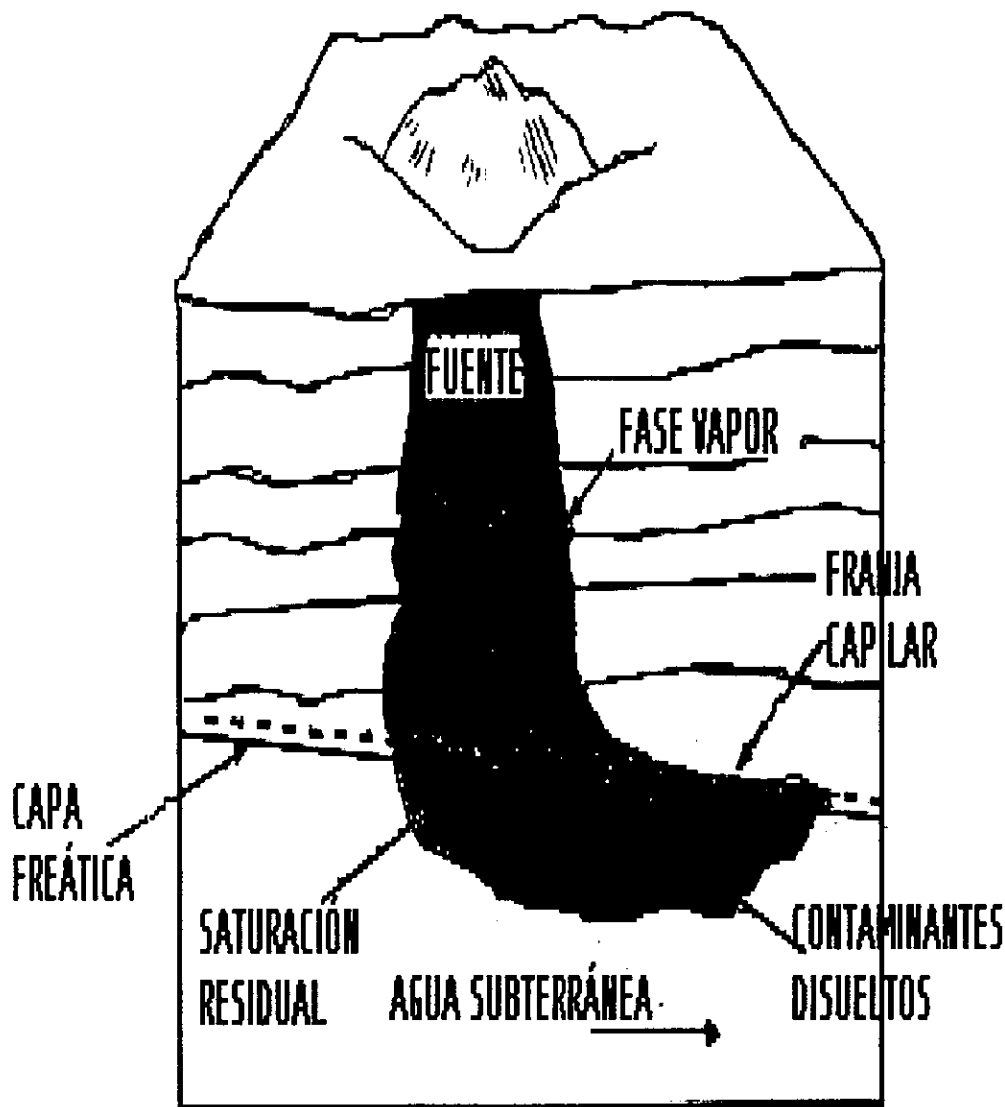


FIG 3.6 LOCALIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES
TRATADOS POR AIR SPARCING

3.4.8 EXTRACCIÓN DE VAPORES DEL SUELO "SOIL VAPOR EXTRACTION" (SVC)

Empleando vacío a través del suelo insaturado promueve el flujo de aire fresco dentro de la subsuperficie y abastece de oxígeno para soportar la biorremediación. El espaciamiento de los puntos de extracción y el tamaño del vacío dependen de la permeabilidad del suelo, el cual puede ser determinado a escala piloto. Desde que la SVE puede remover los constituyentes volátiles en el curso de la estimulación de la biorremediación, se requiere del tratamiento del gas de salida.

3.4.9 ELECTRÓN ACEPTOR ALTERNATIVO

La biorremediación empleando un electrón aceptor más que el oxígeno es potencialmente más ventajoso para cubrir la dificultad de suministrar oxígeno a los procesos aeróbicos. Nitrato, sulfato, y dióxido de carbono son otras alternativas, ya que son más solubles en agua, no son caros, y no son tóxicos para los microorganismos.

La demostración de esta tecnología en el campo es limitada, además el uso de un electrón alternativo para la biorremediación debe ser visto como una tecnología en desarrollo. La **figura 3.7** muestra la localización de los contaminantes que pueden ser remediados por la introducción de un electrón aceptor alternativo.

Esta tecnología involucra la estimulación del crecimiento microbial por la perfusión de electrones donadores, electrones aceptores y nutrientes a través de la formación. Por ejemplo el electrón alternativo como el nitrato para la biorremediación se ha estudiado a nivel laboratorio pero no a gran escala.

La combinación de procesos anaerobios seguidos de procesos aeróbicos es prometedora para la biorremediación de contaminantes orgánicos altamente clorados.

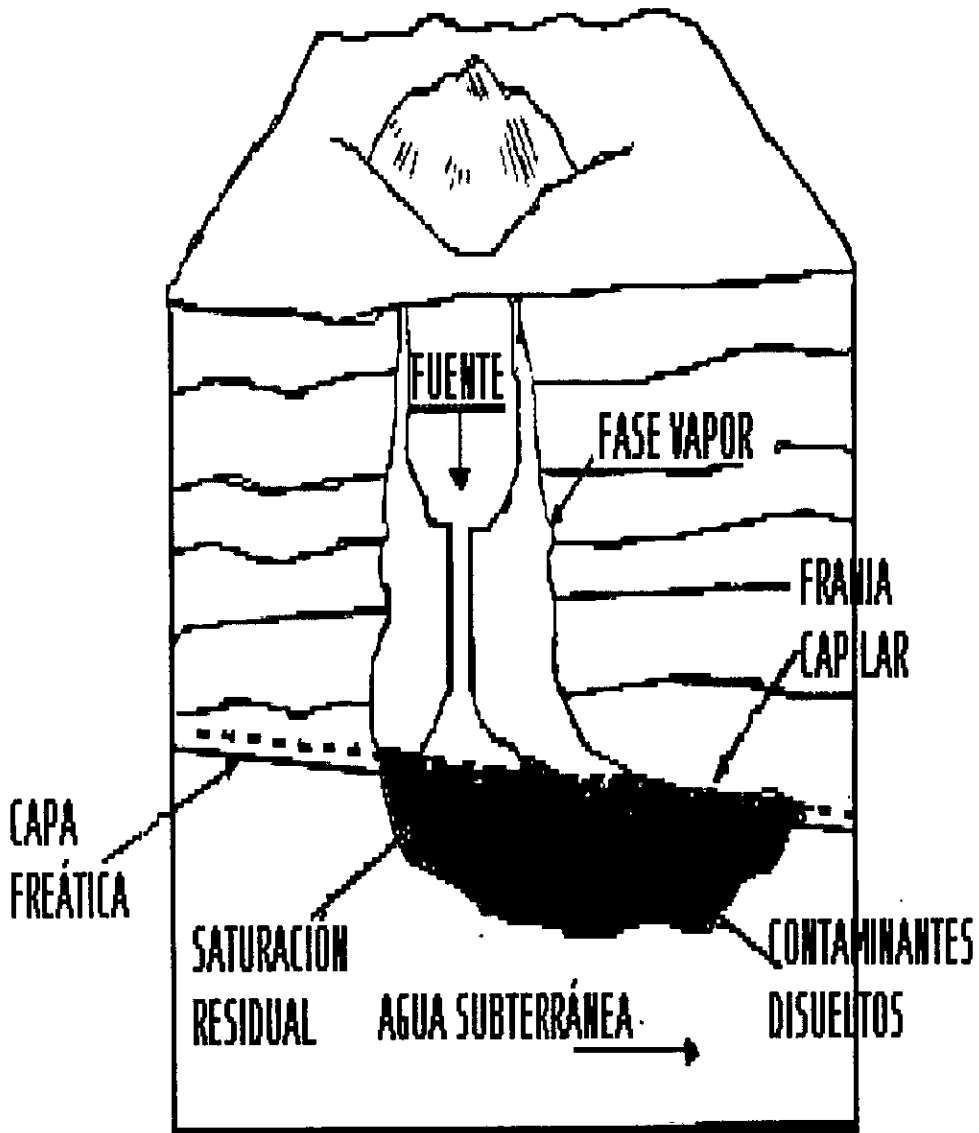


FIG 3.7 LOCALIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES TRATADOS
POR ELECTRON ACEPTOR

3.4.10 BIORREMEDIACIÓN NATURAL

El concepto básico detrás de la biorremediación natural es permitir naturalmente que los microorganismos degraden a los contaminantes que han sido liberados dentro de la subsuperficie. No es una alternativa de "no acción", como en muchos casos este es empleado para suplir otras técnicas de remediación. En algunos casos sólo la remoción de la fuente primaria puede ser necesaria. En otras, técnicas convencionales de remediación de agua subterránea como son bombeo y tratamiento pueden emplearse para reducir las concentraciones de los contaminantes dentro del acuífero.

Esta técnica es capaz de reducir los contaminantes aerobicamente en la zona vadosa y en los márgenes de la pluma (Fig 3.8), donde el oxígeno no es limitado.

Uno de los mayores factores de control del uso de la biorremediación natural es la aceptación de este por las leyes, reglamentos y grupos ambientalistas y el público. Ya que la implementación de estos sistemas difiere de las técnicas convencionales, es decir no se suprime la fuente de contaminantes, sino que se deja que evolucione sin intervenir hasta que se restablezcan las condiciones del sitio.

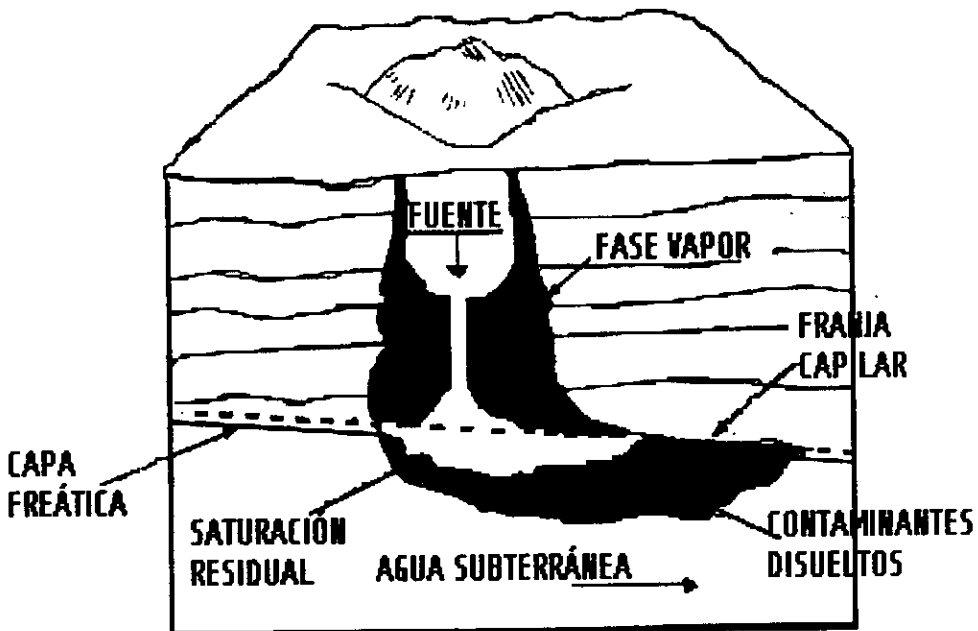


FIG 3.8 LOCALIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES TRATADOS POR BIORREMEDIACIÓN NATURAL

A continuación se muestra un árbol de decisiones de biorremediación que puede servir de ayuda en la selección de la mejor opción.

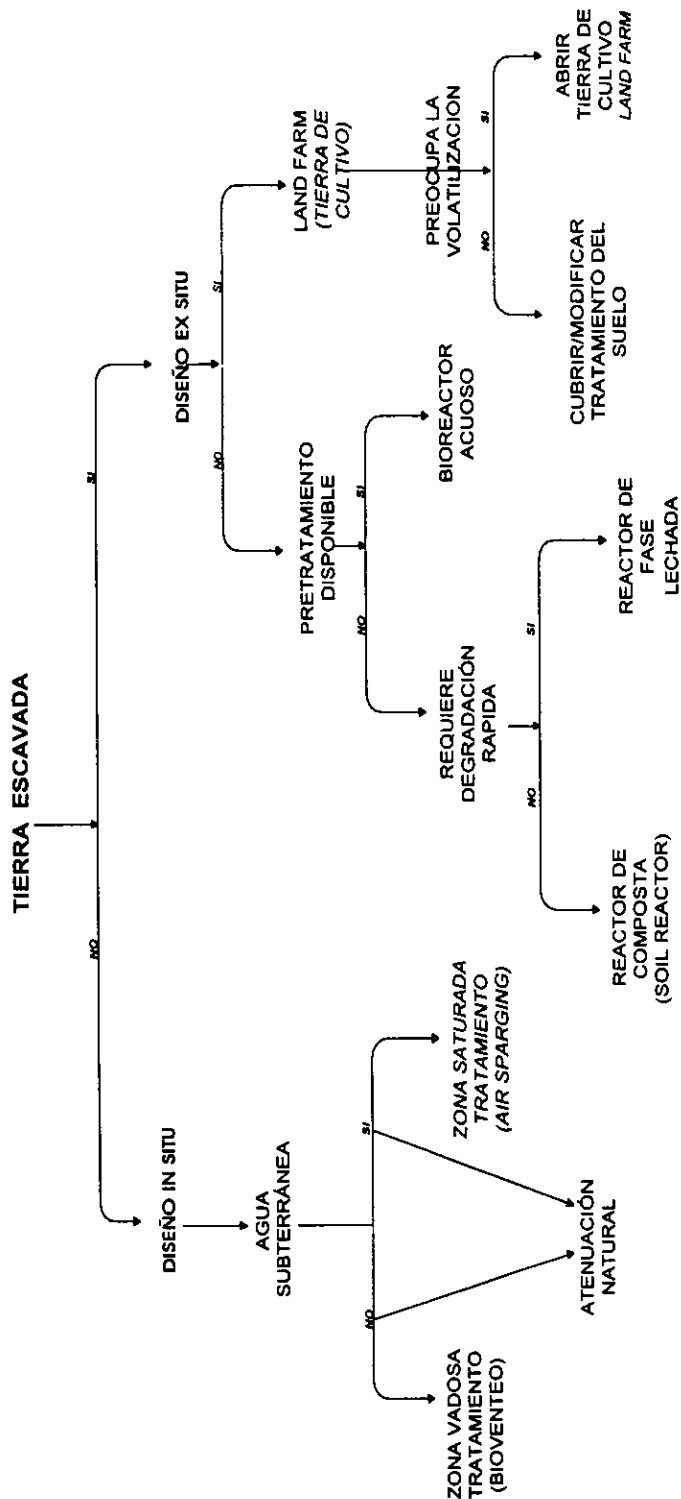


FIG 3.9 DISEÑO DEL ÁRBOL DE DECISIÓN DE BIORREMEDIACIÓN

La tabla 3.3 muestra las características a ser aplicadas a diferentes niveles de la biorremediación, su estrategia general para el monitoreo y evaluación.

TABLA 3.3 CARACTERIZACIÓN			
	CONTAMINANTE	HIDROGEOQUÍMICA	MICROBIOLOGÍA
CARACTERIZACIÓN DEL SITIO	Parámetros de monitoreo: <ul style="list-style-type: none"> • Composición • Concentración • Toxicidad • Bioviabilidad • Solubilidad • Sorpción, volatilización 	Parámetros de monitoreo: <ul style="list-style-type: none"> • Propiedades geológicas, heterogeneidad. • Conductividad hidráulica. • Direcciones de flujo. • Nutrientes, NO₃, PO₄, etc. • Electrones aceptores: O₂, NO₃, etc. • pH, temperatura, potencial acuoso. 	Parámetros de monitoreo: <ul style="list-style-type: none"> • Diversidad catabólica específica. • Tamaño de contaminante. • Actividades catabólicas específicas.
	Preguntas relevantes: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Son los contaminantes biodegradables? • ¿Qué condiciones permiten el tratamiento biológico? • ¿Es el proceso de sucesos metabólicos? • ¿Puede ser la biodegradación mejorada? 	Preguntas relevantes: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Son las condiciones hidrogeológicas favorables? • ¿Son las condiciones ambientales favorables para el desarrollo y la actividad? • ¿Se requiere de la adición de nutrientes adicionales? • ¿Puede ser el ambiente modificado (optimizado)? 	Preguntas relevantes: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Está presente el potencial biológico para la biodegradación? • ¿Puede la degradación estimular a la población? • ¿Vale la pena la bioacrecamiento?
EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO	<p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">¿Es factible un tratamiento biológico?</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>↓</p> <p>Tratamiento In-Situ</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>↓</p> <p>Tratamiento Ex-Situ</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Estudios de biotratabilidad y proceso de evaluación ↓</p>		
PROCESO DE ESCALAMIENTO	Aplicación de criterios para la evaluación eficiente: <ul style="list-style-type: none"> • Química • Económica • Ecotoxicológica • Biológica 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios a escala laboratorio. • Procesos a escala piloto. • Procesos a gran escala. 	Diseño del proceso de monitoreo <ul style="list-style-type: none"> • Muestreo. • Controles • Parámetros.

A continuación también se muestran (Figs. 3.10 y 3.11) los diferentes medios tratados por biorremediación en E. U. Así como los tipos de contaminantes más tratados también. Fuente: Alvarez Pedro, Biorremediación de sitios contaminados., 1997.

FIG 3.10 TIPOS DE MEDIOS TRATADOS POR BIORREMEDIACION EN E.U.

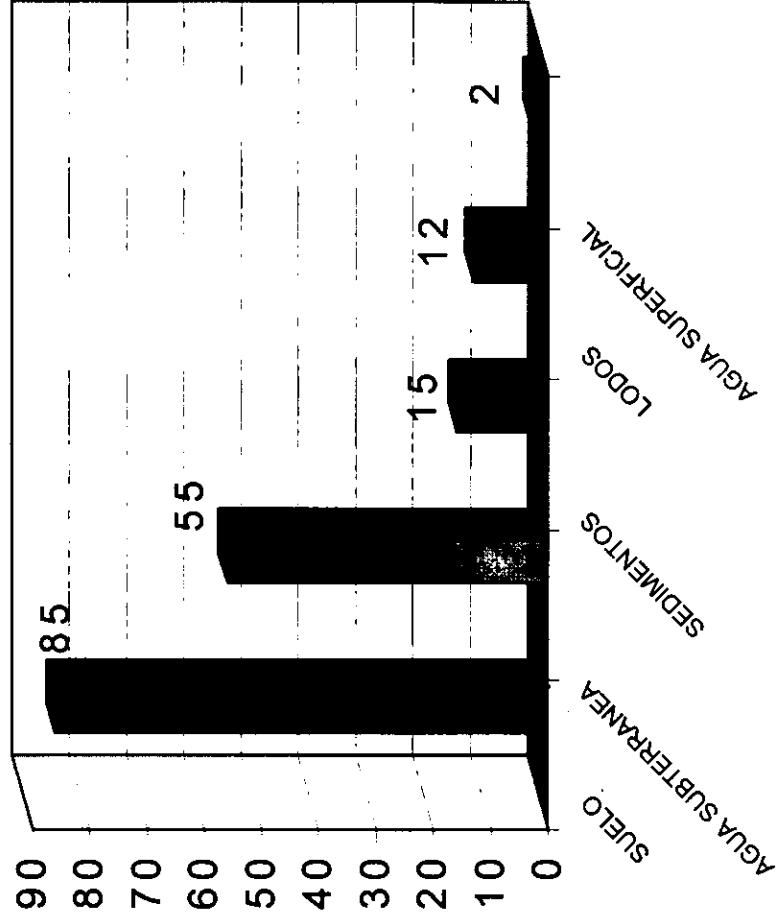
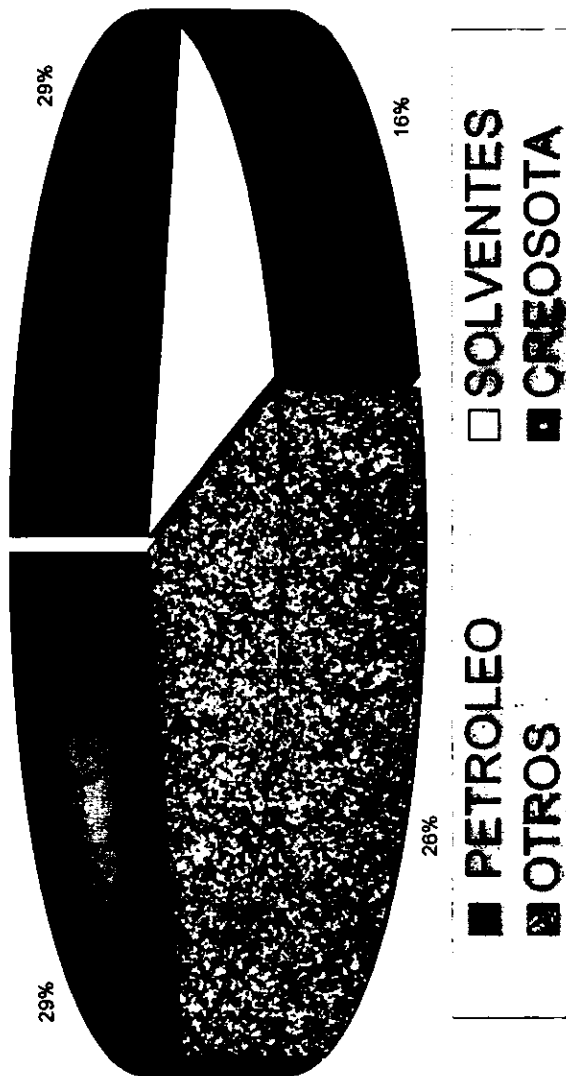


FIG 3.11 TIPOS DE CONTAMINANTES MAS TRATADOS EN ESTADOS UNIDOS EN 1994



3.5 MARCO INTERNACIONAL DE LA BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación continúa su rol incrementando su papel en la remediación del mundo de los residuos peligrosos, y esta convirtiéndose en una herramienta aceptada en las firmas de remediación.

El mercado de la remediación ambiental alrededor del mundo se maneja por regulaciones de gobiernos. Los E.U. tienen el mundo más avanzado en este aspecto pues cuentan con una compleja red de regulaciones ambientales. Sin embargo, mercados que están presentando su existencia son en Europa, Canadá, y la Costa del Pacífico. Generalmente el mercado de la biorremediación existe en muchos países como una industria ambiental establecida y una infraestructura para la remediación o manejo de residuos peligrosos. Tabla 3.4.

**TABLA 3.4 MERCADO DE LA BIORREMEDIACIÓN DE 1994-2000
(EN MILLONES DE DÓLARES)**

EL MUNDO	290-440	450-700	800-1,350
ESTADOS UNIDOS	160-210	225-325	350-600
EUROPA	105-175	180-300	375-600
ALEMANIA	70-100	100-150	250-350
HOLANDA	10-20	15-35	30-60
ESCANDINAVIA	10-20	15-35	30-60
REINO UNIDO	5-10	7.5-20	15-30
OTRA EUROPA	10-25	42.5-60	50-100
CANADÁ	15-35	30-50	50-100

FUENTE: APPLIED BIOREMEDIATION OF HYDROCARBONS, GRASS, 1995.

