



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

"TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR
GASOLINA, DIESEL, PETRÓLEO CRUDO Y
COMBUSTIBLE"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO
P R E S E N T A :
JOAQUÍN DURÁN PÉREZ

ASESOR: I.O. ARIEL BAUTISTA SALGADO

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7
2EJ
274937



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
 CUAUTITLAN



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen Garcia Mijares
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Tratamiento de suelos contaminados por gasolina,
 diesel, petróleo crudo y combustóleo"

que presenta el pasante: Joaquín Durán Pérez
 con número de cuenta: 9101523 para obtener el TITULO de:
Ingeniero químico

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 8 de Diciembre de 199 9

PRESIDENTE I.O. Ariel Bautista Salgado

VOCAL I.O.M. Rafael Sampere Morales

SECRETARIO M.enC. Elizabeth Teriz García

PRIMER SUPLENTE I.O. Miriam Rivas Salgado

SEGUNDO SUPLENTE I.O. Margarita Alonso Espinosa

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES:

Joaquín y Norma por darme la oportunidad de existir y brindarme su apoyo en cada momento de mi vida, además de su esfuerzo y dedicación en mi formación como ser humano.

A MIS HERMANOS:

Luis, Juan Antonio y Alheff por ser partícipes de esta epopeya que es mi vida y por compartir alegrías y tristezas durante varios años más.

A MI ASESOR:

Ing. Ariel Bautista Salgado por su apoyo y consejos para la elaboración de esta Tesis.

A LA SUBGERENCIA DE APOYO OPERATIVO Y CONTINGENCIAS DE PEMEX-REFINACION:

Por el apoyo atorgado y en especial al *Ing. Carlos Rivera Tafoya* por brindarme su amistad y compartir sus conocimientos para la realización de este trabajo.

A MIS MAESTROS Y AMIGOS DE LA FES-CUAUTITLÁN:

Por compartir una etapa de nuestras vidas juntos aprendiendo y disfrutando cada instante.

A TODOS ELLOS, GRACIAS.

**"TRATAMIENTO DE SUELOS
CONTAMINADOS POR GASOLINA,
DIESEL, PETRÓLEO CRUDO Y
COMBUSTÓLEO"**

ÍNDICE

| | Pág. |
|---|-----------|
| Introducción. | 6 |
| Alcance. | 9 |
| Capítulo I. Marco Normativo. | 10 |
| 1.1. Nacional. | 10 |
| 1.2. Internacional. | 18 |
| Capítulo II. Suelo, Subsuelo y Aguas Subterráneas. | 20 |
| 2.1. Suelo y Subsuelo. | 20 |
| 2.2. Función del Suelo. | 20 |
| 2.3. Características de los Suelos. | 21 |
| 2.3.1. Tipos de Suelo. | 21 |
| 2.3.2. Composición. | 23 |
| 2.3.3. Perfil del Suelo. | 23 |
| 2.3.4. Infiltración. | 25 |
| 2.3.5. Permeabilidad. | 25 |
| 2.3.6. Acidez. | 26 |
| 2.3.7. Reacciones Químicas. | 27 |
| 2.3.8. Organismos del Suelo. | 28 |
| 2.3.9. Descomposición de Materia Orgánica. | 29 |
| 2.4. Aguas Subterráneas. | 30 |
| 2.4.1. Nivel Freático. | 30 |
| 2.4.2. Acuíferos. | 30 |
| 2.4.3. Distribución del Agua Subterránea. | 31 |

| | |
|--|----|
| Capítulo III. Contaminación de Suelos. | 33 |
| 3.1. Contaminación y Contaminante. | 33 |
| 3.2. Fuentes de Contaminación. | 33 |
| 3.3. Comportamiento del Contaminante en el Suelo. | 35 |
| 3.3.1. Características Químicas y Físicas de Gasolina, Diesel, Crudo y Combustóleo. | 35 |
| 3.3.1.1. Toxicidad de los Principales Componentes de la Gasolina, Diesel, Crudo y Combustóleo. | 37 |
| 3.3.2. Dispersión de Contaminantes en Suelos y Aguas Subterráneas. | 38 |
| 3.4. Criterios para el Tratamiento de Suelos. | 41 |
| 3.4.1 Criterios sobre Niveles de Limpieza para el Tratamiento de Suelos. | 42 |
| 3.4.2 Criterios para Aguas Subterráneas. | 51 |
| Capítulo IV. Evaluación del Sitio Contaminado. | 52 |
| 4.1. Detección, Localización y Antecedentes de la Contaminación. | 52 |
| 4.2. Estudios de Caracterización. | 54 |
| 4.2.1. Caracterización del Sitio. | 54 |
| 4.2.2. Características del Contaminante. | 57 |
| 4.2.3. Muestreo. | 59 |
| 4.3. Estudios de Evaluación de Riesgo y de Impactos Ambientales. | 64 |
| Capítulo V. Tecnologías para el Tratamiento de Suelo y Aguas Subterráneas. | 68 |
| 5.1. Tratamiento Biológico (Biorremediación). | 70 |
| 5.1.1. Técnicas <i>In Situ</i> | 88 |
| 5.1.2. Biorremediación <i>Ex Situ</i> | 94 |
| 5.1.2.1. Landfarming (Biolabranza). | 95 |
| 5.1.2.2. Landfill. | 96 |

| | |
|---|-----|
| 5.2. Tratamientos Físico/químicos. | 99 |
| 5.2.1. Extracción Hidráulica de Hidrocarburos y Agua Subterránea. | 99 |
| 5.2.2. Extracción de Vapor. | 101 |
| 5.2.3. Tratamientos Termales. | 105 |
| 5.2.4. Lavado de Suelos. | 109 |
| 5.2.5. Incorporación de Asfalto y Cemento. | 112 |
| 5.2.6. Confinamiento. | 114 |
| 5.2.6.1. Aislamiento. | 114 |
| 5.2.6.2. Microencapsulamiento. | 117 |
| | |
| Capítulo VI. Selección del Tratamiento para Suelos Contaminados por Gasolina, Diesel, Crudo y Combustóleo. | 120 |
| Análisis de la Información y Propuestas. | 124 |
| Conclusiones. | 127 |
| Glosario y Abreviaturas. | 129 |
| Bibliografía. | 135 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| 1. pH de Algunos Minerales del Suelo. | 27 |
| 2. Características de las Gasolinas. | 36 |
| 3. Características del Diesel. | 37 |
| 4. Características Toxicológicas. | 38 |
| 5. Capacidad de Adsorción, Volatilización y Solubilidad de los Compuestos más Comunes en las Gasolinas. | 40 |
| 6. Límites Máximos Permisibles de Concentraciones de Contaminantes (EPA). | 43 |
| 7. Niveles de Limpieza de Suelos en los Estados Unidos. | 44 |
| 8. Criterios para Tratamiento de Suelos Contaminados (CCME). | 45 |
| 9. Niveles Máximos de Limpieza (ppm) para TPH's y BTEX por Encima del Nivel Freático. | 47 |
| 10. Resultados del Muestreo del Ejemplo 1. | 48 |
| 11. Concentraciones Máximas de Limpieza del Ejemplo 1. | 49 |
| 12. Criterios de Limpieza (PROFEPA). | 50 |
| 13. Criterios para Cuerpos de Agua (ppm). | 51 |
| 14. Tipo de Bacterias Factibles Para la Biorremediación. | 78 |
| 15. Aplicación de Técnicas de Tratamiento de Suelos. | 121 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| 1. Diagrama Triangular de Tipos de Suelo en Base a su Textura. | 22 |
| 2. Perfil del Suelo. | 24 |
| 3. Bacteria en el Suelo. | 29 |
| 4. Acuíferos. | 31 |
| 5. Distribución del Agua Subterránea. | 32 |
| 6. Fuga en un Tanque de Almacenamiento. | 34 |
| 7. Perfil Estatigráfico. | 55 |
| 8. Distribución de la Contaminación. | 58 |
| 9. Muestreadores. | 61 |
| 10. Muestreador de Gases. | 62 |
| 11. Modelo Conceptual del Suelo. | 82 |
| 12. Diagrama de Flujo en el Proceso de Bioestimulación. | 93 |
| 13. Landfarming. | 96 |
| 14. Celda de Tratamiento Landfill. | 97 |
| 15. Sistema de Adsorción. | 98 |
| 16. Extracción Hidráulica. | 100 |
| 17. Pozo de Extracción de Gas. | 102 |
| 18. Sistema de Extracción de Vapor. | 103 |
| 19. Red de Tuberías del Sistema de Extracción. | 103 |
| 20. Sistema de Oxidación Catalítica. | 104 |
| 21. Homo Rotatorio. | 107 |
| 22. Homo de Lecho Fluidizado. | 108 |
| 23. Diagrama de Bloques del Proceso de Lavado de Suelos. | 110 |
| 24. Aislamiento de Suelo Contaminado. | 115 |
| 25. Trincheras de Aislamiento. | 116 |

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la Protección del Medio Ambiente se ha consolidado como una necesidad para cualquier sector de la producción. Miles de toneladas de residuos son vertidos, sin control, al suelo, subsuelo, aguas subterráneas (freáticas y acuíferos) provocando desequilibrios en la flora y fauna del lugar contaminado, tales como, transformaciones en sus ciclos de vida e incluso su desaparición.

No obstante, este medio ha encontrado la manera de disminuir los efectos producidos por los contaminantes a través de su degradación química y bioquímica.

Sin embargo, la contaminación ha rebasado los límites en que la naturaleza puede combatirla, por lo cual es tarea del ser humano realizar actividades preventivas y en su caso correctivas para disminuir, remediar o eliminar los deterioros causados por los agentes contaminantes. Por lo tanto, es trabajo del Ingeniero Químico y de especialistas en la materia (Ing. Ambiental, Geólogo, Biólogo, Ing. Civil, Químico, etc.) atacar el problema.

La contaminación en suelos es una área poco abordada, pero de vital importancia, pues de éstos se obtienen la mayoría de los alimentos que consumimos. Así, cualquier contaminante absorbido por un vegetal, directamente afecta al individuo que lo consuma.

Los suelos por su porosidad, son materiales absorbentes de compuestos líquidos, incluso de gases y sólidos, de ahí que los contaminantes puedan difundirse con gran propiedad. La gasolina, diesel, petróleo crudo y combustóleo (GDCC) son hidrocarburos fáciles de penetrar la corteza terrestre y dañar a los individuos de este hábitat.

La extensión de una fuga de material contaminante en los estratos del suelo puede alcanzar los sistemas acuíferos y extender la magnitud del deterioro hacia la calidad del agua destinada a usos productivos sociales, con lo que también se requieren de tecnologías de rehabilitación específicas para sistemas hidrológicos subterráneos. El

conocimiento preciso de la dinámica hidráulica del acuífero y la delimitación del área contaminada exige estudios especiales que revelen la dirección, magnitud y velocidad de las corrientes freáticas.

En lo que concierne a la naturaleza del contaminante resulta imprescindible un estudio detallado de sus características y propiedades, tales como densidad, punto de ebullición, punto de volatilización, viscosidad, etc., lo que combinado con la descripción detallada del suelo, definirán las técnicas de remediación aplicables.

La contaminación por GDCC con frecuencia se deriva de fugas y derrames de combustóleo tanto en ductos como en tanques de almacenamiento. Así, cuando se ha detectado un lugar contaminado por GDCC es prescindible aplicar técnicas de tratamiento de suelos para su remediación.

El desarrollo de las tecnologías para el tratamiento de suelo, subsuelo y aguas subterráneas, a nivel mundial se inició en los países desarrollados hace más de una década. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos, que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados peligrosos en concentraciones que sobrepasan los límites permitidos.

Con el propósito de proteger la salud de la humanidad, el hombre ha establecido como actividad prioritaria el desarrollo de técnicas de todo tipo para reducir los límites de contaminación en los suelos, subsuelos y cuerpos de agua.

En los Estados Unidos, el Departamento de Energía fue el encargado de organizar diferentes laboratorios públicos y privados para la realización de investigaciones tendientes a la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con desechos militares en las localidades que funcionaron como puntos estratégicos durante la Segunda Guerra Mundial.

Las actividades de investigación realizadas dieron como consecuencia diversas tecnologías de tratamiento, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento.

En México, aunque no se comenta de manera oficial, es evidente, que con frecuencia ocurren derrames de hidrocarburos como gasolina, diesel, crudo y

combustión o rupturas en tanques de almacenamiento de estos combustibles, lo que propicia evidentemente la infiltración al suelo.

En la década de los 90's se inició en México la identificación y saneamiento del suelo y subsuelo por hidrocarburos, con las limitantes que la economía lo ha permitido. De ahí el hecho que sobre este tema no se cuenta con experiencia amplia en la realización de estos trabajos.⁽³⁶⁾

Sin embargo, existen diferentes metodologías para la descontaminación de suelos, las cuales comprenden dos categorías, aquellas que involucran procesos físico/químicos y los biológicos. En las primeras se utilizan procesos físicos y químicos para estabilizar, inmovilizar o remover los contaminantes, por otra parte, los biológicos aprovechan la acción microbiana para la desintegración de los contaminantes.

Las tecnologías pueden llevarse a cabo en el lugar afectado, denominadas técnicas In Situ (En el lugar) o trasladar el material contaminado a otro lugar previamente acondicionado para su posterior tratamiento, denominadas Ex Situ (Fuera del lugar).

Desgraciadamente en México contamos con grandes volúmenes de suelos contaminados por presencia de GDCC, algunos detectados, pero otros no se han contabilizado. Últimamente cuando hablamos de contaminación, nos referimos específicamente de agua y aire sin pensar que abajo se encuentran grandes toneladas de contaminantes que pueden repercutir enormemente en la salud de los seres vivos, incluyendo al ser humano. Hablando específicamente de GDCC son hidrocarburos compuestos de varios elementos detectados como materiales peligrosos para la salud del ser humano, entre ellos el benceno, antraceno, tolueno, xilenos, benzopiridenos entre otros, los cuales son importantes eliminar en los suelos.

Por todo lo anterior, resulta una amenaza el contar con sitios contaminados, de ahí el hecho de su tratamiento. Las técnicas hasta ahora utilizadas ofrecen ventajas y desventajas tanto en lo económico como lo técnico, por lo cual la tesis abarca algunas de las tecnologías actualmente utilizadas en el tratamiento de suelos contaminados por presencia de GDCC.

ALCANCE

El presente trabajo tiene el propósito de estudiar algunos sistemas de tratamientos de suelos, subsuelos y aguas subterráneas, contaminados por gasolina, diesel, petróleo crudo y combustóleo (GDCC); y proponer aquellas tecnologías aplicables técnicamente para cierto caso de contaminación en suelos por presencia de algún combustible antes citado. Así también, como describir el procedimiento para llevar a cabo un tratamiento de suelos. Todo esto, con la finalidad de disminuir la concentración de los contaminantes y preservar el medio ambiente, incluyendo al ser humano.

Por lo tanto, para alcanzar estos propósitos, el contenido de la Tesis describe en los primeros capítulos, el Marco Normativo Nacional e Internacional tal como, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y las Normas Oficiales Mexicanas, aplicable a suelos y aguas subterráneas, algunas características del suelo y de los contaminantes necesarias para entender el problema de la contaminación, así como el comportamiento de los principales compuestos de GDCC.

En los Capítulos siguientes se explica el proceso de evaluación de suelos, siendo esta etapa una de las más importantes en el procedimiento para realizar el tratamiento, pues comprende el estudio de las condiciones en las que se encuentra el área afectada y es una de las herramientas para elegir el método de descontaminación más apropiado.

Posteriormente se describen las técnicas de tratamiento recientes, aplicables a la remediación de los sitios contaminados con GDCC, ya sea in situ o ex situ, indicando sus ventajas y desventajas. Por último, se proponen las tecnologías más viables para la eliminación o reducción de los diferentes contaminantes en el suelo, subsuelo y aguas subterráneas para cualquier tipo de contaminación por GDCC.

CAPÍTULO I

"MARCO NORMATICO"

CAPÍTULO I

MARCO NORMATIVO

Dada la escasa experiencia que se registra en México sobre el manejo de residuos peligrosos y, en menor escala aún, en lo que concierne al tratamiento de suelos contaminados, la legislación no los regula en forma específica y comprensiva, por lo que se ha estimado conocer la experiencia internacional sobre la materia, comentando las leyes de algunos países que presentan cierto desarrollo sobre el particular.

1.1 NACIONAL .

Para el Tratamiento de suelos, subsuelo, aguas subterráneas (freáticas y acuíferos) contaminados, tiene sus bases legales dentro de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley de Agua Nacionales, sus Reglamentos y Normas Técnicas Ecológicas.

LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO

La LGEEPA es un documento que regula las actividades que se refieren a la preservación y restauración del Equilibrio Ecológico, así como la protección al ambiente, en el territorio Nacional y las zonas en que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Entró en vigor el 1º de marzo de 1988 derogando a la "Ley Federal de Protección al Ambiente" la cual fue promulgada en 1982.

La Ley está integrada por seis títulos desglosados de la siguiente manera:

- I. Título Primero: Disposiciones Generales
- II. Título Segundo: Biodiversidad.
- III. Título Tercero: Aprovechamiento sustentable de los elementos naturales.

IV. Protección al Ambiente.

V. Participación sustentable de los elementos naturales.

VI. Medidas de Control, Seguridad y Sanciones.

Los artículos que hacen mención al tema que se trata en esta Tesis son:

TÍTULO PRIMERO. Cap. I. Art. 1.

La Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la prevención y restauración del equilibrio ecológico. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

Fracción III La preservación, restauración y el mejoramiento al ambiente.

Fracción V El aprovechamiento sustentable, la preservación y en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas.

TÍTULO SEGUNDO. Cap. II. Art. 78.

En aquellas áreas que presenten procesos de degradación o graves desequilibrios ecológicos, La Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) deberá formular y ejecutar programas de restauración ecológica, con el propósito que se lleven a cabo las acciones necesarias para la recuperación y el restablecimiento de las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los procesos naturales que en ella se desarrollaban. En estas zonas la SEMARNAP promoverá en el Ejecutivo Federal la expedición de declaratorias para el establecimiento de zonas de restauración ecológica. Las declaratorias deberán publicarse en el Diario Oficial de la Federación e inscribirse en el Registro Público de la Propiedad correspondiente y han de ser resultado de los estudios necesarios que justifiquen su establecimiento.

TÍTULO TERCERO. Cap. II. Prevención y aprovechamiento sustentable del suelo y sus recursos. Art. 98.

Para la preservación y aprovechamiento sustentable del uso del suelo se consideran los siguientes criterios:

Fracción V En las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse acabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas.

Fracción VI La realización de las obras públicas o privadas que por si mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

TÍTULO CUARTO. Cap. I. Disposiciones Generales. Art. 109 Bis.

La Secretaría, en los términos que señalen los Reglamentos de esta Ley, deberá integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de su competencia, coordinar los registros que establezca la Ley y crear un sistema consolidado de información basado en las autorizaciones

TÍTULO CUARTO. Cap. III. Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos. Art. 117.

Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios:

Fracción II Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.

TÍTULO CUARTO. Cap. III. Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos. Art. 120.

Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a la regulación federal o local:

Fracción VI Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos.

TÍTULO CUARTO. Cap. IV. Prevención y Control de la Contaminación. Art. 134.

Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

Fracción V. En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que pueden ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

TÍTULO CUARTO. Cap. IV. Prevención y Control de la Contaminación. Art. 136.

Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

- I.- La contaminación del suelo.
- II.- Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos.
- III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.

TÍTULO CUARTO. Cap. IV. Prevención y Control de la Contaminación. Art. 139.

Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

Art. 140.

La generación, manejo y disposición final de residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

TÍTULO CUARTO. Cap. VI. Materiales y Residuos Peligrosos. Art. 151.

La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contraten los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría y los residuos sean entregados a dichas empresas, la responsabilidad por las operaciones será de estas, independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los generó.

Art. 152 BIS.

Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzcan contaminación del suelo, los responsables de dichas operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable a la zona respectiva.

REGLAMENTOS DE LA LGEEPA.

Existen a la fecha 5 Reglamentos vinculados directamente con la LGEEPA y cada una de las leyes complementarias y/o supletorias consigna sus propios reglamentos que instrumentan la interpretación y aplicación de la correspondiente Ley.⁽²⁹⁾

Para este caso en particular los Reglamentos aplicables son:

- A) Reglamento de Residuos Peligrosos.
- B) Reglamento de Transporte de Residuos Peligrosos.
- C) Reglamento de Aguas Nacionales.

Es importante hacer notar, que en la contaminación de suelos, los componentes de GDCC no son considerados propiamente como residuos, porque según la LGEEPA un Residuo es:

"Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó".⁽¹⁹⁾

Sin embargo, estos componentes a pesar que no son residuos, sí son materiales peligrosos por su grado de toxicidad, por lo cual se toman en cuenta los Reglamentos sobre Residuos Peligrosos.

REGLAMENTO DE LA LGEEPA EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS

El Reglamento establece las obligaciones a las que están sujetos los generadores de residuos , de igual manera regula el almacenamiento, transporte, recolección y la disposición final de los residuos, incluyendo su confinamiento.

Los artículos que aplican en el tema de la tesis son los siguientes:

Cap. III. Del Manejo de Residuos Peligrosos. Art. 42.

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

El aviso por escrito a que se refiere el párrafo anterior deberá comprender:

- I. Identificación, domicilio de los propietarios, administradores o encargados de los residuos peligrosos de que se trate.
- II. Localización y características del sitio donde ocurrió el accidente.

- III. Causas que motivaron el derrame, infiltración, descarga o vertido.
- IV. Descripción precisa de las características físico-químicas y toxicológicas, así como, cantidad de los residuos peligrosos derramados, infiltrados, descargados o vertidos.
- V. Acciones realizadas para la atención del accidente.
- VI. Medidas adoptadas para la limpieza y restauración de la zona afectada
- VII. Posibles daños causados a los ecosistemas.

NORMAS OFICIALES MEXICANAS

Las Normas Oficiales Mexicanas detallan los aspectos metodológicos, de niveles de concentración o magnitud de contaminantes, cuando es el caso, logística, alcances y campos de aplicación.⁽²⁴⁾

NOM-052-ECOL/93.

Establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Indica que es necesario definir cuales son esos residuos identificándolos y ordenándolos por giro industrial y por proceso, los generados por fuente no especificada, así como los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Se consideran residuos peligrosos a aquellos que presenten una o más de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y/o biológico infecciosas (características CRETIB).

Un Residuo se considera corrosivo: cuando su pH este en el rango de $\text{pH} < 2$ y $\text{pH} > 12.5$.

Un residuo se considera reactivo cuando en condiciones normales (25 °C) al contacto con el agua, con ácidos y bases fuertes, en una relación 5:1, 5:3, 5:5, reaccione violentamente formando vapores, gases o humos.

Un residuo se considera explosivo cuando tiene una constante de explosividad mayor o igual al de dinitrobenceno.

Un residuo se considera tóxico cuando se somete a la prueba descrita en la norma NOM-053-ECOL/93.

Un residuo se considera inflamable , siendo líquido, cuando su punto de inflamación sea inferior a 60 °C; siendo sólido o gas, cuando sea capaz de producir fuego por fricción.

Un residuo se considera que es biológico infeccioso cuando contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección.

NOTA:

La mezcla de un residuo peligroso con un residuo no peligroso será considerada residuo peligroso.

NOM-053-ECOL/93.

Establece el procedimiento para llevar a cabo las pruebas de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

NOM-054-ECOL/93.

Establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos.

Se clasifican los residuos peligrosos en diversos grupos reactivos, y en base a su código se relacionan en tablas de incompatibilidad.

NOM-055-ECOL/93., NOM-056-ECOL/93. NOM-057-ECOL/93. NOM-058-ECOL/93.

Establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, su construcción y operación.

LEY DE AGUAS NACIONALES

La Ley de Aguas Nacionales es creada y reglamentada por la Comisión Nacional de Agua. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de Diciembre de 1992, consigna el Título Séptimo, Prevención y control de la contaminación.⁽³⁹⁾

Los artículos de interés para el tema de la Tesis, son :

TÍTULO SÉPTIMO. Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas.

Art. 86. La Comisión Nacional de Agua tendrá a su cargo:

- I. Promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura federal y los servicios necesarios para la preservación, conservación y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas respectivas y las condiciones particulares de descarga, en los términos de la ley.
- II. Formular programas integrales de protección de los recursos hidráulicos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua.
- VI. Promover o realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos, materiales y sustancias tóxicas, y lodos producto de los tratamientos de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo.

REGLAMENTO DE AGUAS DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES

El Artículo que se refiere a las aguas subterráneas en suelos contaminados es:

TÍTULO SÉPTIMO: Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas.

Art. 150.

La Comisión en el ámbito de su competencia, promoverá las medidas preventivas de control para evitar la contaminación de las aguas superficiales o las del subsuelo por materiales y residuos peligrosos.⁽³⁰⁾

1.2. INTERNACIONAL .

Por la poca información sobre legislación en materia de suelos contaminados en México, es importante la revisión de la existente internacionalmente. Algunas Organizaciones que manejan el tema son las siguientes.^(30,34)

- CANADÁ.

Canadian Environmental Protection Act. (CEPA)

Clean Air Act. Environmental

Contamination Act. Fishing Act.

Canadian Water Act.

- ESTADOS UNIDOS.

El Estados Unidos el órgano encargado de controlar y coordinar los esfuerzos en el tratamiento de suelos contaminados es la Environmental Protection Agency (EPA).

Las mas importantes de estas Leyes son:

RESOURCE CONSERVATION AND RECOVERY ACT. (RCRA)

Subtítulo I : Regula los productos del petróleo y las sustancias tóxicas almacenadas en tanques subterráneos. EL Objetivo de éste, es prevenir derrames y contaminación de mantos acuíferos. Bajo lo señalado en el Subtítulo I, la EPA ha desarrollado estándares para nuevos tanques y nuevas normas para la prevención y detección de derrames, clausuras y responsabilidad financiera, así como las acciones correctivas en todos los sitios con tanques subterráneos.

COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL RESPONSE, COMPENSATION AND LIABILITY ACT - CERCLA O SUPERFUND-

Creada para facilitar los problemas de limpieza de sitios contaminados que resultan de accidentes durante la transportación de los residuos peligrosos y en los sitios de donde se han encontrado depósitos clandestinos de residuos y los propietarios no han sido detectados.

Faculta a la EPA para llevar a cabo los trabajos de restauración o en su caso, obligar a los responsables del daño, recuperar los costos erogados por los trabajos de restauración y conducir el monitoreo en caso de fugas o derrames.

CAPÍTULO II

"SUELO, SUBSUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS"

CAPÍTULO II

SUELO, SUBSUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

2.1. SUELO Y SUBSUELO.

Desde una perspectiva científico-tecnológico, el suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la tierra. Constituido por varias capas (horizontales) que sostienen a las plantas y a otro tipo de organismos, estén o no relacionados con éstas.⁽⁴⁾

Existe una gran controversia para definir lo que es el suelo y subsuelo, pues suelo se refiere a la superficie y subsuelo hacia la profundidad, sin existir una referencia para saber que tan profundo es el suelo y desde donde empieza el subsuelo.

Algunos Técnicos proponen que el suelo se refiere a la capa superficial donde se encuentran los organismos, tanto vegetales como animales, y por consecuencia el subsuelo se refiere a las capas inferiores a ésta. Para mayor simplicidad, en la tesis se manejará solamente el término de suelo refiriéndonos también al subsuelo, porque no pueden ser entidades separadas.

2.2 FUNCIÓN DEL SUELO.

El suelo, dentro del medio ambiente tiene diversas funciones, tales como:

1. Filtro amortiguador y transformador.
2. Productor de alimentos.
3. Hábitat biológico y reserva genética.
4. Fuente de materias primas.

Una de las principales funciones del suelo, es servir como filtro que limpia el agua de lluvia y recarga los acuíferos protegiéndolos contra la contaminación. El agua de lluvia

arrastra un sin número de compuestos y durante su recorrido, éstos son retenidos en el suelo.

Algunos compuestos son transformados por la población microbiana nativa antes de llegar a los acuíferos . Sabiendo de antemano que los acuíferos son la fuente principal de suministro del agua a las poblaciones, queda sobreentendido la importancia del cuidado que se tiene hacia los suelos.

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida del hombre y los animales, permite la implantación de las raíces de las plantas y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende de la disponibilidad y el buen estado de los suelos.

El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico y reserva genética. Se pueden desarrollar gran cantidad de vegetales y animales que forman parte de la cadena alimenticia y constituyen la riqueza de la biodiversidad, por lo que deben ser protegidos de su posible extinción. Además, también son fuente de materia primas para la industria y la vida en general, por ejemplo para la industria minera, industria petrolera, industria agrícola, etc.^(17, 26, 10)

Por todo lo anterior, se comprueba la necesidad de prevenir el daño al suelo y remediarlo cuando esté afectado, pero nunca destruirlo, debido a que es un recurso natural difícilmente renovable.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS.

2.3.1 TIPOS DE SUELOS.

El suelo en base a su textura, es decir, dependiendo del tamaño de partícula, se clasifica en:

1. Arcilloso.
2. Limoso.
3. Arenoso.

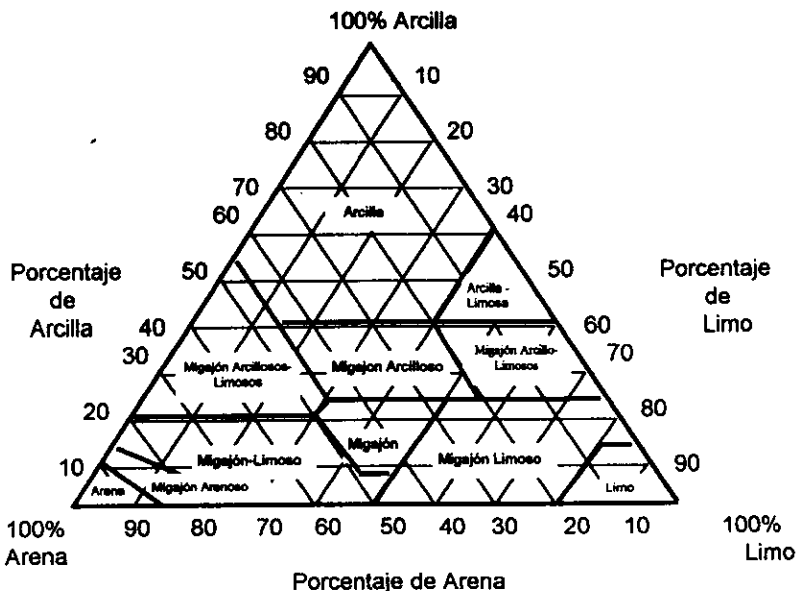
Los suelos arcillosos se han integrado por partículas pequeñas, procedentes de la desintegración de las rocas como el granito. Entre cada una de estas partículas existe un espacio reducido, por lo que presentan una mayor cohesión entre ellas, haciendo al suelo impermeable y pegajosos (barro); provocando una gran retención de agua, aire, y en éste caso de contaminantes. Se considera arcilloso si el tamaño de la partícula es inferior a 0.002 mm.

En el suelo limoso las partículas se encuentran en el rango 0.002-0.050 mm. Los suelos limosos tienen gran capacidad para retener agua; liberan fácilmente los nutrientes solubles y presentan poca tendencia a adherirse a otras partículas.

Los suelos arenosos están constituidos por partículas grandes e insolubles en el agua. El tamaño de la partícula es mayor de 0.050 mm. Entre las partículas de arena existen grandes espacios, que permiten que el aire y el agua penetren con facilidad.⁽¹⁰⁾

Existen combinaciones entre las texturas del suelo forman otros tipos de suelos. Estas combinaciones se representan en un Diagrama Triangular dependiendo de los porcentajes de cada uno de las clases de texturas.

Fig. 1. Diagrama Triangular de Tipos de Suelo en Base a su Textura⁽³⁶⁾



2.3.2- COMPOSICIÓN.

El suelo es una mezcla compuesta principalmente por:

1. **Materia Mineral.**
2. **Materia Orgánica.**
3. **Agua.**
4. **Aire.**

La materia inorgánica es el componente más abundante en los suelos, representado el 45 % y está compuesto por minerales como magnesio, calcio, fósforo, calcio, flúor, silicio, etc.

La materia orgánica del suelo proviene de las raíces, residuos de plantas y organismos vivos o muertos. Generalmente los suelos están compuestos por el 5% de materia orgánica. La acumulación de materia orgánica es favorecida en áreas de precipitación abundante, baja temperatura y vegetación nativa de pastos. La materia orgánica tiene un gran impacto sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, por ejemplo, la descomposición de materia orgánica produce CO₂ que forma ácido carbónico, el cual aumenta la solubilidad de muchos compuestos del suelo.

La mayoría de los organismos del suelo y sus clases son influenciados por los niveles de materia orgánica. La mayoría de los organismos derivan su energía de los compuestos del carbono y del nitrógeno de la materia orgánica del suelo. Así, el aire se encuentra en una proporción del 25 % y proporciona el oxígeno necesario para llevar a cabo la respiración aerobia de los microorganismos presentes. El agua representa el 25 % en el suelo y es suministrada por la infiltración del agua de lluvia, representando el medio por el cual las plantas adquieren los nutrientes necesarios para su desarrollo.^(10, 34)

2.3.3 PERFIL DEL SUELO.

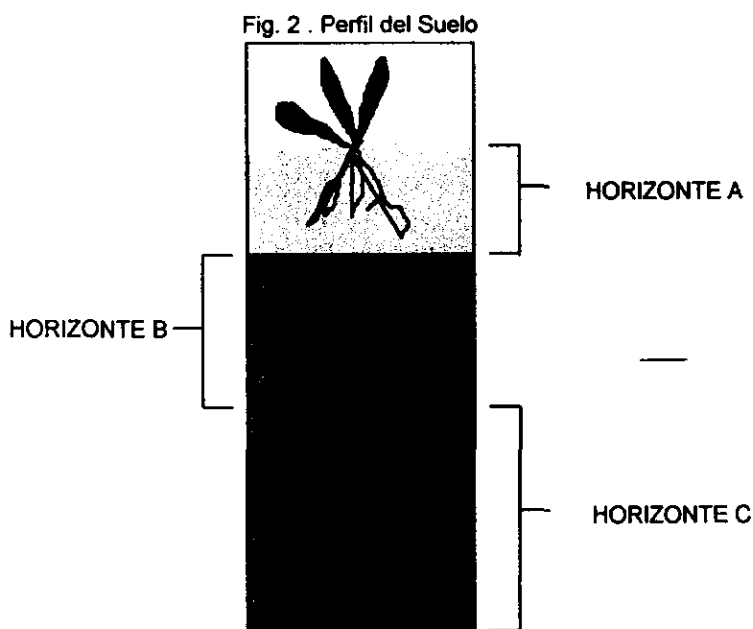
Si se realiza un corte en sección a través del suelo, se hallarán las capas horizontales. Un corte así se llama perfil y las capas horizontales. Cada suelo bien desarrollado tiene sus características peculiares de perfil, estas características se utilizan en la clasificación de los suelos.

Según la nomenclatura, los horizontes se designan por letras mayúsculas y siguiendo el orden alfabético, la primera capa que se observa en el suelo se designa como horizonte A y agrupa los horizontes ricos de materia orgánica y demás población microbiana, por lo cual es la capa fértil del suelo. Su color varía de gris a negro.

Debajo de éstos horizontes se distinguen los horizontes B, o de acumulación, es la capa que está formado por compuestos como óxidos de hierro, aluminio, arcillas, entre otros, y coloraciones que varían del pardo al rojo o al acre.

La roca madre, que aún no ha sufrido meteorización y sobre la cual destacan los horizontes citados, se denomina horizonte C. (Figura 2).

Las capas superiores del perfil de un suelo contienen generalmente considerables porcentajes de materia orgánica. El suelo subyacente, contiene mucho menos materia orgánica.



2.3.4 INFILTRACIÓN.

Se entiende por infiltración a la penetración de agua u otro compuesto líquido en el suelo.⁽³⁹⁾ Algunos factores que afectan la infiltración son:

1. Porcentaje de arena, limo y arcilla en el suelo. Las arenas gruesas favorecen la infiltración.
2. Cantidad de agua en el suelo. En general los suelos mojados tienen menor infiltración que los suelos secos.
3. Cantidad de materia orgánica en el suelo. Altas proporciones de materia orgánica sin descomponer propician una mayor infiltración.
4. Temperatura del suelo. Los suelos calientes permiten mayor infiltración que los fríos.
5. Estructura geológica. Dependiendo del arreglo entre las capas del suelo permitirán la infiltración, por ejemplo: los lentes de materiales impermeables que interceptan el agua y evitan su paso.

La magnitud de la infiltración:

- A) Muy lenta. Suelos con capacidad de infiltración menor de 0.25 cm/hr se consideran muy lentos. En este grupo están los suelos que tienen un alto contenido en arcilla.
- B) Lenta. La infiltración de 0.25-1.75 cm/hr. Este grupo incluye suelos con alto porcentaje de arcilla, de bajo contenido de materia orgánica.
- C) Media. Son infiltraciones de 1.75-2.5 cm/hr. La mayoría de los suelos en este grupo son migajones arenosos o migajones limosos.
- D) Rápida. Infiltración mayor de 2.5 cm/hr. Arenas y migajones limosos profundos y de buena agregación, están en este grupo.

2.3.5. PERMEABILIDAD.

La permeabilidad es la cualidad del suelo o de sus horizontes que se relaciona con la transmisión de un líquido o gas a todas las partes de su masa. Las características que determinan la rapidez con la cual un líquido o gas fluye a través del suelo, están

determinadas por la permeabilidad. La permeabilidad es un parámetro fundamental que gobierna el flujo de la contaminación en el suelo. Esencialmente, la permeabilidad es una medida de resistencia a fluir de un líquido, y es independiente de las propiedades del líquido.⁽¹⁰⁾

La permeabilidad es generalmente relacionada con la distribución del tamaño del grano y es directamente proporcional a la porosidad e inversamente proporcional al área superficial del sólido. Relativamente un suelo con grano grande tal como arenas es generalmente más permeable que granos pequeños como arcillas. Así, GDCC se movilizan principalmente a través de los macroporos. Esto significa que entre más grandes y numerosos sean los poros mayor será la permeabilidad.⁽³⁰⁾

2.3.6 ACIDEZ

El estado de acidez del suelo se conoce como una reacción del suelo. Los principales factores que determina la acidez de éste, son: las lluvias y las partículas minerales, principalmente

Los suelos pueden ser ácidos, neutros y alcalinos. La reacción del suelo tiene gran influencia en el desarrollo y productividad de los cultivos. Los suelos entre ligeramente ácidos y ligeramente alcalinos son los mejores para la mayoría de los cultivos. Además, la vida en los suelos es fuertemente influida por el pH, pues determinará el tipo de fauna y flora del lugar.⁽³⁴⁾

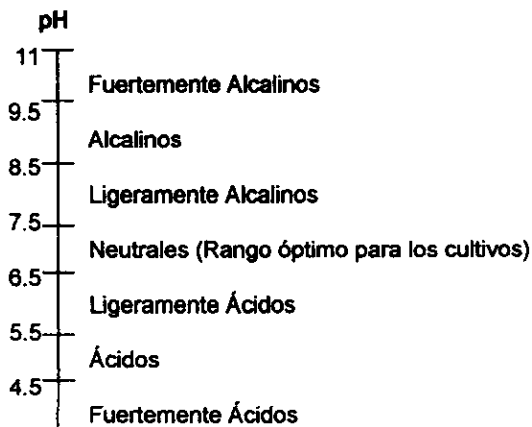


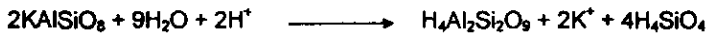
Tabla 1. pH de algunos Minerales del Suelo

| Muy Ácido | | | Ácido | | | Alcalino | | | Muy Alcalino | | |
|-----------|--|--|-------|--|---|----------|--|--|--------------|--|--|
| | | | Cu | | P | | | | | | |
| | | | Zn | | K | | | | | | |
| | | | Fe | | S | | | | | | |
| | | | Mn | | N | | | | | | |
| | | | B | | | Ca | | | | | |
| | | | | | | Mg | | | | | |
| | | | | | | Mo | | | | | |

2.3.7. REACCIONES QUÍMICAS.

Dentro del suelo se suscitan diferentes reacciones químicas que determinan algunas de sus características, por ejemplo reacciones de neutralización, las cuales determinan el pH, otras de óxido-reducción importantes en la nutrición de los microorganismos y de las plantas de la superficie⁽³⁹⁾. Algunos ejemplos de estas reacciones son:

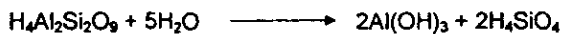
- De intercambio iónico y Ácido-Base.



KAlSiO_3 es ortoclasa, un feldespato. $\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$ es Kaolinita, una arcilla.

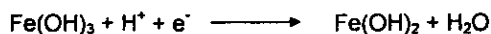
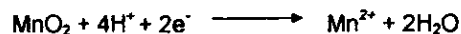


donde $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ es la albita, una arcilla.



donde $\text{Al}(\text{OH})_3$ es la gibsita.

- Óxido-Reducción.



2.3.8 ORGANISMOS DEL SUELO.

La población del suelo es predominantemente bacteriana, pero también incluye numerosos grupos de hongos, actinomicetos, protozoarios, algas y muchos animales invertebrados pequeños.⁽³⁴⁾

Las bacterias son organismos unicelulares que transforman el nitrógeno atmosférico a nitritos y nitratos que, disueltos en el agua, son asimilados por las plantas. Otras bacterias y organismos hacen asimilable el nitrógeno porque tienen la capacidad de descomponer los restos de plantas y animales y, de esta manera, lo reintegran al suelo. Por lo general las bacterias no se encuentran aisladas, sino que forman grupos o colonias en las capas superficiales, donde el oxígeno y el alimento son abundantes.

Los hongos abundan en suelos ácidos y tienen la capacidad que más del 50 % de los desechos de materia orgánica pueden ser transformados en sustancias útiles para plantas y animales.

Las algas son vegetales unicelulares que, debido a su capacidad de desprender oxígeno, ayudan a la aireación del suelo, sirven de alimento a otros organismos y, en algunos lugares húmedos, tienen la capacidad de fijar el nitrógeno.

Los protozoarios se encuentran en las capas superiores, donde el alimento y el oxígeno son abundantes, se alimentan de bacterias y algas, por lo cual si consumieran demasiadas bacterias podrían limitar la fertilidad del suelo.

Además de los organismos microbiológicos habitan en el suelo algunos invertebrados pequeños tales como algunos insectos y lombrices, etc.

- Factores que afectan crecimiento microbiano en el suelo.

Factores Físicos.

Temperatura.

Humedad.

Aireación.

Factores Químicos.

pH.

Materia Orgánica.

Nutrientes (Fósforo, potasio, nitrógeno, entre otros)

Factores Biológicos.

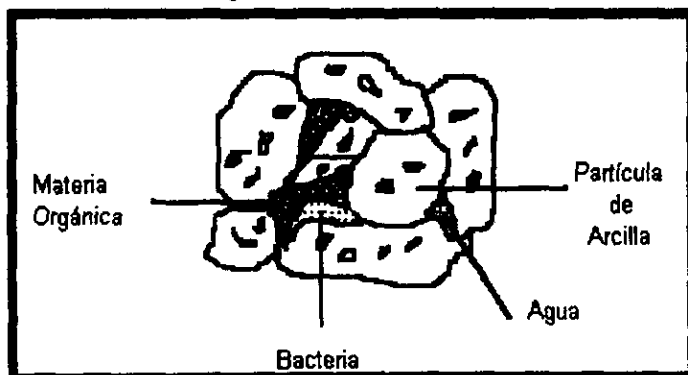
Comensalismo. Una especie se beneficia y la otra no.

Amensalismo. Una población daña a la otra.

- Importancia de los microorganismos .

- 1.Descomponen macro y micronutrientes.
- 2.Evitan la erosión del suelo.
3. Descomponen materia orgánica.
4. Proporcionan factores especiales (vitaminas para el desarrollo de las plantas a través de la descomposición).

Fig. 3 . Bacteria en el Suelo

**2.3.9 DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.**

La materia orgánica suministra energía y nutrientes para todas las formas de vida en el suelo, su descomposición es un proceso biológico que implica a los organismos del suelo. Las clases de organismos implicados en el proceso de descomposición son gobernadas por la naturaleza química de los residuos orgánicos y condiciones del suelo.⁽³⁰⁾

Características en el proceso de descomposición.

- El rango óptimo de temperatura es entre 21 y 38 °C. (Fuera de este rango retarda las actividades de los organismos).
- Cantidad de Humedad (Una cantidad excesiva de agua disminuye la cantidad y clases de microorganismos por la falta de aireación).
- Las bacterias y los actinomicetos son los organismos más importantes en la descomposición a pH mayor de 6. Los hongos predominan a pH menor de 6.

2.4. AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Aguas Subterráneas se le designa a todo cuerpo de agua que se encuentra en el suelo. Estos cuerpos de agua se forman principalmente por infiltraciones de agua de lluvia o agua superficial de lagos, ríos, depósitos artificiales, entre otros.⁽¹⁰⁾

Así, a partir de cierta profundidad todos los huecos entre las rocas acaban por llenarse de agua, el nivel asciende en razón de las infiltraciones, mientras que por encima están normalmente vacías.

2.4.1 NIVEL FREÁTICO.

Las aguas existentes en la superficie del suelo, por gravedad se infiltran en el suelo hasta una zona impermeable formada, en la cual, el agua es detenida y se empieza a acumular y el suelo empieza a saturarse.

El nivel entre una zona saturada de agua y una zona seca, se le conoce como nivel freático. Su profundidad puede variar dependiendo de las características del suelo y condiciones climatológicas.⁽³⁹⁾

2.4.2. ACUÍFEROS.

Los acuíferos son formaciones geológicas, cuyas estructuras permiten que fluyan por ellas cantidades apreciables de agua, en las condiciones naturales normales.^(10, 39)

Existen varios tipos de acuíferos, éstos son:

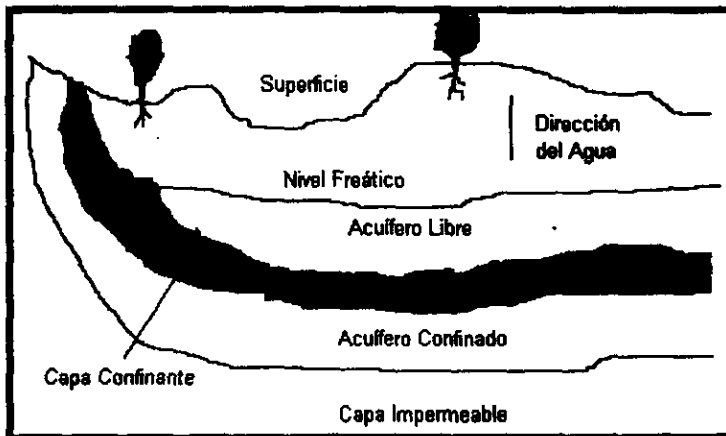
1.- Acuífero Confinado

Cuerpo de agua subterránea que se encuentra contenida entre dos capas de rocas (Capa confinante y capa impermeable), las cuales funcionan como límites para el paso de agua hacia una profundidad mayor o de la superficie. Así, la masa de agua tenderá a desplazarse paralelamente a las capas limitantes (Fig. 4.)

2.- Acuífero Libre

Cuerpo de agua subterránea, la cual puede desplazarse con libertad en cualquier dirección del suelo, sólo teniendo como capa limitante a la capa confinante o la capa impermeable.

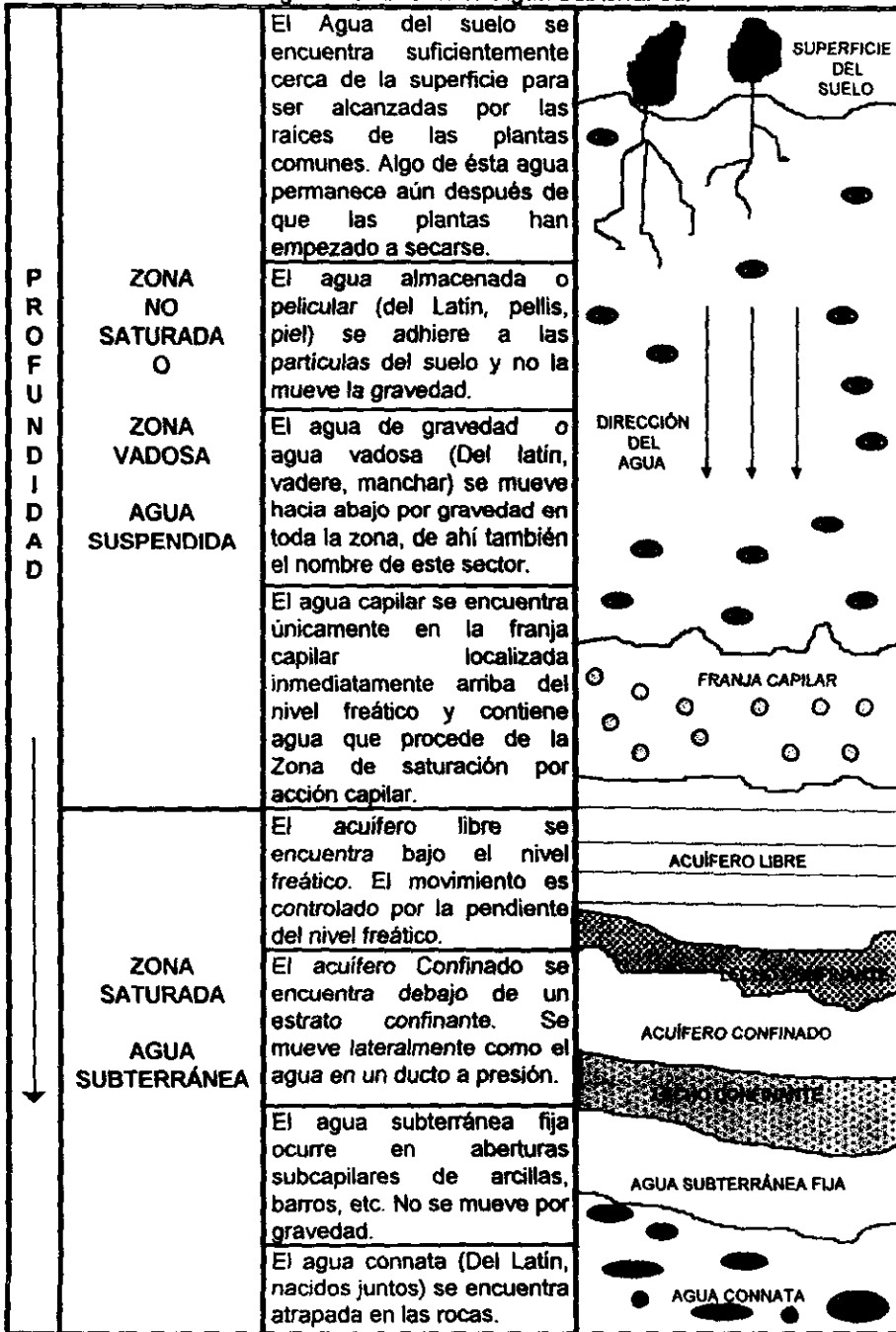
Fig. 4 Acuíferos



2.4.3. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Hemos hablado de los acuíferos por la importancia que tienen en el abastecimiento de agua potable a las poblaciones, sin embargo existen otras formaciones de agua en el suelo y Subsuelo distribuida entre la Zona no Saturada o Zona Vadosa y la Zona Saturada, que se describen en el siguiente cuadro.⁽³⁰⁾

Fig. 5. Distribución del Agua Subterránea.



CAPÍTULO III

"CONTAMINACIÓN DE SUELOS"

CAPÍTULO III

CONTAMINACIÓN DE SUELOS

3.1 CONTAMINACIÓN Y CONTAMINANTE.

Se entiende por contaminación, la adición de cualquier sustancia al medio ambiente en suficientes cantidades, que causen efectos sobre los seres humanos, los animales, la vegetación o los materiales y que se presenten en cantidades que sobrepasen los niveles normales en los que se encuentran en la naturaleza.⁽⁴⁾

Por lo tanto, de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), un contaminante es toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición o condición natural.⁽¹⁹⁾

Por lo tanto, la incorporación de gasolina, combustóleo, crudo y diesel, definitivamente son considerados contaminantes por la alteración que se realiza al medio ambiente del suelo, así como aguas subterráneas.

3.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN.

Existen varias industrias que manejan GDCC y son responsables de la contaminación en suelos y aguas subterráneas, sin embargo, una de las empresas que por naturaleza esta expuesta a sufrir este tipo de problemas, es la Industria petrolera, la cual presenta contaminación de suelos durante actividades de extracción refinación , petroquímica, transporte, distribución almacenamiento y comercialización.

En las actividades de extracción se observan derrames y acumulación de residuos de perforación y lodos aceitosos. En refinación y petroquímica se presentan derrames y

fugas en los tanques de almacenamiento, así como en otras plantas industriales donde también se presenta este tipo de problemas.

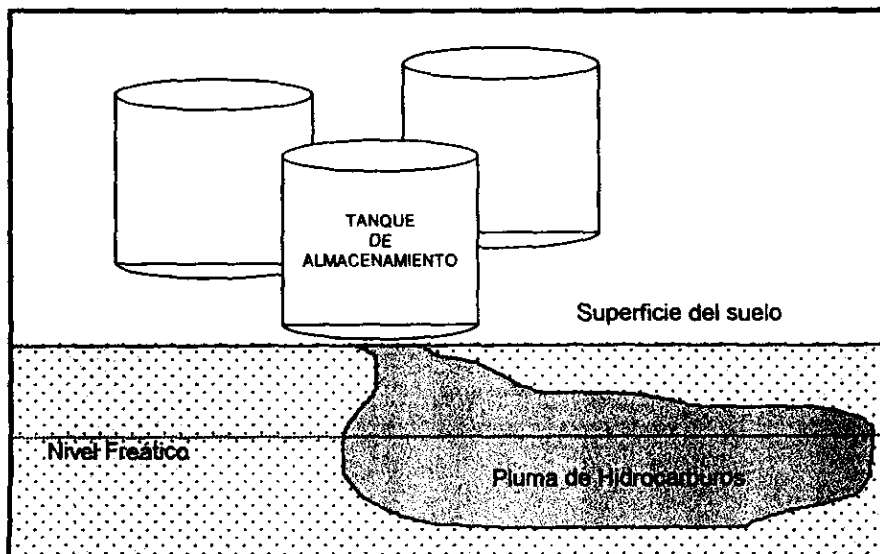
Las redes de ductos de distribución están siempre sujetas a riesgos de derrames, explosiones o incendios.

Otros derrames de hidrocarburos que ocurren accidentalmente y son menos considerados se refieren a las volcaduras de pipas y vagones de ferrocarril. Algunos problemas de contaminación que han sido producto de descargas de residuos se encuentran en zonas pantanosas, donde el nivel freático sube de manera sorprendente en la temporada de lluvias.

No solamente la Industria petrolera es causante de la contaminación de suelos por gasolina, combustóleo, crudo y diesel; la mayoría de las industrias de transformación utilizan éstos combustibles como fuente de energía, almacenándolos en tanques por varios días. Estos tanques pueden provocar fugas y contaminar al suelo, en varias ocasiones sin conocimiento de la empresa propietaria. ^(17, 20)

Otro caso similar sucede con los tanques subterráneos de las gasolineras, los cuales por su diseño son frecuentes las fugas.

Fig. 6. Fuga de un Tanque de Almacenamiento



3.3 COMPORTAMIENTO DEL CONTAMINANTE EN EL SUELO.

Para poder llevar a cabo un sistema de tratamiento de suelos, resulta importante conocer el tipo de contaminante que se encuentra impregnado en el mismo y de igual manera tener conocimiento de su comportamiento. Como sabemos, los combustibles referidos en este trabajo son mezclas de innumerables compuestos que presentan un cierto comportamiento individual dentro del suelo.

3.3.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE GASOLINA, DIESEL, CRUDO Y COMBUSTÓLEO.

Con el objeto de entender el comportamiento de los hidrocarburos en el suelo y aguas subterráneas, se presentan algunas características físicas y químicas de GDCC.

- Petróleo Crudo:

El petróleo crudo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos, sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geográfico y geológico. En México se cuenta con 3 tipos de petróleo, el Maya, Olmeca e Istmo.

- Maya: Petróleo Crudo pesado con densidad de 22° API y 3.3% de Azufre en peso.
- Istmo: Petróleo Crudo Ligero con densidad de 33.6° API y 1.3% de Azufre en Peso.
- Olmeca: Petróleo Crudo muy ligero con densidad de 39.3° API y 0.8% de Azufre en peso.

Los crudos pesados generalmente son hidrocarburos parafínicos de cadena grande y peso molecular alto. Por su parte los crudos ligeros contienen un porcentaje considerable de hidrocarburos aromáticos.