La Figura 3.12 muestra la proyección hecha por los autores *David Glass y Van Eyk & colaboradores*, tomándose los valores mínimos para cada país en los diferentes años.

Como lo muestra la Tabla 3.5 el mercado europeo está dividido en varios bloques, basados en las regulaciones nacionales ambientales y políticas. Igual que en los países punteros de los bloques, el mercado de la remediación de sitios son buenos detrás de los E.U. Muchos de estos países tienen solo inventarios para identificar y dar prioridad sus sitios peligrosos. Aunque han sido estimados más de 150,000 sitios peligrosos en la nación Europea. Muchos países del Norte después de los punteros como Holanda, Dinamarca y Alemania tienen estimados los sitios de contaminación pero muy poco trabajo.

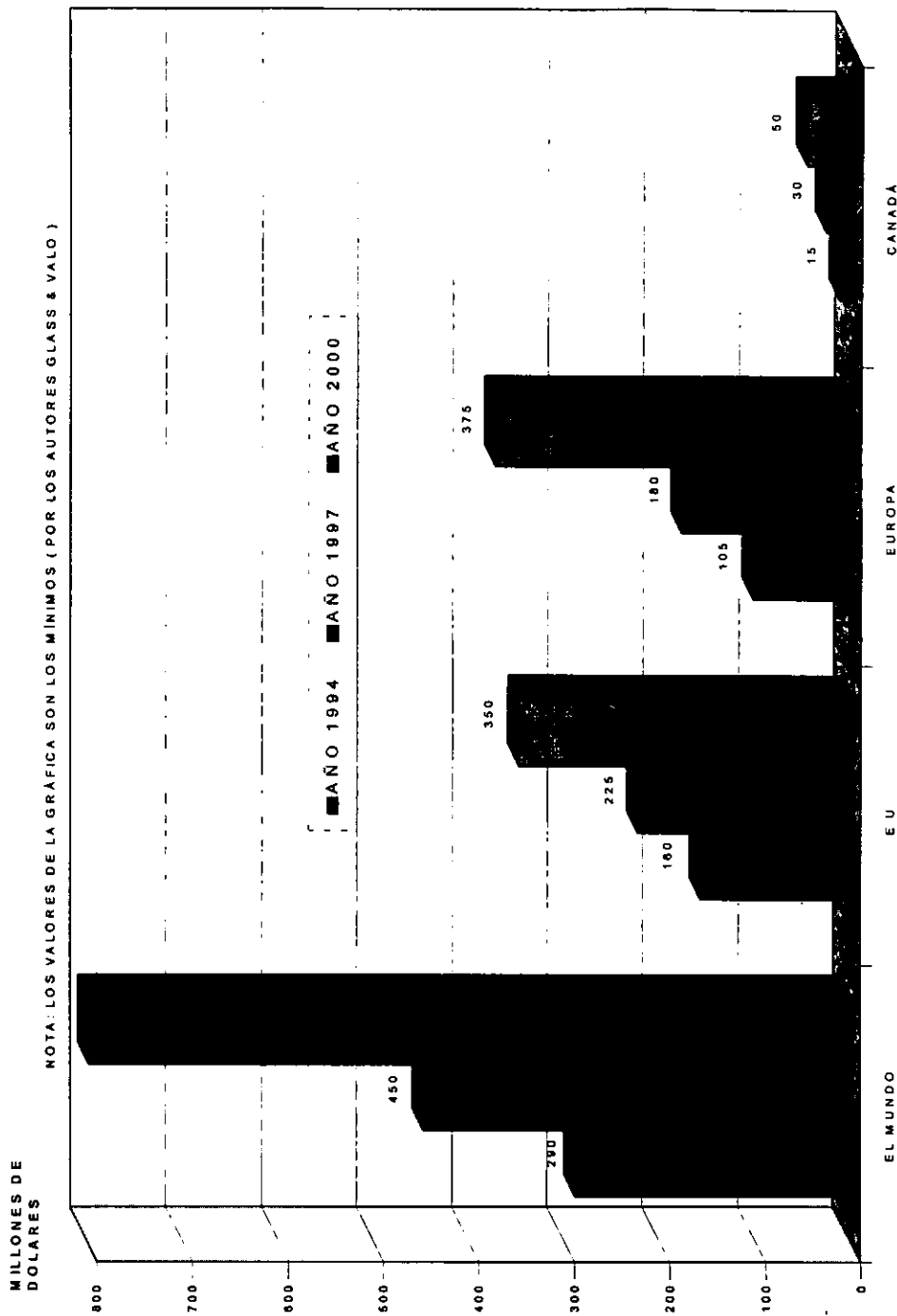


FIG 3.12 MERCADO DE LA BIORREMEDIACIÓN DE 1994-2000

**TABLA 3.5 ESTRUCTURA POR SECTORES O BLOQUES
EN EL MERCADO AMBIENTAL EUROPEO**

BLOQUE O SECTOR 1	BLOQUE O SECTOR 2	BLOQUE O SECTOR 3	BLOQUE O SECTOR 4
DINAMARCA ALEMANIA HOLANDA NORUEGA SUECIA SUIZA	LUXEMBURGO REINO UNIDO AUSTRIA BÉLGICA FINLANDIA FRANCIA IRLANDA ITALIA	GRECIA PORTUGAL ESPAÑA	BLOQUES DEL ESTE

FUENTE: ENVIROMENTAL BUSINESS JOURNAL 1991. METZGER 1990.

En total el mercado Europeo se prevé que crezca como se muestra en la Tabla 3.6.

**TABLA 3.6 SITIOS CONTAMINADOS CONOCIDOS O ESTIMADOS EN
ALGUNOS PAÍSES EUROPEOS**

PAÍS	NÚMERO ESTIMADO DE SITIOS	AÑO DE ESTIMACIÓN	COSTO ESTIMADO DE REMEDIACIÓN EN BILLONES DE DÓLARES
UNIÓN EUROPEA	150,000	1990	200 BILLONES
ALEMANIA	150,000-200,000	1993	100 BILLONES
HOLANDA	C.A. 100,00	1993	30-120 BILLONES
FINLANDIA	10,000-25,000	1995	N.A.
DINAMARCA	6,000-12,000	1991	4 BILLONES
SUECIA	>6,000	1995	7 BILLONES
NORUEGA	>2,000	1995	N.A.

FUENTE: ENVIRONMENTAL BUSINESS JOURNAL 1991. N.A. =NO DISPONIBLE

Hay una larga historia de actividades del sector público y privado en Técnicas biológicas en Europa, particularmente, en las practicas establecidas de terreno de cultivo "landfarming" y lavado de suelo "soil washing" frecuentemente combinado con alguna forma de biodegradación. Alemania y Holanda son líderes en limpieza, pero también la biorremediación toma lugar en países como el Reino Unido.

Después de Europa sigue Canadá, donde hay un interés considerable en la biorremediación. El mercado ambiental también existe en Australia, Japón y la costa del Pacifico principalmente en Singapur y Taiwan.

Se espera hacer expandir las regulaciones ambientales en el mundo de la remediación en general y específicamente el de la biorremediación.

CAPÍTULO 4

DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS POR MICROORGANISMOS

4. DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS POR MICROORGANISMOS

4.1 GENERALIDADES

El catabolismo de compuestos aromáticos por parte de los microorganismos, constituye un paso esencial en el ciclo del carbono, con relación a la oxidación de productos naturales y compuestos aromáticos adicionados al medio ambiente por las actividades realizadas por el hombre. (Dagley, S. 1978).

Aunque los compuestos aromáticos raramente predomina entre los substratos orgánicos que llegan al suelo, representan un grupo importante de sustancias que están sujetas al ataque por parte de la microflora. Los tejidos vegetales contienen compuestos sencillos, monocíclicos, que poseen anillos de benceno así como moléculas más complejas tales como flavonoides, alcaloides, terpenos y taninos.

Los compuestos aromáticos constantemente se encuentran disponibles para la microflora en forma de humus, tejidos vegetales y células microbianas en descomposición. También se encuentran en varios suelos el benceno, tolueno, xileno, etilbenceno y naftaleno, provenientes de procesos industriales los cuales son desechados a este medio.

Muchos miembros de la microflora del suelo metabolizan hidrocarburos aromáticos y sus derivados. Existen microorganismos específicos que descomponen moléculas tales como el fenol, naftaleno y antraceno que contiene 1,2 y 3 anillos de benceno respectivamente. Aparentemente, las bacterias son el grupo microbiano dominante relacionado con la mineralización de compuestos de este tipo, principalmente las especies *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter* y *Bacillus*; también los hongos y estreptomicetos pueden participar en la descomposición de hidrocarburos aromáticos.

La importancia en determinar que tan rápido se consume un hidrocarburo por biodegradación, lo cual resulta en el incremento del potencial de oxidación de hidrocarburos, se conoce como adaptación. (Song, H.G. y R. Bartha, 1990).

Los tres mecanismos por los cuales puede ocurrir la adaptación son:

1. Inducción y/o desrepresión de enzimas específicas.
2. Cambios genéticos, los cuales resultan en nuevas capacidades metabólicas.
3. Selección de organismos enriquecidos, capaces de transformar los compuestos de interés.

Existen ciertos factores que limitan la biodegradación de compuestos aromáticos:

1. Cantidad de oxígeno disponible.
2. Cantidad disponible de nutrientes, el nitrógeno, el fósforo y el hierro tienen un efecto definitivo sobre el proceso.
3. Temperaturas bajas. Abajo de los 10° C se limita grandemente el proceso de degradación.
4. Otros. En determinadas situaciones la humedad y los pH extremos pueden constituirse en factores limitantes.

4.2 DEGRADACION DE HIDROCARBUROS AROMATICOS, ALIFÁTICOS Y OTROS

Existe en la naturaleza gran cantidad de microorganismos capaces de biodegradar una amplia variedad de hidrocarburos aromáticos, desde los más simples como el benceno, hasta los más complejos como los alquilbencenos y aromáticos polinucleares tales como naftaleno, fenantreno, y antraceno.

Los hidrocarburos monoaromáticos son oxidados hasta catecol en uno o varios pasos. En el caso que contengan sustituyentes metil, tales como el tolueno y el xileno, el ataque enzimático inicial puede ser directamente en el anillo aromático o en el grupo metil.

Sin embargo, la oxigenación del anillo aromático parece ser el mecanismo más común. La secuencia de reacciones es en cierta medida similar a la observada en la oxidación del benceno.

Además de los derivados sustituidos simples del benceno, los microorganismos son capaces de biodegradar una gran variedad de alquilbencenos con sustituyentes de cadena corta y larga. Entre los primeros se tiene el etilbenceno, propilbenceno, isopropilbenceno y butilbenceno. Estos derivados, como resultado del ataque enzimático del anillo aromático, son catabolizados a través de la formación de grupos diol y catecoles sustituidos.

Los pasos iniciales en el catabolismo de los hidrocarburos alifáticos, ciclicos y aromáticos, por bacterias y hongos, involucran la oxidación de los substratos por oxigenasas, para lo cual se requiere oxígeno molecular. Las condiciones

aeróbicas son por lo tanto necesarias para que esta ruta de oxidación microbiana de hidrocarburos en el medio ambiente.

La disponibilidad del oxígeno en suelos es dependiente de los índices de consumo de oxígeno de los microorganismos, del tipo de suelo, ya que el suelo puede estar saturado de agua, lo que puede agotar el oxígeno del medio.

En las rutas bioquímicas para el catabolismo aeróbico de compuestos aromáticos, la presencia de oxígeno es necesaria como aceptor de electrones y para la inserción del mismo durante la hidroxilación y división del anillo.

La degradación microbiana de compuestos aromáticos tales como el benzoato y de compuestos aromáticos halógenos, tales como los halobenzoatos, clorofenoles y bifenilos policlorados, se han demostrado que ocurre bajo condiciones anaeróbicas. Evidencias indican que ciertos microorganismos del suelo y fango, son capaces de metabolizar hidrocarburos aromáticos no sustituidos y alquil sustituidos, incluyendo también el benceno, tolueno, xileno, 1,3-dimetilbenceno, acenafteno y naftaleno en ausencia de oxígeno molecular.

La transformación anaeróbica de benceno y tolueno bajo condiciones metanogénicas se ha caracterizado tentativamente como una fermentación, en la cual el sustrajo es parcialmente oxidado y parcialmente reducido, siendo los productos finales bióxido de carbono y metano. Como se muestra.

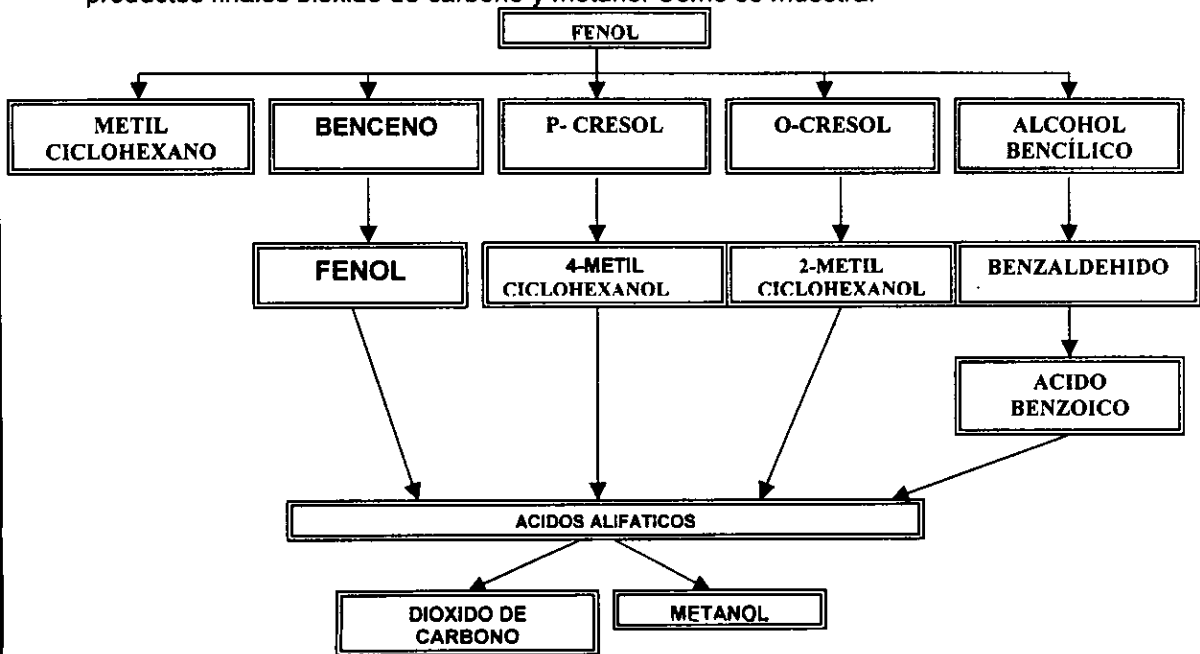


FIG. 4.1 DEGRADACIÓN ANAEROBICA POR MEZCLA DE MICROORGANISMOS METANOGÉNICOS PROPUESTA POR GRBIC-GALI' C Y VOGEL 1987.

Los microorganismos pueden desintegrar casi todos los hidrocarburos bajo condiciones apropiadas. Hay bacterias que no actúan sobre los hidrocarburos de cadena larga, pero que oxidan generalmente el metano. La especie *Methanomonas* (*Pseudomonas*) *methanica* puede utilizarlo (o bien al metanol) como única fuente de carbón. La oxidación del metano pasa probablemente por las etapas de metanol. Formaldehído y ácido fórmico para terminar en CO_2 .

Aparte de la especie mencionada, hay otras bacterias capaces de oxidar este hidrocarburo, especialmente en los lagos donde su producción es muy activa. Además del género *Pseudomonas*, hay sobre todo algunos actinomicetos que destacan como oxidantes del metano.

La oxidación microbiana de las parafinas superiores se inicia en el último átomo de carbono y conduce a la formación de ácidos grasos pasando por la etapa de alcoholes parafínicos. Para ello es necesaria la presencia de oxígeno molecular. *Pseudomonas erythrea*, que utiliza los hidrocarburos alifáticos desde el hexano hasta la parafina líquida.

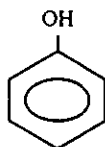
Los hidrocarburos alifáticos de cadena corta, como el etano, el propano y el butano son oxidados por algunas bacterias de distintos órdenes. Se trata principalmente de representantes de los géneros *Pseudomonas*, *Flavobacterium* (*eubacterias*) y *Nocardia* (*actinomicetos*).

Muchas bacterias, algunas levaduras y otros hongos descomponen también los hidrocarburos aromáticos. Entre las primeras destacan principalmente las representantes de los géneros *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Spirillum*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Bacillus* y *Nocardia*. En esta degradación se produce principalmente anillos aromáticos que portan casi exclusivamente grupos hidroxilos. Estos anillos se convierten después en ácidos alifáticos, para lo cual hace falta oxígeno molecular. Las oxigenasas catalizan la incorporación de éste elemento a la molécula del hidrocarburo.

4.3 FENOL (COMO COMPUESTO AROMÁTICO)

4.3.1 GENERALIDADES DEL FENOL

Ácido carbólico, ácido fénico, ácido fenílico, benzofenol, hidróxido de fenilo, hidroxibenceno, oxibenceno, son los nombres con los cuales se conoce a este compuesto llamado fenol C_6H_5OH . Además el término fenol se utiliza para el compuesto padre hidroxibenceno, y también como término genérico para la clase de compuestos orgánicos aromático que tiene un grupo hidroxilo enlazado en un anillo de benceno.



4.3.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

El fenol puro cristaliza en largas agujas incoloras que funden a $42.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; hierve a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su peso específico es 1.084 a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 1.070 a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; tiene solubilidad en el agua de 9 g por 100 g de agua. Es incoloro, sin embargo, se oxida con facilidad, por lo que puede tomar una tonalidad rojiza; su pK a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ es 10.0 (Tabla 4.1), el pH de soluciones acuosas es de 6.0; presenta un olor característico (ácido fénico, timol); soluble en agua, muy soluble en alcohol, cloroformo, éter, glicerol, petrolato, disulfito de carbono, etc.; su temperatura de autoignición es de $1319\text{ }^{\circ}\text{F}$.

TABLA 4.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL FENOL (Pk)

pKa, 25°C			
SUBSTITUYENTE	ORTO	META	PARA
H	10.00	10.00	10.00
METILO	10.29	10.09	10.26
FLUORO	8.81	9.28	9.81
CLORO	8.48	9.02	9.38
BROMO	8.42	8.87	9.26
YODO	8.46	8.88	9.20
METOXI	9.98	9.65	10.21
METILTIO		9.53	9.53
CIANO			7.95
NITRO	7.22	8.39	7.15

FUENTE : QUÍMICA ORGÁNICA, ADREW STREITWIESER Jr, 1985.

El fenol es un compuesto bastante ácido, distinguiéndose marcadamente en esto de los alcoholes, menos ácidos incluso que el agua; es decir reacciona con el hidróxido de sodio formando agua y fenóxido de sodio, en cambio los alcoholes que son más débiles que el agua, no sufren la reacción anterior. Así los fenoles de bajo peso molecular son por lo general un tanto hidrosolubles y tienen puntos de

ebullición más altos que los hidrocarburos del mismo peso molecular, por ejemplo la del fenol ($T_{eb} = 182^{\circ}\text{C}$) que es mayor 70° que la del tolueno ($T_{eb} = 110.6^{\circ}\text{C}$), debido a puentes de hidrógeno intermoleculares. Sin embargo, la propiedad más importante de los fenoles es su acidez. La Tabla 4.2 muestra la acidez de algunos fenoles comunes.

TABLA 4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FENOLES

NOMBRE	FÓRMULA	T _{FUSIÓN} (°C)	T _{EBULLICIÓN} (°C)	SOLUBILIDAD EN AGUA (GM/100 ML H ₂ O)
Fenol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	43	182	9.3
<i>o</i> -Cresol	<i>o</i> - $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$	30	191	2.5
<i>m</i> -Cresol	<i>m</i> - $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$	11	201	2.6
<i>p</i> -Cresol	<i>p</i> - $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$	35.5	201	2.3
<i>o</i> -Clorofenol	<i>o</i> - $\text{ClC}_6\text{H}_4\text{OH}$	8	176	2.8
<i>m</i> -Clorofenol	<i>m</i> - $\text{ClC}_6\text{H}_4\text{OH}$	33	214	2.6
<i>p</i> -Clorofenol	<i>p</i> - $\text{ClC}_6\text{H}_4\text{OH}$	43	220	2.7
<i>o</i> -Nitrofenol	<i>o</i> - $\text{O}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{OH}$	45	217	0.2
<i>m</i> -Nitrofenol	<i>m</i> - $\text{O}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{OH}$	96		1.4
<i>p</i> -Nitrofenol	<i>p</i> - $\text{O}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{OH}$	114		1.7
2,4 Dinitrofenol		113		0.6
2,4,6-Trinitrofenol (ac. pícrico)		122		1.4

FUENTE: FUNDAMENTOS DE QUÍMICA ORGÁNICA, GRAHAM SOLOMONS, 1995

Los efectos tóxicos por ingestión de pequeñas cantidades de fenol en los humanos pueden provocar náusea, vómito, colapso circulatorio, parálisis, convulsiones, coma, ictericia, necrosis de boca y tracto gastrointestinal, muerte por paro respiratorio.

Los fenoles abundan en la naturaleza y sirven como intermediarios en la síntesis industrial de productos tan diversos como adhesivos y antisépticos.

Las resinas fenólicas, por su durabilidad, lisura, resistencia a los agentes ambientales y propiedades dieléctricas han sido muy usados en el campo de polvos moldeables (se moldean para dar una gran variedad de productos tales como cajas y bocinas de teléfono e implementos eléctricos), laminados (se emplean generalmente para partes estructurales como: hojas, tubos canales, varillas etc.), adhesivos (como impermeabilizantes y empleo en empaques, aislantes), y resinas de recubrimientos (de protección y en exteriores).

El fenol y sus derivados son extensamente usados en la refinación de productos petroquímicos, en extracciones de materiales indeseables de los aceites combustibles, como materia prima, etc. En un inicio el fenol fue utilizado como desinfectante, el fenol puro se emplea como estándar para valoración de los desinfectantes.

4.3.3 DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DEL FENOL

4.3.3.1 INTRODUCCIÓN

La habilidad de microorganismos para metabolizar compuestos orgánicos ha tomado gran ventaja por métodos tanto naturales como de ingeniería.

En Estados Unidos la popularidad en técnicas como la Biorremediación es debido al tratamiento de materiales peligrosos que son reducidos a sustancias inocuas como son: metano, dióxido de carbono etc.

Los compuestos fenólicos son de interés especial para los microbiólogos, desde que son ampliamente empleados y encontrados como constituyentes de muchos residuos peligrosos. Los fenoles han sido extensamente estudiados en experimentación de biodegradación. La biodegradación del fenol, uno de los muchos compuestos aromáticos presentes en alquitrán de carbón y petróleo, ha sido analizado por varios investigadores durante 40 años. El fenol es un componente orgánico tóxico frecuentemente encontrado en residuos de productos de refinería, petroquímicos y tratamiento de plantas de madera. Esta registrado por la EPA con el código U188. La dosis letal para humanos es reportada de 5-10 mg /kg. Estando en la naturaleza, el fenol a altas concentraciones puede inhibir el crecimiento o ser letal para la degradación de microorganismos. La máxima concentración de fenol biodegradado en estudios durante los últimos 20 años se muestra en la **figura 4.1**. Existe un interés continuo por biodegradar altas concentraciones de fenol para dirigir cada problema durante los tratamientos de aguas, suelos, lodos altamente contaminados con residuos peligrosos.

4.3.3.2 HISTORIA

En 1929 Mohnlmann reportó que bajos niveles de fenol podían ser tratados por lodos activados. Evans investigó la oxidación del fenol y ácido benzoico por una bacteria separada del suelo. En un esfuerzo por determinar el metabolismo de los compuestos fenólicos, mostró que el primer producto en el proceso del fenol era el catecol.

Coe reportó 90-95% residuos removidos de una refinería contenían 100 mg/l de fenol. Bengner recomendó el tratamiento biológico sobre los procesos físico-químicos para residuos de fenol debido a la alta eficiencia del tratamiento y el fácil control de las fluctuaciones de los niveles de fenol en un rango de 50 a 500mmg/l encontrados en corrientes de residuos.

Jones y colaboradores separaron dos géneros de bacteria a escala laboratorio de una planta de lodos activados tratadas con residuos líquidos carbonizados. Uno de estos géneros es el *Acinetobacteria* sp. y el otro *Comonas* sp. Las cuales crecen bien en fenol.

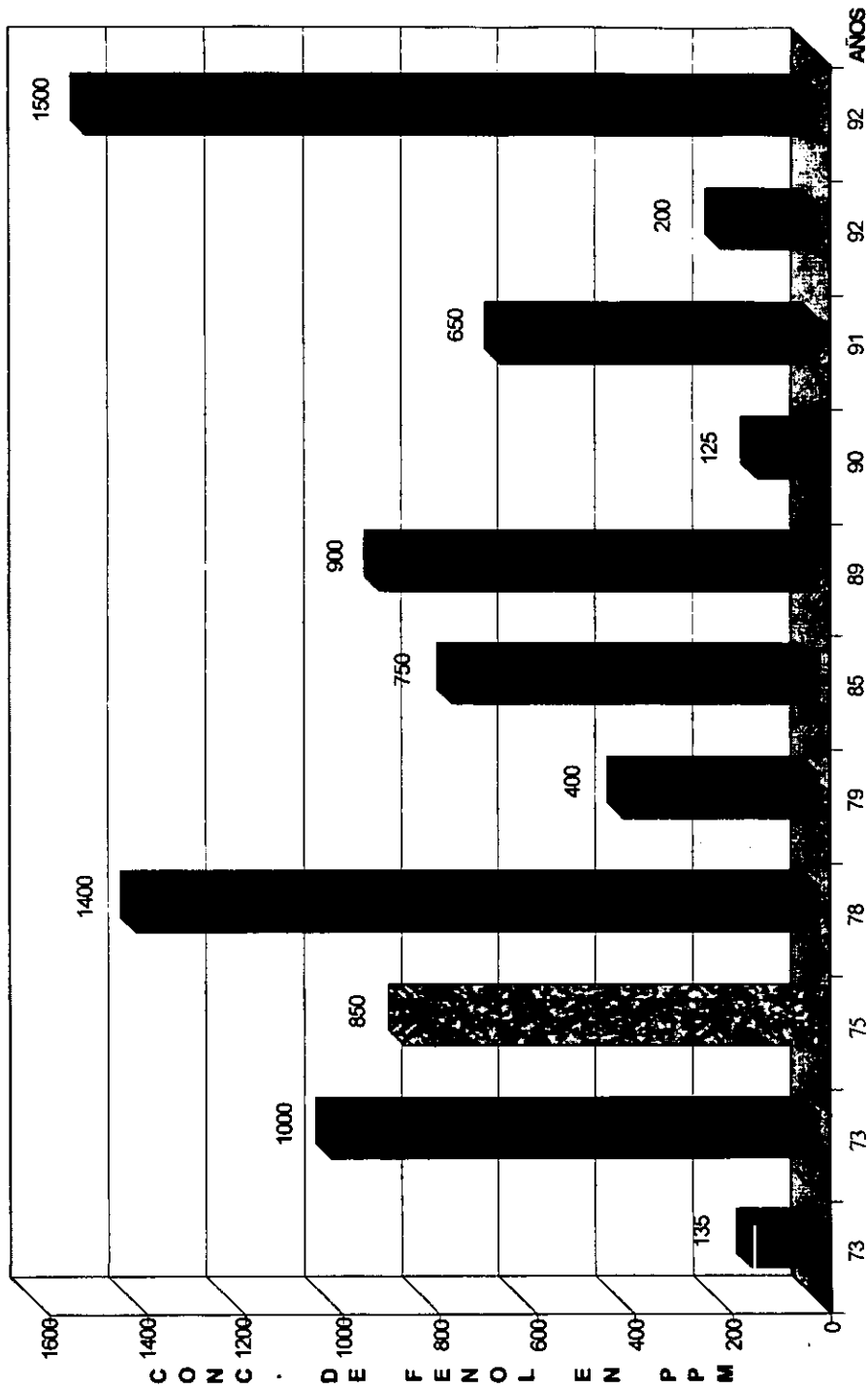


FIGURA 4.1 MAXIMAS CONCENTRACIONES DE FENOL TRATADAS EN LOS ULTIMOS AÑOS (WISE & TRANTOLO, 1994)

Yang y colaboradores investigaron la degradación microbiológica del fenol con cultivos puros y mezclas de *Pseudomonas putida* en un reactor continuo batch y reactor continuo. Ellos concluyeron que el modelo cinético de inhibición describir más propiamente la degradación del fenol.

Colwell y Saylor revisaron varios estudios realizados con la degradación microbiológica de compuestos fenólicos. Ellos concluyeron que es posible remover 1–2 mg/l de compuestos fenólicos.

Petrasek y colaboradores mostraron que la biodegradación contribuye con más del 90 % del fenol removido en el tratamiento biológico. Rozich y colaboradores investigaron el comportamiento de una población heterogénea aclimatada en la degradación del fenol como una fuente de carbón en reactores batchs. Namkoong y colaboradores estudiaron la remoción de compuestos fenólicos en reactores batchs, y mostraron que siguen un modelo cinético de cero y primer orden. Lewandowski y otros en sus estudios identificaron tres especies oxidativas del fenol en lodos activados: *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomona putida* y *Serratia liquefacens*, las cuales consumen al fenol directamente.

Gurujeyalakshmi y Oriel tienen reportada la degradación completa del fenol a concentraciones iniciales de 950 ppm empleando la *Bacillus Stearothermophilus*. Esta bacteria, sin embargo puede alcanzar sólo una degradación parcial del fenol a concentraciones cercanas a las 1500 ppm.

En un estudio de Vaishnav y otros sobre el efecto de la concentración microbios en la velocidad de biodegradación de fenoles concluyó que cuando una concentración mínima de microorganismos aclimatados este presente, la biodegradación química seguirá principalmente una cinética de pseudo-primer orden y ocasionalmente una de segundo orden.

Grady también propuso un método para el uso de obtención de información cinética para estudios de biodegradación para predecir la extensión en la cual el compuesto tóxico puede ser removido de un residuo complejo de vapores por medio del tratamiento biológico.

4.4 OTROS ESTUDIOS

Algunos microorganismos por ejemplo, la especie *Nocardia rubra*, participan en la depuración de las aguas residuales que contienen fenol procedente de la industria química o de centros hospitalarios.

Pseudomonas sp. y *Spirillum sp.* son capaces de metabolizar al fenol y al cresol bajo condiciones anaeróbicas en un medio de sal-nitrato-mineral. El fenol es reducido a ciclohexanol el cual es deshidrogenado a ciclohexanona, que sufre una fisión del anillo para producir caproato.

El p-cresol es metabolizado vía oxidación anaerobia produciendo 4-hidroxibenzoato.

Existen informes de que varios microorganismos son capaces de crecer en compuestos aromáticos como el benceno, tolueno, fenol, o-cresol, etc. En 1961 se obtuvo la primera evidencia de que el catecol está involucrado en la degradación del fenol; en 1968 se demostró que el cis-bencen-glicol (cis-1,2-dihidroxi-1,2-dihidroxibenceno), es un compuesto intermediario entre el fenol y el catecol en el metabolismo de una cepa de *Pseudomonas putida*.

Los hidrocarburos sencillos derivados del fenol son degradados por los microorganismos mediante un ataque enzimático inicial directo al anillo aromático del grupo metilo; Sin embargo la oxigenación al anillo, parece ser el mecanismo más común.

Tanto las bacterias, como los hongos son relativamente abundantes en el suelo; y miembros de ambos grupos, contribuyen a la biodegradación de hidrocarburos.

Las bacterias, levaduras y hongos filamentosos que participan en la biodegradación del fenol han sido sujetos de estudio, pero parece ser que la capacidad degradativa depende de los ecosistemas y de las condiciones locales del medio ambiente.

4.5 MECANISMO DE DEGRADACIÓN DEL FENOL

Muchas bacterias aeróbicas y hongos, son capaces de utilizar compuestos aromáticos como la única fuente de carbono y energía. Una ruta típica para metabolizar compuestos aromáticos es la dihidroxilación del anillo de benceno para formar catecol y así abrir el anillo a través de una oxidación orto o meta (Yang, R.D. y E.A. Humphrey, 1975).

La bacteria *Pseudomonas putida* degrada al fenol a través de la ruta meta. La levadura *Trichosporon cutaneum* degrada al hidrocarburo a través de la ruta orto. En la ruta meta, la 2,3 oxigenasa es un sistema inducible. El fenol puede actuar como el inductor. En la ruta orto, el *trichosporon cutaneum* tiene un sistema inducible 1,2 oxigenasa. En el caso de catecoles sustituidos se utiliza por lo general la ruta meta, la fragmentación en esta posición produce un semialdehído cis-cis mucónico generándose posteriormente ácido pirúvico y acetaldehído. La ruta orto, es una ruta metabólica que transforma al catecol a succinato y acetil CoA ($\text{CH}_3\text{COOSCoA}$). Después de la fisión orto del anillo aromático, el catecol es procesado a un intermediario común β -ceto adipato enol-lactona y transformado a succinato y acetil CoA.

ESTA TESIS NO DEBE
SER DE LA BIBLIOTECA

TABLA 4.2 DE MICROORGANISMOS EMPLEADOS EN LA BIODEGRADACION DE COMPUESTOS FENÓLICOS

GRUPO	MICROORGANISMO	COMPUESTO METABOLIZADO (SUSTRATO)
BACTERIAS	<i>Bacillus Stearothermophilus</i>	Fenol
	<i>Desulfosarcina</i>	Fenol
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Fenol
	<i>Pseudomonas sp</i>	Fenol
	<i>Spirillum sp</i>	Fenol
	<i>Achromobacter</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Acinetobacter</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Arthrobacter</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Alcaligenes</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Chromobacterium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Corynebacterium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Flavobacterium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Norcadia</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Klebsiella Pneumoniae</i>	Fenol
	<i>Chlamydomonas ulvaensis</i>	Fenol
METANOTROFOS	<i>Nocardia rubra</i>	Fenol
ACTINOMICETOS	<i>Nocardia spp.</i>	Fenol
LEVADURAS	<i>Trichosporium cutaneum</i>	Fenol
HONGOS	<i>Acremonium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Aspergillus</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Candida</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Cladosporium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Fusarium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Geotrichum</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Monilia</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Penicillium</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Saccharomyces</i>	Fenol y Compuestos Derivados
	<i>Trichoderma</i>	Fenol y Compuestos Derivados

FUENTE RUIZ SILVA, 1996.

4.6 CASOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON FENOLES

El primer caso concerniente a la biorremediación in situ de un sitio urbano industrial fue en el Reino Unido. La gasificación del carbón en este trabajo por casi 70 años y por más de 10 hectáreas de sitio contaminado con químicos biodegradables (alquitrán de carbón, fenoles) y no biodegradables (metales pesados, sulfatos y otros). Los contaminantes no biodegradables fueron encapsulados, mientras se desarrollaba un programa de biorremediación para la implementación de 30 500 m³ de suelo con alquitrán de carbón y fenoles.

El proceso se desarrollo en tres fases: (1) selección de los contaminantes efectivos-degradación micro-microorganismos; (2) optimización de las condiciones químicas del suelo empleando estudios de laboratorio y (3) optimización de las condiciones físicas del campo.

Los microorganismos capaces de crecer en fenoles e hidrocarburos policíclicos aromáticos fueron separados por lotes de cultivos y la bio-disponibilidad de estos químicos en el suelo fue incrementada con la adición de surfactantes.

El bioaumento del suelo por el aislamiento de organismos se realizó para acelerar las etapas iniciales en la degradación del contaminante, mientras se realizaba un bioenriquecimiento razonable con nutrientes para realizar la degradación de productos fallidos por la microflora autóctona. Un cultivo regular del suelo provee a ser un medio más efectivo de aereación que una aereación pasiva o forzada vía cubierta enterrada. El tratamiento completo del sitio comenzó en el verano de 1986 y fue completada justo un año después. El suelo contaminado fue cubierto y arreglado en forma de camas y subsecuentemente inoculado por medio de una máquina dispersora (agricultura). La aplicación de organismos, aditamentos, aumentadores de presión y otros se realizaron durante el periodo de remediación. Se mantuvo un blanco de las concentraciones (testigo) para realizar una valorar independiente. El suelo tratado se repuso en el sitio y se compactó. Valores medios de los 16 Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PAHS) prioritarios y fenoles antes y después de la biorremediación fueron validados como 22000 y 148 mg/kg. y 205 y menos de 3 mg/kg., respectivamente.

La recuperación del sitio fue estimada del 80 al 85% en costo de una disposición de relleno "landfill". Bewley et al (1989) muestra proyectos de biorremediación similares.

CAPÍTULO 5

**METODOLOGÍAS AUXILIARES
PARA LA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS
Y SITIOS CONTAMINADOS**

5. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN MÁS ADECUADA AL PROBLEMA

A continuación se presentan algunos procedimientos (*presentados en tablas*) que facilitan autores como Calabrese & Kosteci para realizar una buena selección de la tecnología más favorable a las condiciones que presenta el sitio. El procedimiento considera el tipo de contaminante, las condiciones de la subsuperficie, condiciones del agua subterránea, tipo de desarrollo en y a los alrededores del sitio, requisitos permitidos, y costos. Algunas veces la "mejor" tecnología es indicada, pero en muchos casos dos o más tecnologías que son potencialmente apropiadas también se muestran. La selección final depende de las investigaciones de detalle dirigidas específicamente a proveer las opciones más viables.

Ejemplos de guía para la caracterización de la zona que favorezca la toma de decisión de las tecnologías más aplicables así como para la identificación de factores específicos del sitio. **Tabla 5.1.** Generalmente mucha de la información es obtenida de fuentes disponibles como la **tabla 5.2**, sin una investigación extensiva del sitio.

TABLA 5.1. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DEL SITIO
1. TIPO BÁSICO DE CONTAMINANTES GASOLINA _____ DIESEL _____ PETROLEO CRUDO _____ PETROLEO CRUDO LIGERO _____ NAFTA _____ KEROSENO _____ OTROS _____
2. OTRO TIPO DE CONTAMINANTES
3. CARACTERÍSTICAS DE LA SUBSUPERFICIE Profundidad de agua: ___ pies Profundidad de la zona saturada del agua subterránea: ___ pies Tipo de suelo en la zona vadosa: arena ___, grava ___, arcilla ___, otras _____. Características de la zona vadosa: homogénea ___, en estratos o capas _____. Tipo de suelo en la zona saturada: arena ___, arcilla ___, grava ___, otros _____. Características de la zona saturada: homogénea ___, en estratos o capas _____.
4. EXTENSIÓN DEL POTENCIAL DE CONTAMINACIÓN Profundidad de la zona vadosa de ___ pies a ___ pies Profundidad en la Zona saturada de ___ pies a ___ pies Área de contaminación: ___ pies de ancho x ___ de largo

5. CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE DEL SITIO

Tamaño de la operación: __pies x __pies
 Condiciones sobre la zona contaminada: A espacio abierto __, Tanques__, Tuberías__,
 pavimento__, Estructuras __
 Número de empleados: mas de 5 __, 5-10 __, 10-25 __, mayor de 25 __.

6. USO DE LOS SITIOS ADYACENTES

Espacio Abierto __, Industrial __, Comercial __, Residencial __, Hospital o escuela __ Otra __.

7. FACTORES POTENCIALES DE PERMISO

Desagüe o alcantarillado industrial o sanitario disponible __
 Desagüe temporal disponible __
 Distancia al suministro más cercano de agua __ Calidad del aire: __.

FUENTE: Calabrese & Kosteckí, Hydrocarbon Contaminated Soils, Vol 1, 1991

**TABLA 5.2 REQUISITOS DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA
EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL SITIO**

1. TIPO DE CONTAMINANTE

- Entrevista al personal de operaciones.
- Registro de inventario.
- Hojas de datos de material de seguridad.
- Investigación de contaminación.

2. CONDICIONES DE LA SUBSUPERFICIE

- Datos geológicos del área (literatura).
- Investigación de la subsuperficie en el sitio o adyacentes.
- Interpretación de la fotografía aérea.
- Desarrollo principal de los mapas del sitio.
- Observaciones de caminos cortados y afloramiento.
- Investigación de la contaminación.

3. CONDICIONES DEL AGUA SUBTERRÁNEA

- Registro de las fuentes de agua.
- Sitio y registro regional de perforaciones.
- Sitio y área-subsuperficie de investigaciones.
- Planes de manejo de agua.
- Investigación de la contaminación.

4. EXTENSIÓN DEL POTENCIAL DE CONTAMINACIÓN

- Datos de investigación del sitio.
- Volumen de reconciliación.
- Investigación de la contaminación

5. AREA DEL SITIO ADYACENTE CONDICIONES DE LA SUPERFICIE

- Observaciones de la superficie.
- Fotos aéreas.
- Tierra, empleo de planeación de documentos

6. REQUISITOS DE PERMISO INCLUYENDO LOS CRITERIOS DE LIMPIEZA

- Guías de Reglamentos y regulaciones.
- Discusión con las correspondientes dependencias.
- Registro de proyectos similares de remediación.

7. OTROS FACTORES

- Largos términos de la planeación real.
- Planes futuros del sitio modificaciones de uso.

FUENTE: Calabrese & Kosteckí, Hydrocarbon Contaminated Soils, Vol 1, 1991

La **Tabla 5.3** desarrolla las apreciaciones iniciales de problemas y riesgos asociados con cada tecnología seleccionada. Los ejemplos de las condiciones de los problemas potenciales están divididos en las siguientes categorías:

- Características de la subsuperficie.
- Características del sitio.
- Factores climáticos.
- Otros contaminantes.

Las dos filas de la matriz muestran que los problemas pueden ser relacionados con:

- Inaceptable o permite riesgo como son: a) la creación de un potencial adverso de exposición, ó b) no es capaz de satisfacer los criterios de limpieza para ciertas especificaciones del sitio.
- El potencial de las especificaciones del sitio puede tener un efecto adverso en la tecnología, que los resultados satisfactorios no puedan ser aprovechados (p.e. la biorremediación probablemente no puede ser efectiva en materiales de baja permeabilidad como son suelos de arcilla).

En esta tabla también se considera determinar, cuál es la selección más apropiada de la siguiente forma:

- Las consideraciones están dadas para la tecnología primaria (aprobadas y frecuentemente usadas) más baja hasta tecnologías secundarias (aprobadas y ocasionalmente empleadas) si hay:
 - Alto potencial para cualquier problema.
 - Moderado potencial para resolver problemas difíciles.
- La consideración es dada para elevar un candidato secundario a uno primarios si no existen problemas graves.
- La tecnología puede ser eliminada si existe:
 - Una gran probabilidad de presentar un problema, el cual es potencialmente difícil de resolver.
 - Probabilidad moderada para una condición muy difícil de resolver.

La eliminación de una tecnología debe considerarse sí:

- a) los problemas no son importantes para el sito en específico (p.e. costo del tratamiento).
- b) El investigador tiene un deseo especial por el empleo de alguna en específica.

TECNOLOGIA		ARCILLA	ARENA	GRAVA	FRAGMENTO	LA ANORMAL	SUPERFICIE	PROFUNDIDAD	CERTCA	RECUBIERTO	HOMOGENEO	ALTO	MODERADO	VOJUBEN DE SUELO	RESIDENCIAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL	ALTA TEMPERATURA	CONDICIONES HUMANAS	CONDOMINIOS	AN DEMASIADO ALTO	AN DEMASIADO BAJO	METALES	VALDES VOLATILES	ORGANOS VOLATILES	SEMI ORGANOS VOLATILES	COMPOSTOS XLORESINADOS	PBC / DIOXINAS	FOSEFOROS	ALDES I NORGANICAS	MEMBRANAS	ORGANICOS	ALFA O BROMINADOS	CIANDROS			
1	VOLATILIZACION																																				
2	BIOREMEDIACION																																				
3	SOLID LEACHING																																				
4	SEPARACION SOLID/PAIRES																																				
5	VITRIFICACION																																				
6	REMEDIACION PASIVA																																				
7	BIOREMEDIACION SUPERFICIAL																																				
8	BIOREMEDIACION COMPUESTA																																				
9	BAJA TEMP. TERMICA																																				
10	ALTA TEMP. TERMICA																																				
11	EXTRACCION QUIMICA																																				
12	SOLIDIFICACION/ESTABILIZACION																																				
13	SEPARACION/PAIRES																																				

T.	RIESGO DE SALUD/																																						
P.	PERMITE DIFICULTADES	X	X																																				
P.	FALLO DE TECNOLOGIA/																																						
P.	ALTO COSTO EJECUCION	X	X																																				

DIFICIL PARA RESOLVER

MUY DIFICIL	DIFICIL	FACIL
ALTO	MODERADO	ALGUNOS

POTENCIAL PARA EFECTOS ADVERSOS DE TECNOLOGIA

NOTAS: -"OTROS CONTAMINANTES"- NO INTENTA INDICAR QUE LA TECNOLOGIA ES CAPAZ DE REMOVER UN CONTAMINANTE EN PARTICULAR. T.P.P. -TIPO DE PROBLEMA POTENCIAL

FALTA PAGINA

No. 86

5.1 PLANEACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DE DETALLE

Una investigación detallada generalmente es apropiada cuando uno o más de las siguientes condiciones existe:

- ◆ Las condiciones del sitio son suficientemente complejas que no es posible determinar los probables sucesos o costos de cualquier tecnología.
- ◆ La tecnología más apropiada presenta algunos problemas potenciales los cuales deben ser resueltos antes de que el método sea seleccionado, o si es necesario demostrar la tecnología a escala piloto.
- ◆ Dos o más tecnologías que se determinen en una escala muy cercana, y la decisión de la mejor, no puede realizarse sin tener respuestas claras acerca de las condiciones del sitio, o demostrar las técnicas a nivel escala piloto.
- ◆ Existe un interés de que la implementación de la tecnología aparentemente más adecuada puede tener efectos indeseables (p.e. contaminación del agua freática, etc.) los cuales deben ser resueltos si las condiciones del sitio son bien entendidas.
- ◆ Una dirección del riesgo específico debe requerirse para determinar un criterio de limpieza aceptable y datos adicionales del sitio para conducir este análisis.

Es esencial que en cada investigación:

- ◆ Se planee obtener la información específica necesaria para el sitio en particular y los requisitos de la tecnología más adecuada.
- ◆ Tomar las ventajas apropiadas de la información disponible de fuentes.
- ◆ Planear en la fase básica, con suficiente flexibilidad en "tiempo real" las modificaciones que deben realizarse, cómo cada pieza nueva de datos es determinada e interpretada.