Así, cuando el petróleo crudo se presenta en el suelo y su proporción es mayor que el que puede reciclar este último, el petróleo se convierte en un contaminante presentando un impacto negativo, ya que sus componentes a altas concentraciones son considerados como materiales peligrosos por su efecto dañino a la salud. Ejemplo de estos son: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, naftaleno, antraceno, fenantreno, cresoles, fenol, ciclopentano, ciclohexano y etileno. Algunos de ellos son cancerígenos como el benceno, naftaleno, antraceno y fenantreno.^(14, 10)

En general los crudos, contienen un gran número de hidrocarburos con cadenas de más de 12 carbonos y en menor proporción de compuestos volátiles.

- Gasolina:

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos en una gasolina típica. Los principales componentes químicos incluyen las cadenas de los alcanos, los cicloalcanos, olefinas y los aromáticos.⁽¹⁴⁾

Las gasolinas son consideradas como los combustibles más tóxicos por su alto contenido de compuestos volátiles tales como el benceno, tolueno, xilenos, entre otros. Esto lo podemos comprobar con algunas características de las gasolinas producidas en México.

Tabla 2. Características de las Gasolinas⁽¹⁴⁾

| GASOLINAS PRODUCIDAS EN MÉXICO | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| - PROPIEDADES. | | | | |
| • Nombre Químico: Gasolina. | | | | |
| • Fórmula Química: C_5H_{12} - C_9H_{20} | | | | |
| • Peso Molecular: 107-114. | | | | |
| • Densidad: 42.63-47.12 lb/ft ³ . | | | | |
| • Presión de Vapor: 6.5 - 8.5 Psi. | | | | |
| • Punto de Ebullición: 23-204 °C. | | | | |
| TIPO DE GASOLINA | AROMÁTICO S % EN VOL. | OLEFINAS % EN VOL. | BENCENO % EN VOL. | PLOMO |
| Gasolina Pemex Magna | 30 | 15 | 4.9 | N.E. |
| Gasolina Nova Plus | 25 | 12 | 1.5 | N.E. |
| Gasolina Magna Sin | N.E. | N.E. | 4.9 | 0.01 gr/gal. |
| Gasolina Premium | 32 | 15 | 2 | 0.01 gr/gal. |

N.E.= No Especificado.

- Diesel.

El Diesel es un Líquido obtenido de una mezcla compleja de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos derivado de la destilación del petróleo. Esta integrado por hidrocarburos con mas de 12 carbonos en su cadena. Desde el punto de vista toxicólogo, el diesel cuenta con hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH's) y compuestos volátiles⁽¹⁴⁾. Algunas Características físicas y químicas se enuncian a continuación de los tipos de diesel que se producen en México.

Tabla 3. Características del Diesel⁽¹⁴⁾
DIESEL PRODUCIDO EN MÉXICO

| DIESEL PRODUCIDO EN MÉXICO | | |
|---|---------------------------------|---------------------|
| - PROPIEDADES: | | |
| • Nombre Químico: Diesel. | | |
| • Fórmula Química: C ₁₂ -C ₂₀ | | |
| • Peso Molecular: 236.53. | | |
| • Densidad: 53.02 lb/ft ³ . | | |
| • Punto de ebullición: 160-360 °C. | | |
| TIPO DE DIESEL | DIESEL DESULFURADO % EN PESO | AZUFRE % EN PESO |
| Diesel Desulfurado | 99.5 | 0.5 |
| Diesel Sin | 99.95 | 0.05 |

- Combustóleo:

El Combustóleo es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, olefinas, nafténicos y aromáticos producido por la destilación del petróleo. Esta integrado por compuestos de alto peso molecular, por lo cual su densidad es grande. Principalmente contiene hidrocarburos de cadena de 20 carbonos o más. Dentro de los compuestos tóxicos presentes se encuentran principalmente los PAH's.^(39, 10)

3.3.1.1.- TOXICIDAD DE LOS PRINCIPALES COMPUESTOS DE GDCC.

Cuando se presentan derrames de GDCC en el suelo, los habitantes de este hábitat sufre alteraciones o impactos en su forma de vida. Estos combustibles cuentan con algunos agentes tóxicos que modifican el ciclo de vida de la flora y fauna del lugar contaminado. Algunos microorganismos mueren por las altas concentraciones de ciertos

productos como, Benceno, Tolueno, PAH's y algunos metales pesados. Estos elementos inhiben el crecimiento de los microorganismos existentes en el suelo y algunos otros mueren.⁽³⁴⁾

En una zona que ha sido contaminada por GDCC es común las emisiones de los compuestos más volátiles a la atmósfera, resultando un peligro para las personas o animales que viven a los alrededores del lugar, además de los posibles riesgos de indigestión del suelo por algunos individuos. Ciertos compuestos son muy tóxicos para el ser humano, de ahí que se pretenda actuar lo antes posible ante estos accidentes. Algunos compuestos tóxicos para la salud humana se presentan en la tabla 4.

Tabla 4 Características Toxicológicas

| COMPUESTO | SISTEMAS U ORGANOS AFFECTADOS | EFFECTOS CANCERIGENOS |
|-------------|---|---|
| NIQUEL | Alergias Dermales Respiratorio Intestinal | Respiratorio Gastrointestinal Renal |
| VANADIO | Irritante de mucosas del tracto respiratorio y piel Hígado Médula Ósea Glándulas Suprarrenales | No Observado |
| PLOMO | Sistema Nervioso y Periférico | Leucemia |
| BENCENO | Sanguíneo Sistema Nervioso | Leucemia |
| TOLUENO | Hígado Riñones Sistema Nervioso | No Observado |
| ETILBENCENO | Hígado Riñones Sistema Nervioso | No Observado |
| XILENO | Hígado Sistema Nervioso | No Observado |

Fuente: Agencia para el Registro de Substancias Tóxicas y Enfermedades de los E. U.

3.3.2.- DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS.

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

En términos generales el comportamiento de los contaminantes está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente la densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que les rodea como el tipo de suelo, su permeabilidad, la porosidad, su contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también son de gran influencia.

Estas propiedades pueden variar incluso dentro de un mismo suelo debido a las heterogeneidades que pueden presentarse. La porosidad depende de factores tales como el tamaño y forma de la partícula, generalmente la porosidad de los suelos compuestos de partículas redondas de igual tamaño es mayor que la de los suelos conteniendo partículas angulares y de diferentes tamaños. Por ejemplo, la mayor parte del área metropolitana de la Cd. de México se encuentra asentada sobre sedimentos arcillosos (partículas pequeñas) que provocan una gran compactación y baja permeabilidad lo que limita el movimiento del agua o de contaminantes, por lo cual circulan en forma lenta, retardando la contaminación.⁽²⁴⁾

Así, cuando se produce un derrame de GDCC en el suelo, los componentes de estos combustibles puede existir en fase líquida, fase disuelta y fase vapor.

La fase líquida puede existir en el suelo como líquido residual inmóvil, absorbida por las partículas del suelo y en algunos casos solidificarse como el naftaleno y algunos otros compuestos aromáticos polinucleares de más de 4 anillos, los cuales se encuentran principalmente en las capas superiores. Así también, se puede encontrar esta fase como líquido libre en el espacio poroso. La Fase Disuelta puede estar presente en el agua del suelo o como capas residuales en la superficie del sólido. La fase vapor generalmente existe como vapores en el suelo, aunque también puede condensarse y ser absorbida por éste o ser disuelta en el agua. Las propiedades de los hidrocarburos presentes en el suelo serán las que determinarán el estado físico en que se encuentren, algunas de estas se presentan en la tabla 5, en la cual se muestra la capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de algunos componentes de la gasolina, y de esta manera es posible deducir el estado de agregación en el que se presentan los compuestos. Por ejemplo, los compuestos ligeros (aquellos cuya densidad es menor a la del agua) tienden a volatilizarse como el heptano, hexano, pentano, otros como los

compuestos pesados (aquellos cuya densidad es mayor al agua) como el antraceno, pireno son adsorbidos por las partículas del suelo principalmente, así también el benceno, tolueno pueden presentarse en fase vapor o bien disueltos en las aguas subterráneas.⁽³⁹⁾

Tabla 5. Capacidad de Adsorción, Volatilización y Solubilidad de los Componentes más Comunes de las Gasolinas⁽³⁹⁾

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

Fuente: Fleischer, 1986

Los hidrocarburos, por gravedad y fuerzas capilares descienden, algunos se concentran en la Zona Vadosa o no Saturada como los PAH's y otros compuestos ligeros se volatilizan, pero parte de los hidrocarburos llegan a los acuíferos. Los hidrocarburos ligeros tienden a formar una capa en forma de "nata" en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, como el benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, etc.; sin embargo parte de éstos se solubilizan en el acuífero.

Los compuestos pesados por el contrario, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección al flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad, como por ejemplo, Cloroformo, Cloruro de metileno, tricloroetileno, bifenilos policlorados y bencenos halogenados.

Una vez que los constituyentes han sido disueltos en el acuífero, la migración de éstos es controlado por procesos de advención y dispersión hidrodinámica.

Se denomina *advención*, al proceso en el cual los contaminantes se mueven de la misma manera que fluye el agua subterránea. La dispersión hidrodinámica es el resultado de dos fenómenos: la difusión molecular que ocurre por el movimiento del contaminante de zonas de alta concentración a zonas de baja concentración y el mezclado que se da por el flujo del agua subterránea.⁽²⁰⁾

Estos procesos son acelerados por la acción de precipitaciones pluviales y las altas temperaturas que imperan en algunas zonas.

Como se ha visto, el movimiento de los hidrocarburos es muy complejo por todas las variantes de *movilización* que pueden presentarse y que una simple ecuación matemática no nos daría la información necesaria para determinar el comportamiento de los constituyentes. Por dicha dificultad, se han utilizado simuladores para determinar el comportamiento del contaminante.

Los simuladores son modelos matemáticos complejos acondicionados en un paquete computacional. Para el tratamiento de suelos, los simuladores nos determinarán los cambios en la concentración de los contaminantes con el paso del tiempo, la dirección a donde *emigrarán*, con el fin de determinar el tipo de tratamiento necesario, así como medidas adicionales. Para la utilización de los simuladores necesitamos conocer algunas características del suelo, aguas subterráneas y del contaminante para lo cual se realiza un estudio en la zona afectada llamada "Evaluación", la cual se tratará más adelante.

3.4 CRITERIOS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS.

Para llevar a cabo trabajos sobre tratamiento de suelos contaminados se debe contar con estándares de limpieza aprobados por las Instituciones Ambientales, en México ésta tarea le corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). Los Estándares son niveles de limpieza para suelos y aguas subterráneas legalmente aprobados, es decir, concentraciones máximas de contaminantes, para considerar al suelo y aguas subterráneas limpios y no representar un riesgo al medio ambiente y el ser humano. Los estándares, primeramente son criterios y después en base a su efectividad se adoptan como regulaciones.

Hoy en día, no existen estándares para suelos contaminados, por lo cual para realizar trabajos sobre tratamiento de suelos se toma en cuenta algunos criterios. Estos criterios son propiamente límites referidos a concentraciones de contaminantes en el suelo, teniendo la finalidad de servir como guías para la protección y mantenimiento de suelos y aguas subterráneas de un sitio específico, basados en la experiencia y juicio profesional.^(15, 26)

3.4.1. CRITERIOS SOBRE NIVELES DE LIMPIEZA PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS.

A diferencia del agua o el aire en los cuales existen leyes específicas y normas federales que detallan los límites máximos permisibles para los contaminantes, en el caso de la contaminación del suelo no se han establecido niveles permisibles.

Sin embargo, las Autoridades Ambientales de diversos países han establecido algunos criterios provisionales de limpieza de suelos contaminados para llevar a cabo la evaluación y remediación de los mismos.

Los Criterios se concretan específicamente a aquellos compuestos peligrosos por su toxicidad para el medio ambiente del suelo y del hombre, presentes en GDCC. Para determinar las concentraciones máximas de limpieza, los compuestos de hidrocarburos se han clasificado en varios grupos, dependiendo de sus características físicas y químicas. Entre ellos se encuentran:

BTEX.- Grupo formado por Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos. Este grupo está considerado como los compuestos de mayor toxicidad.

PAH's.-(Polynuclear Aromatic Hydrocarbons) Grupo formado por hidrocarburos Aromáticos polinucleares, es decir, compuestos aromáticos policíclicos o de varios anillos. Entre éstos se encuentran el antraceno, fenantreno, naftaleno, benzopireno, etc.

TPH.-(Total Petroleum Hydrocarbons). Este grupo corresponde a la suma de todos los hidrocarburos impregnados en el suelo, subsuelo o agua subterránea.

VOC's.-(Volatile Organic Compounds) Este grupo corresponde a los compuestos volátiles monoaromáticos como el Benceno, Estireno, Xileno, Fenol, etc.

Compuestos Inorgánicos.- Grupo formado por metales pesados como plomo, vanadio, cadmio, níquel, mercurio, etc.

Los Criterios propuestos por Instituciones Ambientales están definitivamente en función de los niveles de toxicidad tanto para los organismos del suelo, como para el ser humano.⁽³⁸⁾

En Estados Unidos, la Institución Ambiental Federal dedicada a la Protección de Medio Ambiente es la Environmental Protection Agency (EPA), ella ha propuesto algunos Criterios para el Saneamiento de suelos contaminados, y algunos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Límites Máximos Permisibles de Concentraciones de Contaminantes⁽³⁴⁾

| CONTAMINANTE | CONCENTRACIÓN (ppm) |
|--|---------------------|
| Químicos Cancerígenos, Indicadores Totales (Benzoantraceno, Benzopireno, Benzofluoranteno, Dibenzoantraceno, Pireno) | 100 |
| TPH's | 500 |
| Benzopireno | 9 |
| Benceno | 14 |
| Bifenilos Policlorados totales | 23 |
| Cloruro de Vinilo | 43 |
| Arsénico | 7 |
| BTEX | 100 |
| PAH's | 500 |

Fuente: EPA

Sin embargo, cada Instituto Estatal de Protección al Ambiente de la Unión Americana posee sus propios criterios, dado que las características fisicoquímicas de los suelos difieren de un lugar a otro. Así, en algunos sitios los niveles de limpieza son más elevados debido a que existen ciertas características en los suelos capaces de disminuir las concentraciones de los contaminantes establecidos en los criterios de saneamiento de cada localidad^(34,36). Entre estas características podemos citar, a la población microbiana, precipitación pluvial, el tipo de suelo, entre otros.(Tabla 7)

Tabla 7. Niveles de Limpieza de Suelos en los Estados Unidos.⁽³⁹⁾

| ESTADO | NIVEL | REFERENCIAS |
|---------------------|---|---|
| Arkansas | TPH's = 100 ppm para diesel TPH's = 50 ppm para gasolina. BTEX < 10 ppm | -Petroleum contaminated soil sampling |
| Alabama | TPH's = 100 ppm | Alabama Dept. of Env. Admin. Code R. Water Quality Program. |
| Arizona | TPH's = 100 ppm Benceno = 130 ppm Tolueno = 200 ppm Etilbenceno = 68 ppm Xilenos = 44 ppm | Ninguna |
| California | TPH's = 10-100 ppm para gasolina. TPH's = 100-1000 ppm para Diesel. Benceno = 0.3-1 ppm Tolueno = 0.3-50 ppm Etilbenceno = 1-50 ppm Xilenos = 1-50 ppm | California LUFT Field Manual, State Water Resources Control Board, Sacramento. |
| Florida | TPH's = 500 ppm | Guidelines for Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Soils, Florida Dept. of Environmental Regulation. |
| Georgia | TPH's = 100-500 ppm BTEX = 20-100 ppm | Rules of Dept. of Natural Resources Environmental Protection Division. |
| Hawai | TPH's = 50 ppm | Ninguno |
| Illinois | Benceno = 0.025 ppm BTEX < 16.025 ppm | Guidance Manual for Petroleum-Related LUST Cleanups in Illinois. |
| Kansas | TPH's = 100 ppm Benceno = 1.4 ppm | Kansas Dept. of Health and Environment, UST Program. |
| Nueva Hampshire | TPH's = 10 ppm para gasolina BTEX = 1 ppm para gasolina TPH's = 100 ppm para otros hidrocarburos BTEX = 1 ppm para otros hidrocarburos | Policy for Management of Soils Contaminated from Spills/Releases of Virgin Petroleum Products. |
| Oklahoma | TPH's = 50 ppm BTEX = 10 ppm | Ninguno |
| Oregon | TPH's = 40-130 ppm para gasolina TPH's = 100-1000 ppm para diesel | Numeric Soil Cleanup Levels for Motor Fuel and Heating Oil (Draft) |
| Texas | TPH's = 50 ppm BTEX = 10 ppm | Ninguna |
| Vermont | Compuestos Volátiles = 20 ppm | Ninguna |
| Washington | TPH's = 100 ppm para gasolina TPH's = 200 ppm para Diesel Benceno = 0.1 ppm Tolueno = 4.0 ppm Etilbenceno = 3.0 ppm Xilenos = 2.0 ppm | Interim Underground Petroleum Storage Tank Removal and Remediation Guidelines. (Draft) Washington Dept. of Ecology. |
| Wisconsin | TPH's = 10 ppm | Ninguna |
| Virginia Occidental | TPH's = 100 ppm BTEX = 100 ppm | Ninguna |
| Wyoming | Menor de 10 ppm de TPH's para suelos localizados en áreas donde la profundidad del nivel freático se encuentra a menos de 50 pies y menor de 100 ppm de TPH's para suelos localizados en áreas donde la profundidad del nivel freático se encuentra a más de 50 pies. | Ninguna |

Estados Unidos, 1990

En Canadá, se presentó ante la *Canadian Council of Ministers of the Environmental (CCME)* un documento denominado *Interim Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites* (Criterios Provisionales para la Calidad Ambiental de Sitios Contaminados) propone concentraciones límites para la evaluación y remediación de suelos contaminados para una zona agrícola, residencial e Industrial.⁽¹⁵⁾

Los límites también varían de acuerdo con el uso del suelo, por ejemplo, si se utiliza para la agricultura, los límites de algunos compuestos son más rigurosos que los utilizados para una zona industrial, debido a la posible contaminación en las plantas si se cultivan en el lugar contaminado (Tabla 8).

Tabla 8. Criterios para Tratamiento de Suelos Contaminados⁽¹⁵⁾

| CONTAMINANTE | ZONA AGRÍCOLA | ZONA RESIDENCIAL | ZONA INDUSTRIAL |
|--|---------------|------------------|-----------------|
| | ppm | ppm | ppm |
| COMPUESTOS INORGÁNICOS | | | |
| Antimonio | 20 | 20 | 40 |
| Arsénico | 20 | 30 | 50 |
| Bario | 750 | 500 | 2000 |
| Berilio | 4 | 4 | 8 |
| Cadmio | 3 | 5 | 20 |
| Cromo | 750 | 250 | 800 |
| Cobalto | 40 | 50 | 300 |
| Cobre | 150 | 100 | 500 |
| Mercurio | 0.8 | 2 | 10 |
| Molibdeno | 5 | 10 | 40 |
| Níquel | 150 | 100 | 500 |
| Plata | 20 | 20 | 40 |
| Plomo | 375 | 500 | 1000 |
| Selenio | 2 | 3 | 10 |
| Talio | 1 | - | - |
| Titanio | 5 | 50 | 300 |
| Vanadio | 200 | 200 | 200 |
| Zinc | 600 | 500 | 1500 |
| Cianuro | 5 | 50 | 500 |
| Floruro | 200 | 400 | 2000 |
| Sulfuro | 200 | - | - |
| HIDROCARBUROS AROMÁTICOS MONOCÍCLICOS | | | |
| Benceno | 0.05 | 0.5 | 5 |
| Etilbenceno | 0.1 | 5 | 50 |
| Tolueno | 0.1 | 3 | 30 |
| Clorobenceno | 0.1 | 1 | 10 |
| 1,2-Diclorobenceno | 0.1 | 1 | 10 |
| 1,3-Diclorobenceno | 0.1 | 1 | 10 |
| 1,4-Diclorobenceno | 0.1 | 1 | 10 |
| Estireno | 0.1 | 5 | 50 |

| | | | |
|-------------------------------|------|-----|-----|
| Xilenos | 0.1 | 5 | 50 |
| COMPUESTOS FENÓLICOS | | | |
| No clorados (1) c/u | 0.1 | 1 | 10 |
| Clorofenoles (2) c/u | 0.05 | 0.5 | 5 |
| PAH's | | | |
| Antraceno | 0.1 | 1 | 10 |
| Pireno | 0.1 | 10 | 100 |
| benzofluoranteno | 0.1 | 1 | 10 |
| dibenzoantraceno | 0.1 | 1 | 10 |
| naftaleno | 0.1 | 5 | 50 |
| fenantreno | 0.1 | 5 | 50 |
| HIDROCARBUROS CLORADOS | | | |
| Alifáticos (3) c/u | 0.1 | 5 | 50 |
| Clorobencenos (4) c/u | 0.05 | 2 | 10 |
| Hexaclorobenceno | 0.05 | 2 | 10 |
| Hexaclorociclohexano | 0.01 | - | - |

Fuente: Canadian Council of the Environment (CCME), 1990

NOTAS:

- (-) Valor no establecido
- (1) Los compuestos no clorados incluyen:
 - A) 2,4-dinitrofenol
 - B) 2-metil 4,6-dinitrofenol
 - C) Fenol
 - D) Cresol
- (2) Los Clorofenoles incluyen:
 - A) Diclorofenoles (2,6- 2,5- 2,4- 3,5- 2,3- 3,4-)
 - B) Triclorofenoles (2,4,6- 2,3,6- 2,4,5- 2,3,5- 2,3,4- 3,4,5-)
 - C) Tetraclorofenoles
- (3) Los Hidrocarburos Alifáticos Clorados incluyen:
 - A) Cloroformo
 - B) Dicloroetano (1,1- 1,2-), Dicloroetano (1,1- 1,2-)
 - C) Diclorometano
 - D) Dicloropropano
- (4) Los Clorobencenos incluyen:
 - A) Triclorobencenos
 - B) Tetraclorobencenos
 - C) Pentaclorobencenos

Existen Organizaciones Ambientales como The Regional Board en E.U., quien propuso un método para determinar los niveles de tratamiento de suelos. Este método fue sugerido con el propósito de proteger el agua subterránea utilizada para beber. La tabla 9 define los niveles de saneamiento por encima de los acuíferos. Los niveles de saneamiento para TPH's en la tabla están basados en el número de carbonos de los hidrocarburos y del tipo de suelo (Litología). Estos rangos reflejan la movilidad del material, los TPH's más cortos (C₄-C₁₂) se mueven más fácilmente en el sólido que los TPH's de cadena larga (C₂₃-C₃₂). La tabla es organizada dentro de una matriz de niveles de saneamiento basados en la distancia de los contaminantes arriba del nivel freático y los rangos de la cadena de carbonos. Si algún nivel de saneamiento, en función de la distancia por encima del nivel freático, no se encuentra en la tabla, el valor podrá ser interpolado.⁽¹²⁾

Tabla 9. Niveles Máximos de Limpieza (ppm) para TPH's y BTEX por encima del Nivel Freático⁽¹²⁾

| | DISTANCIA POR ENCIMA DEL NIVEL FREÁTICO | RANGO DE CARBONOS | | | |
|------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | C ₄ -C ₁₂ | C ₁₃ -C ₂₂ | C ₂₃ -C ₃₂ | |
| T | > 150 PIES | 1,000 | 10,000 | 50,000 | |
| P | 20-150 PIES | 500 | 1,000 | 10,000 | |
| H | < 20 PIES | 100 | 100 | 100 | |
| B T E X | DISTANCIA POR ENCIMA DEL NIVEL FREÁTICO | LITOLÓGIA | | | |
| | | GRAVA | ARENA | LIMO | ARCILLA |
| | 150 PIES | B=0.04 T=2.0 E=8.0 X=23 | B=0.077 T=4.0 E=17 X=48 | B=0.165 T=9 E=34 X=93 | B=0.8 T=13 E=170 X=465 |
| | 80 PIES | B=0.022 T=1 E=4 X=11 | B=0.033 T=2 E=7 X=20 | B=0.068 T=4 E=15 X=40 | B=0.34 T=18 E=72 X=200 |
| | 20 PIES | B=0.011 T=0.15 E=0.7 X=1.75 | B=0.011 T=0.3 E=0.7 X=0.75 | B=0.011 T=0.45 E=2 X=5.3 | B=0.044 T=3.3 E=9 X=24.5 |

Fuente: The Regional Board, 1996

Un ejemplo de aplicación de la tabla 9, se describe a continuación.

EJEMPLO 1.

Se detectó gasolina en el suelo alrededor de un tanque subterráneo. La composición del sitio consiste de 60% de arena y 40% de limo⁽¹²⁾. El nivel freático se encuentra a una profundidad de 40 pies. Se realizó un muestreo de suelo para determinar la concentración de los contaminantes a 10, 15 y 20 pies de profundidad, presentándose los siguientes resultados.

Tabla 10. Resultados de Muestro del Ejemplo 1.

| PROFUNDIDAD PIES | DISTANCIA POR ARRIBA DEL NIVEL FREÁTICO PIES | TPH's (C4-C12) ppm | B ppm | T ppm | E ppm | X ppm |
|---------------------|---|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | 30 | 1500 | 1.6 | 9.1 | ND | ND |
| 15 | 25 | 210 | 0.01 | 0.4 | ND | ND |
| 20 | 20 | 100 | 0.005 | ND | ND | ND |

ND = No Detectado.

De la tabla 9, los niveles de limpieza para TPH's con 4-12 Carbonos (Las gasolinas entran en éste rango) a una distancia entre 30 y 20 pies por encima del nivel freático corresponde a 500 ppm, lo que significa que a una profundidad mayor de 15 pies la concentración de saneamiento se encuentra por arriba de lo reportado por la muestras, por lo tanto, no se realizarán trabajos de limpieza en ésta parte. De ésta forma, se realiza el cálculo para el nivel máximo de BTEX sólo a una profundidad de 10 y 15 pies o una distancia de 30 y 25 pies por encima del nivel freático.

En este caso, los niveles de saneamiento están en función de la composición litológica del suelo (60% arena y 40% limo). Para el Benceno en arena a una distancia 30 pies por arriba del nivel freático, primeramente se realiza una interpolación de la siguiente forma:

$$\text{Nivel Máx. de Benceno en Arena} = \{(20-30)/(80-20)\} \times (0.033-0.11) - 0.11 = 0.015$$

Asimismo, para el benceno en limo, el resultado es 0.02. Efectuando la correcci3n por el porcentaje en concentraci3n :

$$\text{Nivel para el Benceno} = (0.015 \times 0.6) + (0.02 \times 0.4) = 0.017$$

De la misma manera se obtienen los resultados para una distancia de 25 y 30, pies para Benceno, Tolueno y demás BTEX. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Concentraciones Máximas de Limpieza del Ejemplo 1.

| Distancia por encima del nivel freático | Con. en Arena (ppm) | Con. en Limo (ppm) | Con. Máx. de Limpieza 60% Arena y 40% Limo (ppm) |
|---|---------------------|--------------------|---|
| 30 pies | B=0.015 T=0.58 | B=0.02 T=1 | B=0.017 T=0.75 |
| 25 pies | B=0.013 T=0.44 | B=0.016 T=0.75 | B=0.014 T=0.58 |

Analizando los resultados, para una distancia de 25 pies no es necesario realizar algún trabajo de limpieza, pues las concentraciones máximas de limpieza se encuentran por arriba de las muestras, por lo cual sólo se realizarán operaciones hasta una profundidad de 10 pies.

Hay que hacer hincapié sobre algunas limitaciones del método, una de ellas es que sólo proporciona información sobre TPH's y BTEX pero no de PAH's considerados también como materiales peligrosos. Por lo cual, la tabla 9 es útil para mezclas de hidrocarburos en donde exista un porcentaje considerable de BTEX como las gasolinas y diesel.

En nuestro país, aquellas personas o instituciones que realizan algún trabajo de tratamiento de suelos, acuden con la Autoridad competente para acordar el nivel de limpieza de la zona en estudio, en base a la experiencia internacional sobre la materia.

Últimamente, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), el Instituto Nacional de Ecología (INE) y las instituciones de Educación Superior como la U.N.A.M. han considerado que en caso de derrames de hidrocarburos, cumplir con dos de parámetros de saneamiento, de la siguiente forma:

- Gasolinas Magna, Nova y Premium: TPH's y Benceno.
- Combustóleo, Diesel, Petróleo Crudo: TPH's y Benzopireno.

Proponiendo criterios de limpieza para suelos contaminados de acuerdo al uso del suelo como sigue:

Tabla 12. Criterios Interinos de Limpieza⁽²⁵⁾

| NOMENCLATURA | SUELO 1 | SUELO 2 | SUELO 3 |
|--|--|--------------------------|------------|
| USO DEL SUELO | Agricultura Forestal Recreativo De conservación | Residencial Comercial | Industrial |
| CONTAMINANTE (CONCENTRACIÓN EN PPM) | | | |
| GASOLINA | | | |
| TPH's | 200 | 200 | 500 |
| Benceno | 20 | 20 | 50 |
| DIESEL, CRUDO Y COMBUSTÓLEO. | | | |
| TPH's | 1,000 | 1,000 | 2,000 |
| Benzopireno | 0.08 | 0.08 | 0.80 |
| Benzo (a) antraceno | 0.80 | 0.80 | 8.0 |
| Benzo(B)fluorante | 0.80 | 0.80 | 8.0 |
| Benzo(k)fluorante | 8.0 | 8.0 | 80.0 |
| Criseno | 80.0 | 80.0 | 800.0 |

Fuente: PROFEPA, 1998

Estos criterios son genéricos, todas las propuestas de saneamiento por parte de las instituciones que van a realizar alguna limpieza del suelo, se revisan caso por caso por parte de la PROFEPA, quien dictará las medidas de seguridad pertinentes y los criterios de limpieza a seguir.⁽²⁵⁾

Por otra parte, cuando no se cuenta con algunos criterios de saneamiento, algunas Organizaciones Ambientales utilizan diversos parámetros para decidir los niveles de contaminación considerados como aceptables.

Algunos parámetros que son tomados en cuenta para determinar la limpieza de un sitio son.

- Alcanzar los niveles de las zonas aledañas al sitio contaminado.
- El riesgo de los niveles de contaminación del suelo basados en el peor y el promedio de los casos de exposición. Las exposiciones pueden incluir inhalación de polvos, indigestión de suelo y el contacto directo de la piel con el suelo.

3.4.2. CRITERIOS PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Criterios o Estándares de limpieza propiamente para aguas subterráneas, no existen en México, sin embargo se cuenta con algunos estándares para agua según su uso, propuestos por la Comisión Nacional del Agua⁽¹³⁾. Estos son:

1. Como Fuentes de Agua Potable.
2. En Actividades Recreativas de Contacto Primario.
3. Para Riego Agrícola.
4. Para usos Pecuarios.
5. Para la protección de la vida acuática en agua dulce y agua marina.

Tabla 13. Criterios para Cuerpos de Agua (ppm)⁽¹³⁾

| SUSTANCIA | FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE | RIEGO AGRÍCOLA | PECUARIO | PROTECCIÓN DE LA VIDA ACUÁTICA DE AGUA DULCE |
|---------------------------------------|--|----------------|----------|--|
| Arsénico | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| Plomo | 0.05 | 5.0 | 0.1 | n.d. |
| Cromo | 0.05 | 1.0 | 0.01 | n.d. |
| Zinc | 5.0 | 2.0 | 50.0 | n.d. |
| Cadmio | 0.01 | 0.01 | 0.02 | n.d. |
| Cobre | 1.0 | 0.2 | 0.5 | n.d. |
| Mercurio | 0.001 | n.d. | 0.003 | 0.00001 |
| Selenio | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.008 |
| Benceno | 0.01 | n.d. | n.d. | 0.05 |
| Tolueno | 14.3 | n.d. | n.d. | 0.2 |
| Etilbenceno | 1.4 | n.d. | n.d. | n.d. |
| Grasas y Aceites | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |
| Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos | 0.00003 | n.d. | n.d. | n.d. |
| Naftaleno | n.d. | n.d. | n.d. | 0.02 |

n.d. No Definido.

Por lo tanto, para el tratamiento de aguas subterráneas se utilizan los estándares según el futuro uso del agua tratada.

CAPÍTULO IV

"EVALUACIÓN DEL SITIO CONTAMINADO"

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DEL SITIO CONTAMINADO

Después de identificar o detectar el lugar contaminado por la presencia de GDCC, el primer paso en el proceso de descontaminación de suelos, subsuelos y aguas subterráneas, es llevar a cabo la Evaluación del Sitio Afectado.

Una Evaluación, en términos generales, consiste en la determinación cualitativa y cuantitativa del grado de afectación de una área determinada, a fin de determinar la extensión vertical y horizontal de la contaminación y su posible migración, además de evaluar la concentración y toxicidad de los contaminantes, para definir las medidas de seguridad y la selección del tratamiento de saneamiento.⁽³⁴⁾

El Estudio de evaluación del sitio representa un paso importante en el sistema de tratamiento porque de él se decidirá en gran parte la elección de la tecnología a utilizar y el buen resultado de ésta.

La Evaluación principalmente se compone de los siguientes puntos:

1. Detección, localización y antecedentes de la contaminación.
2. Estudios de Caracterización.
3. Estudios de evaluación de riesgo y de Impactos Ambientales.

4.1 DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES DE LA CONTAMINACIÓN.

Uno de los primeros puntos a ejecutar en el tratamiento es identificar o detectar la fuente de la contaminación, por ejemplo, en el caso de una fuga en un tanque o ducto se tomarán acciones pertinentes para corregir la fisura que propició la fuga.

Por otra parte, se obtendrá información en cuestión al historial o antecedentes de la contaminación, por ejemplo, si la contaminación es derivada de algún derrame por GDCC, datos como fecha del accidente, tipo y volumen recuperado de combustible, acciones tomadas, entre otros, son analizados. Esto con el fin de conocer el volumen impregnado en el suelo.

De igual manera se determinará la extensión de la contaminación superficial con el fin de delimitar o restringir el acceso al sitio colocando alguna barrera de protección. La tela de protección o valla representa una medida de seguridad para evitar acercarse al lugar, pues en algunas ocasiones ciertos animales silvestres o de ganado entran a la zona y llegan a alimentarse de plantas contaminadas.

La barrera de protección debe ser situada a una distancia determinada del perímetro de la mancha contaminante, hasta donde los vapores de los compuestos volátiles del hidrocarburo no se consideren riesgosos para la salud de los individuos cercanos.

La delimitación de la zona también permitirá la ejecución de los trabajos de estudio y tratamiento con mayor libertad y eficiencia.

También se deberá obtener información acerca de las comunidades aledañas al sitio, al igual que la identificación de flora y fauna afectadas por la contaminación y por los trabajos posteriores. De igual manera, se determinará el uso del suelo donde se encuentra impregnada la contaminación, como:

- Zona Habitacional.
- Parque Nacional.
- Zona Agrícola.
- Zona Industrial.
- Zona Protegida.

Todo esto para tomar las acciones pertinentes en pro de la seguridad de los individuos de las localidades, además como punto importante en la determinación de los niveles de saneamiento.

4.2 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN.

Los Estudios de Caracterización consisten en recopilar información en relación al área afectada y de los contaminantes para la descripción y evaluación de la conducta del medio ambiente, el transporte y destino de contaminantes en el suelo y subsuelo.

La caracterización involucra los siguientes estudios:

- a) Caracterización del sitio.
- b) Características de los contaminantes.

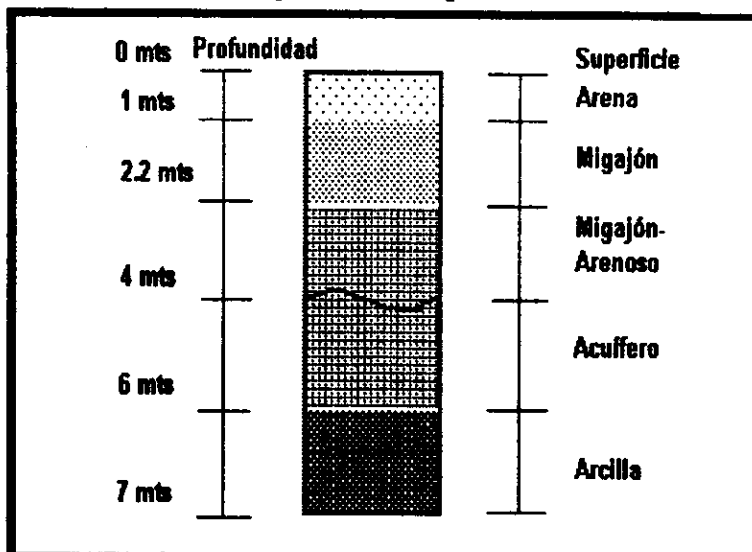
4.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO.

La caracterización del sitio incluye las características físicas, tales como, geológicas, hidrológicas, tipo de clima, precipitaciones pluviales, propiedades del suelo y de las aguas subterráneas en general.

En cuestión de las propiedades geológicas e hidrológicas se debe identificar principalmente la porosidad, la permeabilidad del suelo, los estratos u horizontes geológicos, además de definir la geometría y la estructura del sistema de flujo de aguas subterráneas, la conductividad hidráulica del suelo, flujo de los acuíferos, el tipo de suelo, nivel freático, identificación de acuíferos, entre otras.

La identificación de las propiedades anteriores se llevan a cabo mediante un estudio estratigráfico y proporcionan la información necesaria para elaborar un Perfil Estratigráfico, el cual representa los estratos identificados de la zona contaminada y la forma como se distribuyen en toda el área⁽³⁶⁾. Además, se identifica en éste plano los espesores de cada estrato al igual que la profundidad del nivel freático y el espesor de los acuíferos. El plano del Perfil Estratigráfico es tanto bidimensional como tridimensional (fig. 7). Los datos indicados son obtenidos en base a un plan de muestreo definido acertadamente en toda el área en estudio, recolectando las muestras para analizarse en laboratorio.

Fig. 7. Perfil Estratigráfico.



Lo que se refiere a propiedades del suelo y aguas subterráneas se debe recabar datos en cuestión, al pH del suelo y de las aguas subterráneas, mineralogía del suelo, tamaño y forma de la partícula del suelo, temperatura, humedad, empaquetamiento, capacidad de adsorción del suelo, metales presentes (principalmente Mg, Cu, Ni, Fe y Mn), contenido de Nitrógeno y fósforo, oxígeno disponible, entre otros más.

Algunos datos recabados sobre las propiedades del suelo se llevan a cabo por un estudio litológico.⁽¹⁶⁾

La litología es el estudio de las características físicas y la composición de los depósitos no consolidados y rocas. El estudio incluye:

1. Mineralogía.
2. Contenido de Materia orgánica.
3. Tamaño de la partícula.
4. Forma de la partícula.
5. Empaque.

Los dos primeros términos afectan la absorción, por otro lado los últimos tres términos afectan el almacenamiento y flujo de los contaminantes y del agua. Adicionalmente, la compactación y cementación reducen la permeabilidad basada en la porosidad, por otro lado los canales incrementan la permeabilidad.

La composición mineral de la roca y la de los depósitos no consolidados se emplea para determinar la composición química. La composición química afecta al transporte químico en aguas subterráneas mediante varias reacciones químicas. Estas interacciones involucran primeramente a inorgánicos e incluye la absorción, precipitación y disolución, reacciones ácido-base, de complejos redox. Ejemplos de sólidos que se reducen en bajas concentraciones en el agua subterránea a través de la formación de precipitados incluyen al arsénico (por reacciones con el hierro, aluminio o calcio), plomo (por reacción con sulfitos y carbonato), y plata (por reacción con cloro). La hidrólisis puede conducir a la precipitación del hierro, manganeso, cobre, cromo y zinc. La oxidación o la reducción favorece la precipitación del cromo, arsénico y selenio.

La variación en la absorción de los diferentes tipos de suelo se relaciona con el área superficial, pues en general, las arcillas tienden a absorber químicos.

El tamaño de la partícula influye en el movimiento del agua y de los contaminantes, en general los sólidos con partículas o granos grandes son más transmitivos y con una menor capacidad de almacenamiento que sólidos de granos finos.

La forma de la partícula influye en el almacenamiento de contaminantes y de agua, al igual que de la porosidad, debido a que la forma del grano afecta en el acomodo de las partículas. Una forma irregular y muy angular da como resultado una gran porosidad comparada con la de granos lisos y regulares.

Los sólidos compuestos con granos de tamaño muy similar posee una porosidad mayor que los materiales con una gran variedad en su distribución de tamaños, ya que en los de una amplia distribución, las partículas pequeñas ocupan los lugares dejados por las partículas mayores. En la zona vadosa, los sólidos uniformes desarrollan una franja de capilaridad bien definida, mientras los suelos con una gran distribución tienden a tener una capilaridad mayor, pero la franja es menos diferenciable.

Dentro de la caracterización del sitio es también importante obtener información en relación a las condiciones biológicas del suelo. La información recabada debe incluir el tipo de microorganismos existente en el lugar y la densidad bacteriana, además de su comportamiento por la presencia de los contaminantes. Esto con la finalidad de indicar si es factible la utilización de las tecnologías de biorremediación.⁽³³⁾

Para determinar la densidad bacteriana se puede utilizar el método de conteo en caja de petri, el cual consiste en disolver un gramo de suelo en 99 ml de una solución buffer de fosfato, obteniéndose una disolución 10^{-2} ; posteriormente se agitará vigorosamente por 25 minutos y se transfiere 1 ml de esta solución para ser adicionada a otra solución de fosfato de 99 ml para formar una solución de 10^{-4} . Un ml de la solución es colocada sobre una caja de petri donde será analizada por microscopio para contar las bacterias presentes. Varias disoluciones se realizarán hasta poder contar de 25-250 bacterias en el plato.

Menor de 25 bacterias detectadas no es aceptable por razones estadísticas y mayor a 250 no es posible contabilizar exactamente las bacterias por la cercanía entre ellas.

Cuando se detectan bacterias entre 25-250 en el plato, se determinará la cantidad de bacterias en la muestra dividiendo el número de bacterias determinadas en el plato petri entre la concentración final. Por ejemplo, suponiendo que la dilución 10^{-5} se encontraron 130 bacterias. Entonces la densidad bacteriana en un gramo de suelo, es:

$$\text{Bacterias/ gr de suelo} = (130) / (10^{-5}) = 1.3 \times 10^8$$

4.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL CONTAMINANTE.

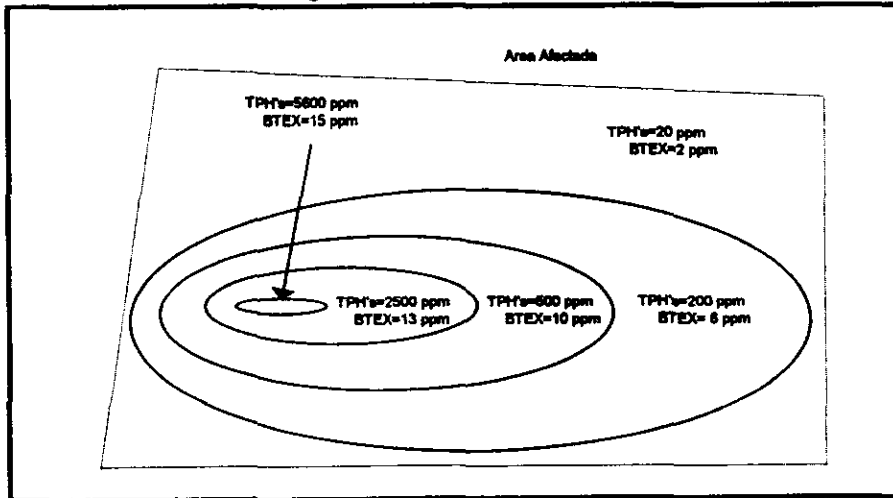
El análisis y estudio referente a los contaminantes se concreta a identificar la distribución y concentración de los contaminantes en el suelo, con el objeto de identificar la pluma de contaminación dimensionalmente y tridimensionalmente, así como la volumetría del suelo contaminado (fig. 8). Este estudio también es referido a las aguas subterráneas, indicando la concentración en los acuíferos, principalmente de las

sustancias tóxicas. El análisis se concreta a la determinación de la concentración primeramente de los TPH's, los BTEX, los PAH's, metales pesados. ^(33, 38)

Para la determinación de los contaminantes se utilizan los métodos descritos en la EPA⁽¹¹⁾, tales como:

| PARÁMETRO | MÉTODO DE ANÁLISIS |
|-----------------|---------------------------------------|
| TPH's | EPA 418.1(Absorción atómica) |
| BTEX | EPA 8240(Espectrofotometría de masas) |
| PAH's | EPA 8310(Espectrofotometría de masas) |
| Metales Pesados | NOM-052 ECOL/1993 y NOM-053 ECOL/1993 |

Fig. 8. Distribución de la Contaminación.



Además , también se reúne información importante de los contaminantes, por ejemplo, coeficientes de partición o coeficientes de distribución de los principales contaminantes en las diferentes fases que existen en el suelo, la fase acuosa, fase gaseosa, la fase aceitosa (la mezcla de hidrocarburos) y la fase sólida, tales como, concentración de la fase sólida/concentración en la fase acuosa, concentración en la

fase aceitosa/concentración en la fase acuosa, concentración en la fase gaseosa/concentración en la fase acuosa, a las condiciones de temperatura y presión promedio que imperan en el suelo, estos datos serán empleados en los simuladores computacionales para indicar la movilidad de la contaminación.

Otras propiedades físicas de interés de los contaminantes útiles para trabajos posteriores son: su densidad, viscosidad, presión de vapor, punto de ebullición, solubilidad, difusividad, tensión superficial, entre algunas propiedades más.⁽³³⁾

Toda la información recabada en los estudios de caracterización tienen como utilidad posterior, realizar el modelamiento de la distribución de los contaminantes, así como de herramientas para la selección apropiada de la tecnología de tratamiento y su aplicación.

Por otra parte, la recopilación de información se lleva a cabo tanto en bibliotecas, laboratorios, así como en estudios de campo. Los estudios de campo se realizan en el lugar contaminado o con la empresa responsable de la contaminación y se refieren a la recolección de muestras del suelo a través de un plan de muestreo.

4.2.3. MUESTREO.

Muchos de los datos recopilados en la caracterización se realizan a través del muestreo de la zona. El muestreo consiste en la recolección de muestras del suelo para determinar sus propiedades antes citadas, de gas en la cuantificación de oxígeno y compuestos volátiles, así como de producto líquido como aguas subterráneas. El número de muestras que se tomen están en función de la dimensión del lugar en estudio y de la cantidad de contaminante o GDCC presente en el suelo. Además, las muestras no solamente se realizan en el área de la mancha de contaminantes superficial sino también en la periferia de ésta, para identificar si la pluma de contaminación se ha desplazado a otro lugar.

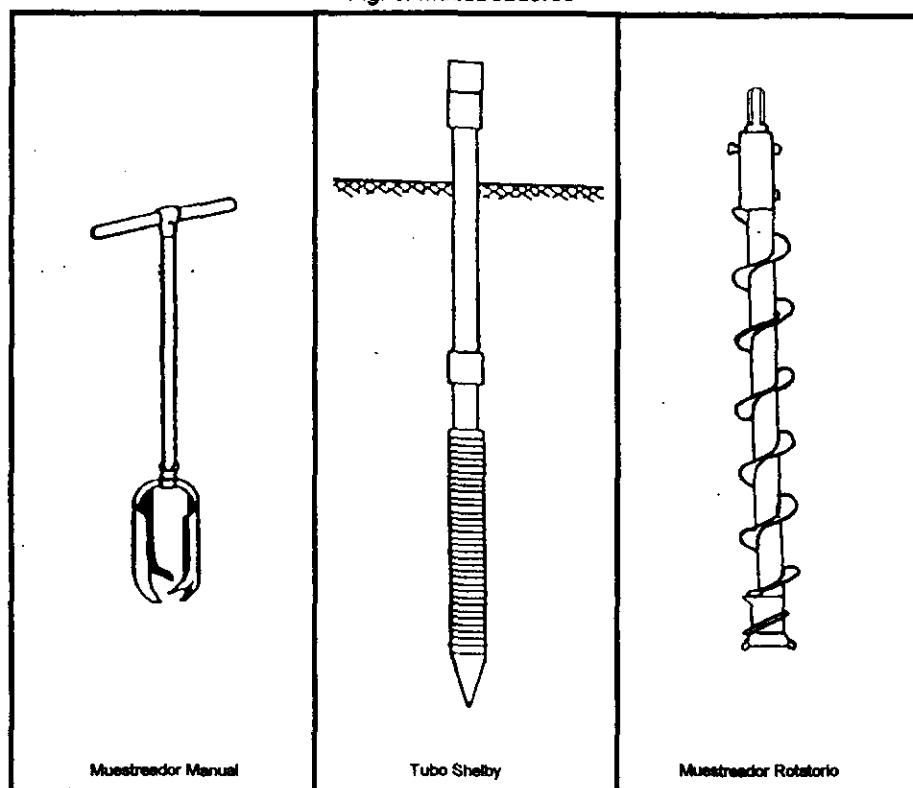
Las muestras del suelo, se toman mediante la perforación de éste a diferentes profundidades y zonas del área afectada. Para las perforaciones se utilizan, la barrena manual, muestreadores de cuchara abierta, tubos shelby y equipo de perforación de roca.^(39,28)

Las barrenas manuales son muy útiles, particularmente para materiales arenosos, para examinar los perfiles de suelo superficial y para instalar equipos de monitoreo. Existen varios tipos de barrenos manuales, pero todos se encuentran limitados al uso de materiales geológicos no consolidados y tienden a ser imprácticos con arcillas densas y materiales rocosos.

Los muestreadores de cuchara abierta consisten en un cilindro que se encuentra partido longitudinalmente y está unido por sus extremos. La cabeza de corte se encuentra en el extremo inferior y el mecanismo de perforación se encuentra en el otro extremo. El muestreador se dirige sobre la formación en la punta de una barrera, la perforación se realiza usando un anillo de perforación de 70 kg. El número de golpes requeridos para penetrar el sólido se encuentra en función de la compactación del suelo; así, al contar los golpes se utiliza para caracterizar el tipo de suelo. Cuando se extrae y abre la muestra se encuentra poco alterada y enseña la estratificación natural del material geológico.

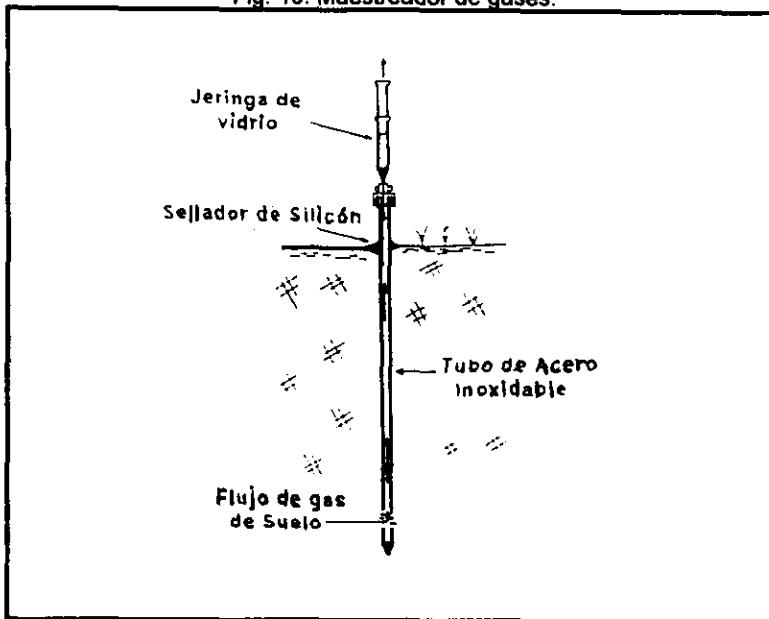
Los tubos Shelby son tubos de metal con pared delgada, el cual incluye una punta cónica truncada; a través de ésta, entra el material del suelo al tubo, al ser impulsado el muestreador hacia abajo. El tubo muestreador se encuentra revestido en su interior por un empaque de acetato, dentro del cual se aloja la muestra del material. Al sacar el tubo muestreador, se extrae el empaque del acetato y muestra del suelo, al que se le colocan tapas en las partes superior e inferior. Las tapas pueden ser de diferente color con el objeto de marcar la orientación de la muestra. Sin embargo, los tubos Shelby y los muestreadores de cuchara abierta se limitan al muestreo de materiales no consolidados.

Cuando la formación es muy dura para muestrearse con métodos de muestreo de suelos, se puede utilizar un perforador de rocas. La barrena más simple consiste en un tubo hueco de acero con atrapador de material y un cortador de diamante o tungsteno. Otros barrenos tienen un sistema de pared dual con una manga interna flotante que se mantiene estacionaria mientras el barreno exterior rota y corta la roca. En este sistema el material se coloca a través del anulo de los vástagos del taladro.(fig. 9).

Fig. 9. Muestreadores⁽²⁹⁾

Las muestras de gas en los pozos se realiza colocando un tubo de plástico flexible dentro del pozo. Se extrae el gas por medio de una pequeña bomba y se almacena en bolsas especiales, fabricadas con materiales que no reaccionan con los hidrocarburos o bien en recipientes de vidrio. También puede extraerse por medio de un tubo de acero inoxidable que está conectado con una jeringa de vidrio, la cual extraerá el gas del suelo (fig. 10). Las muestras obtenidas se envían al laboratorio para su análisis.⁽²⁸⁾

Fig. 10. Muestreador de gases.



Las muestras de agua subterránea y hidrocarburo líquido que se encuentra flotando sobre el nivel freático, son recogidos en envases especiales para su análisis posterior.

El análisis de los materiales se desempeña tanto en el campo como en el laboratorio. En laboratorio se analizan las muestras de suelo y se determinan sus características. Las pruebas de laboratorio se llevan a cabo bajo un reglamento normativo, los cuales indican los procedimientos por los cuales se determinan las propiedades anteriormente descritas, entre las que podemos citar las establecidas en las Normas de la EPA (Environmental Protection Agency), Normas Oficiales Mexicanas, Normas ASTM (American Society for Testing and Materials), entre otros. La descripción de estas pruebas no corresponden al objetivo de la Tesis por lo cual no se profundiza en este tema.

Como se ha indicado con anterioridad, no todos las pruebas o análisis se determinan en laboratorio. Existen propiedades que se determinan en el lugar contaminado, una de estas pruebas es la determinación de la velocidad o conductividad de los acuíferos.

La velocidad del acuífero es determinada gracias a un elemento químico que sirve como trazador. Para esto se excavan dos pozos hasta los acuíferos, separados por una distancia previamente determinada. En el primer pozo se inyecta el trazador, mientras en el segundo se recibirá.

Para la elección del tipo de trazador ideal, éste debe ser:

- No debe reaccionar químicamente con el agua, o ser absorbido en los poros del suelo.
- No debe ser tóxico.
- Debe ser barato y disponible.
- Debe ser susceptible a cuantificarse en concentraciones mínimas.

Algunos trazadores que se han utilizado son las sales, como el cloruro de sodio, por reunir las características expuestas anteriormente. Por otra parte, refiriéndose al proceso, en el segundo pozo se tomarán muestras aproximadamente cada dos horas para determinar la concentración del cloruro de sodio y así obtener la velocidad por medio de la distancia entre los pozos y el tiempo en detectar al trazador en el segundo pozo.⁽²¹⁾

Por otro lado, con los datos recopilados en el proceso de caracterización pueden utilizarse modelos matemáticos confinados en un paquete computacional para la evaluación de la contaminación. En general, los modelos se usan para analizar la conducta de un sistema ambiental bajo condiciones tanto actuales (o pasadas) como anticipadas (futures).⁽⁴⁾

Un modelo matemático provee una herramienta para integrar los datos de la caracterización del sitio y simular la conducta de los constituyentes en el suelo contaminado y para predecir las rutas de migración a través del área contaminada, y por lo tanto, las rutas de exposición a los seres humanos y al ambiente.

Algunos modelos son muy específicos, es decir, sólo nos proporcionan información acerca de los contaminantes en la zona vadosa u otros referidos a la zona saturada. Sin embargo, resultan de gran ayuda para la implementación de las tecnologías de descontaminación.

4.3 ESTUDIOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y DE IMPACTOS AMBIENTALES.

Los estudios de Evaluación de Riesgo representan un punto importante en la evaluación de la zona contaminada, pues son el resultado del análisis de peligrosidad, de exposición y de riesgo de los contaminantes en el lugar contaminado.^(17, 26)

El análisis de peligrosidad determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio de estudio.

En el análisis de exposición se evalúan los medios por los cuales el ser humano y los ecosistemas se ven afectados por los contaminantes que se generan del sitio, tales como emisiones de volátiles que pueden ser inhalados y causar mareos, absorbidos dérmicamente y causar irritaciones. Así también, los contaminantes pueden ser capturados a través de la ingestión de agua o suelo contaminados y provocar efectos negativos en el sistema nervioso o en los riñones, entre otros.

En el análisis de riesgo, los niveles de exposición humana para un compuesto químico y la toxicidad resultante de tal exposición se comparan con un valor de toxicidad crítica para ese compuesto.