La **Tabla 5.4** es una matriz de investigación de actividades que proveen una línea general para determinar el tipo de actividades que se requieren para las condiciones en la selección, permisos, y diseño de la tecnología de remediación

TABLA 4. MATRIZ DE EJEMPLO DETALLADO DE ACTIVIDADES DE INVESTIGACION

TIPO DE INVESTIGACION	MANEJO SUBSUELO															ANÁLISIS LABORATORIO														
	PUBLICACIONES	PUBLICACION DEL SITIO	REPORTES DEL AREA	REPORTES DEL REDEDOR	REGISTROS DEL MEDIO	PRUEBAS DE POZOS	PERFORACIONES	PERFORACIONES	PERFORACION GEOFISICA	SUPERFICIE GEOFISICA	MONITOREO PARED DIAM	MONITOREO PARED > 5	PRUEBAS DE BOMBEO	VISTA AEREA	OBSERVACION DE CAMPO	ENCUESTA AL PERSONAL	ENTREVISTA A AGENCIA	ENTREVISTA CAMPO PILOTO	PRUEBAS GEOTECNICAS	PRUEBAS PERMEABILIDAD	PRUEBAS DE FUERZA	COMPOSICION SUELO	MUESTRAS INDIVIDUALES	MUESTRAS COMPUESTAS	MUESTRAS QUIMICAS	PRUEBAS ESCALA BANC				
CONFIRMACION DEL SITIO																														
TIPO DE SUELO																														
CARACTERISTICAS DE LA ZONA VADOSA																														
PROFUNDIDAD DEL MANTO FREATICO																														
CONDICIONES DE FLUJO DEL MANTO																														
REQUISITOS DE CONTROL DEL MANTO																														
CONDICIONES DEL SITIO:																														
ESTRUCTURA BASE																														
LOCALIZACION DE UTILIDAD																														
IMPACTO DE ROMPIMIENTO																														
POTENCIAL DE EXPOSICION EMPLEADO																														
CONDICIONES CLIMATICAS																														
TECNOLOGIA BASICA:																														
DESARROLLO DE TECNOLOGIA BASICA																														
EFFECTOS DE INTERFERENCIA																														
CAMPO DE CONTROL																														
REQUERIMIENTO MANEJO SUBPRODUCTOS																														
REQUERIMIENTO DE MONITOREO																														

MATRIZ DE EJEMPLO DETALLADO DE ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN CONTINUACIÓN

TIPO DE INVESTIGACIÓN	PUBLICACIONES	PUBLICACIONES	REPORTES	REPORTES	REGISTRO MEDIO	PRUEBA POZO	PERFORACIONES	P MUESTRA SÓLIDA	PERFORA GEOFISICA	SUPERFICIE GEOFISICA	MONITOREO PARED	MONITOREO PARED	PRUEBAS DE BOMBEO	VISTA AEREA	OBSERVACION DE CAMPO	ENCUESTA AL PERSONAL	ENTREVISTA MANEJO	ENTREVISTA AGENCIA	PRUEBAS CAMPO PILOTO	PRUEBAS GEOTECNICAS	PRUEBAS PERMEABILIDAD	PRUEBAS FUERZA	COMPOSICION SUELO	MUESTRAS INDIV SUELO	MUESTRAS COMPO AGUA	MUESTRAS QUIM IND AGUA	PRUEBAS ESCALA BANCO
DATOS REQUERIDOS																											
CAMPO DE APLICACIÓN:																											
INSTALACION DE LA SUBSUPERFICIE																											
REQUERIMIENTOS EXCAVACION ESPECIAL																											
UTILIDAD DISPONIBLE																											
DISPOSICION DE LOS RESIDUOS LIQUIDOS																											
DISPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS																											
APRECIACION / DIRECCION RIESGO:																											
RECEPTORES POTENCIALES																											
CURSO POTENCIAL DE LA SUBSUPERFICIE																											
CURSO POTENCIAL DE LA SUPERFICIE																											
RIESGO DE SALUD POR EXPOSICION																											
RIESGO AMBIENTAL/EXPOSICION POTENCIAL																											
RIESGOS POR USO DE TIERRA																											
VALOR REAL DEL EDO DE RIESGO																											

CLAVES	ACTIVIDAD OBLIGATORIA	FRECUENTEMENTE REQUERIDA	POSIBLEMENTE REQUERIDA	ALTO POTENCIAL PARA SER SATISFACTORIO	FRECUENTEMENTE SATISFACTORIO	ALGUN POTENCIAL PARA ENJO
ALGUN POTENCIAL PARA ENJO						
FRECUENTEMENTE SATISFACTORIO						
ALTO POTENCIAL PARA SER SATISFACTORIO						
POSIBLEMENTE REQUERIDA						
FRECUENTEMENTE REQUERIDA						
ACTIVIDAD OBLIGATORIA						

5.2 METODOLOGÍA PARA EL MANEJO DE SITIOS CONTAMINADOS POR LA LEGISLACIÓN ALEMANA

La siguiente información muestra la metodología a seguir con base a planes y guías para el caso de manejo de sitios contaminados en general que se ha aplicado en Alemania.

Se muestra como una guía posible de emplear o manejar por el investigador y los puntos a considerar en la búsqueda de información, se adjuntan diagramas que se emplean para una mejor visualización del problema y su afectación al medio.

ETAPA 1 EVALUACIÓN PRELIMINAR

Fase 1 Investigación histórica del sitio

Previo a la utilización del sitio y a la asignación de los potenciales de contaminación, tipos de contaminantes, objetos de protección en el sitio y sus alrededores. (Fuentes como: archivos, memorias, mapas territoriales, mapas históricos, fotografías vía satélite y aérea, preguntas a testigos, inspección del sitio, etc.).

Fase 2 Investigación Geogénica del sitio

El tipo y la interacción del medio ambiente, derivación de los cursos peligrosos, desarrollo de modelos de formulación (cualitativa) en la naturaleza e intensidad de los contaminantes en el medio ambiente y/o vía las rutas de peligro. (Mapas geológicos, mapas de estudios de tierra, construcciones del sitio de estudio, mapas hidrológicos, etc.).

Fase 3 Investigación de la Utilización de la orientación del sitio.

Asignación de los objetivos del plan, intenciones de investigación y el empleo de un nuevo sitio de utilización, extrapolación para la evaluación de las Fases 1 y 3 (desarrollo y planes de construcción).

Fase 4

Definición del programa de investigación para la Etapa 2

(Escribir la lista de servicios, cálculos de costos y planes de documentación para la etapa 2).

Evaluación preliminar de las circunstancias sobre la base de los peligros potenciales (objetos de protección) y riesgos (utilización).

Recomendaciones iniciales en la optimización de planeación y nuevas utilizaciones.

ETAPA 2 INVESTIGACIÓN Y ESTIMACIÓN

ETAPA 2 Orientación de la investigación (orientación del daño)

Investigación sistemática para la verificación de las consultas hechas en la Etapa 1 "Evaluación Preliminar".

ETAPA 2 2 Investigación Detallada (Estimación detallada del daño)

Fase 1 Determinación técnica comprensible de las circunstancias para:

Registro de los peligros existentes en el sitio y sus alrededores.

Registro de los peligros a futuro y riesgos existentes.

Fase 2

Evaluación técnica de las circunstancias referidas a los peligros por objetos de protección y riesgo de empleo.

Fase 3

Derivación y concepción de una organización apropiada y mediciones técnicas de manejo (disposición, separación, remediación) o monitoreo (observación) de la contaminación bajo tierra, costos estimados, determinación de los datos del suelo, los esbozos de la documentación de planes, etc.

Metodología Para La Etapa 2 Investigación y Evaluación

TABLA 5.5 METODOLOGÍA ETAPA 2

	METODOLOGÍA
1) PLANEACIÓN PRELIMINAR	Sobre la base de la evaluación preliminar y la investigación de orientación (mediciones en red de los trabajos en el sitio, mediciones de instrumentos, tiempo, costo de planeación, documentación suplementaria de planes para la seguridad industrial (agua, gas, y electricidad).
2) PRUEBAS DEL SITIO	Exploración y pruebas para obtener la composición del suelo y reconocimiento geológico e hidrogeológico. Instalación de indicadores de nivel del agua del subsuelo y gas para muestreo y mediciones de la situación del medio ambiente de los mantos y aire. Desarrollo de mediciones en el sitio. Registro de todas los datos e investigaciones de planimetría del sitio, condiciones bajo tierra (estratos del suelo, niveles de los mantos, etc.)

3) ANÁLISIS DE LABORATORIO	Investigación química y pruebas mecánicas del suelo.
4) ESTIMACIÓN	Evaluación de todos los datos obtenidos y estimación de las circunstancias observadas, bosquejo de los conceptos de acción.

ETAPA 3 Provisiones científicas y técnicas para el mejoramiento del "Sitio Contaminado"

Resumen

La evaluación técnica de las circunstancias del caso es propuesta constantemente en todos los niveles y en todas las partes de las fases de la investigación de apreciación de las circunstancias.

La temprana detección y el potencial de estimación del peligro y "los riesgos de utilización" se llevan a cabo para la conclusión de la evaluación preliminar.

La extensión de cualquier peligro puede reconocerse en la etapa de inicio y tomar acciones prioritarias para acciones que pueden ser definidas y proveer la prevención de daños implementándose en la primer etapa.

Tabla 5.6 METODOLOGÍA GENERAL PARA ANALIZAR Y EVALUAR "SITIOS CONTAMINADOS"

ETAPAS	TÍTULO	OBJETIVOS
ETAPA 1	Preevaluación	Identificación del riesgo potencial del sitio contaminado. Deducción del riesgo potencial. Objetivos
ETAPA 2	Estimación de riesgos	Control de la conducción de las etapas, concepción de estas y otras investigaciones.
	2.1 Investigación preliminar	
	2.2 Investigación de detalle y estimación de riesgo	Análisis detallado de los riesgos. Planificación teórica de las soluciones
ETAPA 3	Solución técnica Observación Mediciones de seguridad Acciones de remediación	Prevención de los daños Separación de los daños

A continuación se muestran distintos esquemas que emplea la Legislación Alemana como ayuda en la descontaminación de sitios.

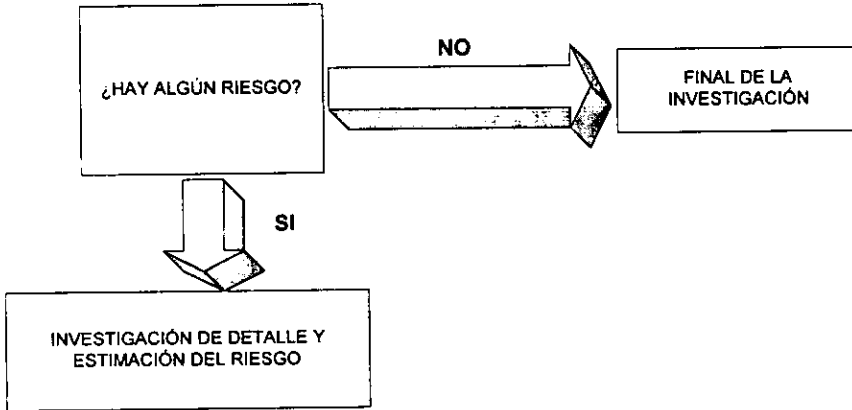
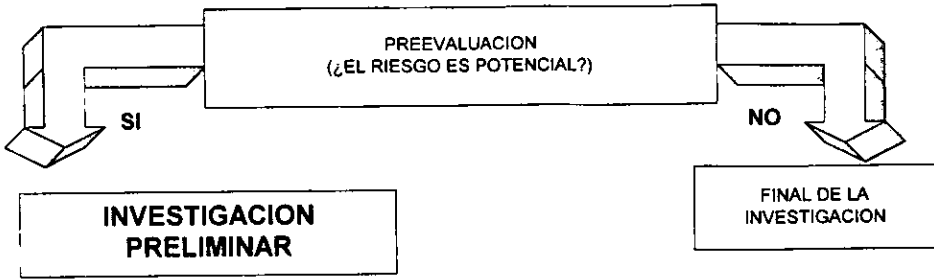
El modelo por etapas (Fig. 5.1).

La **figura 5.2** muestra la interdependencia entre el peligro- ambiente-hombre como un sistema.

La **figura 5.3** muestra también los pasos más importantes para el análisis, investigación, acciones de remediación y monitoreo y control en un sitio contaminado.

La **figura 5.4** Muestra un modelo de decisión y selección de tecnología para el caso de suelos contaminados con hidrocarburos.

SITIO DE IDENTIFICACIÓN



DETALLAR LA EXISTENCIA DE SUSTANCIAS PELIGROSAS Y SITIOS CONTAMINADOS Y OBJETOS DE PROTECCIÓN

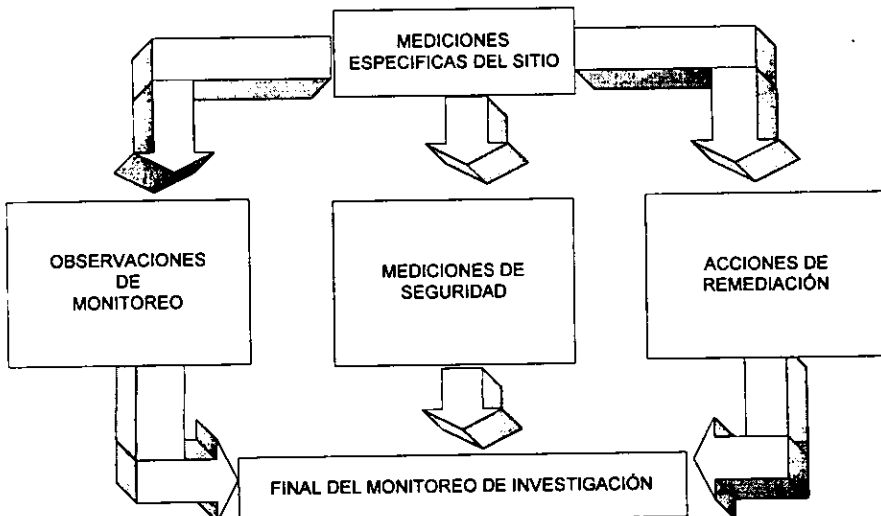


FIG 5.1 MODELO DE ETAPAS

SUBSTANCIA PELIGROSA

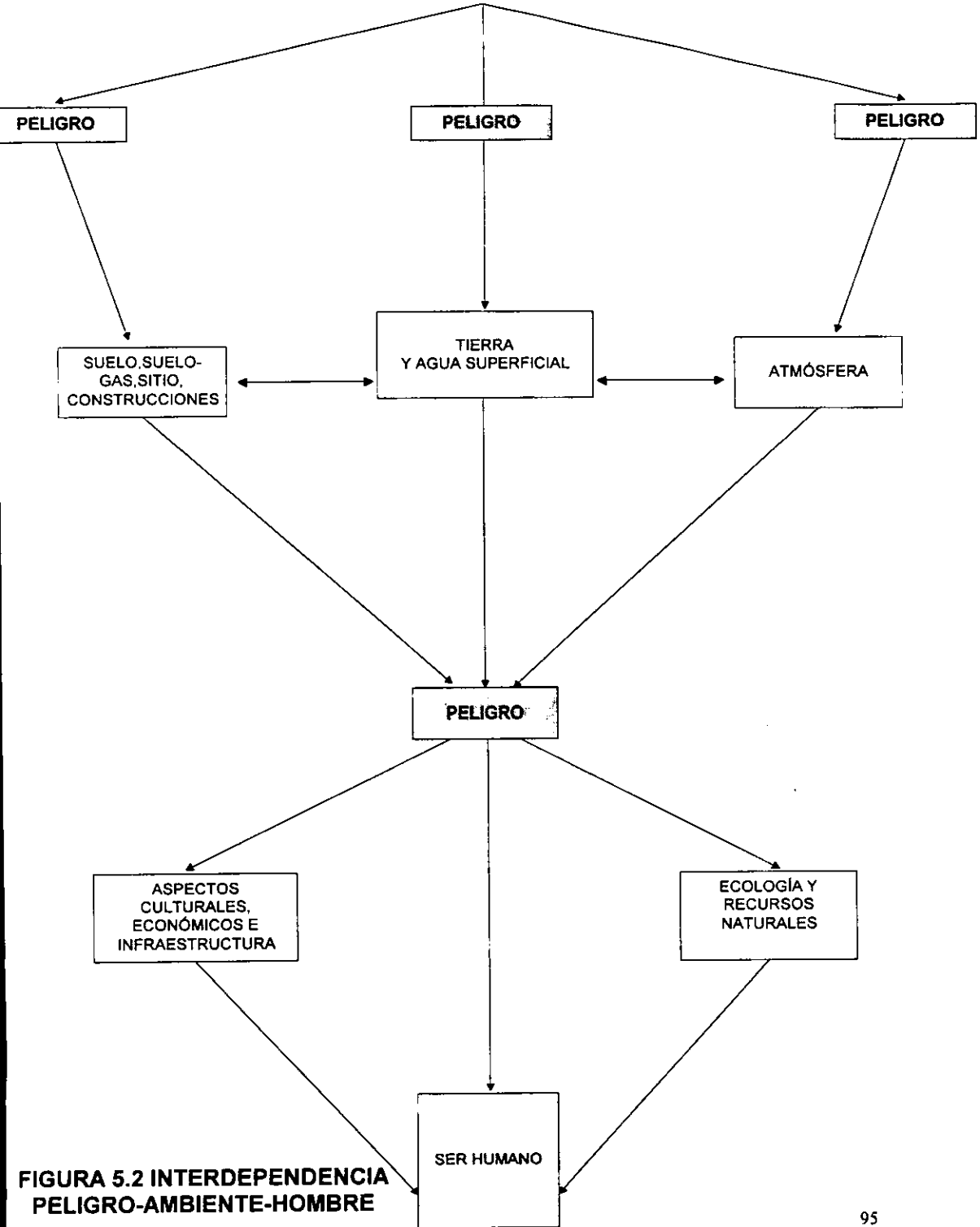


FIGURA 5.2 INTERDEPENDENCIA PELIGRO-AMBIENTE-HOMBRE

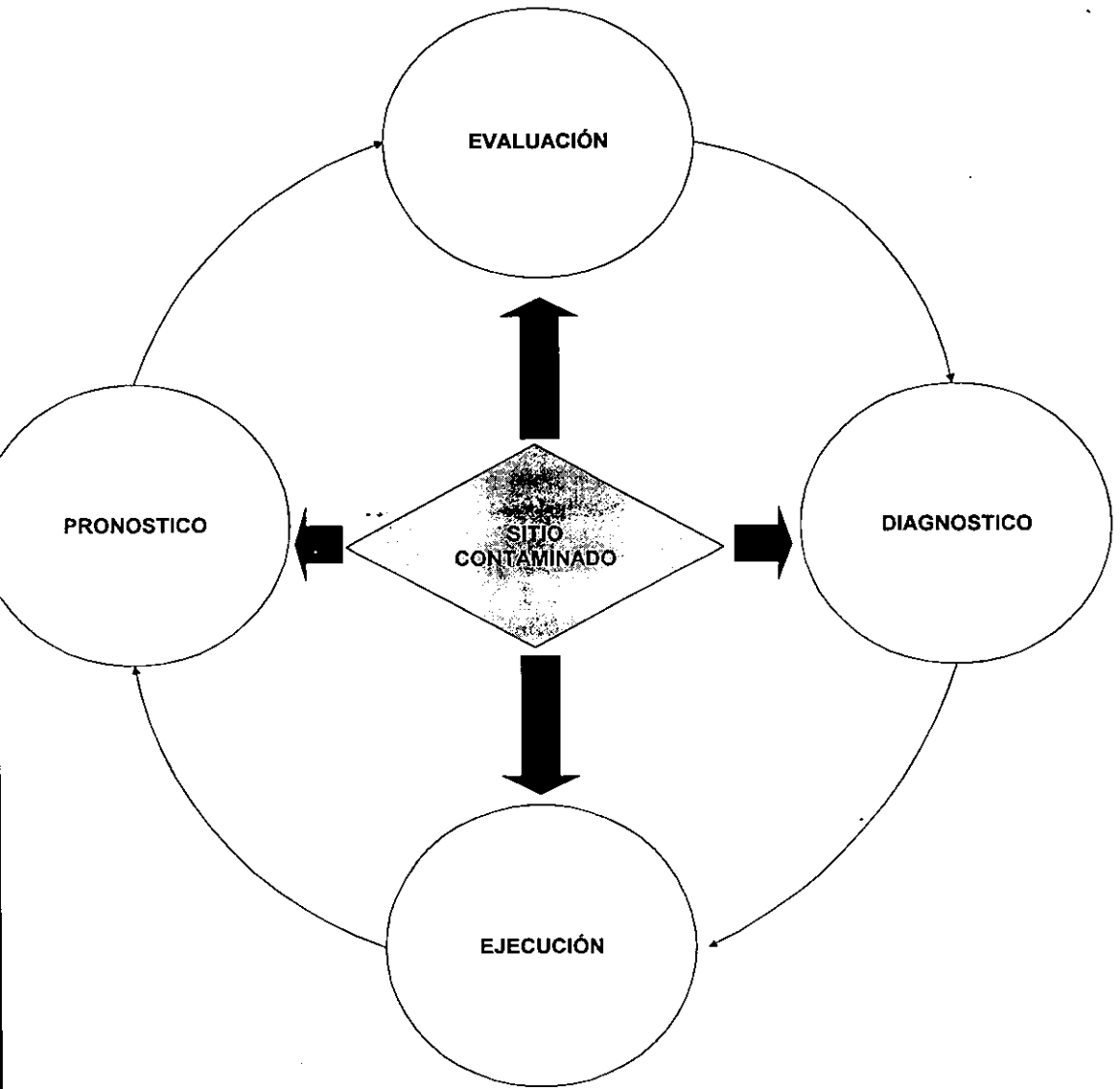


FIGURA 5.3 LOS PASOS MÁS IMPORTANTES SON:

1. **EVALUACIÓN** - EXAMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS DATOS/INFORMACIÓN
2. **DIAGNOSTICO** - INVESTIGACIÓN, MUESTREO Y ESTIMACIÓN DEL RIESGO
3. **EJECUCIÓN** - ACCIÓN DE REMEDIACIÓN
4. **PRONÓSTICO /CONTROL** - MONITOREO, CONTROL, PASOS A FUTURO Y ACCIÓN DE REMEDIACIÓN.

CIRCULO : SITIO CONTAMINADO

REFERENCIA: SEMINAR "CONTAMINATED SITIES" MÉXICO D.F., 3-13 MAY 1994.

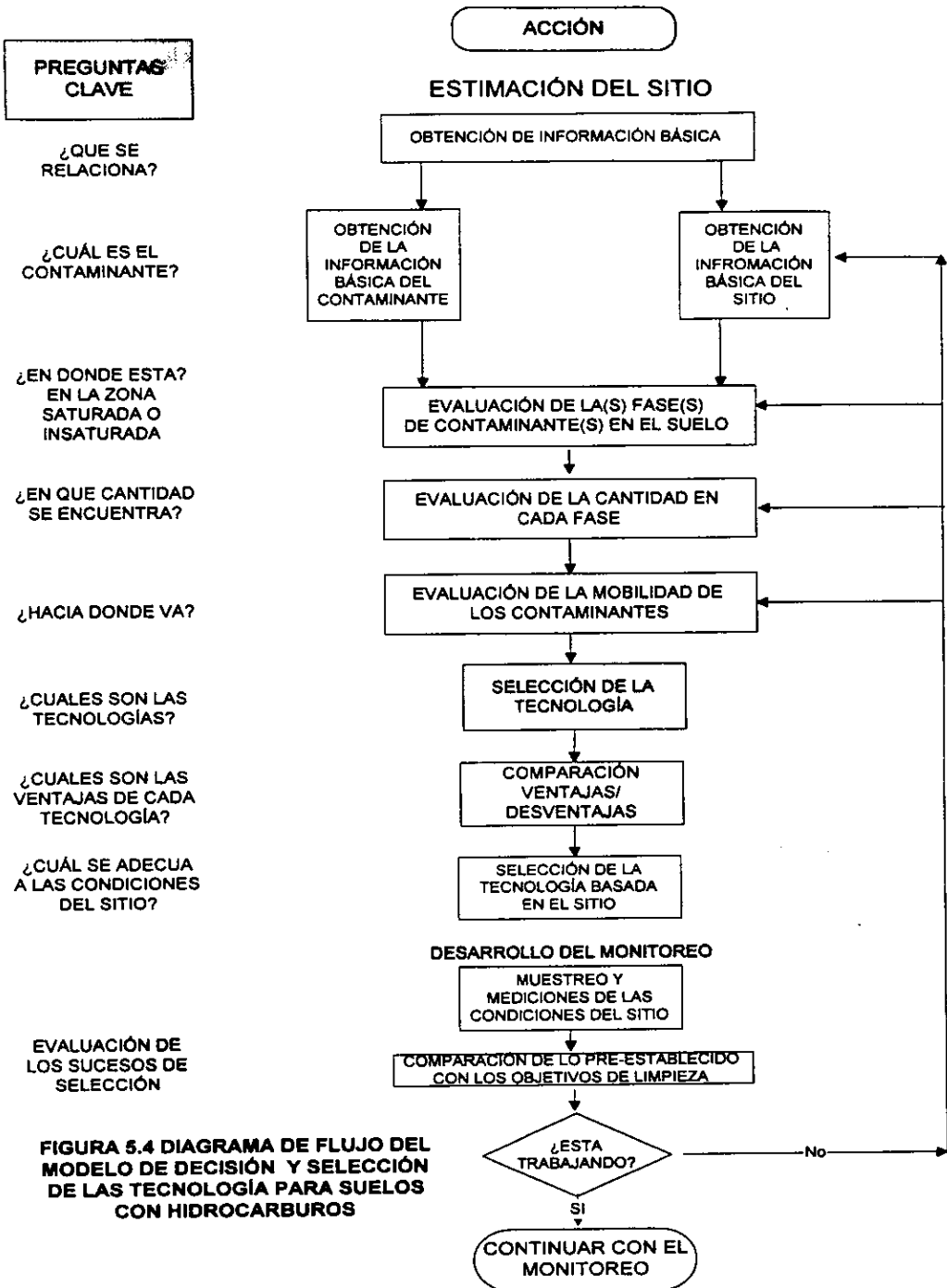


FIGURA 5.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO DE DECISIÓN Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍA PARA SUELOS CON HIDROCARBUROS

5.3 CASO EX-REFINERIA 18 DE MARZO AZCAPOTZALCO

La siguiente sección de este capítulo se enfocará a presentar una visión general de las condiciones en las que se encuentra la Ex – Refinería de Azcapotzalco como un **caso de estudio de sitio contaminado con residuos peligrosos** en su mayoría por hidrocarburos, **compuestos aromáticos**, lodos parafinosos o aceitosos, ácido fosfórico y otros en las diferentes zonas a lo largo y ancho de la Ex Refinería.