El valor de toxicidad crítica generalmente representa un nivel de exposición aceptable para el compuesto (niveles de limpieza de suelos contaminados).

Si el valor de toxicidad crítica se excede, las acciones de tratamiento del suelo es inminente.

El Análisis de riesgo consta de 3 criterios.

1. La aditividad del nivel de peligrosidad para químicos que tienen efectos tóxicos similares (ejemplo: daño nervioso o hepático).
2. La aditividad del nivel de peligrosidad para exposición de un mismo compuesto encontrado en varias fuentes (ejemplo agua, alimentos de origen vegetal y animal).
3. Efecto Sinérgico, que se refiere al nivel de peligrosidad de 2 o más compuestos, que es mayor cuando están juntos en comparación con la suma de los efectos de los mismos compuestos por separado.

Algunas variables que claramente representan peligrosidad y deben ser evaluadas del sitio son:

Peligrosidad.

- Toxicidad aguda no cancerígena.
- Toxicidad aguda cancerígena.
- Toxicidad crónica cancerígena.
- Mezcla de contaminantes.

Exposición.

- Inhalación de aire, polvos.
- Ingestión de agua, suelo.
- Absorción dérmica.
- Consumo de vegetales y carne.

Análisis de riesgo.

- Efectos sinérgicos.
- Exposición por medios múltiples.
- Aditividad del efecto de toxicidad.

Los estudios de evaluación de riegos representan una herramienta de gran ayuda para tomar medidas de seguridad y minimizar riesgos tanto en los trabajos de evaluación como tratamiento.

Los estudios de evaluación de riesgo, deberán también realizarse posteriormente para los trabajos de implantación y desarrollo de la tecnología de tratamiento seleccionada, que incluye nuevas formas de exposición de químicos tóxicos causadas por el tratamiento, la permanencia de los contaminantes por el fracaso de la tecnología, accidentes ocasionados por el uso de equipo pesado, accidentes o derrames durante la transportación del suelo contaminado, entre otros.

Así también, se realizan estudios de evaluación de impacto ambiental. Se entiende por impacto ambiental como la modificación o alteración favorable o desfavorable que experimenta el medio ambiente natural y social, como resultado de efectos positivos o negativos de la actividad humana o de la naturaleza en sí. El medio ambiente natural está constituido por cuatro sistemas interrelacionados: la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera. El medio ambiente social queda definido por el conjunto de infraestructuras materiales construidas por el hombre y los sistemas sociales que ha creado.⁽⁴⁾

Por lo cual, el estudio referido a la Evaluación de Impactos Ambientales se concreta a identificar e interpretar, así como a prevenir las consecuencias en el medio ambiente natural y social, de una determinada acción.

Entonces, previo a implantar la técnica de saneamiento seleccionada, se evalúan los impactos ambientales potenciales que pueden ocurrir con su ejecución, identificando los impactos físicos, biológicos y sociales, así como la magnitud del impacto y los efectos sobre el medio tanto negativos como positivos, temporales o permanentes, directos o indirectos, reversibles o irreversibles, etc. Todo esto con el fin de minimizar el impacto que pudiese darse en el tratamiento.

Durante el proceso del tratamiento del suelo, los impactos pueden ser provocados por emisiones a la atmósfera, generación de residuos afectando la calidad del aire y agua.

- a) Impactos a la atmósfera: Las posibles emisiones de contaminantes a la atmósfera, se producen en aquellas tecnologías de remoción y traslado del material contaminado. Las emisiones son principalmente compuestos orgánicos volátiles. Al igual que se producen emisiones de partículas en las tecnologías de combustión o incineración del suelo contaminado.
- b) Impactos generados por residuos: Se presentan en tecnologías de combustión del material contaminado al producir cenizas que deben ser analizadas y determinar su confinamiento si es necesario.
- c) Impactos en el agua: Algunas técnicas utilizan agua en el tratamiento, la cual puede ser contaminada por los hidrocarburos del suelo, por lo tanto deben ser tratadas posteriormente.

CAPÍTULO V

"TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS"

CAPÍTULO V

TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

Posteriormente de haber ejecutado los trabajos de evaluación y la recopilación de la información acerca de la zona contaminada, el siguiente paso es seleccionar la técnica de tratamiento, basados claramente en los estudios realizados en la caracterización.

Básicamente las técnicas de tratamiento de suelos contaminados por Gasolina, Diesel, Crudo y Combustóleo, se dividen principalmente en dos grupos.^(17,28)

a) Tratamiento o Remedación Pasiva.

b) Tratamiento o Remedación Activa.

a) Tratamiento o Remedación Pasiva.

Este método consiste en que el medio natural actúa para eliminar los hidrocarburos sin la acción del ser humano y solamente se monitorea el progreso de ésta remoción. La remediación pasiva es aplicable a sitios donde los hidrocarburos por su extensión y concentración no significan un riesgo en el medio ambiente. Por ejemplo, que en lugar existan microorganismos capaces de degradar los componentes de los hidrocarburos, como las bacterias, sin alguna ayuda externa. La Remedación Pasiva es útil para aquellos sitios en donde las concentraciones de los contaminantes se encuentran relativamente cercanas a las indicadas en los límites de saneamiento preestablecidos.⁽³⁾

Cuando existen las condiciones anteriormente mencionadas, la remediación pasiva es una opción aceptable en la eliminación de constituyentes de GDCC.

Si es factible la utilización de esta remediación, se generan las siguientes ventajas:

- No genera corrientes residuales.
- Elimina potencialmente el contacto humano con los suelos impactados durante la instalación y operación de un sistema de tratamiento.
- Es menos costoso que otros métodos.

Algunas desventajas que se tienen es que se requiere de gran tiempo para alcanzar los objetivos de limpieza.

b) Tratamiento o Remediación Activa.

Este tipo de tratamiento elimina o reduce la concentración de los constituyentes activamente, es decir, el suelo contaminado es alterado por la acción humana en pro de la restauración de la zona. Esta serie de métodos de tratamiento activo es por lógica aplicable cuando por las condiciones del suelo y los contaminantes no se puede utilizar la *remediación pasiva*.

En ambos métodos (activo y pasivo), se requiere el monitoreo de la zona, el cual consiste de muestreos de suelo, análisis de vapor, aguas subterráneas, con el fin de llevar un control sobre los trabajos de tratamiento.

Por lo expuesto anteriormente, los sistemas de tratamiento más utilizados por las condiciones de contaminación, son los de Remediación Activa. Las Técnicas pueden realizarse en el lugar contaminado denominadas Técnicas In Situ (En el Lugar) o pueden trasladar el suelo contaminado a otro lugar donde será tratado (Técnicas Ex Situ), esto dependerá en gran medida de las características del sitio. Por otra parte, dentro de los Tratamientos para efectuar una remediación activa, se dividen principalmente en dos grandes grupos: Tratamientos Biológicos y Tratamientos Físico/químicos. Los primeros están basados en la acción de microorganismos, quienes se encargan de degradar los contaminantes, mientras los segundos utilizan procesos físico/químicos para eliminar los contaminantes.⁽³⁴⁾

Algunas Técnicas utilizadas actualmente en el tratamiento de suelos y aguas subterráneas por presencia de GDCC se presentan en el siguiente esquema.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|-----------|--------------------|
| Técnicas de Tratamiento de Suelos | -Tratamientos Biológicos | - Biorremediación | - In Situ | - Bioestimulación. |
| | | | | - Bioaumentación. |
| | | | - Ex Situ | - Landfill |
| | | | | - Landfarming |
| | - Tratamientos Físico/químicos | - Extracción Hidráulica de hidrocarburos y agua subterránea | - In Situ | |
| | | | | |
| | | - Extracción con vapor | - In Situ | |
| | | - Tratamientos Termales | - Ex Situ | |
| | | - Lavado de Suelos | - Ex Situ | |
| | | - Incorporación de Asfalto y Cemento | - Ex Situ | |
| - Confinamiento | - Aislamiento | - Ex Situ | | |
| | - Microencapsulamiento | - In Situ | | |
| | | - Ex Situ | | |

5.1 TRATAMIENTO BIOLÓGICO (BIORREMEDIACIÓN)

Los tratamientos biológicos son aquellos que utilizan algún agente bioquímico en la desintegración de los contaminantes. Las técnicas más utilizadas en los sistemas de tratamiento de suelos, es la Biorremediación.

La Biorremediación es el proceso en el cual se utilizan microorganismos para transformar materiales químicos peligrosos en materiales inocuos al ambiente. La capacidad de estos microorganismos para degradar los contaminantes se ha desarrollado a través de su evolución.

Últimamente es uno de los métodos más utilizados para degradar hidrocarburos impregnados en el suelo. Entre los microorganismos que se encuentran en el suelo, las bacterias son los degradadores más importantes de material contaminante. Poseen algunas características peculiares entre otros microorganismos, como:

1. Una mayor velocidad de crecimiento que otros microorganismos.
2. Alta frecuencia de mutación.
3. Gran transferencia de material genético.

Estas cualidades hacen a las bacterias, como los microorganismos más eficaces para degradar materiales orgánicos, y en algunos casos materiales inorgánicos. Sabiendo de antemano que la gasolina, crudo, diesel y combustóleo están compuestos principalmente por materiales orgánicos, resulta importante la utilización de las técnicas de biorremediación en los trabajos de tratamiento de suelos.

Por lo tanto, los hidrocarburos funcionan como fuente nutricional para las bacterias por su contenido de carbono, además que son utilizados también, como fuentes de energía. Así, las bacterias a través de su metabolismo degradan los hidrocarburos y lo transforman en material celular, en energía o en compuestos más simples.

El metabolismo, es un proceso bioquímico de reacciones óxido-reducción desarrollado por los microorganismos para la producción de energía útil en la síntesis de proteínas, su proceso de respiración y todas las actividades relacionadas en el desarrollo de los microorganismos. El metabolismo incluye dos procesos: el catabolismo y anabolismo. En el anabolismo ocurren fenómenos de construcción o síntesis de materiales. El Catabolismo es la encargada de la desintegración de la materia orgánica con liberación de energía.⁽³⁾

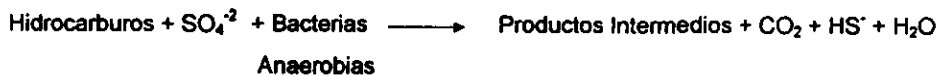
En las reacciones de óxido-reducción se requiere de un sustrato oxidante. El oxígeno molecular es el elemento que frecuentemente interviene como agente oxidante, sin embargo existen otros agentes que se pueden utilizar como nitratos, sulfatos, entre otros.

Por lo anterior, existen bacterias que pueden llevar a cabo su metabolismo utilizando oxígeno, denominadas bacterias aeróbicas y aquellas bacterias que realizan su metabolismo en ausencia de oxígeno, utilizando otros sustratos como agente oxidante, denominadas bacterias anaerobias.^(4,40)

La ecuación general que describe el proceso aeróbico es:



Bajo condiciones anaerobias los compuestos orgánicos son descompuestos en productos intermedios tales como ácidos orgánicos y alcoholes, los cuales nuevamente son oxidados para producir metano y dióxido de carbono. La ecuación representativa en el proceso anaerobio es:



La relación entre el metabolismo, la energía y la síntesis son importantes en el entendimiento de los sistemas de tratamiento biológicos. El primer producto del metabolismo es energía, la cual es básicamente usada para la síntesis y desintegración de los contaminantes. Las velocidades más altas de síntesis son observadas simultáneamente con una velocidad máxima de metabolismo (producción de energía). En otras palabras, para una población dada de microorganismos, la velocidad máxima de síntesis de los contaminantes ocurre durante el máximo desarrollo bacterial.

Las desventajas de los procesos anaerobios son un metabolismo incompleto, bajo desarrollo biológico, y producción de productos de alta energía, por ejemplo metano. En los procesos aeróbicos los resultados de un metabolismo completo y la síntesis del sustrato con un alto desarrollo bacteriano, representa una ventaja ante el otro proceso.

Cuando los contaminantes no son biodegradables como metales, estos pueden ser absorbidos por ciertos microorganismos y así pueden ser retirados del medio ambiente.

Por otra parte, la estructura y los efectos tóxicos de los contaminantes influyen de manera significativa en su degradación por parte de los microorganismos. Por ejemplo, en contaminantes con estructura muy compleja es lógico que a las bacterias se le sea más difícil degradarlos en comparación con otros compuestos cuya estructura es simple. Este es el caso de la descomposición de los PAH's, los cuales por su estructura formada principalmente por anillos de benceno provocan la lentitud de la biodegradación. De la misma forma, los compuestos tóxicos para los microorganismos resulta difícil su desintegración por el daño en la salud de los mismos, este es el caso de los compuestos como el benceno, tolueno, y especies cloradas.

Como se ha indicado anteriormente los constituyentes orgánicos de complicada estructura y pesos moleculares altos, representan un obstáculo para la completa desintegración pues en algunas ocasiones se producen productos intermedios en más tóxicos que el sustrato original o que inhiben el crecimiento o desarrollo bacteriano, este es el caso de la degradación de compuestos clorados simples. Por ejemplo la desintegración del tricloroetileno da productos intermedios como el cloruro de vinilo y el 1,1,1- dicloroetileno, que se han clasificado como cancerígenos. En general, hidrocarburos que contienen arriba de 44 carbonos son susceptibles a varios grados de biodegradación.⁽³⁴⁾

El ácido láurico es reportado como uno de los principales agentes inhibidores en el desarrollo de los microorganismos, producido por estos, a partir de hexadecano. El contenido de grandes cadenas en algunos hidrocarburos contenidos en el crudo, tales como alcanos (ceras) producen intermediarios durante la biodegradación. Alcanos entre C₅-C₉ no son tóxicos pero los alcoholes de éstos son inhibidores.

Generalmente, los efectos tóxicos de los hidrocarburos están relacionados con los compuestos de bajo peso molecular (C_6-C_{10}) y compuestos aromáticos como el benceno y naftaleno, por la sencilla razón que son más solubles en el agua (lugar donde se lleva a cabo la degradación).

Los efectos inhibidores de varios componentes dependen principalmente de la concentración. Varias poblaciones de bacterias pueden ser inhibidos por el tolueno y el fenol a altas concentraciones.

No solamente los hidrocarburos pueden provocar efectos inhibidores en la población microbiana, los metales pesados pueden influir significativamente en los procesos de degradación. La presencia de Pb, Cd, Cr, Zn, Ni y Cu en concentraciones altas, presentan efectos de inhibición en el desarrollo bacterial (Generalmente por arriba de 400 ppm). El Cd es más tóxicos para los microorganismos que el Pb, cuando se encuentra en concentraciones mayores de 500 ppm.⁽⁴¹⁾

Generalmente las GDCC contienen bajo contenido de metales pesados, sin embargo cuando el petróleo es extraído, residuos del proceso de desalado contienen cantidades significativas de metales que deben ser tratados por métodos de precipitación o electrodiálisis.

FACTORES GENERALES QUE AFECTAN LA BIORREMEDIACIÓN.

Después de haber realizado el proceso de Evaluación, los componentes básicos que deben ser atendidos para llevar a cabo la biorremediación, son los siguientes:

1.- MICROORGANISMOS.

La biorremediación implica que un microorganismo tenga la habilidad de lograr el rompimiento de los componentes del contaminante a compuestos de menor peso molecular o la transformación a compuestos más polares con un número de carbono

igual al del compuesto original, donde los pasos que sigue cada tipo de microorganismo para lograrlo, se llaman mecanismos bioquímicos. Mediante el estudio de estos mecanismos bioquímicos (pruebas bioquímicas) se puede identificar el género y la especie del microorganismo degradador.

Para un compuesto, no es difícil encontrar una gran variedad de especies de bacterias que tengan gran habilidad de degradarlo bajo diferentes condiciones de operación. Una vez que el Estudio de Evaluación nos indica el género de microorganismos existentes en la zona contaminada (Organismos nativos) se realiza una prueba de biodegradabilidad que indica el tiempo que dichos organismos requieren para degradar el compuesto a los niveles máximos de degradación. En suelos contaminados que tienen tiempo, usualmente contienen significativas poblaciones de microorganismos útiles en la biorremediación. En el suelo contaminado recientemente, los contaminantes inhiben el crecimiento de los microorganismos nativos y algunos mueren, sin embargo otros se ajustan a las condiciones del medio, utilizando los hidrocarburos como alimento, estos microorganismos son seleccionados por aislamiento para su identificación y determinar su habilidad degradadora.

- PRUEBAS DE BIODEGRADABILIDAD.

Como se ha indicado anteriormente, las bacterias son microorganismos con gran habilidad degradadora, existe varios géneros de bacterias que pueden ser útiles en los procesos de descontaminación de suelos. Entre los géneros se encuentran las Pseudomonas, Acinetobacter, Citrobacter, Flavobacterium, Chromobacter, entre algunas más.⁽⁴⁰⁾

La concentración ideal de microorganismos en el suelo para degradar los hidrocarburos es considerada de 10^7 - 10^9 bacterias/gr de suelo contaminado, pero esto varía en gran parte de la concentración de contaminantes presentes, pues si la cantidad de hidrocarburos es pequeña, una gran población de microorganismos en lugar de aumentar la velocidad de biorremediación puede disminuirla debido a que puede surgir la competencia por el alimento entre las bacterias.

Por otro lado, las pruebas de biodegradabilidad se inician posteriormente de haber separado la bacteria del suelo contaminado y se coloca en un medio nitrogenado, provisto de nutrientes para el desarrollo y cultivo de las bacterias. El medio nitrogenado esta preparado por:

| MEDIO NITROGENADO | |
|--|---------|
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | 0.5 gr |
| NaNO_3 | 0.5 gr |
| CaCl_2 | 0.02 gr |
| MgSO_2 | 0.2 gr |
| KH_2PO_4 | 1.0 gr |
| $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 1.0 gr |
| Agar | 15.0 gr |
| Aforar con H_2O | 1000 ml |
| pH ajustado a 7 | |

Las bacterias en el medio nitrogenado son incubadas entre 24-48 °C hasta que la solución se vuelve turbia, lo que indica que las bacterias han incrementado su población. Ocho ml de este cultivo es mezclado con 75 gr de suelo limpio de una zona aledaña al sitio contaminado, 16 ml de medio nitrogenado y 1 ml del tipo de combustible que fue impregnado en el suelo, en este caso de Gasolina, Diesel, Crudo o Combustóleo. La prueba contiene 8×10^4 bacterias/ml y la concentración del hidrocarburo agregado es aproximadamente de 10,000 ppm. Esta prueba es incubada a 24-48 °C por siete días. Una muestra de suelo contaminado es utilizada como control. Durante el periodo de incubación los cultivos son agitados uniformemente provocando la aireación de los mismos. Al término de los 7 días de incubación la concentración de TPH's es determinada. Posteriormente se vuelven a incubar las muestras durante otros siete días y al final de éstos, de igual manera se miden los TPH's.

La bacteria que degrada los hidrocarburos hasta los límites de saneamiento predeterminados en 7-14 días, se puede seleccionar como el microorganismo para llevar a cabo la biorremediación.

Después de elegir la bacteria idónea para la biorremediación se debe confirmar que ésta no sea patógena. Muchos organismos encontrados en el suelo son patógenos, por ejemplo, *Clostridium botulinum*, *Clostridium tetani*, *Clostridium perfringens*, *Bacillus anthracis* y *Pseudomonas aeruginosa*. Este último es una bacteria patógena para el hombre y animales, sin embargo, muchas personas son resistentes a estos especímenes, pero no lo son tanto las personas de edad avanzada, con SIDA, que llevan radioterapias y todas aquellas personas que padecen inmunodeficiencias.⁽⁶⁾

Por lo cual, la bacteria seleccionada en biorremediación no debe ser una especie patógena, sin embargo, existen algunas bacterias patógenas que pueden utilizarse sólo tomando debidas precauciones, pues en muchas ocasiones estas bacterias pueden ser más eficientes en la biodegradación.

Se recomienda utilizar bacterias que se encuentran en el sitio contaminado porque este tipo de microorganismos se encuentran adaptados al lugar, en cambio si se utiliza otro tipo de bacterias puede no adaptarse al medio y minimizar la eficiencia de la biorremediación. Esto no quiere decir, que siempre se deba elegir una bacteria nativa, existen muchas bacterias capaces de adaptarse al medio y dar buenos resultados.

Cuando al suelo contaminado se le agregan microorganismos , la curva de crecimiento típica de éstos , presentará las siguientes fases:

a) Fase de Adaptación.

El microorganismo se adapta a las nuevas condiciones ambientales. Aumentan su tamaño y entonces comienzan a reproducirse.

b) Fase de crecimiento exponencial.

Durante éste periodo, los microorganismos están biodegradando el compuesto, están creciendo a una tasa máxima y reproduciéndose gracias a la energía generada por la degradación del compuesto.

c) Fase estacionaria.

La población deja de dividirse debido a la limitación de nutrientes.

d) Fase de mortalidad.

Durante esta fase, la velocidad de muerte de bacterias es mayor a la generación de nuevas células, debido a que ya no hay residuo o nutriente.

Para la obtención de esta curva se requiere de un tiempo largo y de muchos muestreos del suelo impactado.

Por otra parte, la tabla 14 muestra algunas bacterias sugeridas para su uso en biorremediación para petróleo crudo y diesel.

Tabla 14. Tipo de Bacterias Factibles Para la Biorremediación.⁽⁸⁾

| TIPO DE BACTERIA |
|---------------------------------|
| Bacterias del suelo |
| <i>Klebsiella pneumoniae</i> |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> |
| <i>Pseudomonas aureofaciens</i> |
| <i>Serratia Marcescens</i> |
| Bacterias de animales |
| <i>Escherichia coli</i> |
| <i>Salmonela enteritidis</i> |
| <i>Shigella flexneri</i> |
| <i>Staphylococcus aureus</i> |

2.- NUTRIENTES.

La carencia de nutrientes para las bacterias, en especial de nitratos y fosfatos, es un factor importante que limita la tasa y el grado de degradación de compuestos. El Nitrógeno representa la base de la síntesis de proteínas en las bacterias, en comparación, el fósforo se necesita en la producción de energía para llevar a cabo el metabolismo. El fósforo es también un importante constituyente de los ácidos nucleicos, fosfolípidos, entre otros. La velocidad de biodegradación se eleva al doble con la aplicación de los nutrientes. La relación requerida de nutrientes para C:N:P (Carbono:Nitrógeno:Fósforo) es 120:10:1 respectivamente.

Comúnmente se utiliza Nitrato de Amonio, Sulfato de Amonio y urea como fuente de Nitrógeno. La Urea contiene altos porcentajes de N (46%). Cuando la urea es adicionada al suelo es rápidamente hidrolizada a Amonio y bióxido de carbono. Por otro lado, los compuestos utilizados como fuente de Potasio son: Difenil fosfato de potasio, difenil-pirofosfato de potasio, dietil-fosfato de calcio, entre otros.

Además del nitrógeno y el fósforo requeridos en altas concentraciones, los elementos como el hierro, azufre, magnesio y sodio son importantes aunque en menor concentración.⁽⁴¹⁾

-pH.

Los valores de pH ideales para promover la biodegradación de GDCC a través de bacterias, se encuentran entre el rango de 6.5-7.5. En condiciones neutrales el desarrollo de las bacterias es máximo que a condiciones extremas de alcalinidad o acidez. Sin embargo existen algunas excepciones, por ejemplo, para bacteria *Pseudomona aeruginosa*, la velocidad de desarrollo óptima se lleva a cabo a pH de 6.6 a 7.0, pero puede sobrevivir desde pH de 5.6 a 8.0. En comparación, la bacteria *Rhizobium* sobrevive a pH de 3.4 a 11.

El pH de varios suelos varía considerablemente de un lugar geográfico a otro. Afortunadamente las bacterias se ajustan a las condiciones extremas. Sin embargo, el pH del suelo puede ser ajustado con agentes químicos. Cuando se cuenta con suelos que tienen un pH relativamente alto, éste puede ser tratado con un solución diluida de H_3PO_4 para bajar el pH a rangos neutrales. El pH puede también bajar su valor con la aplicación de sulfato ferroso o sulfato de aluminio. Los suelos ácidos pueden ser tratados con Carbonato de calcio. Asimismo, un método alternativo para ajustar el pH es la utilización de soluciones buffer.⁽⁴¹⁾

- HUMEDAD.

El contenido de humedad en el suelo contaminado afecta en la biodegradación de GDCC debido a la disolución de los compuestos contaminantes, la dispersión y la necesidad de agua por las bacterias. Los contaminantes disueltos en agua son fácilmente degradados por las bacterias que cuando se encuentran en otro estado.

Sin embargo, la excesiva humedad puede limitar la difusión de gases como el oxígeno y disminuir la biorremediación. La humedad ideal en el suelo para los trabajos de biorremediación se encuentran entre 20-80%. Si la contaminación del suelo es poco profunda y no requiere la adición de oxígeno, 20% de humedad es adecuada, pero si la contaminación es profunda y requiere oxigenación mecánica por medio de una red de tuberías, 80% de humedad debe ser apropiada.⁽⁸⁾

- TEMPERATURA.

Todas las transformaciones biológicas son afectadas por la temperatura. Generalmente, con el incremento de la temperatura, la actividad biológica tiende a incrementarse. La Temperatura óptima para la degradación de hidrocarburos es 18 a 30 °C. Dos cultivos de bacterias usadas en biorremediación, *Pseudomona aureofaciens* y *Pseudomonas putida*, tienen una temperatura de desarrollo de 30 °C y 25° a 30 °C, respectivamente. Ninguna de estas bacterias se desarrollan a 41 °C, pero ambas pueden desarrollarse a 4°C.

Los efectos de la temperatura difieren dependiendo de la composición química del compuesto a degradar. Las temperaturas bajas retardan las tasas de volatilización de compuestos de bajo peso molecular, algunos de los cuales son tóxicos para los microorganismos y por tanto se retarda o incluso se inhibe la degradación.

Hay que tomar en cuenta que los efectos de la temperatura son interactivos con otros factores físicos, así como, con la composición del compuesto y de las comunidades microbianas. La temperatura no es a menudo el principal factor limitante excepto en medida en que se relaciona con otros factores mencionados.

Las temperaturas del suelo pueden variar entre las estaciones, principalmente en invierno y verano. En las épocas de frío, para incrementar la temperatura pueden colocarse paneles solares o cubrir el suelo con polietileno oscuro aprovechando los rayos solares. Estos métodos son útiles también para zonas frías del norte para incrementar la velocidad de la biorremediación.⁽⁴¹⁾

- OXÍGENO

Anteriormente se ha mencionado que la biodegradación bajo condiciones anaerobias es lenta y casi despreciable, por lo cual comúnmente se realiza biorremediaciones de GDCC bajo condiciones aerobias, es decir, en presencia de oxígeno.

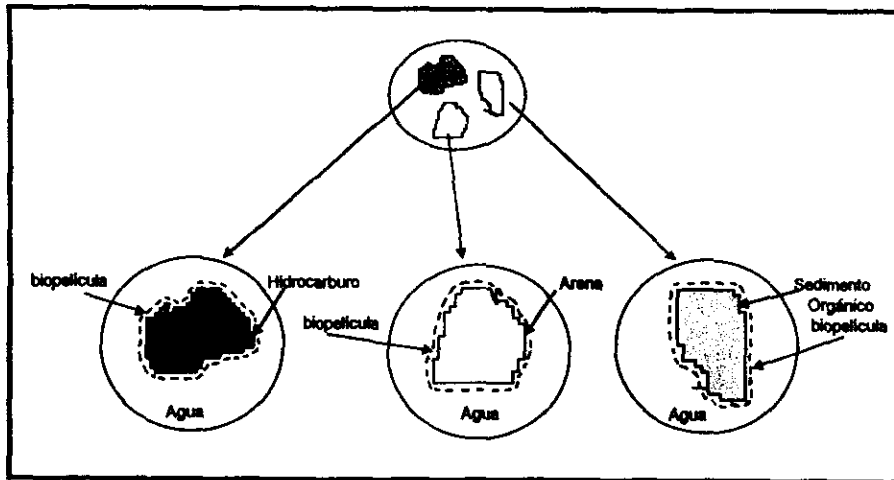
Por lo tanto, la presencia de oxígeno es esencial para la biodegradación de contaminantes. Para el aumento de oxígeno puede realizarse por medio de la aireación del suelo, esto se consigue inyectando aire al suelo por medio de un soplador o removiendo el suelo. Además, el contenido de oxígeno en el suelo también puede ser incrementado con la adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). En presencia de un catalizador, el H_2O_2 se descompone en O_2 y H_2O . Algunos metales pesados funcionan como catalizadores, como Pb, Co, Ni, Zn, Cr, entre otros. La presencia de compuestos de fosfato insoluble disminuyen la velocidad de descomposición. Generalmente la concentración óptima de H_2O_2 adicionada en el suelo es de 100 a 300 ppm.⁽⁴¹⁾

MODELO CINÉTICO DE BIORREMEDIAÇÃO.^(1, 20, 33)

Para establecer la rapidez con la cual el compuesto es degradado por las bacterias o cualquier otro microorganismo, existen un sin número de modelos cinéticos. Cuando los microorganismos se adaptan a las condiciones imperantes en el suelo contaminado, la velocidad de biorremediación depende principalmente de la cantidad de oxígeno y nutrientes, y también de la transferencia de masa de los contaminantes.