A continuación se muestra la aplicación de los formatos de la tablas 5.1 y 5.2 además las condiciones encontrada para este sitio.

<p>1.-TIPO BASICO DE CONTAMINANTES GASOLINA _____ DIESEL ____ PETROLEO CRUDO _____ PETROLEO CRUDO LIGERO _____ NAFTA _____ KEROSENO _____ OTROS: HIDROCARBUROS, COMPUESTOS AROMÁTICOS, LODOS PARAFINOSOS</p>
<p>2.- OTRO TIPO DE CONTAMINANTES ACIDO FOSFORICO</p>
<p>3.- CARACTERÍSTICAS DE LA SUBSUPERFICIE Profundidad de agua: ____pies Profundidad de la zona saturada del agua subterránea: varía de una sección a otra. Tipo de suelo en la zona vadosa: arena x, grava ____ arcilla x, otras. Características de la zona vadosa: homogenea _____, en estratos o capas X. Tipo de suelo en la zona saturada: arena x, arcilla x grava ____ otros _____. Características de la zona saturada: homogénea _____, en estratos o capas x:</p>
<p>4.- EXTENSIÓN DEL POTENCIAL DE CONTAMINACIÓN Profundidad de la zona vadosa : n.d. Profundidad en la Zona saturada: n.d. Area de contaminación: no disponible</p>
<p>5.- CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE DEL SITIO Tamaño de la operación: n.d. Condiciones sobre la zona contaminada: A espacio abierto X, Tanques __, Tuberías x, pavimento X, Estructuras ____ Número de empleados: mas de 5 __, 5-10 __, 10-25 __, mayor de 25 X.</p>
<p>6.- USO DE LOS SITIOS ADYACENTES Espacio Abierto __, Industrial __, Comercial X, Residencial __, Hospital/Escuela __, Habitacional X.</p>
<p>7.- FACTORES POTENCIALES DE PERMISO Desagüe o alcantarillado industrial o sanitario disponible ____ Desagüe temporal disponible ____ Distancia al suministro más cercano de agua ____ Calidad del aire: ____.</p>

INFORMACIÓN GENERAL REFINERÍA DE MARZO DIV. 1	
7. TIPO DE CONTAMINANTE	<ul style="list-style-type: none"> • Entrevista al personal de operaciones. ✓ • Registro de inventario. ✓ • Hojas de datos de material de seguridad. • Investigación de contaminación. ✓
8. CONDICIONES DE LA SUBSUPERFICIE	<ul style="list-style-type: none"> • Datos geológicos del área (literatura). ✓ • Investigación de la subsuperficie en el sitio o adyacentes. ✓ • Interpretación de la fotografía aérea. ✓ • Desarrollo principal de los mapas del sitio. ✓ • Observaciones de caminos cortados y afloramiento. • Investigación de la contaminación. ✓
9. CONDICIONES DEL AGUA SUBTERRÁNEA	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de las fuentes de agua. ✓ • Sitio y registro regional de perforaciones. ✓ • Sitio y área-subsuperficie de investigaciones. ✓ • Planes de manejo de agua. • Investigación de la contaminación. ✓
10. EXTENSIÓN DEL POTENCIAL DE CONTAMINACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Datos de investigación del sitio. ✓ • Volumen de reconciliación. • Investigación de la contaminación. ✓
11. AREA DEL SITIO ADYACENTE CONDICIONES DE LA SUPERFICIE	<ul style="list-style-type: none"> • Observaciones de la superficie. ✓ • Fotos aéreas. • Tierra, empleo de planeación de documentos
12. REQUISITOS DE PERMISO INCLUYENDO LOS CRITERIOS DE LIMPIEZA	<ul style="list-style-type: none"> • Guías de Reglamentos y regulaciones. ✓ • Discusión con las correspondientes dependencias. • Registro de proyectos similares de remediación. ✓
7. OTROS FACTORES	<ul style="list-style-type: none"> • Largos términos de la planeación real. • Planes futuros del sitio modificaciones de uso. ✓

5.3.1 ANTECEDENTES

Con el propósito de dar una visión panorámica de las condiciones originales y actuales del área ocupada por la Ex-Refinería Fig 5.5 se recopilaron los siguientes datos:

5.3.1.1. Características del Sitio

Con base a estudios de las características físicas del terreno en estudio, ya que es posible visualizar la migración de los contaminantes, se presentan los siguientes resultados de estudios: geográficos, hidrológicos, climatológicos, etc.

5.3.1.2. Localización geográfica

La localización geográfica de la Ex-Refinería está circunscrita dentro del cuadrante definido por las coordenadas extremas y un punto central del predio: Norte 19°28' 14" latitud norte, sur 19°27'36" latitud norte, oeste 99°12'30" longitud oeste, Este 99°11'22" longitud oeste, central 19°27'59" latitud norte, 99°12'03" longitud oeste.

El uso de suelo en los inicios de la operación de la Ex-Refinería, fue de tipo agrícola, pero en la actualidad, en el entorno del predio es del tipo industrial, comercial, habitacional y de servicios.

5.3.1.3. Topografía

La topografía de la región es plana, con una diferencia en nivel de 35 m. Entre la cota más alta de 2,270 m.s.n.m. y la más baja de 2,235 m.s.n.m., por lo cual la topografía del predio en estudio tiene un desnivel de 7.85 m. Con el punto localizado al poniente, con la cota de 2,254.27 m.s.n.m. y más bajo al noroeste en la cota 2,246.43 m.s.n.m.; la pendiente general tiene la dirección Oeste-Este.

Al inicio de las operaciones, las instalaciones se localizaron en la parte noroeste en un área aproximada de 60 has. Y en la actualidad el área ocupada es aproximadamente 174 has.

5.3.1.4. Climatología

El clima característico de la región es templado, sub-húmedo con bajo grado de humedad. Con un promedio de precipitación pluvial anual de 734.6 mm, una temperatura promedio anual es de 17.5 °C, siendo los meses de julio y agosto en los que se presentan las mayores precipitaciones pluviales y una precipitación invernal menor al 5%.

5.3.1.5. Hidrología

En base a datos proporcionados por PEMEX (grupo técnico) el nivel freático se encuentra entre los 2 y 5 m. De profundidad con respecto al nivel del suelo. Los acuíferos localizados en esta zona, se encuentran entre 15-35, 70-100, y 120-170 m de profundidad.

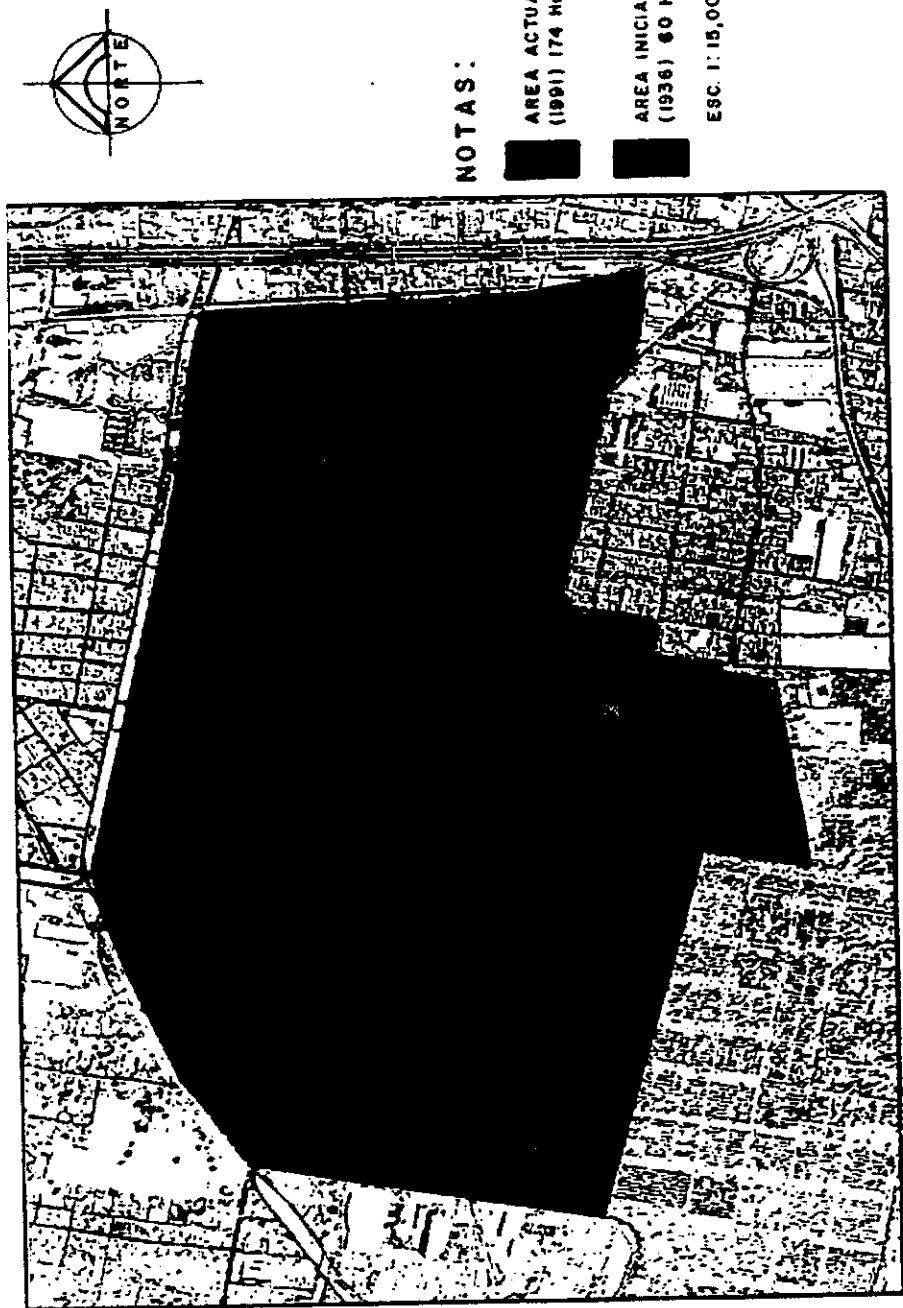


FIG 5.5 AREA OCUPADA POR LA EX-REFINERIA 18 DE MARZO (174 Ha)

5.3.1.6. Geología

La Ciudad de México esta ubicada en la cuenca de México, que pertenece a la provincia geológica del eje Neovolcánico, considerada una cuenca endorreica de estructura compleja. La zona metropolitana del Valle de México se encuentra en la sección SE de la cuenca y la Delegación Azcapotzalco queda asentada en un relieve plano compuesto por acumulaciones lacustre y/o aluviales al este de la Sierra de Monte alto y al sur de la Sierra de Guadalupe, situación que determina una pendiente menor de 5° de orientación general NO-SE.

En cuanto a la estratigrafía y tipo de rocas características del Valle de México, ubicada a 4 km al SO de la cuenca de México principalmente son arcillas, arenas limosas y grava volcánica. Al SO de Mixcoac, D.F., a donde afloran tobas, brechas, gravas volcánicas de origen aluvial y delgadas capas de pómez, todas ligeramente endurecidas.

5.3.1.7. Geohidrología Regional

La Ex – Refinería se localiza dentro del subsistema Acuífero Metropolitano, el cual abarca casi totalmente la zona urbana metropolitana. Se compone esencialmente de materiales granulares de permeabilidad media a baja, y se alimenta por flujos provenientes de la Sierra de “Las Cruces” y de los alrededores de Tlalpan. En el área de Azcapotzalco, las profundidades del nivel estático varían de 50 a 80 metros, formándose inclusive un cono piezométrico.

La constitución litológica, está formada por arcillas con intercalaciones de arenas, limos, horizontes de tobas líticas consolidadas, cenizas, pómez y turbas, con permeabilidades de baja a media (Vázquez, E. Y Jaimes R.P 1989).

Se determinó que la dirección del flujo subterráneo regional proviene, de norte a sur y de oeste a este.

5.3.1.8. Desarrollo Histórico

Con base en estudios fotográficos (Instituto Mexicano del Petróleo) del periodo de 1936 a 1991, se observaron los eventos más significativos que pudieron resultar los sitios probables de contaminación durante el funcionamiento de la Ex-Refinería. **Figs 5.6 y 5.7.**

Por ejemplo en el año de 1933 dan inicio las operaciones, con una capacidad de procesamiento de 7500 barriles/día y en el año de 1936 se registra la primera ampliación, para alcanzar una capacidad de 11,000bbls/día, dichas instalaciones se localizaron en la parte noroeste en un área aproximada de 60 Has., en el sitio que ocupa actualmente la terminal de distribución.

En el año de 1946 se realizó la segunda ampliación alcanzando una capacidad de procesamiento de 50,000 barriles/día, esta ampliación se realizó hacia el lado noroeste, hacia lo que actualmente es la calle de Prolongación Ingenieros Militares.

Para el año de 1955 se efectuó la tercera ampliación, llegando a una capacidad de 100,000 barriles/día, siendo en esta fecha cuando las instalaciones ocupan el total de 174 has., que es el área que existe hasta la fecha. Finalmente en 1990 se registró su último incremento de capacidad, para alcanzar 105,000 barriles/día, que es su máxima capacidad instalada, con lo que cierra operaciones en el año de 1991.

Durante estos años, el uso del suelo en el entorno del área ocupada por la Ex -Refinería sufre cambios notables, ya que paso de ser de uso agrícola en sus inicios, hasta llegar a tener en la actualidad un uso industrial, comercial, habitacional y de servicios municipales.

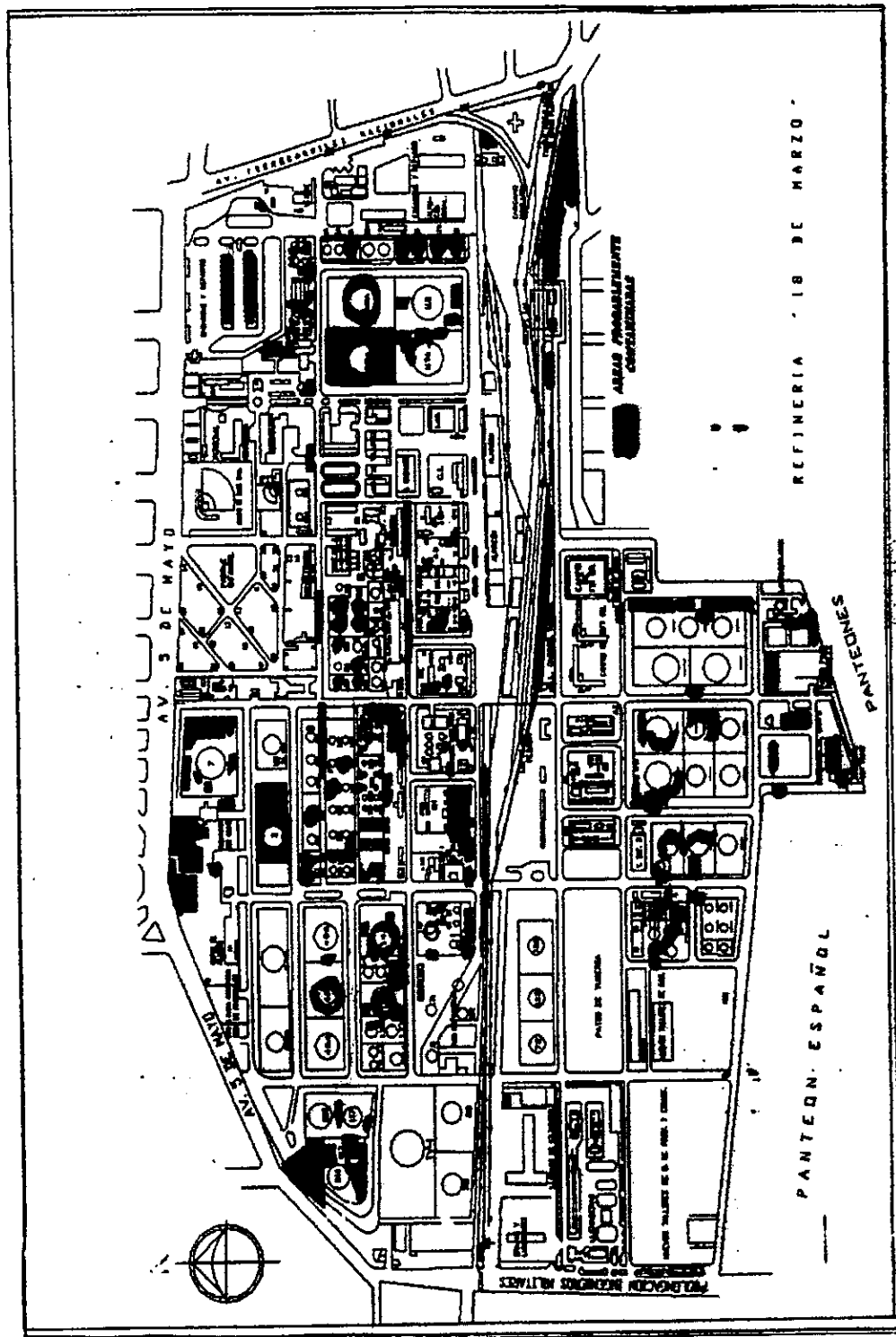


FIG. 5.6 AREAS PROBABLEMENTE CONTAMINADAS EN LA EX-REFINERIA 18 DE MARZO

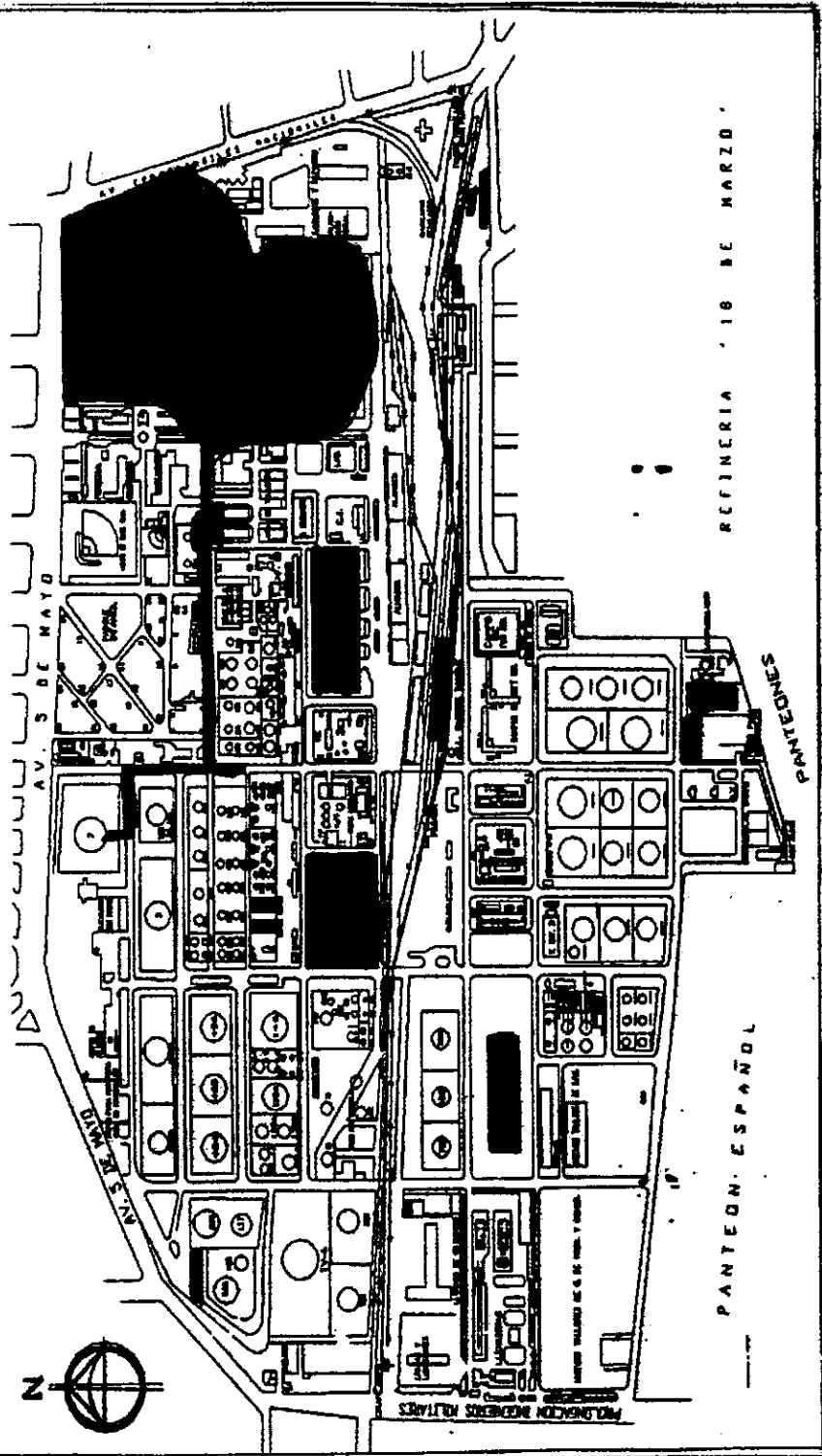


FIG 5.7 AREAS POTENCIALMENTE CONTAMINADAS EN LA EX - REFINERIA 18 DE MARZO.

5.3.2 ZONAS DEL SUBSUELO

En estudios realizados se pueden establecer diferentes zonas del suelo y subsuelo siendo seccionadas en:

- ◆ Suelos superficiales
- ◆ Subsuelo o zona no saturada
- ◆ Acuífero subterráneo o zona saturada

El *suelo superficial* se refiere como la primer capa del subsuelo que comprende hasta una profundidad de 0.5 m, medida desde la superficie del terreno natural o del nivel de piso terminado, según sea el caso.

El *subsuelo o zona no saturada* esta zona comprende la capa del subsuelo a partir de los 0.5 m de profundidad, hasta el nivel de contacto con el manto freático somero, que se ubica aproximadamente a 3.0 m de profundidad, aquí los niveles de contaminación se determinan en función del riesgo potencial de contaminación de los acuíferos. El *acuífero subterráneo o zona saturada* corresponde al acuífero superficial, ya que en este se llevan a cabo los procesos de disolución de los lixiviados en el agua. Fig 5.8.

5.3.2.1. Pozos de Monitoreo y abastecimiento

Por otra parte en estudios realizados por el Instituto Mexicano del Petróleo en marzo de 1994 de la zona norte del suelo y subsuelo de la Ex - Refinería se observaron algunos de los siguientes resultados

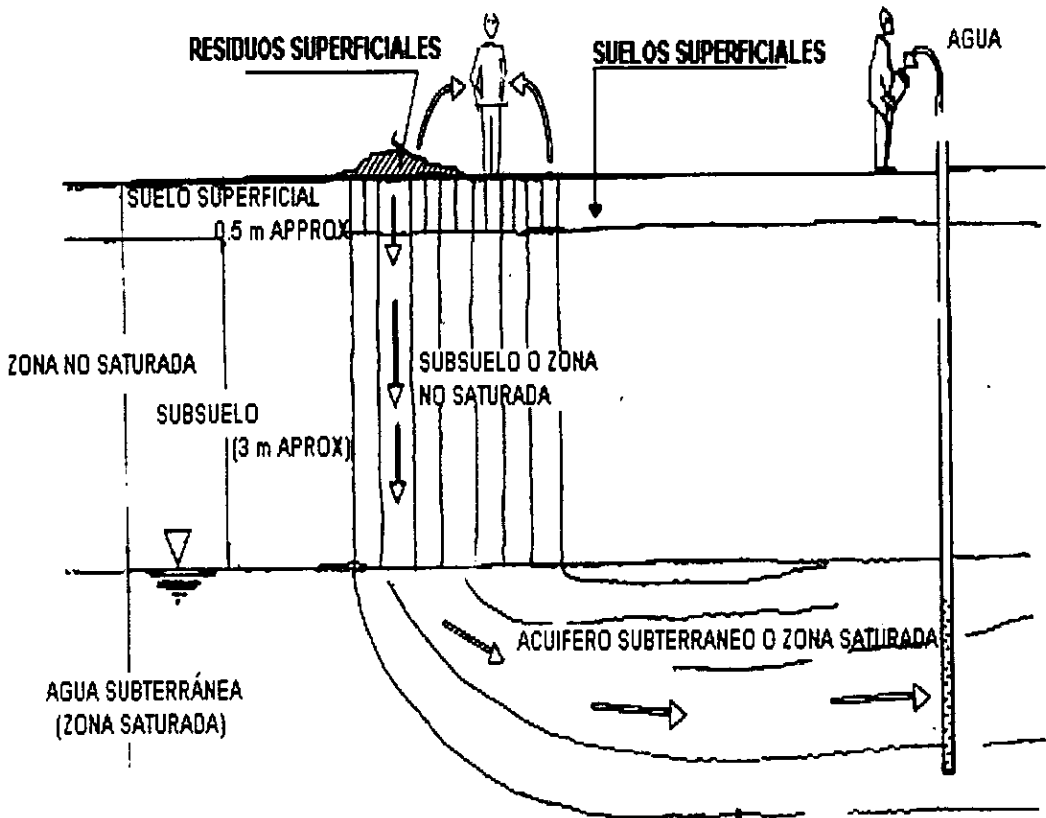
TABLA 5.9 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS POZOS DE MONITOREO EN LA ZONA NORTE DE LA EX - REFINERIA

POZO	PARAMETROS					
	BENCENO	TOLUENO	ETILBENCENO	XILENOS	BTEX	TPH
MW1	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	22.39
MW2	6.1	1.2	<0.4	1.1	8.4	16.72
MW3	0.5	2.7	<0.4	<0.4	3.2	20.58
MW4	65	8.6	3.2	10.2	87	85.05
MW5	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	

* BTEX, TPH: ppm.

5.3.3 RECONOCIMIENTO DE LA ZONA

La Figura 5.9 muestra la zona restringida al estudio la cual se encuentra dividida en dos partes: A y B, en la primera se tiene un nivel de contaminación menor que en la parte B. Esta diferencia de contaminación puede deberse en parte a la estratigrafía, también puede deberse al uso del suelo. La zanja ZN1 se ubica en la zona donde estuvo un quemador y el pozo de monitoreo MW1 en la zona de tanques donde pudieron ser más probables fugas, derrames y otras actividades.



- NOTAS:
- MIGRACIÓN POTENCIAL LENTA DE LOS CONTAMINANTES
 - EN EL SUBSUELO SE PRESENTA AL SER HUMANO COMO RECEPTOR POTENCIAL DE LOS CONTAMINANTES.

FIG 5.8 MODELO CONCEPTUAL DEL TRANSPORTE POTENCIAL DE LOS CONTAMINANTES EN LA EX-REFINERIA 18 DE MARZO

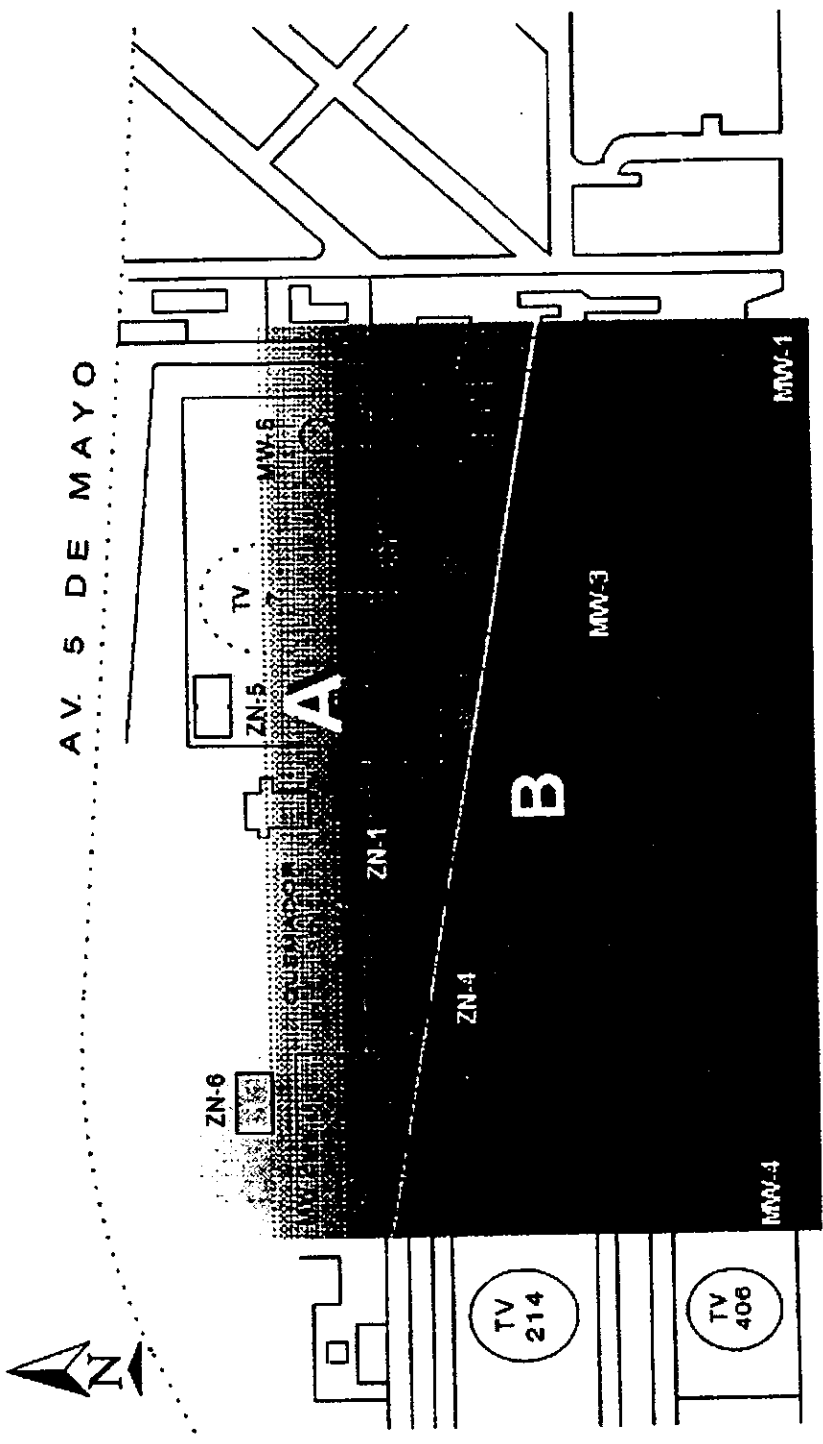


FIGURA 5.9 LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE MONITOREO Y DE LA SECCIÓN NORTE DE LA EX-REFINERÍA

La **figura 5.10** muestra el corte del pozo MW1 y la **figura 5.11** la zanja de observación ZN1.

En cuanto a la estatigrafía del suelo se tiene lo siguiente:

Para la zanja ZN1 en sus diferentes capas lo que predomina es la arcilla hasta una profundidad de 3 metros.

Para el pozo MW1 el predominio de arcilla es hasta casi 10 metros y más abajo la arena.

Debido a estos tipos de suelos se tienen diferentes permeabilidades. Los materiales más permeables y por tanto aquellos que favorecen el movimiento libre de la humedad, tiene un contenido elevado de arena. Pero a medida que se reduce el tamaño de las partículas la tendencia general es que el material se vuelve más impermeable, de tal manera que las arcillas sólo permiten una tasa muy baja de movimiento de humedad. Esto puede ocasionar que el agua se acumule en la superficie o cuerpo del suelo; sin embargo en ocasiones algunos materiales arenosos pueden resultar bastante impermeables al compactarse.

Por ejemplo, analizando el pozo MW1, en la primera zona se observa que el nivel de producto oleoso está a 1.40 m lo cual describe el paso de hidrocarburos a lo largo de este suelo que va de arcilla a poca arena.

La consistencia del suelo o propiedades para su manejo se refieren al tipo y grado de cohesión y adhesión existentes entre las partículas del mismo; esto es, la resistencia del suelo a la deformación o ruptura o a la fuerza y naturaleza de las fuerzas de cohesión y adhesión. Entre los términos empleados para describir la consistencia se encuentran: compacta, dura, esponjosa, suave pegajosa, plástica, quebradiza, etc.

Las partículas de suelo de tierra fina son por lo general menor de 2 mm. Por lo que se dice que la zona estudiada es de tierra fina.

El color del suelo es determinado por la cantidad y estado del hierro y/o de la materia orgánica. Por lo común, el color de los horizontes superiores cambia de pardo a pardo oscuro y a negro a medida que aumenta el contenido de materia orgánica y ésta tiende a tomar un color más oscuro al aumentar la humificación.

En el pozo MW1 la primera zona, con alto contenido de hidrocarburos presenta la coloración propia de un suelo rico en materia orgánica, lo cual lleva a suponer la posibilidad de sistemas que la degradan.

También el pH y el contenido de cationes pueden ejercer influencia, ya que los horizontes ácidos pobres en calcio y materia orgánica a menudo son de color claro, mientras que en presencia de grandes cantidades de calcio o de sodio, se forman más colores oscuros, aún con cantidades pequeñas de materia orgánica.

Los suelos en condiciones parciales o completamente anaeróbicas presentan muchos colores gris, olivo y azul, que se origina por la presencia de hierro en es estado reducido o ferroso. Existen otras coloraciones que van desde rojizas hasta amarillas producidas principalmente por la hematita, geothita y limonita.

La segunda zona del pozo MW1 presenta coloración oscura, con presencia de materia orgánica y el paso de hidrocarburos o compuestos orgánicos por esta zona impermeable hace sugerir que los contaminantes están detenidos en esta parte, es decir que gracias a este suelo la afectación se limita hasta 4 metros aproximadamente, pero no hay que descartar un estudio posterior para verificar la presencia de contaminantes más allá de los casi 4 m.

La tercera zona de tipo arcillo arenosa, no presenta materia orgánica, lo que indica la presencia de organismo anaerobios, dentro de esta se localiza el nivel del agua a 4.60 m.

En las siguientes zonas el predominio es de arena y su color que va de gris claro debido a la falta de material orgánico y hasta oscuro, posiblemente por la presencia de hierro, además de ser anaeróbicos

En la primera zona de la zanja ZN1, se observa que es producto mixto materiales como vidrio, madera y otros los cuales imposibilitan el desarrollo de cualquier tecnología, lo que se recomienda es sustraer esta porción mientras se trabaja con las demás zonas.

En la segunda zona, la presencia de material poroso hace tangible que dentro de la misma exista hidrocarburos y agua de las infiltraciones.

La tercera zona es una arcilla y algo de roca volcánica lo que supone que el contaminante se haya detenido en esta zona.

La siguiente zona es de arena con poca materia orgánica, las dos siguientes zonas son arcillosas también con materia orgánica lo que hace posible considerar sistemas que la degraden.

Con base en el reconocimiento de la zona a tratar se inicia el estudio para proponer la técnica que favorecerá la recuperación del suelo.

1. ARCILLA POCO ARENOSA PLASTICA DE COLOR GRIS OSCURO A NEGRO CON ESCASA MATERIA ORGANICA CON OLOR A HIDROCARBUROS (IMPERMEABLE A PERMEABILIDAD BAJA).

2. ARCILLA PLASTICA DE COLOR GRIS OSCURO A NEGRO CON ESCASA MATERIA ORGANICA CON OLOR A HIDROCARBUROS (IMPERMEABLE).

3. ARCILLA-ARENOSA DE COLOR GRIS OSCURO (PERMEABILIDAD BAJA).

4. ARENA GRANO FINO-ARCILLOSA DE COLOR CAFE OSCURO (PERMEABILIDAD BAJA).

5. ARENA DE GRANO FINO A MEDIO DE COLOR GRIS CLARO (PERMEABILIDAD ALTA A MEDIA).

6. ARENA DE GRANO FINO DE COLOR GRIS CLARO (PERMEABILIDAD BAJA).

7. ARCILLA PLASTICA DE COLOR GRIS OSCURO A NEGRO CON MATERIA ORGANICA (IMPERMEABLE).

8. ARENA-ARCILLO-LIMOSA CON FRAGMENTOS DE ROCAS VOLCANICAS (PERM. BAJA).

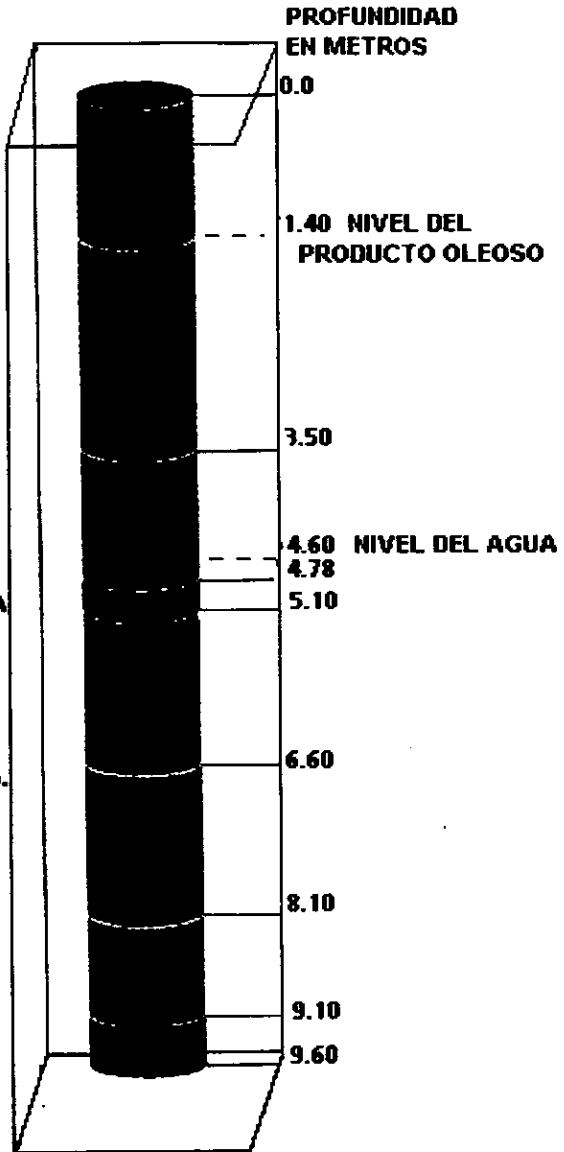


FIG. 5.10 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA Y CARACTERÍSTICA HIDROGEOLOGICA DEL POZO DE MONITOREO MW-1

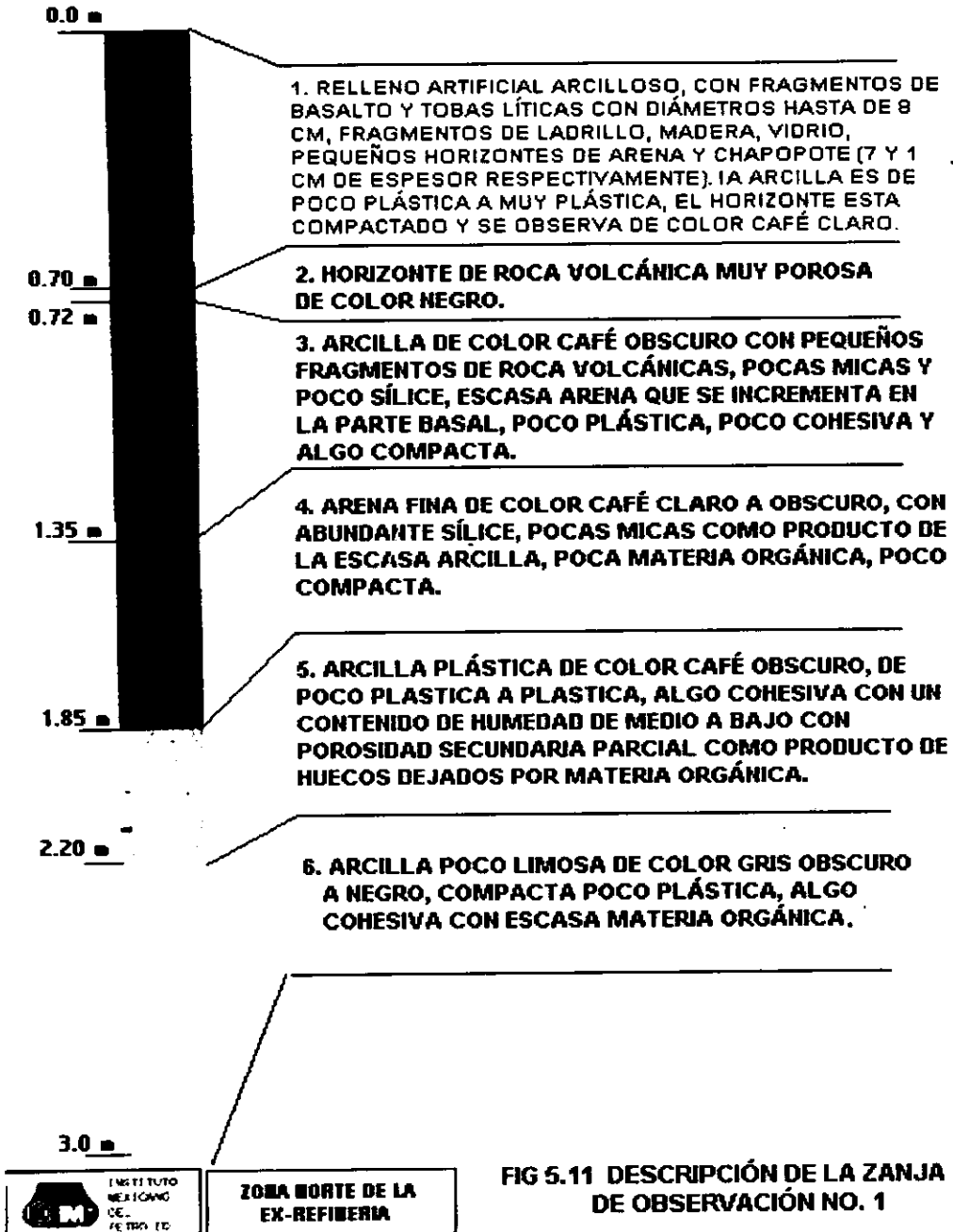


FIG 5.11 DESCRIPCIÓN DE LA ZANJA DE OBSERVACIÓN NO. 1

Los estudios realizados en base a distintas reglamentaciones nacionales e internacionales, sugieren en forma preliminar (para ver el grado de contaminación) los valores de referencia que se muestran en la **tabla 5.10**, con respecto a los contaminantes, el tipo de uso de suelo y la localización del mismo.

TABLA 5.10 CONCENTRACIONES MÁXIMAS RECOMENDADAS PARA CONTAMINANTES EN EL SUBSUELO (mg/kg peso seco)

CONSTITUYENTE /COMPUESTO	TIPO DE SUELO			
	RESIDENTIVO	INDUSTRIAL	AGRICOLA	URBANO
METALES		(mg/kg)		
Plomo	50	100	-	0.01
Niquel	20	70	-	0.1
Molibdeno	4	10	-	-
Cadmio	1	12	-	0.004
Cromo	20	100	-	0.05
Arsenico	5	20	-	0.05
Zinc	80	300	-	5.0
Vanadio	-	380	-	-
COMPUESTOS INORGÁNICOS		(mg/kg)		
Amoniaco	-	-	-	-
Fluoruro	200	400	-	1.5
Cianuro (CN-libre total)	1	10	-	0.2
Cianuro (CN-complejo total)	5	50	-	-
Azufre	2	20	-	-
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS		(mg/kg)		
Benceno	0.01	0.5	1	0.001
Etilbenceno	0.05	5	100	-
Tolueno	0.05	3	500	1.0
Xileno	0.05	5	10	0.04
Fenoles	0.02	1	50	0.001
Aromáticos totales	0.01	7	-	-
HIDROCARBUROS POLICICLICOS		(mg/kg)		
Naftaleno	0.1	5	10	0.03
Antraceno	0.1	10	500	-
Fenantreno	0.1	5	-	-
Criseno	0.01	0.66	500	0.02
Benzo-a-antraceno	0.1	0.22	500	0.01
Benzo-a-pireno	0.006	0.66	100	0.02
Benzo-a-fluoranteno	0.1	0.66	500	0.01
Hidrocarburos policíclicos totales	1	20	-	-
OTROS		(mg/kg)		
MTBE	-	-	-	-
PCB's	0.05	0.45	0.45	-
Aceite mineral	50	100	100	-
Gasolina	20	100	100	-
Hidrocarburos volátiles orgánicos	-	-	-	-
Hidrocarburos del petróleo recuperables totales	-	-	-	-

FUENTE: SIPASA, 1993.

Con base en los valores reportados en la **Tabla 5.10**, se observa que los compuestos aromáticos, de acuerdo a la **tabla 5.9** son mucho más elevados para la zona de la Ex Refinería.

Esta alta contaminación puede haber sido influenciada, como ya se ha dicho, por el tipo de suelo, resultando que a través de los años en el área de tanques, donde se localiza el pozo WM1, las concentraciones de los compuestos orgánicos aumentaron más que en la zona A.

El gran reto será la reducción de los altos niveles de (BTEX) y etilbenceno a valores de 0.01 mg/Kg suelo.

Por otra parte, se debe trabajar primeramente con las zonas más afectadas para ir eliminando el riesgo de una posible dispersión hacia otros medios, evitando con ello la contaminación de lugares más difíciles de tratar. Es decir comenzar en este caso con la sección B de la zona noroeste restringida

5.3.4 TECNOLOGÍAS POSIBLES DE EMPLEAR

A través de los diversos estudios realizados en la Ex –Refinería en el año de 1994, se reportaron las algunas tecnologías (Tabla 5.11) como posibles aplicaciones al sitio.