Un modelo conceptual que cualitativamente describe la biodegradación de hidrocarburos en poros del suelo, se describe en la figura 11.

Fig. 11. Modelo Conceptual del Suelo



Como se describe en la figura 10, los poros de una matriz del suelo está compuesta por una mezcla de arenas, sedimento orgánico, hidrocarburos en fase líquida, poros llenos con agua y de aire. Alrededor de cada uno de los componentes existe una biopelícula compuesta por bacterias y otros microorganismos degradadores que se adhieren en la superficie de los componentes descritos. Los compuestos orgánicos biodegradables se difunden a través de la biopelícula en donde son degradados por los microorganismos.

Los hidrocarburos pueden difundirse a través del agua (sabiendo de antemano que la biorremediación se presenta en solución acuosa) hasta el lugar donde los microorganismos pueden degradarlos en presencia de nutrientes y oxígeno. La velocidad de biorremediación puede ser controlada por la velocidad de transferencia de los contaminantes, la velocidad de transferencia del oxígeno o la velocidad de la reacción bioquímica. La etapa que presenta mayor resistencia, deberá ser la velocidad que controle el proceso de biorremediación. Aunque la velocidad de biorremediación se ve afectada por la concentración de nutrientes, éstas usualmente no son críticas porque las solubilidades de éstos son más grandes que la de los contaminantes, además el fósforo y nitrógeno son compuestos proporcionados por el mismo suelo.

La transferencia de masa de los hidrocarburos en el suelo es un proceso complicado, pues involucra la difusión molecular y la adsorción/desorción de los contaminantes. La velocidad de transferencia de masa, R_c , puede ser expresada en la siguiente ecuación:

$$R_c = A_c k_c (C_{ca} - C_c) \quad (1)$$

donde:

R_c = Velocidad de transferencia de masa de los hidrocarburos, mg/seg.

A_c = Área total de transferencia de masa, cm^2 .

k_c = Constante de transferencia de masa de hidrocarburos, cm/seg.

C_{ca} = Solubilidad del hidrocarburo en agua, mg/cm^3 .

C_c = Concentración del hidrocarburo en agua, mg/cm^3

Los efectos de la adsorción y la desorción en la transferencia de masa puede ser representado por el valor de K_c que es una media experimental.

Otro factor importante para la remediación es la disponibilidad de oxígeno para la reacción bioquímica. La transferencia de masa del oxígeno en el aire, que se encuentra en los poros del sólido, también es un proceso complicado. La transferencia de masa del oxígeno en los poros llenos de aire es mucho más rápida que en los poros llenos de agua. La velocidad de la transferencia del oxígeno en los poros del agua se describe:

$$R_o = A_o k_o (C_{oa} - C_o) \quad (2)$$

donde:

R_o = Velocidad de transferencia de masa, mg/seg.

A_o = Área total para la transferencia de masa del oxígeno, cm^2 .

k_o = Constante de transferencia de masa del oxígeno, cm/seg.

C_{oa} = Solubilidad del oxígeno en agua, mg/cm^3

C_o = Concentración del oxígeno en el agua, mg/cm^3 .

La velocidad de la reacción bioquímica en medio acuoso es descrita por la ecuación de Monod:

$$R_b = V(k_a X C_c C_o) / (K_m + C_c) \quad (3)$$

$$\text{ó}$$

$$dC_c / dt = - k' X C_c / (K_m + C_c) \quad (4)$$

Donde:

R_b = Velocidad de la reacción bioquímica, mg/seg.

k_a = Constante de la biodegradación del sustrato, lt/mg.seg.

X = Concentración de los microorganismos, mg/lt.

K_m = Concentración del sustrato cuando la velocidad de la biorremediación es la mitad de la máxima velocidad, mg/lt.

V = Volumen del agua en el suelo, lts.

$k' = k_a C_o$, 1/seg.

Nota: El sustrato se refiere principalmente a los hidrocarburos biodegradables.

Los valores de las constantes $A_c k_c$, $A_o k_o$, k_a , K_m , son determinados experimentalmente.

En los poros de una matriz del suelo, las tres primeras ecuaciones no son independientes. En efecto, el proceso de biorremediación en el suelo contaminado es simulado por una serie de procesos. La relación de las etapas, puede ser expresada matemáticamente como:

$$R_c = R_b = R_o \quad (5)$$

La etapa que presente mayor resistencia deberá ser la velocidad que controle el proceso de biorremediación.

Para calcular la velocidad de la reacción de biorremediación, la Ec. 4 puede modificarse.

1.- Cuando se presentan altas concentraciones del sustrato, la velocidad es máxima y de primer orden con respecto a la concentración del organismo, pero de orden cero con respecto a la concentración del sustrato.

$$-dC_e / dt = k' X \quad \text{con } (C_e \gg K_m) \quad (6)$$

2.- A bajas concentraciones de sustrato, la velocidad es de primer orden con respecto a la concentración de los microorganismos y a la concentración del sustrato.

$$-dC_e / dt = (k' / K_m) X C_e \quad \text{con } (C_e \ll K_m) \quad (7)$$

A partir de estas ecuaciones, es claro que X o la concentración de los microorganismos debe ser incrementada para incrementar la biorremediación.

Las ecuaciones 6 y 7 de orden cero y de primer orden respectivamente, son a menudo usadas en estudios de degradación de compuestos contaminantes orgánicos en el suelo.

Un término útil para describir la reacción cinética es la vida media, $t_{1/2}$, que es el tiempo requerido para transformar el 50% del sustrato inicial.

Integrando la Ec. 6 se obtiene:

$$C_{\infty} - C_{at} = k' X (t - t_0)$$

donde:

C_{at} = Concentración al tiempo t ,

C_{∞} = Concentración al tiempo $t_0 = 0$

para la vida media, $t_{1/2}$, colocar $C_{at} = 1/2 C_{\infty}$

$$1/2 C_{\infty} = k' X t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = C_{\infty} / 2 k' X$$

Estos conceptos son ilustrados en el siguiente ejemplo:

$$k' = 0.1 \text{ d}^{-1} \text{ o } 8640 \text{ seg}^{-1}.$$

$$C_{\infty} = 100 \text{ mg/ft.}, \text{ o } 100 \text{ ppm}$$

$$t_{1/2} = 1,000 \text{ hrs o } 60,000 \text{ seg.}$$

Calculando la concentración de microorganismos que se necesitaron para degradar 100 ppm de hidrocarburos.

$$X = C_{\infty} / 2k' t_{1/2}$$

$$X = (100 \text{ mg}) / 2 (8640 \text{ seg}^{-1})(60,000 \text{ seg})$$

$$X = 12.5 \text{ mg/ft.}$$

La pequeña concentración de microorganismos hacen que la velocidad de biorremediación sea lenta y provoca el aumento de los microorganismos.

Así, las pruebas para establecer la cinética de la biorremediación se realizan a través de pruebas de Tratabilidad.

- PRUEBAS DE TRATABILIDAD.⁽³³⁾

Posteriormente de seleccionar la bacteria que efectuará la remediación, se realizan las pruebas de tratabilidad. Estas pruebas se realizan en bandejas o en columnas de laboratorio, con el objeto de determinar la cinética de Biodegradación y las variables a controlar en el sistema de biorremediación.

a) Pruebas en Bandejas.

Esta prueba se realiza para determinar las condiciones de operación y cinética de biodegradabilidad cuando se realizará un tratamiento de biorremediación ex situ. La prueba consiste en colocar una porción de suelo del lugar contaminado en una bandeja

con dimensiones de 20 cm por 30 cm y 10 cm de profundidad. Nutrientes (Fósforo y potasio principalmente) y agua, si así lo requiere, son adicionados al suelo en cantidades determinadas. Periódicamente, el suelo es mezclado y los niveles de nutrientes, pH, Humedad, son medidos y si es necesario ajustarlos. Muestras del suelo son tomadas cada semana por 2-3 meses para determinar la concentración de contaminantes (TPH's, BTEX, PAH's, entre otros). Se realiza una curva de concentración de contaminantes contra tiempo para estimar la cinética de la reacción bioquímica y los parámetros para el tratamiento ex situ.

Esta prueba también determinará si es necesario agregar microorganismos externos, así como analizar su comportamiento.

b) Pruebas en columnas.

El procedimiento simula la biorremediación *in situ*. Una columna vertical de suelo contaminado es utilizada, permitiendo que una solución de agua, microorganismos y nutrientes fluyan a través del sistema. Una columna de prueba y otra de control, son corridas. En otra columna se inyecta aire y se comparan resultados para determinar si es necesario introducir oxígeno al sistema en campo.

Durante el curso, los estudios en la columna, parámetros químicos y biológicos de los contaminantes como concentraciones, temperatura, nutrientes, son evaluados y ajustados.

Al final del experimento, el cual dura entre 2-3 meses se realiza la curva de concentración de contaminantes en el suelo contra tiempo y determinar la cinética de reacción en la remediación *In Situ*.

- VENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN.

Las tecnologías de *Biorremediación* ofrece diversas ventajas, entre las principales se pueden citar las siguientes:

1. El Ecosistema del sitio contaminado prácticamente no se altera, al contrario se recupera.
2. No se generan desechos como producto del tratamiento, ya que los contaminantes son degradados.
3. Pueden ser acoplados otros sistemas, cuando la remoción de los contaminantes no es la máxima deseada.
4. Los contaminantes atrapados en los poros del suelo, también son biodegradados.
5. Produce niveles bajos de constituyentes tóxicos.
6. Es útil para tratar suelos contaminados y aguas subterráneas.

- DESVENTAJAS.

Algunas desventajas que presenta la biorremediación son:

1. El tiempo de ejecución de los trabajos es largo.
2. No es muy efectivo para la degradación de metales.
3. En el tratamiento de agua subterránea generalmente se requiere recirculación de agua subterránea.
4. La Biodegradación completa de PAH's puede ser difícil.

5.1.1. TÉCNICAS IN SITU.

Las tecnologías de *biorremediación in situ* se aplican en el sitio contaminado. Generalmente, éstas se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en el acuífero. Además, en varias ocasiones el excavar el suelo para desplazarlo a otro lugar, resulta difícil, primeramente porque en el suelo pueden estar asociadas estructuras superficiales, por

ejemplo, alguna construcción, algún tanque, tuberías, entre otros. Asimismo, una gran profundidad de la contaminación, sumado a un gran volumen del suelo, provocaría un gran costo de operación y riesgo de fuego, explosión y emisiones al aire por la remoción y transporte del suelo contaminado con GDCC.

Algunas ventajas que tiene la biorremediación in situ con respecto a la ex situ son:

1. Se eliminan costos de transportación ya que se realiza en el sitio contaminado.
2. Se eliminan riesgos de fuego y emisiones al aire por la remoción del suelo contaminado.

Dentro de la gama de Técnicas In Situ, se distinguen dos utilizadas en el tratamiento de suelos contaminado con GDCC, como son la Bioaumentación y Bioestimulación.

- BIOAUMENTACIÓN.

En general existe una baja población de microorganismos en el suelo, se dice que existen concentraciones menores a 10^6 bacterias por gramo de suelo, los cuales se encuentran adheridos a las partículas del suelo y cuando sucede la contaminación por GDCC, algunos de estos microorganismos mueren. Como se demuestra en la ecuación de biodegradación, la velocidad en que los contaminantes son degradados es directamente proporcional a la concentración de los microorganismos, por lo cual, al aumentar los microorganismos degradadores aumentará la velocidad.⁽³⁴⁾

Si en el estudio de caracterización del suelo se especifican bajas concentraciones de microorganismos nativos, es necesario cultivarlos e incorporarlos posteriormente. Por lo cual, la bioaumentación, involucra la adición de microorganismos al sitio contaminado cuando la población autóctona carece de capacidad degradadora. Esto involucra tanto microorganismos nativos como de otro tipo. Pues en muchas ocasiones los microorganismos de lugar contaminado son deficientes para degradar los compuestos del GDCC y es necesario cultivar otro tipo de bacterias para llevar a cabo la degradación.

Se recomienda utilizar bacterias del mismo sitio, porque otros microorganismos pudiesen tener interacciones negativas con los nativos, como el amensalismo, competencia por nutrientes, predación, además de un tiempo mayor de adaptación. Sin embargo, algunas bacterias externas se adaptan a las condiciones del suelo y se obtienen trabajos más eficientes. Por lo cual, se realizan en laboratorio los estudios de biotratabilidad para definir la bacteria más apta.

Después de haber identificado el microorganismo ideal que llevará a cabo la biorremediación, se inicia la producción bacterial (Biomasa). La Producción de la Biomasa ocurre en un tanque fermentador. Primeramente, la bacteria es aislada de su hábitat dentro de un tubo de ensayo que contiene una solución de soya y es incubada a una temperatura óptima para la bacteria hasta que el cultivo se toma turbio. Estos 10 ml de cultivo bacterial son usados como semilla para un recipiente más grande que contiene 1 litro de solución de soya y es incubado hasta que la solución se toma turbia y el proceso es repetido en un recipiente de mayor volumen.

Cada proceso de fermentación produce un gran número de bacterias y son separadas de la solución de soya por centrifugación. La nata que contiene las bacterias es descargada y empaquetada en plástico y colocada en hielo y transportada al sitio contaminado. Esta Biomasa debe ser aplicada en el lugar contaminado antes de las 48 horas para obtener mejores resultados.

Para la adquisición de lotes de bacterias, últimamente se cuentan con centros de cultivos de éstos microorganismos, en los cuales las personas que realicen trabajos de biorremediación las podrán adquirir. Algunos nombres comerciales de cepas bacterianas son:

- *Inoculum*. Producto no tóxico utilizado para tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos.
- *Byo-gonpx-109*. Producto no tóxico utilizado para productos industriales orgánicos en agua (Utilizado para contaminación de acuíferos).
- *Byson*. Producto no tóxico utilizado para hidrocarburos impregnados en el suelo.

Nota: Los nombres comerciales fueron proporcionados por las compañías dedicadas a tratamientos de suelos.

Por otra parte, la Biomasa tiene una población aproximadamente de 4.5×10^{14} de bacteria por libra. La cantidad de Biomasa requerida para el sitio contaminado depende del volumen de suelo contaminado y la concentración de los contaminantes presentes.⁽⁴¹⁾

La Biomasa seleccionada para la biorremediación se aplica por inyección o técnicas de spray o rociado, dependiendo de la profundidad de la contaminación. Si la contaminación es superficial las técnicas de rociado serán seleccionadas para introducir las bacterias, por lo tanto, a grandes profundidades de contaminación se realizan a través de técnicas de inyección.

Para su impregnación, la biomasa es diluida (1 libra/ 100 galones de nutrientes, principalmente) para facilitar la aplicación. La solución de nutrientes debe ser precalentada a la temperatura del suelo para prevenir un shock termal en los microorganismos.

La aplicación de la biomasa se recomienda que se efectúe por las madrugadas, principalmente en verano, porque las temperaturas son más frías y no existe riesgo por los rayos ultravioleta (UV) del sol. Los rayos UV son letales para los microorganismos, por lo cual, las bacterias son menos eficientes en la superficie del suelo que en la profundidad. Cuando la contaminación es profunda, se realizan pozos de inyección en diferentes puntos específicamente predeterminados. El número de pozos de inyección está en función del volumen y área de la contaminación. Además de los pozos de inyección, se implementan otros que servirán para monitoriar el desarrollo de la biorremediación.⁽⁴²⁾

El monitoreo consiste en tomar muestras del suelo y determinar en el laboratorio la concentración de TPH's, BTEX, PAH's, nutrientes, oxígeno, entre otros, con el objetivo de dar seguimiento al proyecto.

- BIOESTIMULACIÓN.

La Bioestimulación consiste en la utilización de microorganismos nativos del suelo que requieren ser estimulados a través de la provisión de las condiciones óptimas para su desarrollo. Esto involucra principalmente la inyección de nutrientes y oxígeno.

Cuando la caracterización del sitio contaminado proporciona información acerca de las condiciones del suelo, especificando que la cantidad de nutrientes u oxígeno no se encuentran en grandes cantidades para llevar a cabo el proceso de biorremediación, se debe proveer al suelo de éstas necesidades.

Además, si las pruebas de biotratabilidad indican que los microorganismos presentes en el sitio tienen la facultad de realizar la biorremediación óptimamente, se debe aumentar su cantidad por medio de la adición de nutrientes u oxígeno. La cantidad de nutrientes a adicionar se determina en laboratorio y esta en función de la cantidad de material contaminado en el suelo. Como se especifico anteriormente la relación de Carbono, Nitrógeno y Fósforo es 120:10:1, respectivamente.

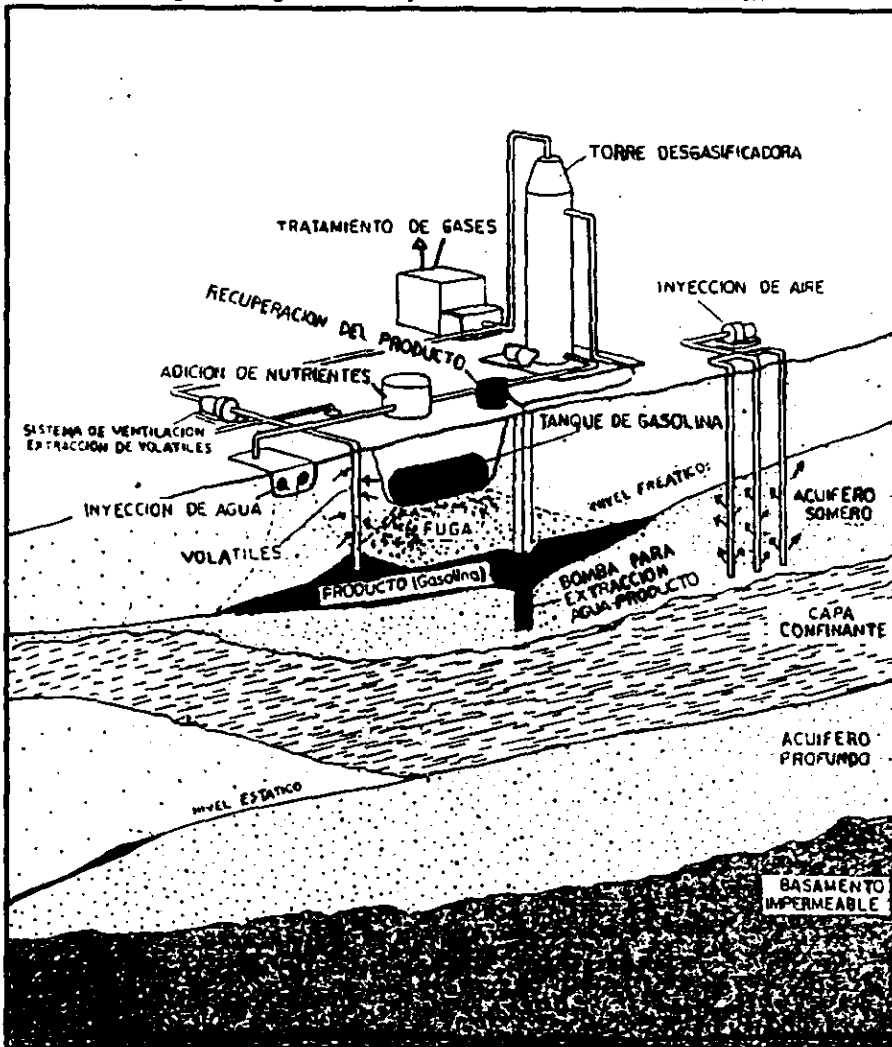
La aplicación, al igual que para la introducción de microorganismos, se emplea una galería de infiltración (a base de tubería PVC ranurada) o se irriga directamente en el suelo por rocío o aspersión, con agua no contaminada mezclada con nutrientes, para suelos en los cuales la contaminación sea poco profunda. En caso de suelos en los cuales la contaminación sea profunda, se habilitarán pozos de inyección.

Asimismo, los niveles de oxígeno son generalmente adecuados para el desarrollo de la biorremediación en la superficie del suelo. Pero para una contaminación profunda es necesario que el oxígeno o aire sea bombeado a través de tuberías colocadas en puntos estratégicos del lugar contaminado.⁽³⁸⁾

Por otra parte, cuando se presenta contaminación en aguas subterráneas, principalmente en acuíferos, los sistemas de tratamiento In Situ involucra bombear el agua subterránea a la superficie a través de un pozo de recuperación, en donde es tratada y mezclada con nutrientes . Posteriormente, es reinyectada dentro del acuífero.

El Diagrama de flujo para el primer caso, se presenta a continuación:

Fig. 12. Diagrama de Flujo en el Proceso de Bioestimulación.



En el diagrama se muestra la extracción de la mezcla agua-gasolina que se encuentra en el acuífero, la cual en la superficie es separada. El hidrocarburo es almacenado en un tanque y el agua pasa a través de una torre desgasificadora para eliminar compuestos volátiles. Los gases obtenidos son tratados por oxidación catalítica

o incinerados. Al agua se le adicionan nutrientes y es inyectada nuevamente al suelo, lo que provoca la biodegradación. Además que se inyecta aire para oxigenar el suelo.⁽³⁴⁾

Para controlar del proceso de bioestimulación, se realiza un monitoreo de la cantidad de nutrientes, TPH's, BTEX, oxígeno y CO₂, principalmente.

En el caso de la determinación de CO₂ se realiza con la finalidad de reforzar los resultados de la desintegración de los contaminantes y comprobar la efectividad de la biorremediación. Se estima que por cada libra de hidrocarburo degradado, el 40 % de carbono disponible es convertido a CO₂, mientras el resto es utilizado por la bacteria como materia celular. Así, a partir de la determinación de CO₂, se conocerá el material degradado en el proyecto.

5.1.2. BIORREMEDIACIÓN EX SITU.

La Biorremediación Ex Situ, consiste en trasladar el suelo contaminado a otro lugar previamente acondicionado, donde será tratado. Cuando el volumen de la contaminación no es grande, es poco profunda y no ha alcanzado el nivel freático, la biorremediación ex situ es una opción factible. La ventaja de las biorremediaciones de éste tipo con la in situ, es que es más rápida, pero se presentan algunas dificultades en la excavación y traslado del material contaminado como emisiones al aire de volátiles y riesgo de explosión o incendio.

Dentro de las técnicas que se encuentran en este grupo aplicables en la biorremediación de GDCC se encuentran los LandFarming (Biolabranza) y Landfill, principalmente.

5.1.2.1 LANDFARMING (BIOLABRANZA).

El Landfarming es una tecnología de biorremediación en la que el suelo contaminado es colocado sobre la superficie protegida del suelo y periódicamente se revuelve o labra para airear el contaminante.^(34, 41)

Mediante pruebas de laboratorio, se determinan las concentraciones y el tipo de nutrientes y microorganismos a emplear para lograr los límites de limpieza.

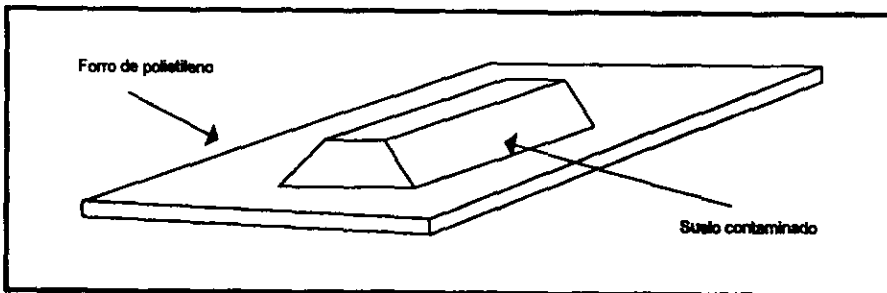
Posteriormente se elige el área donde se efectuará el tratamiento, que debe estar localizada en una zona en la cual no existan problemas que originen deslizamientos del material hacia otro punto.

La superficie del suelo, donde será colocado el material contaminado es protegido por un forro de polietileno. Este material evita la infiltración de hidrocarburos al suelo. Luego se coloca por encima una capa de 20-30 cm de arena o aserrín. A continuación se deposita el suelo contaminado. Existen máquinas mezcladoras de suelo que homogeneizan entre 85 y 95 % los contaminantes hidrocarburos, la tierra, los nutrientes y microorganismos. Para el funcionamiento de las máquinas mezcladoras, el suelo es colocado en hileras de por lo menos 4 metros de ancho en el fondo, 1.5 metros de ancho superior, 2 metros de profundidad y ningún límite de longitud, esto claro que está condicionado por al tamaño de la máquina. Las máquinas mezcladoras pasan por encima de las hileras del material y lo van mezclando.

La capa de aserrín o arena permitirá mezclar completamente toda la tierra contaminada en vez de dejar una capa de 10-15 cm sin homogeneizar apropiadamente al fondo de las hileras. Los nutrientes y microorganismos son rociados sobre las hileras formadas y la máquina mezcladora los revolverá.(Fig. 13).

Además, la máquina elimina partes sumamente contaminadas, así como bloques anaerobios, reduciendo con ello el tiempo de la biorremediación. La remoción recarga la mezcla con O₂ fresco y purga CO₂ acumulado. Un revolviendo más frecuente durante la biorremediación puede hacer al proceso centenar de veces más rápido.

Fig. 13. Landfarming.



Para optimizar la degradación de los contaminantes es necesario controlar las siguientes condiciones del suelo.

- Contenido de humedad (adición de agua por irrigación o rociado).
- Niveles de oxígeno (Mediante la mezcla del suelo)
- Adición de nutrientes.
- pH.(Mantener el pH de 6.5-7.5, principalmente).

El monitoreo y seguimiento de biorremediación es en base a la determinación de los TPH's y los componentes tóxicos, así como los puntos anteriores.

5.1.2.2. LANDFILL

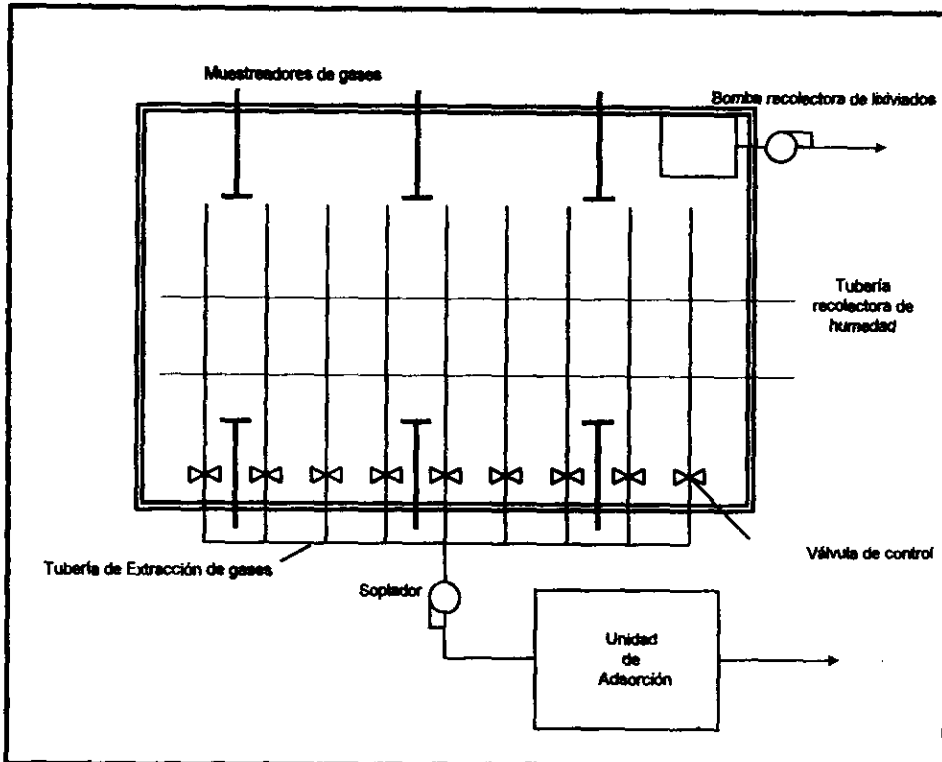
La Técnica de Landfill consiste en la construcción de celdas de tratamiento donde es colocado el material contaminado. La celda es acondicionada con un sistema de aireación, de tratamiento de gases y de recolección de lixiviados, con la finalidad de aumentar la biodegradación.⁽³⁹⁾

El Diseño de la celda consiste en colocar nylon reforzado sobre una área predeterminada y encima se deposita tela asfáltica para evitar la contaminación del suelo. Sobre la tela es colocada la red de tuberías de recolección de exceso de humedad del suelo y lixiviados (hidrocarburos que se filtran del suelo en tratamiento), y es cubierta con una capa de grava mediana. Alrededor de la tela son colocados bolsas de arena en

el perímetro de la celda. Posteriormente se coloca un material geotextil sobre la grava y encima se extiende el material contaminado. Una red de tubería de PVC para la ventilación y el monitoreo de gases es instalado en la construcción de la celda. La ventilación se efectúa a través de un sistema a vacío y los gases obtenidos son tratados por adsorción con carbón activado. (Fig. 14).

La adición de nutrientes es rociada encima del suelo contaminado al igual que microorganismos, si así lo requiere. Durante el proceso de biorremediación se monitorea principalmente, la cantidad de oxígeno presente al igual que de CO_2 , y muestras de suelo son recopiladas con el fin de determinar los TPH's y componentes tóxicos. ^(41, 30)

Fig. 14. Celda de Tratamiento Landfill

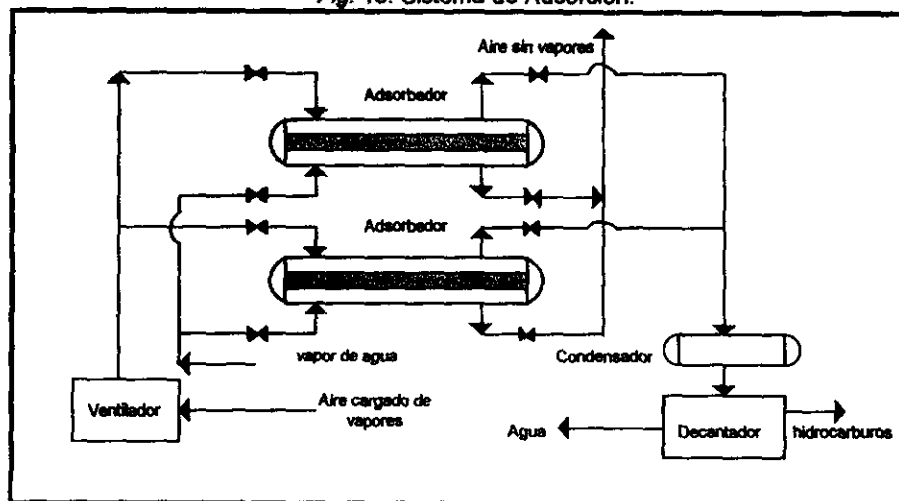


El agua recolectada del suelo y lixiviados se analizan para determinar la cantidad de elementos tóxicos que pudiese arrastrar del suelo y determinar si es necesario tratarlos posteriormente.

Por otro lado, los gases extraídos son analizados antes y después de entrar a la unidad de adsorción. El Sistema de adsorción es utilizado principalmente cuando los hidrocarburos impregnados en el suelo, contienen cantidades significativas de volátiles como gasolinas.

El sistema de adsorción de carbón activado consta por lo menos de dos adsorbedores y de un equipo de condensación y separación (Fig. 15). El aire cargado de contaminantes recuperados del suelo se hacen pasar, de arriba hacia abajo, por los lechos de carbón activado, donde cede dichos vapores, para salir por el fondo del recipiente. Cuando el lecho ha adsorbido tal cantidad de volátiles que sale del adsorbedor es más alta de la deseada, la corriente gaseosa se conmuta y dirige a otro adsorbedor, mientras que el primero se agota y se reactiva. Esta reactivación y recuperación de disolvente se verifica haciendo pasar vapor de agua a baja presión por el lecho, para así eluir los volátiles. La mezcla de vapor de agua-disolvente se condensa y éstos se separan por decantación o destilación.⁽²⁷⁾

Fig. 15. Sistema de Adsorción.



5.2 TRATAMIENTOS FÍSICO/QUÍMICOS.

Los Tratamientos Físico/químicos son aquellos que utilizan elementos físicos o químicos para el saneamiento de suelos contaminados. Algunos procesos físico/químicos no corresponden propiamente a la destrucción de los contaminantes, su propósito es estabilizar, inmovilizar o remover estos constituyentes. Su aplicación se desarrolla In Situ o Ex Situ dependiendo de la naturaleza de los contaminantes y de la extensión del área dañada.⁽³⁶⁾

Los Sistemas Físico/químicos presentan algunas ventajas sobre los Biológicos, como son:

1. Tiempos de tratamiento cortos.
2. Remoción de altas concentraciones de contaminantes.

Algunas desventajas que presenta, son:

1. Ciertos sistemas presentan emisión de gases, líquidos o cenizas que deberán tener un tratamiento o confinamiento posterior.
2. El costo es mayor con respecto a los sistemas de biorremediación.

5.2.1. EXTRACCIÓN HIDRÁULICA DE HIDROCARBUROS Y AGUA SUBTERRÁNEA.

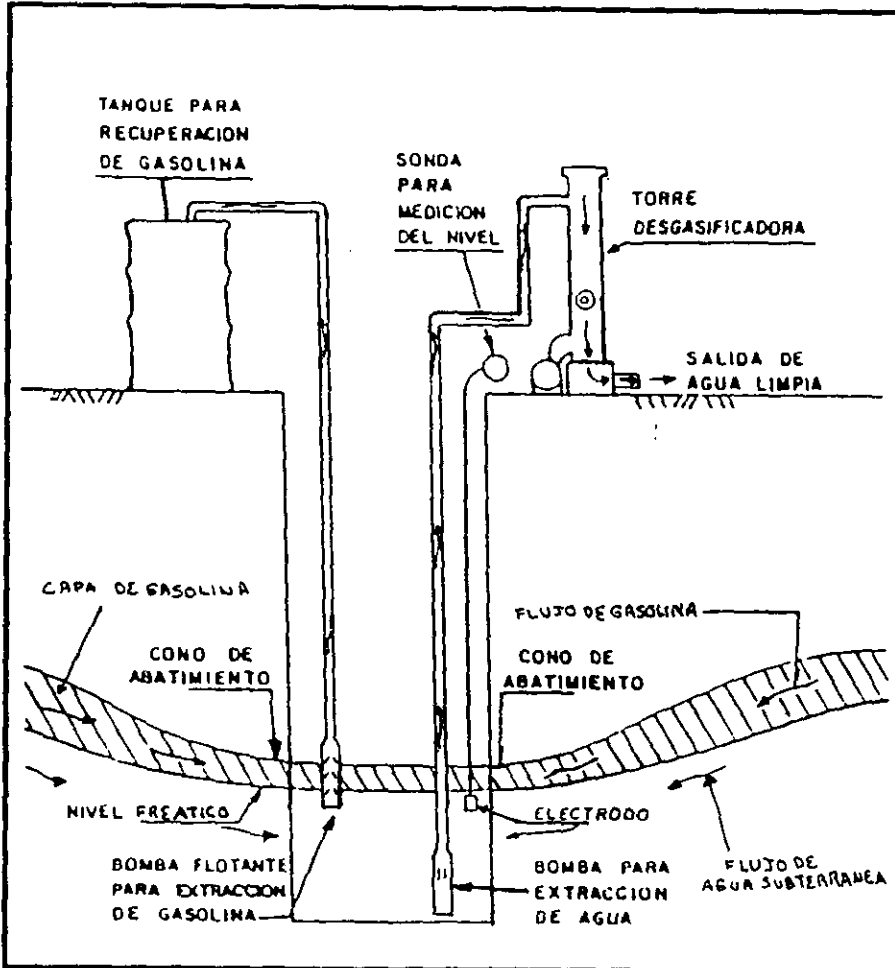
Cuando los contaminantes llegan a infiltrarse hasta los acuíferos, una técnica In Situ de saneamiento es por Extracción Hidráulica.⁽³⁶⁾

El Sistema de extracción hidráulica se basa en el bombeo, extracción y tratamiento de agua subterránea y contaminantes en la superficie.

Los hidrocarburos líquidos son bombeados a través de pozos. Este puede ser extraído junto con el agua del acuífero y una vez en la superficie, es separado. En la mayoría de los casos, los hidrocarburos líquidos se encuentran en una capa flotando sobre el agua, como en el caso de gasolinas y pueden ser extraídos por separado a través de bombas especiales. Para acelerar la acumulación de los hidrocarburos en el

entorno del pozo, puede bombearse agua al suelo y formar un cono de abatimiento, cuya pendiente facilita el movimiento de la capa de hidrocarburos que flota sobre el nivel freático, hacia el pozo (Fig. 16).

Fig. 16. Extracción Hidráulica.



El Diagrama muestra la extracción del agua subterránea y del hidrocarburo (gasolina). Por ser la gasolina una mezcla de hidrocarburos principalmente ligeros, el agua subterránea es tratada en la superficie a través de una torre desgasificadora, por lo cual, es importante el análisis del agua subterránea para elegir su sistema de

tratamiento. El Nivel del agua es controlado para permitir la formación del cono de abatimiento y aumentar la extracción del hidrocarburo.

En algunos casos se inyecta agua hacia los pozos recuperadores para arrastrar contaminantes del suelo y después es bombeado el líquido a la superficie para tratarlo. Para aumentar la solubilidad de los hidrocarburos en el agua inyectada, a ésta se le adicionan aditivos para aumentar la efectividad del tratamiento, que suelen ser surfactantes, como sales de ac. carboxílicos, ac. sulfónico, entre otros.⁽³⁵⁾

Una vez tratada el agua es depositada en ríos, lagos u otro depósito hidrológico cercano o inyectado de nueva cuenta al acuífero.

El sistema de Extracción Hidráulica en varias ocasiones es utilizado antes de emplear alguna otra técnica de saneamiento cuando la contaminación ha alcanzado los acuíferos, además, es empleada principalmente cuando la concentración de los contaminantes en éstos, es grande.

5.2.2. EXTRACCIÓN DE VAPOR.

Esta técnica se basa en la extracción de vapor del suelo aplicando vacío o inyección de vapor para inducir un flujo controlado de aire que remueva los contaminantes volátiles y semivolátiles presentes. Esta Técnica es conocida también como ventilación del suelo o extracción a vacío y es implantado relativamente en un tiempo corto. La extracción de vapor es una técnica in situ, pero también puede acondicionarse a un tratamiento ex situ. En la segunda, se acondiciona en pilas o celdas como se realiza en el tratamiento de Landfill. En ciertas ocasiones, la extracción de vapor ha sido combinada con la biorremediación o sistemas de tratamiento de agua subterráneas como la extracción hidráulica, para eficientar el saneamiento del suelo.

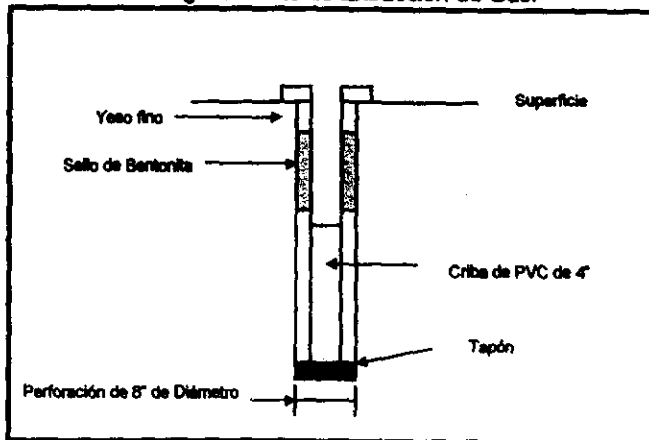
La extracción induce la volatilización de los contaminantes ligeros principalmente y para su implementación se requiere contar con información del estudio de evaluación, como: profundidad y extensión del área contaminada, concentración de los contaminantes, profundidad del nivel freático y propiedades del suelo tales como textura, permeabilidad y contenido de humedad.

Alto porcentaje de humedad (mayor de 80%) disminuye la efectividad del tratamiento, pues el exceso de agua dificulta el paso del aire por el suelo y disminuye la volatilización de los contaminantes. Además, la baja permeabilidad, la compactación y las partículas pequeñas del suelo como la arcilla, impiden la circulación del aire y la extracción de los contaminantes.⁽²⁾

Por lo cual, es necesario un estudio piloto de campo para establecer la factibilidad del método, así como para obtener la información necesaria para diseñar y configurar el sistema, como es el número y localización de pozos de inyección y extracción, tasa de flujo de gas, aplicación óptima de vapor y la tasa de remoción de la masa de los contaminantes.

Típicamente los componentes del sistema de extracción de vapor consiste de un pozo de extracción de vacío (Fig. 17), pozos de entrada de aire y pozos de monitoreo de vapor distribuidos a través del sitio contaminado. También, se cuenta con un sistema de tratamiento del gas extraído del suelo, un separador de humedad y un sistema de bombas a vacío, quienes impulsarán al gas a salir del suelo.

Fig. 17. Pozo de Extracción de Gas.



Los pozos de extracción de vapor son construidos de PVC de aproximadamente 2-4 pulgadas de diámetro y cada pozo tiene una válvula de control, puerto de muestreo y manómetro. Los pozos están interconectados a través de una red de tubería PVC y

desembocan en un separador de humedad, el cual está conectado posteriormente a las bomba de vacío y al sistema de tratamiento de gases⁽³⁹⁾ (figura 18 y 19).

Fig. 18. Sistema de Extracción de Vapor.

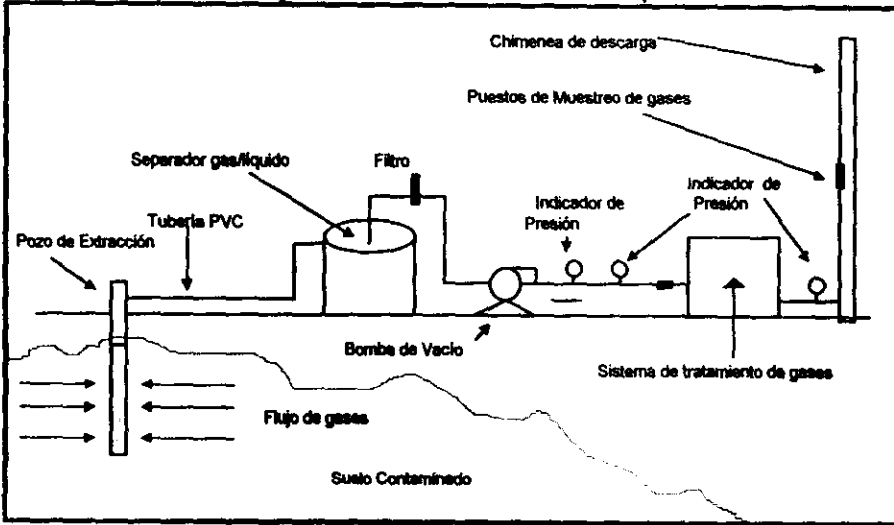
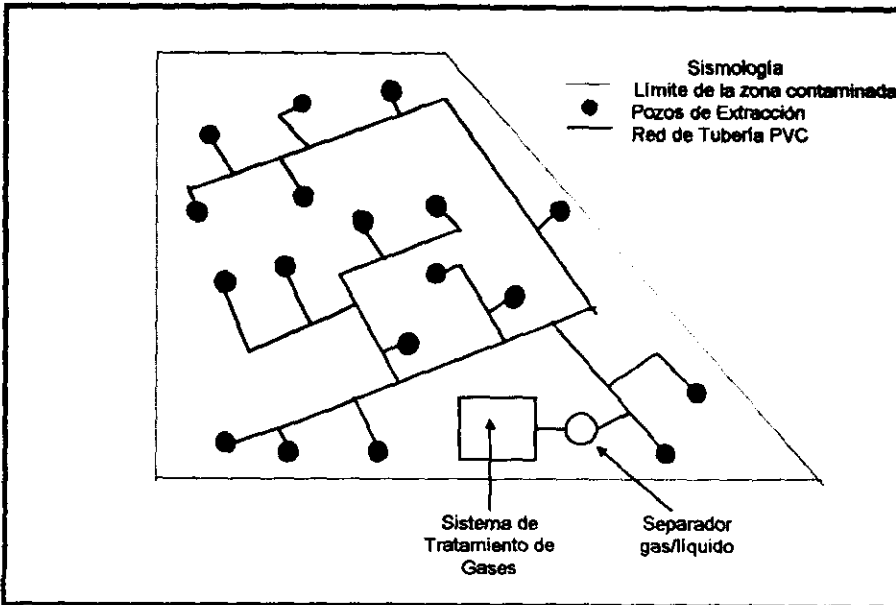


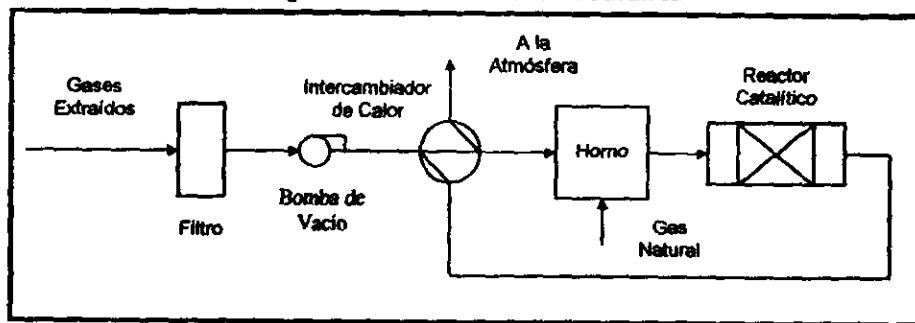
Fig. 19. Red de Tuberías del Sistema de Extracción.



El sistema de tratamiento de gases puede ser a través de adsorción de vapor por carbón activado u oxidación catalítica. El Sistema de Adsorción de gases está constituido de recipientes empacados con carbón activado. Para aumentar la eficiencia del sistema se pueden acondicionar varios adsorbedores conectados en serie. El número y tamaño de los recipientes están en función de la masa de gases a tratar y de la cantidad de volátiles presentes en los gases.

El sistema de oxidación catalítica es esencialmente un reactor termal (Fig. 20). Los gases de extracción fluyen a través de un intercambiador de calor para precalentarlos y posteriormente entran a un horno en donde aumentarán su temperatura hasta 300 °F para que enseguida se introduzcan al reactor catalítico donde se llevará a cabo la reacción de combustión produciendo bióxido de carbono y vapor de agua principalmente.⁽²¹⁾

Fig. 20. Sistema de Oxidación Catalítica



Entre las ventajas de la extracción de vapor se tienen las siguientes:

- Remueve los hidrocarburos volátiles de la zona insaturada.
- La técnica es utilizada como auxiliar de la biorremediación.
- Apropiado para la remoción de gasolinas.

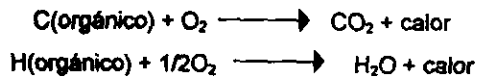
En cuanto a las desventajas se pueden citar:

- No remueve constituyentes no volátiles.
- No es efectivo para suelos con baja permeabilidad.
- El costo es moderado.

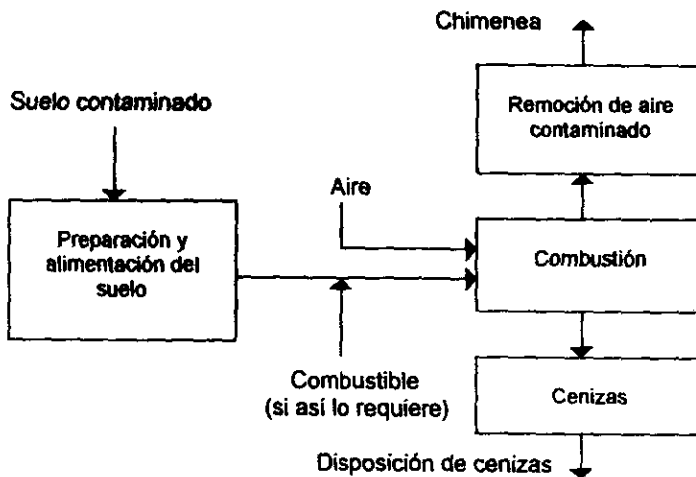
5.2.3. TRATAMIENTOS TERMALES.

El tratamiento *termal* es un proceso en tanque que utiliza altas temperaturas como método primario para la destrucción de los materiales contaminantes del suelo. La eficiencia de destrucción y remoción alcanzadas para desechos incinerados en procesos termales adecuadamente operados a menudo excede el 99.99%.⁽⁷⁾

Dentro de los procesos termales, la Incineración es uno de los métodos de saneamiento más utilizado para la destrucción de contaminantes en el suelo. La destrucción de los contaminantes se realiza a través de la combustión de éstos, simplificadas en las siguientes reacciones significativas.



Los sistemas de incineración pueden dividirse en 4 componentes y muestra el siguiente esquema:



- Alimentación y preparación del suelo.

La preparación del suelo depende de la naturaleza del suelo, pues puede requerir triturarlo o tamizarlo o algún otro mecanismo.

- Cámaras de combustión.

Los incineradores con frecuencia utilizados para el tratamiento del suelo son:

- Incineración con hornos rotatorios.
- Incineración con lechos fluidizados.

- Remoción de aire contaminado.

Los gases de combustión son muestreados para determinar sus efectos tóxicos antes de pasar al sistema de tratamiento. Primeramente, los gases son enfriados por un intercambiador de calor y posteriormente las partículas suspendidas pueden ser removidas por filtros o cámaras de precipitación o recuperadas por ciclones. Los gases ácidos como HCl pueden ser extraídos en torres de rocío, torres empacadas, entre otros. Posteriormente los residuos líquidos requieren un tratamiento químico como neutralización.

- Tratamiento de residuos y cenizas.

El calor de las cenizas es removido con agua, la cual será tratada posteriormente, mientras las cenizas son analizadas para determinar su peligrosidad y su confinamiento.

Por otra parte, las cámaras de combustión empleadas en el tratamiento son hornos rotatorios y de flujo fluidizado.

La incineración en hornos rotatorios han sido usados por muchos años como una técnica de saneamiento. Los hidrocarburos por tener un alto poder calorífico, son factibles de utilizarse en estos procesos.

Los hornos rotatorios son cilindros lineales metálicos, los cuales tienen un sistema de rotación sobre su propio eje y, por lo común, tienen una leve inclinación en relación con la horizontal, con lo que ayudan a homogeneizar el suelo contaminado convirtiendo los contaminantes en bióxido de carbono y agua.

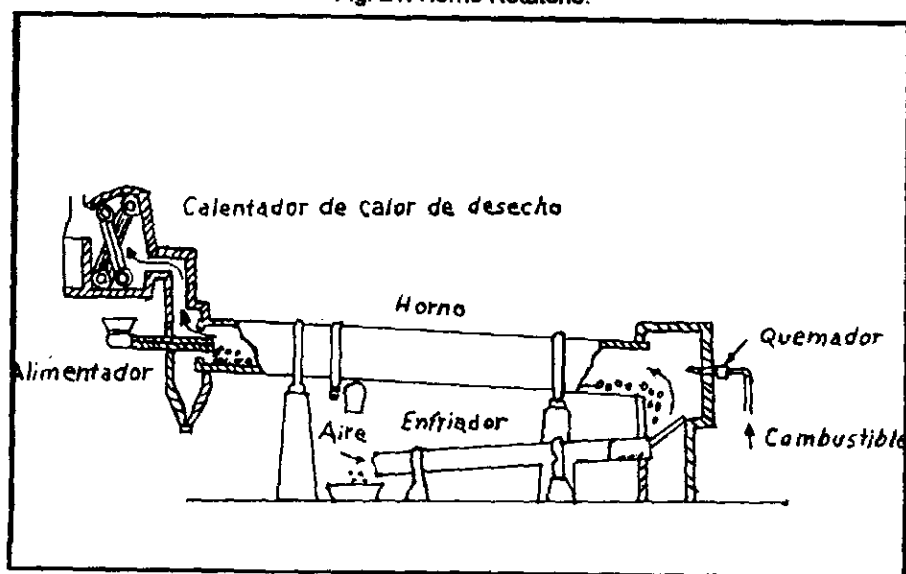
El horno rotatorio es uno de los hornos de proceso para altas temperaturas de mayor importancia en los procesos industriales. Para el tratamiento de suelos

contaminados existen hornos que pueden manejar hasta 10 toneladas por hora de material a 30 millones de BTU/hr.⁽⁶⁾

Este tipo de hornos también pueden ser usados para la destrucción de residuos peligrosos y existen en el mercado compañías dedicadas a estas funciones.

Por otra parte, en el horno rotatorio el suelo contaminado se introduce en el extremo superior del horno a través de vertederos inclinados, transportadores de tornillo sin fin de suspensión superior, entre otros. El suelo pasa a la cámara rotatoria en donde se desplaza a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro y se descarga por el otro extremo como producto de acabado. Las unidades se calientan con gas, petróleo o ase aprovechan los hidrocarburos del suelo. La transmisión de calor se realiza a través de la circulación directa de los gases de combustión por la cámara. Para efectuar la combustión, se introduce aire a la cámara a contracorriente. El producto caliente se descarga desde el extremo inferior del horno hacia dispositivos de enfriamiento que pueden o no recuperar su contenido calorífico⁽²⁷⁾. Estos dispositivos de enfriamiento y recuperación calorífica incluyen cilindros rotatorios inclinados, parrillas inclinadas de movimiento lento, parrillas de sacudimiento, etc.(fig. 21).

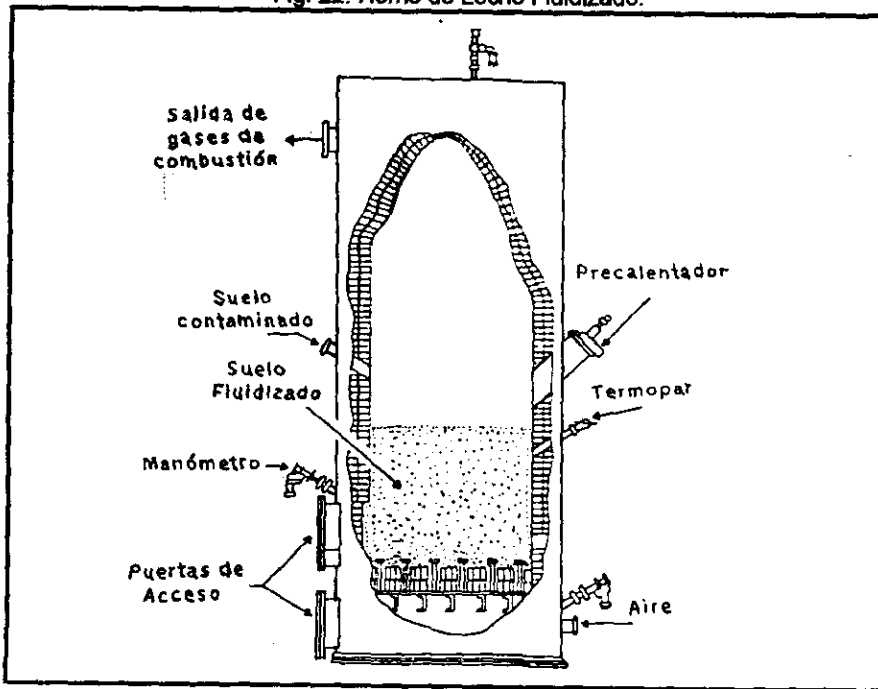
Fig. 21. Horno Rotatorio.



Por otra parte, los hornos con lecho fluidizado son empleados internacionalmente en varios procesos de la industria, como la cementera y en las compañías que se dedican a la incineración de residuos industriales.

El Sistema de lecho fluidizado se concreta en que el aire caliente se desplaza verticalmente hacia arriba a través de un lecho de material granular (suelo contaminado). El aire es circulado hasta que el material sea suspendido en la corriente y capaz de moverse y mezclarse como un fluido. En el lecho se lleva a cabo la combustión de los hidrocarburos y materia orgánica del suelo contaminado produciendo bióxido de carbono y otros gases de combustión. El incinerador cuenta con un ciclón en la parte superior para recircular los sólidos y elevar la eficiencia del sistema. por su completo mezclado debido a la alta turbulencia, la producción de cenizas y gases como N_{ox} , son minimizados⁽²⁷⁾. Los gases son analizados a la salida del lecho para determinar la calidad de los mismos. Las cenizas de la combustión también son analizadas para determinar su peligrosidad y su confinamiento. (Fig. 22).

Fig. 22. Horno de Lecho Fluidizado.