TABLA 5.11 TECNOLOGÍAS POTENCIALMENTE APLICABLES A LA ZONA SATURADA Y NO SATURADA DE LA ZONA NORTE DE LA EX – REFINERÍA

Tecnología potencial de tratamiento								
TRATAMIENTO EN EL SITIO (DESPUES DE LA EXCAVACIÓN) (ZONA NO SATURADA)								
Tratamiento de tierra	♦	♦						
Bioreactor	♦	♦						
Neutralización								♦
Estabilización						♦	♦	
Incineración transporte	♦	♦		♦	♦	♦		
Desorción térmica de baja t.	♦		♦					
TRATAMIENTO "IN SITU"								
Extracción de vapor del suelo	♦		♦					
Nivelado de suelos	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
TRATAMIENTO FUERA DEL SITIO								
Relleno sanitario	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Incineración	♦	♦	♦	♦	♦			
Tratamiento Térmico baja t.	♦		♦					
Reciclado								
CONFINAMIENTO EN EL SITIO								
Encapsulado	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Relleno del lugar	♦		♦		♦	♦	♦	♦
NINGUNA ACCION								
Ninguna acción posterior	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
RECUPERACIÓN DE AGUA FREÁTICA				(ZONA SATURADA)				
Pozos de extracción	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Trincheras de intercepción	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Slurry wall	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Ninguna acción	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
TRATAMIENTO DE AGUA FREÁTICA								
Precipitación								♦
Filtración								♦
Intercambio iónico								♦
Neutralización								♦
DESCARGA DE AGUA FREÁTICA								
Agua superficial	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Tratamiento de aguas negras	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Pozos de inyección	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Aplicación a terrenos (pe. Irrigación)	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦

FUENTE: SIAPASA, 1994.

Analizando la tabla anterior para el caso de compuestos orgánicos en la zona no saturada. Las posibles aplicaciones a considerar son: *El lavado de suelo, Encapsulamiento, Biodegradación, Bioventilación, Incineración.*

En cuanto al encapsulamiento, es limitado por su costo debido a las actividades que implica el empleo de esta tecnología, que van desde transportación y el volumen a manejar.

El lavado del suelo es una tecnología calificada como regular o adecuada con base en la **Tabla 2.4**, donde la eficiencia se tiene considerando el tipo de suelo presentaría dificultades por que será necesario la recuperación del líquido de lavado y una necesaria aplicación de surfactantes.

Debido al medio físico del suelo, los hidrocarburos tienden a adsorberse o fraccionarse en la matriz del suelo para formar fases orgánicas separadas en los espacios de los poros. Debido a la persistencia y adsorción de muchos aromáticos y del hecho de que los compuestos no adsorbidos son con frecuencia fácilmente biodegradados, es tangible que la adsorción resulte en una protección de aquellos químicos al ataque microbiano. Por tanto, para incrementar la biodegradación de estos compuestos, es necesario acelerar su velocidad de desorción y/o solubilización. Tai y Maier (1992) encontraron que ésta se puede acelerar con la adicción de surfactantes.

El uso de surfactantes es recomendado ya que los contaminantes sólo son degradados cuando están disueltos en una solución acuosa o por lo menos en contacto directo con agua, como es el caso de los hidrocarburos que tienen bajas solubilidades en agua.

El uso de surfactantes (p.e. Bio-S surfactant) para mejorar la biorremediación de ambientes contaminados ha logrado considerable interés en años recientes. Muchas bacterias bajo condiciones adecuadas, pueden producir biosurfactantes y bioemulsificantes para ayudarse en su ataque a compuestos específicos.

Pero cabe mencionar que en ocasiones provocan efectos inhibitorios para los microorganismos, así hay que tomar muy en cuenta estos factores, y no descartar su posible aplicación.

La incineración ofrece solución en cantidades menores, así que por la extensión de la zona se limita su empleo además de aumentar los costos.

El relleno implica sólo la transportación del sitio contaminado a otro lugar y no se elimina la fuente.

Por tanto, queda seguir analizando la Biodegradación y el bioventeo, como posibles tecnologías a ser empleadas.

Haciendo referencia a la **tabla 5.3**, muestra *otra visión para la selección de la tecnología más adecuada*. Se puede apreciar que es mucho más estricta para calificar todos los factores que involucra. Principalmente a la biorremediación la pone como una posible alternativa pero con limitantes para suelos arcillosos, en otro caso a la biorremediación compuesta la muestra con ventaja sobre suelos de arcilla y a profundidades mayores. Es así como esta tabla en general es más minuciosa para calificar muchos de los parámetros que estudia, en comparación a otras tablas de selección.

Todo lo anterior nos lleva a determinar que la biorremediación sola o conjuntamente con tecnologías como el bioventeo y la bioaugmentación, auxiliada de otros factores nos pueden dar la solución más favorable al problema de la Ex - Refinería.

Se propone para la zona noroeste ya que el estrato contaminado no es mayor de 1.4 m. y la favorece la presencia de materia orgánica, con referencia en todas las tablas mostradas aplicar para el suelo superficial (ya que son principalmente arcillas de permeabilidad baja a impermeable) hasta donde se encuentre el nivel de agua que va desde 3 a 4.60 m, un arado del suelo y la adición de microorganismos, ya que cuenta con una escasa población en éstos. Para lograr su reproducción en las condiciones adecuadas se requerirá alimento (P:N:K:) (10:5:5). En pocas palabras una bioventilación, ya que este tipo de suelo no permite que el contaminante continúe moviéndose.

Estas variantes hacen de cada zona un caso particular, ya que conforme la estatigrafía de la ZN1 este tipo de arcilla se presenta en dos capas en los primeros 3 m. de profundidad y en el pozo MW1 se presenta casi a metro y medio y en otra capa a los 8 m.

Se deben tomar en cuenta que la mejor forma de atacar el problema puede ser en el mismo sitio, o en determinado momento manejar el suelo superficial en una zona dentro de la misma Ex Refinería y darle las condiciones para iniciar el proceso.

No obstante la aplicación de la biorremediación puede disminuir la concentración de los contaminantes, pero hay que conservar las condiciones adecuadas para el crecimiento de los microorganismos ayudándose de un monitoreo de la zona.

5.3.5 MONITOREO Y PRUEBAS

Para lograr un mejor resultado en cuanto a la aplicación de la biorremediación para esta zona restringida del sitio a tratar, se debe realizar una prueba a nivel laboratorio o escala piloto, la cual ayudara a observar los posibles problemas al tratar de aplicar esta tecnología. Los resultados permiten inclusive adicionar información que en los estudios previos se pudieron enmascarar o

mostrar otro comportamiento y otras muchas cuestiones, todo con el fin de lograr alcanzar la disminución del contaminante.

A continuación se muestra la **figura 5.12** en donde se representa resultados a escala piloto y la real, donde se observa la reducción de la concentración de TPH aplicando la biorremediación

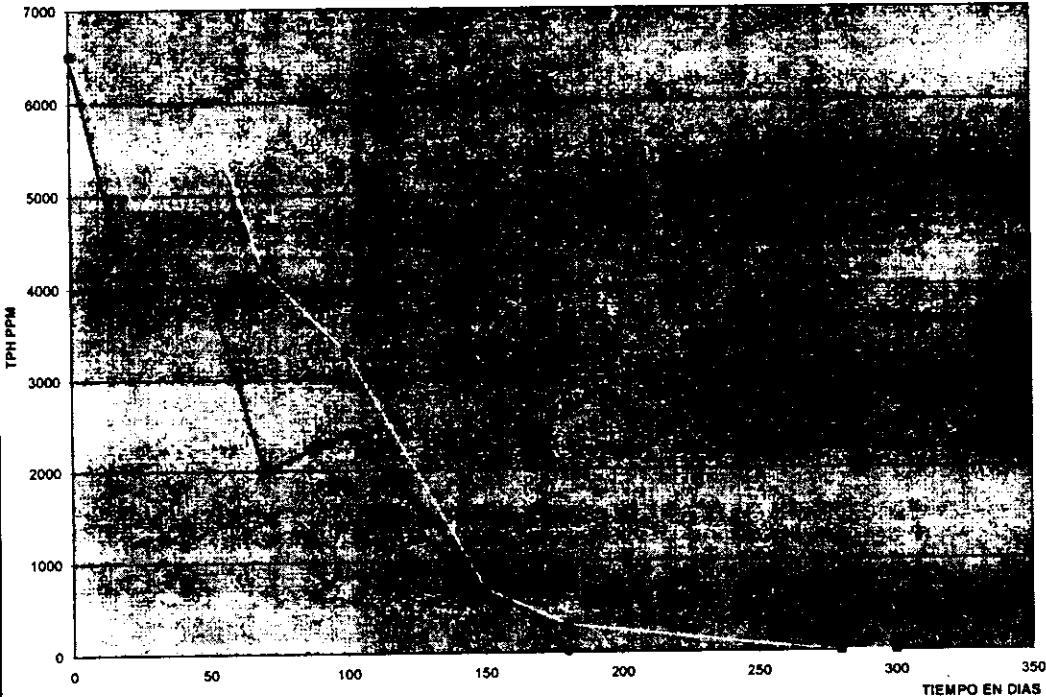


FIGURA 5.12 EJEMPLO DE LA DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES POR BIOTRATAMIENTO IN SITU

Se puede decir que las zonas de mayor concentración de BTEX se localizan en la mitad sur de la zona norte a partir de la calle que comunica la colonia Ingenieros Militares con el Ranchito.

Por estudios anteriores la dirección del flujo de las aguas subterráneas es preferentemente de Noroeste a Sureste y de manera secundaria de Oeste a Este. Esta condición minimiza la posibilidad de migración de contaminación del subsuelo del área estudiada a la zona urbana. Pero actualmente se recomienda otra investigación a fondo para reafirmar o eliminar esta observación.

Una de las herramientas que también hay que tener presente en la aplicación de estas tecnologías de biodegradación es el *monitoreo y control* de

todos los factores involucrados como: la confirmación del crecimiento de microorganismos, la disminución de los niveles de contaminación, conservación de los nutrientes y condiciones para la efectividad del proceso, entre otros. El monitoreo es una guía que nos permite conocer si esta funcionando o no la tecnología.

Los programas de monitoreo de la zona pueden tomar referencia con los estudios a nivel piloto o laboratorio, para definir el tiempo de crecimiento de microorganismos y así delimitar una periodicidad en la toma de muestras para verificar los niveles de contaminantes.

Suponiendo una tasa de crecimiento de 20 días con las condiciones adecuadas, se puede proceder a monitorear la zona y analizar la cantidad de compuestos nocivos presentes.

Se propone que el monitoreo sea principalmente en las dos primeras capas del pozo MW1 y la zanja ZN1 (eliminando la primera zona). Esto no excluye el posible monitoreo a capas más profundas.

Una de las ventajas de la biorremediación es su aplicación a los mantos acuíferos, así que no hay que descartar que al mismo tiempo se trataran estos diferentes sectores, lo cual nos ayudaría a mejorar mucho más el estado actual del sitio. Por tanto se propone aplicar no solo la biorremediación como una tecnología aislada y única.

Otras formas de visualizar la aplicación una tecnología, es mediante los diagramas presentados en capítulos anteriores. La **figura 5.13** muestra la visualización para la Ex- Refinería. La **figura 5.14** muestra mediante un diagrama de bloques las preguntas claves para decidir sobre la tecnología y el contaminante para el caso en estudio.

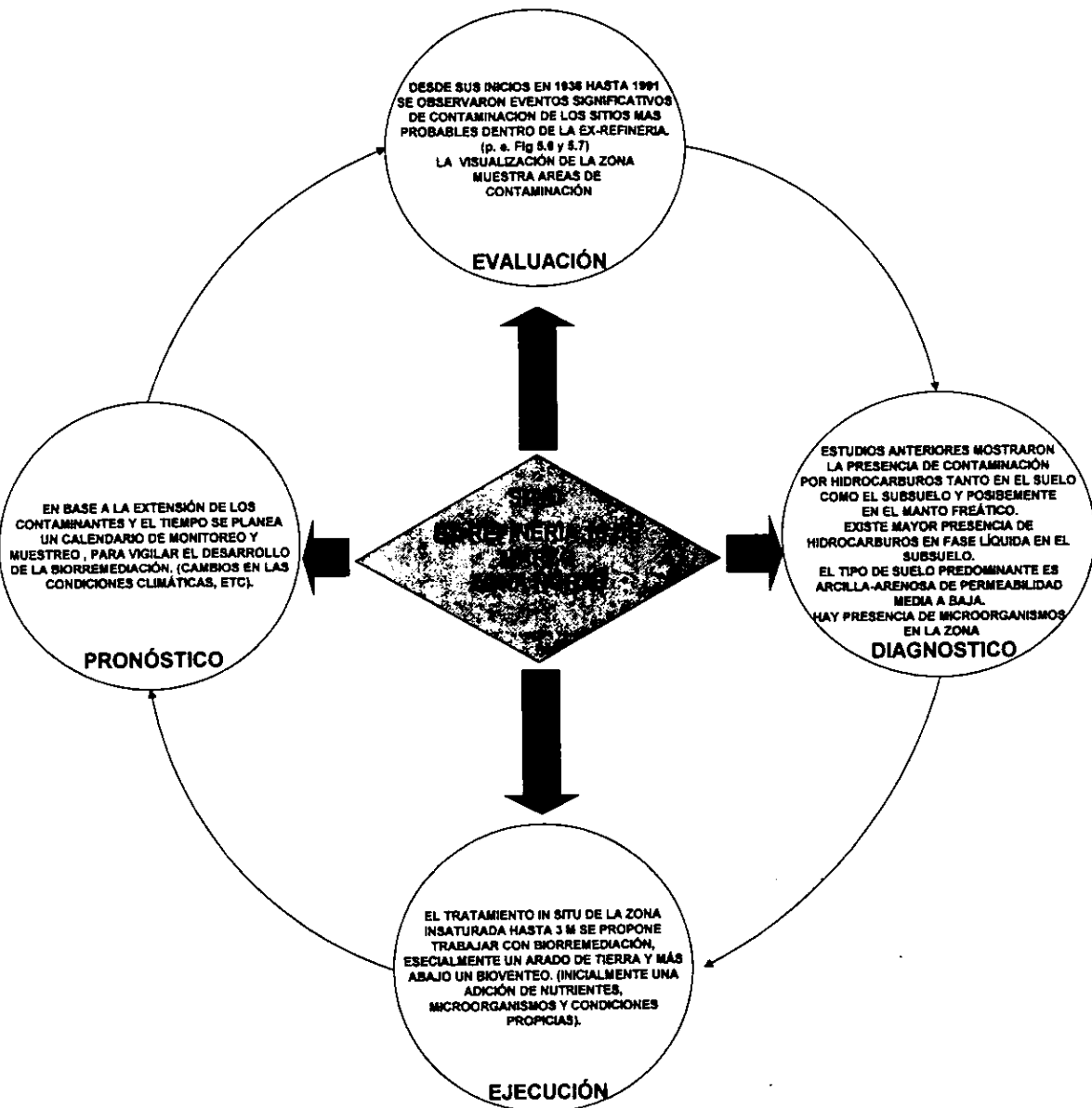


FIGURA 5. 13 LOS PASOS MÁS IMPORTANTES SON:

1. **EVALUACIÓN** - EXAMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS DATOS/INFORMACIÓN
2. **DIAGNÓSTICO** - INVESTIGACIÓN, MUESTREO Y ESTIMACIÓN DEL RIESGO
3. **EJECUCIÓN** - ACCIÓN DE REMEDIACIÓN
4. **PRONÓSTICO/CONTROL** - MONITOREO, CONTROL, PASOS A FUTURO Y ACCIÓN DE REMEDIACIÓN.

CIRCULO : SITIO CONTAMINADO

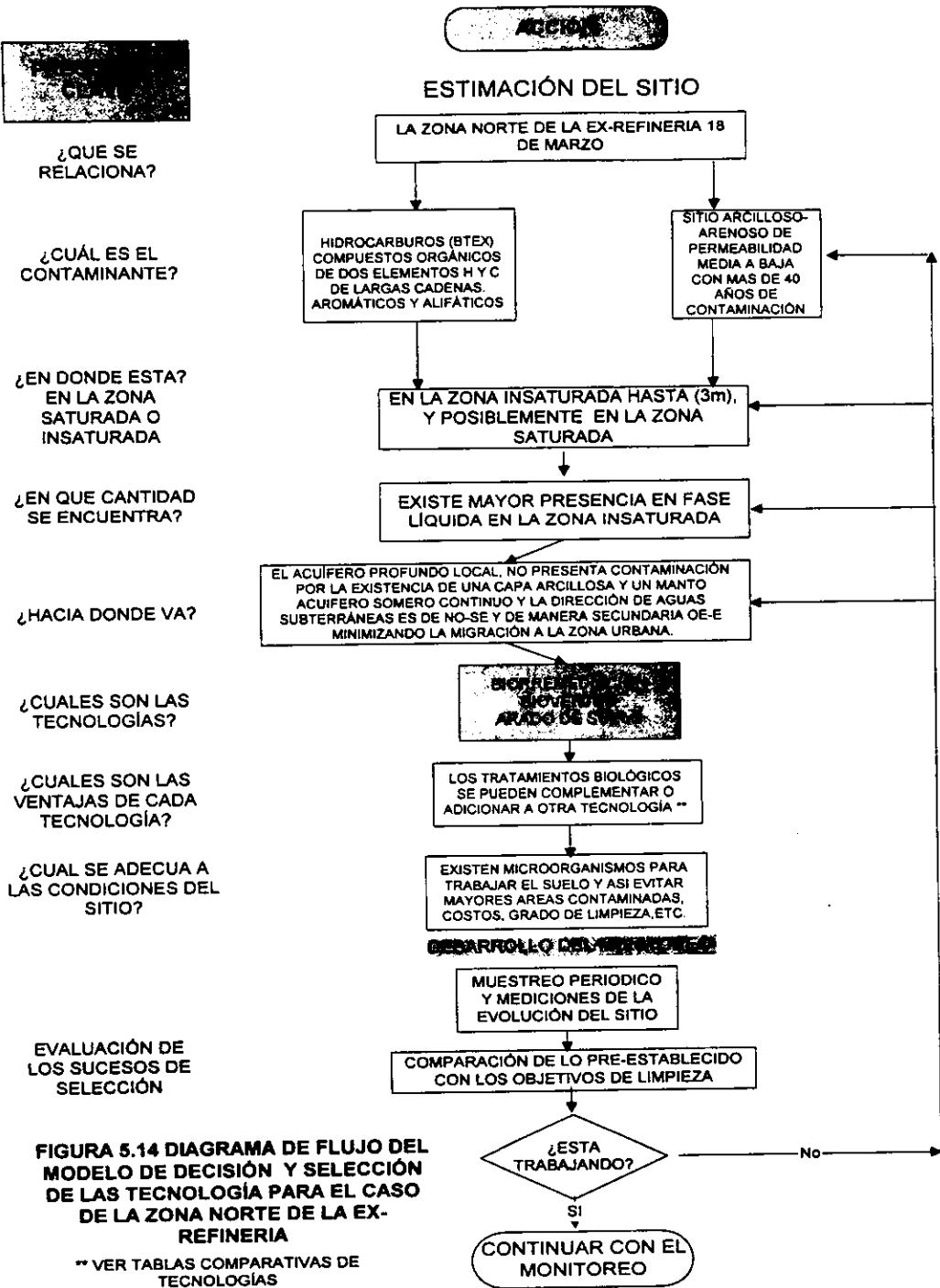


FIGURA 5.14 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO DE DECISIÓN Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍA PARA EL CASO DE LA ZONA NORTE DE LA EX-REFINERÍA

** VER TABLAS COMPARATIVAS DE TECNOLOGÍAS

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Como se presentó el suelo es para los humanos y muchos organismos terrestres la parte más importante de la geósfera, además de ser considerado como el tercer componente del medio ambiente, ya que realiza muchas funciones con base para el desarrollo y crecimiento de plantas.

Desafortunadamente como consecuencia del desarrollo acelerado de la industrialización en todo el mundo y en búsqueda de mejores y mayores beneficios para el hombre, la vida productiva del suelo esta siendo fuertemente alterada, (no sólo este componente de la naturaleza es el único afectado también el agua y aire) por la evolución del ser humano sin considerar los principales factores para la conservación de la vida en todo el mundo.

Se presentaron casos de afectación de sitios contaminados con diferentes residuos. Particularmente la industria del petróleo ha generado muchos de los problemas de contaminación por hidrocarburos alrededor de todo nuestro ecosistema. La contaminación es generada en su mayoría por diversas actividades que van desde la transformación de productos, transporte, almacenamiento y disposición de residuos inadecuada.

Es por ello que ahora el hombre ha desarrollado tecnologías que se han enfocado a minimizar los daños causados, ya existentes en muchos países, tal es el caso de la biotecnología, donde la química e ingeniería son parte esencial y van conjuntamente con muchas otras especialidades.

El presente trabajó se enfocó más a la tecnología llamada "Biorremediación", la cual ha sido ampliamente aplicada en países como E.U., Alemania, Suiza y otros países con resultados favorables.

Como se observó a lo largo del estudio, su principal característica es la de proporcionar las condiciones adecuadas para la degradación de los contaminantes

por medio de microorganismos autóctonos o aplicados al sitio y así reducir su peligrosidad.

Dentro de las ventajas de la Biorremediación están: es un proceso natural, los subproductos del proceso son CO_2 y H_2O , los microorganismos tienen un amplio rango de aplicación, costos y otros; entre las desventajas radica en el tiempo que puede ir de meses hasta años y el control de las condiciones adecuadas.

En México esta tecnología está en sus inicios, actualmente se han desarrollado proyectos de investigación en los que toman parte instancias educativas como: UNAM, IPN, UAM, y con las dependencias gubernamentales. Dichos estudios son valoraciones de esta tecnología en nuestros suelos, todos con la finalidad de mejorar los sitios contaminados.

El Instituto Mexicano del Petróleo también ha contribuido en la ejecución de estos estudios aportando investigaciones profundas de las condiciones reales que imperan en los sitios contaminados por hidrocarburos, en su mayoría.

Petróleos Mexicanos (PEMEX), en la búsqueda de soluciones a este problema de contaminación en el suelo, subsuelo, mantos acuíferos, ha iniciado la aplicación de tecnologías biológicas. Tal es el caso de Pantano de Santa Alejandrina en Minatitlán Veracruz y ahora en el Distrito Federal con la Ex-Refinería 18 de Marzo en Azcapotzalco, la cual se encuentra en proceso evolutivo en la búsqueda de la tecnología adecuada, tomándose en consideración la biorremediación como una posible solución.

El presente trabajo dio una visión general de tecnologías aplicables para el tratamiento de residuos (tablas comparativas), con el fin de poder seleccionar la más adecuada al problema que se presente, así como apreciar sus ventajas y desventajas. Esta selección se vió auxiliada de información recopilada a través de metodologías existentes en otros países.

Estas metodologías (presentadas se han empleado en países como Estados Unidos y Alemania), principalmente facilitan, muestran y recomiendan que antes de la aplicación de cualquier tecnología de remediación se debe realizar un estudio profundo de las condiciones imperantes en el sitio a tratar, así como los pasos a seguir según el grado de contaminación encontrado. La metodología que se empleó en el estudio del caso particular conjunta una visión general de las existentes en estos países.

Sólo se analizó un pequeño sector contaminado de la zona noroeste de la Ex -Refinería. Se observó que el tipo de suelo característico de la zona predominantemente son arcillas y arena, que van de permeabilidad baja a media. La primera capa del pozo MW1 hasta casi 3m presentó la mayor cantidad de contaminantes, debido principalmente a las actividades de almacenamiento y otras

que se realizaban en esta zona. Las siguientes capas fueron predominantemente arcillas, lo que forma una barrera para detener la infiltración de más contaminantes al subsuelo y zonas posteriores. En un 40% de las secciones del subsuelo del pozo MW1 y la zanja ZN1 se apreció la presencia de material orgánico. Se concluye que la zona más afectada es la B, y la principal a tratar.

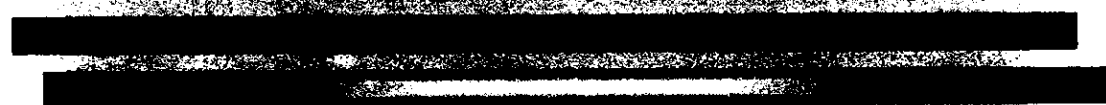
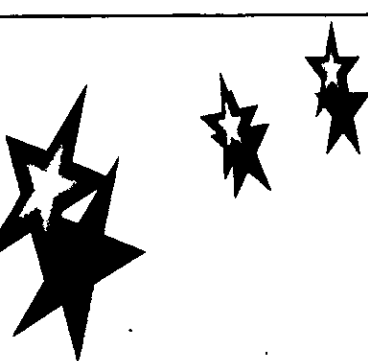
Analizando las posibles aplicaciones de tecnologías se encontró que la biorremediación mediante un arado de suelo para la primera capa del subsuelo, para las capas siguientes se sugiere realizar una evaluación más actualizada de las condiciones del sitio para verificar la extensión de la contaminación.

Se apreció que la estatigrafía del suelo dentro de este sector de la Ex - Refinería es variado como en el corte de la zanja y del pozo, otro factor es el tiempo de exposición del suelo principalmente a hidrocarburos. Lo que hace considerar que para la posible ocupación del sitio para fines recreativos sea necesario minimizar los niveles de los contaminantes.

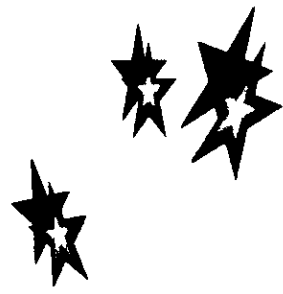
El caso en particular presentado es solo uno de los tantos problemas de sitios contaminados con residuos peligrosos en nuestro país, en donde hace algunos años, la importancia de la conservación de nuestro entorno no era un tema tan importante y tan ampliamente difundido como lo es ahora, gracias a las instancias gubernamentales que actualmente trabajan por ello. El empleo de tecnología como la presentada marca el inicio de un cambio en la conciencia de los individuos.

La biorremediación no es una panacea que resuelva todos los problemas de contaminación de residuos peligrosos, pero en algunos casos es una alternativa viable para la disminución del problema.

El campo de la Biotecnología permite al Ingeniero Químico interaccionar con otras disciplinas favoreciendo su desarrollo profesional y humano vigilar la evolución y mejora de tecnologías para la conservación de nuestro mundo.



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

Legislación

Ley General del Equilibrio Ecológico y protección al Ambiente, Título IV Capítulo IV Prevención y Control de la Contaminación del Suelo, Título I, Cap. y Normas Preliminares, SEMARNAP, INE 1997.

Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana sobre disposición de residuos peligrosos en sitios no autorizados, Ecoprotección Ambiental, 1997.

Revistas

Atlas R.M., Microorganism and petroleum pollutants, Bioscience, 1978, Vol. 28, pp 387-391.

Belhatche H. Dannelle, Choose Appropriate Waste Water Treatment Technologies, Chemical Engineering Progress, August 1995. pp 32-41.

Benger M., The disposal of liquid and solid effluent from oil refineries, Proceedings of 21st Industrial Waste Conference, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1966, pp 759-768.

Bewley R., Ellis B. and Rees J., Microbial Clean-up of Contaminated Soil. Chem. Ind., 1989, Vol. 23, pp 778-783.

Block Robert & Stroo Hans, Bioremediation why doesn't it work Sometimes?, Chemical Engineering Progress, August 1993. pp 44-50.

Bradford Michael I. & Krishnamoorthy, Consider Bioremediation for Waste Site Cleanup, Chemical Engineering Progress, february 1991, pp 80-85.

Coe R.H., Bench scale biological oxidation of refinery waste with activated sludge, Sewage and Indust. Waste, Vol 24, 1952, pp 731-749.

Colwell R.R., and Saylor G.S., Microbial Degradation of Industrial Chemicals, Water Pollution Microbiology, Vol 2, John Wiley & Sons, New York, 1978.

Dagley Stanley, Lesson from Biodegradation, Ann. Rev. Microbiol, 1987, Vol 47, pp 1-23.

Duong Michelle H. And Penrod Samuel L., Kinetics of p-nitrophenol degradation by pseudomonas: An experimental illustrating Bioremediation, Journal of Chemical Education Vol 74 No. 12 Dec 1997, pp 1451-1454.

Evans W.C., Oxidation of phenol and benzoic acid by some soil bacteria, Biochemical J., Vol 41, 1947, pp 373-382.

Grady C.P.L., Biodegradation of toxic organics: Status and potential, J. Env. Engrg. Div. ASCE, Vol 116, 1990, pp 805-828.

Gurujeyalashmi G., and Oriel P., Isolation of Phenol-degrading Bacillus Stearothermophilus and partial characterization, Appl. Environ. Microbiol, Vol. 62, 1989, pp 500-502.

Jespersen Chris & Jergen Douglas, Bioremediation Tacles Hazwaste, Chemical Engineering, June 1993. pp 116-122.

Jones G. L., and Carrington E.G., Growth of pure and mixed cultures of microorganisms concerned in the treatment of carbonization waste liquors, J. Appl. Bacteriol., 1972, Vol. 35, pp 395-404.

Hart Stephen, In situ Bioremediation: Defining the limits. Environmental Science & Technology News, 1996, Vol 30, No. 9, pp 398-401.

Hinchee R. E., and H.J. Reisinger, A practical application of multiphase transport theory to ground water contamination problems. Ground Water Monitoring Review, Vol 7, 1987, pp 84-92.

Holliger Christof, Gaspard Sarra et al., Contaminated environments in the subsurface and bioremediation: organic contaminants, Fems Microbiology Reviews, Review 20, 1997 pp 518-521.

Huling S. G., and J.W. Weaver, Nonaqueous Phase Liquids. Ground Water Issue Paper. EPA/540/4-91-002. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory., 1991, Ada, Oklahoma.

Leahy C. Maureen & Brown A. Richard, Bioremediation: optimizing Results, Chemical Engineering, May 1994. pp 108-116.

Lewandowski G., Batch biodegradation of industrial organic compounds using mixed liquor from different POTWs, J. Wat. Pollution Control Fed., Vol. 62, 1990, pp 803-809.

Mckenna Josua & Edward Pickering, Testing Contaminated Soil, Chemical Engineering, November 1995. pp 175-186.

Mohlmann F. W., The biochemical oxidation of penol waste, Amer. J. Health, Vol 19, 1929, pp 145-151.

Namkoong W., Loehr R.C., and Malina J. F., Kinetics of phenolic compounds removal in soil, Hazardous Waste and Hazardous Mater, Vol 5, 1988, pp 321-328.

Petrasek A.C., Kugelman I. J., Austern B. M., and Wise R.H., Fate of toxic organic compounds in waster plants, J. Wat. Pollution Control Fed., Vol 55, 1983, pp 1286-1296.

Roote S. Diane & Miller R. Ralinda, Groundwater clean-up options, Chemical Engineering, May 1993. pp 104-112.

Rozich A. F., Gaudy A.F. and D'Adamo P.C., Selection of growth rate model for activated sludge treating phenol, Wat Res. Vol 19, 1985, pp 481-490.

Song H. G., and R. Bartha, Effects of jet fuel spills on the microbial community of soil, Appl. Environ. Microb. Vol 56, 1990, pp 646-651.

Vanishnav D. D., Babeu L., and Korthals E. T., Effect of microbial concentration on biodegradation rates of phenols, J. Indust. Microbiol., Vol 4, 1989, pp 307-314.

Yang R. D. And E. A. Humphrey, Dynamic and steady state studies of phenol biodegradation in pure and mixed cultures, Biotechnol. Bioeng., 1975, Vol. 17, pp 1211-1235.

Cursos, Seminarios, Conferencias

Seminario Internacional sobre Restauración de Sitios, INE, Mayo 1997.

Biorremediación de sitios contaminados con Residuos Industriales, Pedro Alvarez, UAM Azcapotzalco, México, 29 de mayo de 1998.

Seminar "Contaminated Sites", Legislación Alemana, México, Mayo 1994.

Libros

Bradshaw A.D, Sir Richard Southwood & Sir Frederick Warner, The treatment and Handling of waste, Chapman & Hall, Great Britain, 1992, pp 155-164.

Calabrese Edward J. & Kostecki Paul T, Petroleum Contaminated Soils, Vol. 1, Lewis Publishers, USA, 1991.

Calabrese Edward J. & Kostecki Paul T., Hydrocarbon Contaminated Soils Vol.1, Lewis Publishers, USA, 1991. pp. 301-337.

Coombos J., Diccionario de Biotecnología, Ed. Labor, España 1989.

Enkerlin Ernesto C. y Cano Gerónimo, Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible, International Thomson Editores, México 1997. pp 235,236,415-417, 379-380.

EPA, Handbook on In Situ Treatment of Hazardous Waste-Contaminated Soils, January 1990. pp 19-28, 86-95.

EPA, Hazardous Waste Land Treatment, April 1983.

Hinchee E. Robert & **Douglas** Gregory S. Monitoring and Verification of Bioremediation, Battelle Press, USA, 1995, pp157-163.

Hinchee Robert E. & **Kitter** Jeffrey A. Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons, Battelle Press, USA, 1995. pp. 1-9, 11-23, 53-58, 61-69, 73-79.

Hinchee Robert E., **Vogel** Catherine, **Brockman**, Microbial Processes for Bioremediation, Batelle Press Vol 8, USA, 1995 pp 169-175, 205-211, 251-257,

King R. Barry, **Sheldom** John K. & **Long** Gilbert M, Practical Environmental Bioremediation, Lewis Publishers, USA, 1992. Pp 11-27, 103-123.

Kirk Othmer, Enciclopedia de Tecnología Química, Ed. Hispano - Americano, México 1985. vol. 15, pp 717-733.

Kerr Robert S., Handbook of Bioremediation, Environmental Research Laboratory, Lewis Publishers, USA, 1994, pp 1-11,

Manahan Stanley E., Fundamentals of Environmental Chemistry, Lewis Publishers, USA, 1993, pp 493-495, 509-513, 661-667.

McMurry John, Química Orgánica, Ed. Interamericana, 1994. pp 987-999.

Perry H. Robert., Manual del Ingeniero Químico. Ed. McGraw Hill, 1987.

Rittmann Bruce E. & Et al, In situ Bioremediation, Noyes Publications, 2da Ed, USA, 1994, pp 1-20.

Rusell David L., Remediation Manual for Petroleum-Contaminated Sites, Technomic Publications, USA, 1992, pp 24-37, 106-111.

Sax N. Irving, Dangerous Properties of Industrial Material, Van Nostrand Reinhold Company, USA, 1979, pp 328,329,873.

Sayler Gary S., Fox Robert & Blackburn James W., Environmental Biotechnology Waste Treatment, Plenum Press, USA, 1991.

Schwarzenbach Rene P. & Co. Environmental Organic Chemistry, John Wiley & Sons, USA, 1993, pp 409-411.

Streitwieser Andrew Jr., Química Orgánica, Ed. Interamericana, 1985. pp 998 -1005.

Testa M. Stephen, Geological Aspects of Hazardous Waste Management, Lewis Publishers, USA, 1994, pp 295-328.

Wentz Charles A., Hazardous Waste Management, Mc Graw Hill, 1989. pp 391, 410-414.

Wise Donald L., Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils, Environmental Science and Pollution Control Series, USA, 1994. pp 55-75, 199-205.

Young Murray Moo, Comprehensive Biotechnology, The Principles, Applications and Regulations, Vol. II, Pergamon Press, USA, 1985, pp 5.

TESIS

Bezares Vidal Luis M, Biodegradación de Hidrocarburos en Ecosistemas Terrestres, QFB, 1993, pp1-2, 40-43.

Calixto Cano Mauro, Aislamiento y Selección de microflora biodegradadora de fenol a partir de suelo de zonas industriales, QFB, México, 1996, pp 2-12, 14-23.

Miranda Herrera Martín, Aspectos Básicos en la planeación y ejecución de auditorías, IQ, 1998, pp 15-16, 100-103, 122-128, 132-135.

Ruiz Silva I, La biodegradación y su aplicación para la biorremediación del medio ambiente, QFB, 1996, pp. 55-65, 80-81, 210,218.

Tena Tapia G. y Ortega R. G, Contaminación de suelos, IQ,1991,pp 8-14.



GLOSARIO

GLOSARIO

Acuífero capas permeables de roca y arena subterránea que retienen agua.

Agua superficial que fluye en arroyos, ríos y lagunas naturales, así como en reservas construidas por el hombre.

Agua subterránea:

Legalmente Todas las formas de agua abajo del terreno, lo contrario de aguas superficiales.

Geológicamente^a Agua en una roca no consolidada o roca sólida, la cual fluye a través de la superficie permeable de la roca (poros, poros acuíferos) o roca sólida (juntas, fisuras etc.), se diferencia en:

Formación de agua (la cual no fluye permanentemente)

Agua subterránea elevada (no fluye y no siempre esta presente)

Bacteria Nombre genérico de los procariotas unicelulares que forman el reino de los Moneras. Comprende entre otros, los siguientes phyla: mixobacterias, pseudomonas, bacterias fermentadoras y bacterias aerobias fijadoras de nitrógeno.

Bacterias acetogénicas Organismos que fermentan los ácidos grasos, especialmente ácido propiónico y ácido butírico, a ácido acético. Sólo son capaces de crecer en ausencia de hidrógeno.

Bioacumulación o biomagnificación Concentración de un determinado químico en los organismos con posiciones más elevadas en la estructura trófica, que se alimenta de organismos de las posiciones inferiores.

Biodegradable Sustancia que puede descomponerse por la actividad de los microorganismos.

Biodegradación proceso por el cual los productos son descompuestos en sus constituyentes químicos por la acción de organismos vivos. El término a menudo se restringe a denominar la descomposición de desechos liberados al medio ambiente. En general, la biodegradación se considera un proceso conveniente en contraste con la biodeterioración.

Biodeterioración cualquier cambio indeseable en las propiedades de materiales no biológicos, llevado a cabo por la actividad biológica de organismos y que tiene como resultado la disminución, para el hombre del valor intrínseco de los materiales.

Biomasa^b la cantidad total de materia celular en una población microbologica

Biotecnología Coombs en 1989 la definió como la aplicación de los organismos, sistemas o procesos biológicos en las industrias manufactureras y de servicio. En un sentido más estricto se define como el uso integrado de la Bioquímica, Microbiología e Ingeniería en orden para llevar a cabo la aplicación tecnológica (industrial) de las capacidades de los microorganismos, cultivo de tejidos y células.

Catecol Primer intermediario de la oxidación de compuestos aromáticos sustituidos aerobicamente.

Cometabolismo^b transformación fortuita de una sustancia por microbios que se alimentan de otro sustrato. La sustancia cometabolizada no sirve ningún propósito metabólico (p.e. no sirve como recurso de carbón ni de energía) y no se mineraliza. Solo se transforma parcialmente (p.e. plaguicidas clorinados).

Contaminante^a compuestos químicos y físicos, o elementos químicos, que son capaces de causar efectos carcinógenos, tóxicos y/o mutágenos como resultado de su estado, forma, nivel de concentración y posible admisión de organismos.

Contaminación subterránea^a Todas las formas de suelo, mantos subterráneos y contaminación de gases por contaminantes.

Disposición^a Todas los procedimientos técnicos los cuales tienen el propósito de remover la contaminación de los mantos acuíferos y tratamientos subsecuentes para los materiales sólidos y/o agua subterránea como "desperdicio".

DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid)^c Capa o película de fluido inmisible en agua con una gravedad específica mayor que la del agua p.e. creosota, solventes clorinados.

Ex situ^c Medio ambiente que está "fuera del lugar", como suelos excavados o agua subterránea extraída.

In situ^c Medio ambiente que está o es "en el sitio", como suelos sin manejar, o agua subterránea dejada en la subsuperficie en lugar de ser bombeada.

LNAPL^c (Light, Non-aqueous Phase Liquid) Película o capa de fluido inmisible con agua y de gravedad específica menor que el agua (p.e. gasolina, diesel).

Lodos Sólidos asentados y removidos por sedimentación.

Manto Freático Nivel superior de las aguas libres del subsuelo. Su importancia radica en un reservorio vital de agua potable, así como en proporcionar firmeza y estabilidad al suelo.

Matriz^b material natural dentro del cual es introducida un contaminante, derramado o dispuesto. Usualmente toma lugar en el ambiente químico creado o encontrado en sólidos, suelos o agua en sitios de remediación.

Metanogeno^b bacteria capaz de completar la reducción del carbón a metano (Ch₄).

Microclima condiciones locales determinadas por el relieve del suelo, exposición solar, pendiente o inclinación del suelo y por el tipo de vegetación predominante.

Mineralización es el rompimiento completo de las moléculas orgánicas en sustancias inorgánicas tales como dióxido de carbono y agua.

NAPL^c (No-Aqueous Phase Liquid) Película o capa de un fluido inmisible en agua.

Pluma de Contaminación^a Área de distribución de contaminación que indica desde la fuente de contaminación, generalmente en forma contenida y una dispersión coherente de agua-contaminantes insoluble en el agua subterránea.

Remediación^a Procedimiento técnico para el tratamiento inmediato de los contaminantes el cual es agregado a la matriz de suelos, esta en los mantos acuíferos o flotando sobre el agua subterránea, u ocurre como un componente en la mezcla de aire-suelo.

Recalcitrante^b resiste la biodegradación (sinónimo de refractorio en términos petroleros).

Sitio contaminado^a Lugar el cual exhibe contaminación subterránea (suelo, agua subterránea, aire), superficie de contaminación.

Sitio contaminado^{a1} Contaminación subterránea de fácil abandono, desde el cual hay "peligro para la seguridad pública y el orden" como resultado de la migración de los contaminantes vía medio ambiente (suelo, aire, agua subterránea, cuerpos de agua y ríos, etc., la atmósfera) y/o contacto con el medio ambiente.

Suelo:

Estructural^a Todas las formas y estados de una roca sólida y sedimento suelto.

Geológicamente^a Roca naturalmente creada no consolidada (sedimento) bajo la superficie del terreno, que es diferenciada en:

- ◆ categoría sólida, de acuerdo con el tamaño de cada grano.
- ◆ tipo sólido, de acuerdo con la química.

Suelo-aire^a La porción de la atmósfera mezcla de gas natural la cual es localizada en los poros de la tierra suelta y esta envuelta en la interacción química con los procesos biológicos.

Toxafeno (octaclorocamfeno $C_{10}H_{10}Cl_{18}$), es un pesticida, amarillo, sólido ceroso, olor parecido al pino. Tóxico con 7 ppm de tolerancia en residuos de frutas y vegetales.

Xenobiotico^b sustancia orgánica ajena a la vida, principalmente sustancias sintéticas-

Zona Saturada^c La zona de la subsuperficie debajo del nivel de agua freática en donde los poros dentro de la matriz geológica son llenados con agua y la presión del fluido es mayor que la atmosférica.

Zona Vadosa^c (o zona insaturada) Es la zona de la subsuperficie arriba de del nivel de agua freática y el borde capilar en la cual los poros dentro de la matriz geológica son parcialmente llenados con aire y agua, y la presión del fluido es menor que la atmosférica. O zona del suelo insaturado arriba de la capa freática.

Fuentes:

J. Coombs, Diccionario de biotecnología Editorial Labor, España 1989.

a: Legislación Alemana. Glosario.

b: Conferencia Biorremediación de sitios contaminados—Pedro Alvarez, UAM. 1998.

c: Groundwater Clean-up options, Chemical Engineering May 1997.

The image features a complex abstract design. It consists of several overlapping, curved bands of diagonal hatching. The hatching lines are closely spaced and create a textured, almost three-dimensional effect. The bands are set against a white background. In the center of the composition, the word "SIGLAS" is printed in a bold, black, sans-serif font. The overall aesthetic is graphic and modern, with a strong emphasis on geometric patterns and high contrast.

SIGLAS

SIGLAS

- ◆ **BTEX:** Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno.
- ◆ **DNAPL:** (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) Fase Líquida Densa no Acuosa.
- ◆ **HC:** Hidrocarburos.
- ◆ **LNAPL:** (Light, Non-Aqueous Phase Liquid) Fase Líquida Ligera no Acuosa.
- ◆ **NAPL:** (Non-Aqueous Phase Liquid) Fase Líquida no Acuosa.
- ◆ **PAHs:** (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons) Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares.
- ◆ **PCBs:** (Polychlorinated Biphenyls) Bifenilos Policlorados
- ◆ **TPH:** (Total Petroleum Hydrocarbon) Hidrocarburos totales.
- ◆ **VOC:** (Volatile Organic Compounds) Compuestos Orgánicos volátiles.

A large, stylized letter 'A' graphic composed of solid black shapes. It features a wide top bar, a large downward-pointing triangle, a horizontal bar across the middle, and a smaller downward-pointing triangle below that. The background is a fine, repeating grid pattern.









ANEXO

A

ANEXO A

A continuación se muestra una tabla comparativa de costos de algunas tecnologías en E.U.

**TABLA AA. DE COSTOS Y TIEMPOS DE ALGUNAS
TECNOLOGÍAS**

TECNOLOGÍA	COSTOS Y TIEMPO
INCINERACIÓN	
SOLIDIFICACIÓN /ESTABILIZACIÓN	
LAVADO DE SUELO SOIL WASHING	
BIORREMEDIACIÓN	
EXTRACCIÓN DE VAPOR SOIL VAPOR EXTRACTION	
TRATAMIENTO QUÍMICO	
AIR SPARCING	
EXCAVACIÓN Y DISPOSICIÓN FUERA DEL SITIO	

NOTA: LA SIMBOLOGÍA REPRESENTA DE 1 A 3 SACOS EL COSTO RELATIVO; DE 1 A 3 RELOJES EL TIEMPO RELATIVO PARA SU IMPLEMENTACIÓN. REF: HARLING LAWSON ASSOCIATES (BASADO EN: EPA 542-R-92-012 Y 542-B-93.005).

ANEXO B

LISTA DE ALGUNAS EMPRESAS QUE OFRECEN SERVICIOS AMBIENTALES ENTRE ELLOS LA BIORREMEDIACIÓN

All Waste Servicios Industriales de Control Ecológico, S.a. de C.V.
Edgar Allan Poe No. 85 Col Polanco México D.F.
Telefonos: 280 24 83 y 88 282 27 11

Germen S.A. de C.V.
Av. Vallarta 3233 Local F2, Galería Éxhmoda
Col. Vallarta Poniente Guadalajara, Jal.
Tel: (01 3) 647 2216, 647 31 89

Geo-Control, S.A. de C.V.
Watteau 6 esq. Holbein Col. Mixcoac, México D.F.
Tel: 611 7626, 611 9426, 563 36 21

Grupo de Ingeniería Ecológica III HLA & ICONSA, S.A. de C.V.
Acapulco 36 2do. Piso Col. Roma México D.F.
Tel: 211 46 91

Hidro Industrial
Estenógrafos 38 Col Sifón México D.F.
Tel: 633 4086, 633 22 10

Kleinfelder México, S.A. de C.V.
Cubilete 2963-202 Guadalajara Jalisco
Te: (01 3) 121 6613 en el D.F. 57494 30

Servicios y Productos Internacionales, S.A. de C.V. "Microlimp"
Ana María Mier 9 Col. Del Valle México D.F.
Tel: 6875668

Sistemas Integrales Ambientales S.A. de C.V.
Pennsylvania 151 A Desp. 103 Col. Parque San Andrés Coyoacán
Tel: 5 44 6717

Tecnología Especializada de Control Ambiental S.A. de C.V.
Alvaro Obregón 103 Desp 604, Zona Centro Tampico, Tam.
Tel: (01 12) 12 43 66, 12 79 72

Tlali, Ingeniería de Suelos
Cantú 11 4to piso Col. Anzures, México D.F. Tel: 2 55 35 25, 34 60

ANEXO C SISTEMA DE BIOVENTEO