Así, el tratamiento por incineración presenta algunas ventajas entre los otros tratamientos como:

- Tiempo de tratamiento muy corto.
- Factible para suelos con concentraciones altas de contaminantes.
- Reduce el volumen de sólidos.
- Efectivo tratamiento para suelos con alto contenido de PAH's.

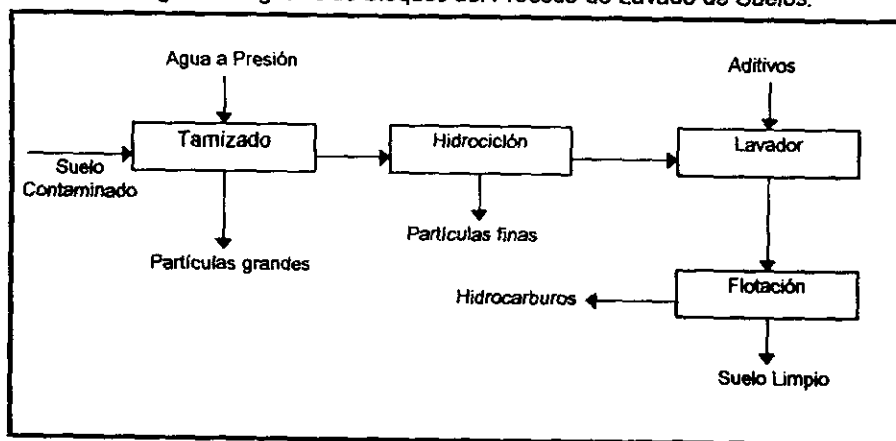
Por lo contrario, también presenta algunas desventajas tales como:

- Los requerimientos de disposición de cenizas depende de una clasificación.
- Las cenizas peligrosas deberán ser tratadas o determinar la manera de su confinamiento.
- Costo de operación es alto y se incrementa a suelos con gran contenido de humedad.

5.2.4. LAVADO DE SUELOS.

El Lavado de Suelos es una técnica de descontaminación ex situ. Es un proceso físico en donde se excava el suelo contaminado y se hace pasar en un sistema de separación de partículas. Las separación de partículas finas, usualmente menores de 35 micras, eliminan una gran porción de los contaminantes. Esto puede lograrse utilizando un hidrociclón. En contraste, las partículas (mayores de 4 mm) son removidas usando técnicas de tamizado. Tanto las partículas muy pequeñas como las grandes contienen pequeñas concentraciones de contaminantes. Las otras fracciones del suelo se hacen pasar a un lavador en donde las partículas estarán en contacto directo con agua. Después la mezcla sólido/agua es alimentada a una unidad de flotación donde el contaminantes flotan en forma de espuma. Los contaminantes son separados en la parte superior, mientras el suelo limpio es acumulado en el fondo.⁽³⁶⁾ (Fig. 23).

Fig. 23. Diagrama de Bloques del Proceso de Lavado de Suelos.



El proceso, como tal, no destruye o inmoviliza los contaminantes, aunque no puede ser considerado como un proceso de remediación. El principal valor del sistema del lavado de suelos con agua es la producción de una corriente limpia del suelo .

La efectividad del proceso de lavado de suelos puede aumentar por medio de dos métodos. Esto puede ser a través de medios químicos o medios mecánicos.

Los métodos mecánicos involucran el uso de varias etapas de flotación o el uso de un gran tiempo de residencia. Este Procedimiento no garantiza lograr los estándares de limpieza. Algunos contaminantes quedan atrapados en los poros y no son liberados a pesar de un gran número de unidades de operación o un gran tiempo de residencia.

Los métodos químicos consisten en la adición de aditivos químicos o materiales sorbentes físicos. Los sorbentes y/o aditivos son adicionados al suelo contaminado en el lavador. El mezclado mecánico, en la presencia de un aditivo, acelera e incrementa la liberación de los contaminantes del suelo. Los aditivos o los sorbentes desplazan los contaminantes de los poros del suelo y como resultado proporcionan un suelo más limpio. Los sorbentes utilizados, por lo general es carbón activado fino o pequeñas tiras de hule, mientras los aditivos pueden ser surfactantes como sales de ac. sulfónico.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

El proceso de lavado de suelos involucra la separación de las partículas grandes, la separación a través de un hidrociclón, el lavado y la flotación.

- Separación de Partículas grandes.

La separación de la partículas de tamaño grande, se realiza a través de un tamiz y por la acción de agua para remover los materiales finos (usualmente contaminado) de los materiales grandes (usualmente descontaminado). Solamente en raros casos los materiales grandes pueden ser porosos y contienen considerable concentración de contaminantes. En este caso los materiales deben ser triturados y procesados.

- Separación por Hidrociclón.

La operación del hidrociclón es similar a un ciclón de gases, promovida por una fuerza centrífuga que desplaza las partículas grandes y densas a la pared exterior del ciclón, en donde descenderán a la base del ciclón cónico, mientras los materiales finos se encuentran en el centro del ciclón y ascienden a la parte superior, en donde son recolectados.

- Lavador.

Después de la separación de materiales grandes y del hidrociclón, la fracción remanente que se recoge en el fondo de este equipo pasa a un lavador, en el cual, la mezcla agua/suelo es agitada vigorosamente produciendo un excelente mezclado. Al final del lavador, los hidrocarburos han sido en gran parte separados de las partículas del suelo y forma una emulsión en el agua.

- Flotación.

En esta operación, una corriente de aire entra por el fondo del tanque de flotación donde se encuentra la mezcla agua/suelo, produciendo pequeñas burbujas. Los materiales hidrofóbicos (contaminantes y partículas ultrafinas), prefieren unirse a la interfase aire/agua que se encuentra en suspensión, por lo cual, se adhieren a las

burbujas. Las burbujas ascienden a la superficie del líquido y puede derramarse por encima de los bordes del recipiente de flotación. La espuma con los contaminantes es lavada con agua rompiendo las burbujas. La corriente concentrada de contaminantes debe ser tratada posteriormente⁽⁵⁾. El suelo libre de contaminación se recupera en la parte inferior del flotador y es analizado para determinar la concentración de TPH's, BTEX y otros agentes tóxicos. Para obtener mejores resultados el suelo puede ser recirculado.

Las ventajas que ofrece el lavado de suelos son:

- Tiempo de tratamiento corto.
- La remoción de los contaminantes es permanente.

Entre las desventajas se pueden citar:

- Se necesita un tratamiento posterior a los residuos.
- No es recomendable para suelos con contenido alto de arcilla.

5.2.5. INCORPORACIÓN DE ASFALTO Y CEMENTO.

La incorporación de suelo contaminado con asfalto es una técnica de inmovilización de contaminantes, pues esta tecnología reduce la movilidad de las sustancias peligrosas y contaminantes contenidas en el suelo y puede clasificarse como técnica *ex situ*. El tratamiento se ha utilizado para suelos arenosos afectados por petróleo crudo y combustóleo, pues las gasolinas y el diesel contienen un considerable cantidad de volátiles que pueden desprenderse del asfalto.

Un estudio de laboratorio se realiza con el fin de establecer la cantidad de asfalto que se le agregará al suelo, así como, si es necesario combinarlo con arena limpia para estabilizar los contaminantes y así evitar que se produzcan lixiviados o evaporaciones.

Las pruebas se realizan en laboratorio y también en campo antes de iniciar los trabajos a gran escala.

Cuando se ha determinado la cantidad de asfalto y arena limpia que se agregará, se inicia el proyecto de pavimentación. El suelo es excavado del sitio y colocado en pilas de almacenamiento previamente acondicionadas con una tela asfáltica para evitar lixiviados. El suelo contaminado es mezclado con la arena limpia para obtener una mezcla homogénea y aireada para reducir la humedad.

Posteriormente, el suelo es extendido y es rociado con asfalto y mezclado homogéneamente. Finalmente depositada sobre la superficie que se pavimentará.⁽⁸⁾

El suelo contaminado no sólo se puede combinar con asfalto, puede también ser mezclado con cemento portland, óxido de calcio, arena y agua.

Para determinar la cantidad de los materiales, las pruebas se realizan tanto en laboratorio como en campo, con el fin de obtener las cantidades idóneas para que la mezcla fragüe y no produzca lixiviados.

Después de obtener las concentraciones adecuadas, se iniciará el trabajo de campo. Los trabajos de mezclado en campo podrán efectuarse colocando los materiales sobre tela asfáltica y utilizando revolvedoras o maquinaria pesada en general.

El contenido de hidrocarburos en el suelo puede retardar el paso a concreto de la mezcla antes mencionada. Esto ocurre debido a la absorción de los materiales hidrófobos (hidrocarburos) en las partículas del cemento y bloquear la difusión del agua para producir la hidratación. esto puede ser minimizado con la adición de carbón activado a la mezcla, cuya cantidad es determinada por pruebas de laboratorio.⁽⁴⁰⁾

El material puede utilizarse como encarpetao de caminos principales.

El tratamiento presenta algunas ventajas como:

- Tiempo de tratamiento corto.
- Efectivo para suelos con altas cantidades de contaminantes hidrocarburos.
- Aprovechamiento del material contaminado en la construcción de pavimentos.

Las desventajas que presenta son:

- El costo del tratamiento es de moderado a alto.
- Requieren de varias pruebas de análisis para que sea posible mezclar el suelo con los materiales de construcción.
- Se requiere gran cantidad de materiales para poder incorporar el suelo contaminado, lo que aumenta el costo.

5.2.6. CONFINAMIENTO.

Las técnicas de confinamiento no se tratan propiamente de sistemas de descontaminación, sino de métodos para limitar la extensión de una contaminación o para aislar un suelo contaminado.

En algunas ocasiones el confinamiento va seguido por un tratamiento; en otras, el confinamiento es la única operación que se realiza.

Entre las técnicas sobre tratamientos de confinamiento se encuentran las de aislamiento y microencapsulamiento, útiles para suelo contaminado por GDCC.

5.2.6.1. AISLAMIENTO.

El sistema consiste en la instalación de materiales que envuelvan el suelo contaminado e impidan que esa contaminación se extienda.

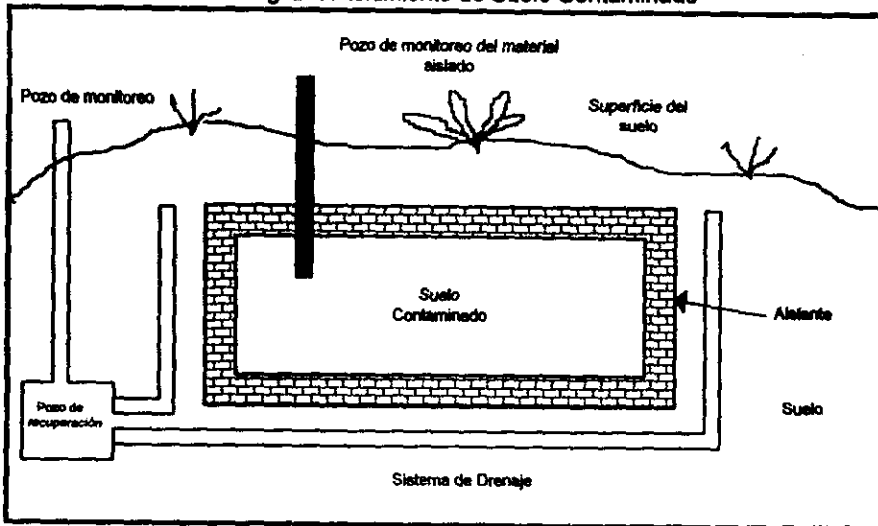
Para ello se utilizan diversos productos como:

1. Arcillas.
2. Películas o láminas de plástico.
3. Materiales Geotextiles.
4. Hormigones

Frecuentemente hay que excavar y desplazar el suelo contaminado para preparar la fosa donde será colocado el material, generalmente alejado del lugar contaminado. Luego se instalarán los materiales de aislamiento y unos diques laterales de contención. Después se vuelve a colocar sobre estos materiales el suelo contaminado. Seguidamente se recubre con otra capa de materiales aislantes y se instalan drenajes de evacuación pluviales y posibles lixiviados. (Fig. 24). Se instala un pozo de monitoreo de lixiviados y evacuación si así lo requiere, además de otro del suelo contaminado para determinar el comportamiento de los materiales como TPH's, BTEX, entre otros.

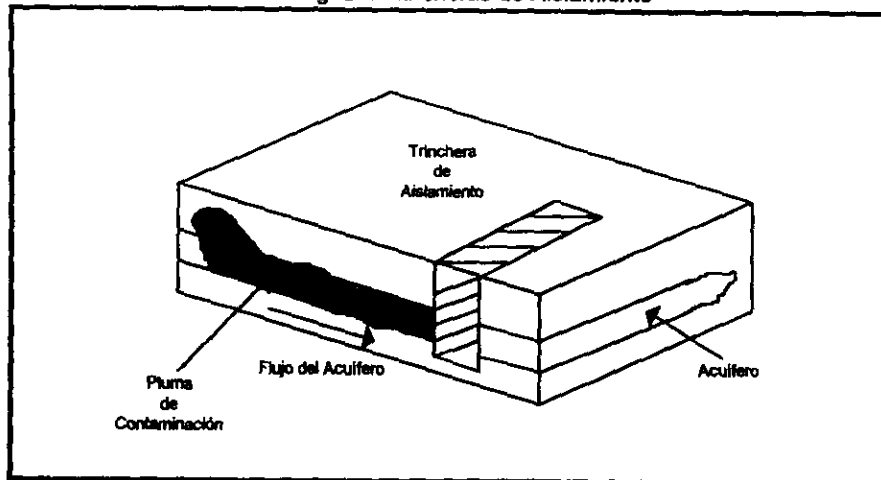
Para la instalación de las fosas de contención del suelo contaminado se debe realizar un estudio previo con el objeto de determinar el lugar de construcción, los riesgos potenciales en su desplazamiento, así como las dimensiones de la fosa o fosas.⁽⁴¹⁾

Fig. 24. Aislamiento de Suelo Contaminado



Por otra parte, los materiales de aislamiento se han empleado para evitar el flujo de la pluma de contaminación cuando ha alcanzado los acuíferos por medio de trincheras o zanjas cubiertas con material aislante⁽³⁹⁾. Esto evitará el flujo de la contaminación para llevar a cabo las técnicas de saneamiento. (Fig. 25)

Fig. 25. Trincheras de Aislamiento



Así, algunas ventajas que se le atribuyen a las técnicas de aislamiento son:

- Tiempo de instalación corto.
- Para su utilización del sistema de aislamiento no es necesario personal especializado, siendo solamente imprescindible la dirección por parte de especialistas y el control del personal.

Dentro de sus desventajas se encuentran:

- Existen grandes problemas administrativos y legales para otorgar los permisos operacionales y definir el lugar donde se construirán las fosas de aislamiento.
- Las trincheras de aislamiento sólo representan una barrera horizontal, pero no evitan la contaminación en otras direcciones.
- Los costos operacionales son moderados a altos.

5.2.6.2. MICROENCAPSULAMIENTO.

El microencapsulamiento es una técnica de inmovilización de contaminantes en la cual los contaminantes son retenidos en fase sólida y evitar su transferencia en el suelo. El método consiste en atrapar los contaminantes en sílica por medio de la aplicación de un reactivo de silicato, impidiendo su difusión hacia el exterior. El reactivo de silicato es soluble en agua e incluye materiales aluminio-silicatos, silicatos de calcio, entre otras sustancias). Las técnicas de microencapsulamiento se pueden llevar a cabo tanto in situ como ex situ.

El proceso de microencapsulamiento consiste de dos etapas simples. La primera etapa es la desorción del hidrocarburo de las partículas del suelo y su emulsificación. La segunda etapa es la aplicación de un reactivo de silicato. Estos reactivos con el emulsificante forman una celda de sílica no soluble que puede medir menos de 10 micras de ancho.⁽⁸⁾

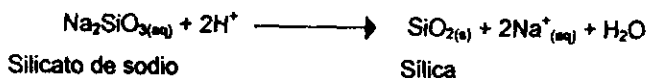
En la primera etapa, la desorción y emulsificación, son la clave de la eficiencia del proceso por lo cual existe una gran variedad de emulsificantes para diferentes hidrocarburos, tipos de suelos y aplicaciones técnicas.

Los emulsificantes están basados en el uso de surfactantes con un pH de 3-4 y cuando están diluidos en agua para su uso el pH es 4-5.

Sabiendo de antemano que el emulsificante orienta su parte hidrofóbica (parte orgánica) hacia el hidrocarburo y su parte hidrofílica (parte inorgánica) hacia el agua; tenderá a crear micelas del hidrocarburo y así separarlos de las partículas del suelo y formar una emulsión.

Después de que se ha creado una emulsión estable (micelas entre 2-4 micras de ancho aproximadamente) se inicia la segunda etapa, agregar el reactivo de silicato.

El reactivo de silicato esta basado en una solución de agua con pH alcalino. Cuando un poco de silicato alcalino es agregado a un poco de emulsificante ácido, una simple reacción ácido-base ocurre. La neutralización del silicato produce sílica, agua y sal.



La formación de la sílica comienza en los sitios activados por el emulsificante. El emulsificante se encuentra alrededor del hidrocarburo formado una micela, por lo cual la reacción silicato/emulsificante produce una celda de sílica alrededor y dentro del hidrocarburo envolviéndolo y aislándolo del medio.

En el tratamiento *ex situ* el suelo contaminado es excavado y conducido a un tanque mezclador, posteriormente se agrega el emulsificante y se forma la emulsión. Posteriormente se añade el silicato para microencapsular los hidrocarburos. Previamente antes se determinará la cantidad de emulsificante y silicato que se le agregará al suelo en función de la cantidad de hidrocarburo en el suelo y pruebas de laboratorio.

Cuando se ha llevado a cabo el microencapsulamiento, se monitorea el suelo para determinar la concentración de TPH's, BTEX y otros agentes tóxicos, para establecer si es necesario volver a tratar el suelo. Finalmente el suelo es reincorporado a su lugar de origen.

Por otra parte, cuando se requiere realizar un tratamiento *in situ* debido que el volumen de contaminación es muy grande u otra razón, el tratamiento de microencapsulamiento de hidrocarburos se realiza inyectando el emulsificador y la solución de silicatos en el suelo. Antes del tratamiento, se efectúa un estudio para determinar el número de puntos donde se inyectarán las soluciones y la profundidad a las que se realizarán con ayuda del estudio de evaluación.

Primeramente, se inyecta el emulsificante y posteriormente la solución de silicatos que efectuarán el microencapsulamiento⁽³⁶⁾. Se tomarán muestras del suelo para

determinar la cantidad de TPH's, BTEX y otros agentes tóxicos. A partir de las muestras se decidirá si es prescindible volver a tratar el suelo.

Así, las ventajas que muestra del microencapsulamiento son las siguientes:

- Tiempos de tratamiento muy cortos.
- El tratamiento de vitrificación no presenta cambios en las características físicas del suelo como permeabilidad, porosidad, tamaño de grano, etc.

Entre sus desventajas se encuentran:

- El costo del tratamiento es alto.
- En el proceso se requiere de una homogeneización completa del suelo y los reactivos, por lo que hace más difícil trabajar en condiciones in situ.

CAPÍTULO VI

"SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO PARA SUELOS CONTAMINADOS POR GASOLINA, DIESEL, PETRÓLEO CRUDO Y COMBUSTÓLEO"

CAPÍTULO VI

SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO PARA SUELOS CONTAMINADOS POR GDCC.

La selección de la tecnología o el tratamiento que se va a elegir depende en gran medida del estudio de Evaluación del sitio contaminado, además del factor económico, el tiempo de ejecución, entre otros factores.

No solo un análisis sobre la información de la evaluación del sitio nos determinara la técnica a utilizar, sino también los estudios de tratabilidad.

Los estudios de tratabilidad son usados para proporcionar información específica relacionada con la aplicación potencial de las tecnologías de tratamiento a escalas de campo o escala piloto, tales como las condiciones de operación, los niveles potenciales de tratamiento alcanzables para determinar la factibilidad de la operación, entre otros.

En varias ocasiones una técnica de tratamiento no es muy efectiva, por lo cual se selecciona un tren de tratamiento, es decir, se llevan a cabo varias tecnologías para el saneamiento del sitio contaminado. Por ejemplo, se utiliza la biorremediación asistida con extracción de vapor o extracción hidráulica.

Algunas sugerencias para utilizar las tecnologías presentadas en éste trabajo, han sido estudiadas por instituciones ambientales de los Estados Unidos, como The Air Force for Environmental Excellence y la EPA y se presentan en la tabla 15, la cual está estructurada en función de ciertas características del contaminante (GDCC) y del lugar contaminado.

Tabla 15. Aplicación de Técnicas de Tratamiento de Suelos.

| TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO | CONDICIONES FAVORABLES PARA SU USO | CONDICIONES DESFAVORABLES PARA SU USO | *COSTO | HIDROCARBURO SUGERIDO PARA TRATARSE |
|--|---|---|--------|---|
| Remediación Pasiva (In Situ) | 1. Capacidad de microorganismos y nutrientes capaces de degradar los contaminantes. | 1. Concentraciones grandes de contaminantes | N.E. | - Gasolina. - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Biorremediación (In Situ) | 1. Grandes volúmenes de suelo contaminado. 2. Suelo permeable. 3. pH neutro. 4. Temperatura del suelo > 40 °F. 5. Aguas Subterráneas cuya permeabilidad del acuífero es mayor de 10:2 pies/día. | 1. Suelos con gran cantidad de arcilla. 2. Contenido de humedad mayor de 50 %. | 1.0 | - Gasolina. - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Landfarming (Ex Situ) | 1. Suelo Permeable. 2. pH neutro. 3. Temperatura mayor de 40 °F. | 1. Presencia de estructuras en la superficie. 2. Suelos con gran contenido de arcilla. 3. Humedad mayor de 50 %. | 2.0 | - Gasolina. - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Landfill (Ex Situ) | 1. Suelo Permeable. 2. pH neutro. 3. Temperatura mayor de 40 °F. | 1. Presencia de estructuras en la superficie. 2. Suelos con gran contenido de arcilla. 3. Humedad mayor de 50 %. | 2.0 | - Gasolina. - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Extracción Hidráulica (In Situ) | 1. Espesor de la película de hidrocarburos mayor a 6 pulgadas. 2. Nivel freático menor de 50 pies de la superficie. | 1. Nivel freático mayor de 100 pies de profundidad. 2. Delgadas capas de hidrocarburos. | N.E. | - Gasolina. - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Extracción de vapor (In Situ) | 1. Gran permeabilidad y porosidad del suelo. 2. Presencia de contaminación a una profundidad mayor de 30 pies. 3. Estructuras en la superficie que impiden excavar. 4. Presencia de contaminantes volátiles. | 1. Profundidad del nivel freático menor de 10 pies. 2. Contenido de arcilla mayor de 20%. | 1.5 | - Diesel. - Gasolina. |
| Tratamientos Termales (Ex Situ) | 1. Altas concentraciones de contaminantes. 2. Humedad menor de 20% | 1. Alto contenido de humedad 2. Alto contenido de arcilla. | 2.7 | - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Incorporación de Asfalto y cemento (Ex Situ) | 1. Contaminantes no volátiles. 2. Grandes concentraciones de contaminantes. | 1. Presencia de compuestos volátiles 2. Suelos con alta cantidad de arcilla. 3. Preparación de material (molienda, trituración, tamizado, etc.) | N.E. | - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Lavado de suelos (Ex Situ) | 1. Cuando se prohíbe el tratamientos termales. | 1. Presencia de mayor del 30% de arcilla. 2. Sistemas de tratamiento adicionales para residuos. | N.E. | - Gasolina. - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Aislamiento (Ex Situ) | 1. Gran volumen de suelo contaminado. 2. Relativamente baja peligrosidad. | 1. Requiere regulaciones específicas para la construcción de contenedores. 2. Materiales volátiles. | N.E. | - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |
| Microencapsulamiento (In Situ y Ex Situ) | 1. Presencia de contaminantes inorgánicos. 2. Contaminantes volátiles menor al 1%. | 1. Alto contenido de arcilla. 2. Presencia de volátiles. | N.E. | - Diesel. - Combustóleo. - Petróleo Crudo. |

Fuente: The Air Force Center for Environmental Excellence, Agosto, 1994.

N.E. = No Especificado.

* Se toma como referencia el costo de la Biorremediación In Situ = 1.0.

La tabla muestra algunos criterios para utilizar cierta tecnología en cierto caso especial, sin embargo, la decisión final esta en función de una buena evaluación del sitio y de las pruebas de tratabilidad que se realicen, dado que cada sitio contaminado es particular.

Por otra parte, la técnica más versátil para el tratamiento de GDCC es la biorremediación, ya sea in situ o ex situ, así lo consideran algunas Instituciones Ambientales como la EPA (Agencia para la Protección Ambiental), pues ofrece algunas ventajas sobre las otras como:

- No genera residuos.
- El costo de los trabajos es bajo.
- Las condiciones del sitio prácticamente no se altera.

Esta tecnología se ha utilizado en saneamiento de varios sitios contaminados en Estados Unidos, como por ejemplo:

En el estado de California en 1988⁽⁶⁾, se presentó un derrame de diesel estimado por 145,000 galones. Los estudios de evaluación dieron como resultado que la contaminación era superficial y la profundidad de esta fue limitada a 2 pies. Las muestras del suelo indicaron que la concentración de TPH's alcanzaba niveles de 100,000 ppm y el promedio se encontraba entre 10,000-20,000 ppm. Los criterios de saneamiento manifestaron que el propósito de la biorremediación debería disminuir la concentración de TPH's a valores inferiores de 1,000 ppm. El volumen de suelo a tratar fue aproximadamente de 15,000 yardas cúbicas. El suelo esta compuesto por arena principalmente. Un total de 27 muestras fueron coleccionadas y analizadas en función de TPH's, concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno, principalmente) y densidad de población microbiana.

El pH del suelo fue en el rango de neutro a ligeramente ácido. La densidad de la población microbiana se encontró en el rango de 10^4 - 10^7 bacterias/gramo de suelo. Esto indicó que existía suficiente población microbiana para el tratamiento. Sin embargo, los nutrientes debían ser adicionados para estimular la biorremediación.

Para determinar los requerimientos del proceso de biorremediación se realizó un estudio de tratabilidad en campo y laboratorio. El estudio evaluó el beneficio de la adición de nutrientes, la labranza y aumento de humedad. El estudio dio como resultado el incremento de la población microbiana y menor concentración de TPH's comparado con una porción del suelo de control.

El tratamiento consistió de 2 etapas. La primera etapa inició en julio de 1988 y terminó en noviembre del mismo año. Los nutrientes fueron adicionados mensualmente. El pH fue mantenido entre 6-7.6. La densidad bacteriana se incrementó tres veces su estado inicial promoviendo suficiente densidad bacteriana.

Los TPH's en la primera etapa se redujeron un 81% alcanzando valores de 2,000-8000 ppm.

La segunda etapa inició en abril de 1989 hasta octubre de 1989. Este periodo se vio afectado por las intensas lluvias que duraron alrededor de 82 días, lo que limitó la aireación del sistema, sin embargo la densidad de la población bacteriana alcanzó niveles de 10^{12} bacterias/gramo de suelo.

Los TPH's variaron de 1,600-6500 ppm. Una tercera etapa fue necesaria iniciarla en mayo de 1990 hasta octubre del mismo año. En este periodo la población bacteriana descendió de 10^8 a 10^7 bacterias/gramo de suelo. La concentración de nutrientes se mantuvo constante, por lo cual, la disminución de la población bacteriana fue atribuida a la disminución de carbón orgánico proporcionado por los hidrocarburos que minimizaron su desarrollo.

Al final de la tercera etapa se encontró que los TPH's en el sitio manifestaron cantidades menores de 1,000 ppm, encontrándose que más del 50% del área tenía valores entre los 450 ppm, con lo cual no fue necesario de una cuarta etapa.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y PROPUESTAS.

De las tecnologías de tratamiento de suelos indicadas en el trabajo, todas son utilizables en el tratamiento, con algunas ventajas y desventajas cada una de ellas. La biorremediación, es una tecnología que ha demostrado su efectividad en otros países para la descontaminación de suelos por GDCC, la extracción con vapor es recomendable principalmente cuando el suelo ha sido impactado por gasolina o diesel por presentar compuestos volátiles en su composición. Los tratamientos térmicos son de los tratamientos más antiguos, tanto para residuos peligrosos como para la incineración de los compuestos de la GDCC impregnados en el suelo, sin embargo, para su utilización es necesario de un control muy riguroso en la combustión y en los residuos, los cuales deben ser tratados para no volver a contaminar el medio ambiente, por lo cual pienso que es una de las tecnologías que deberán ser utilizables cuando alguna de las otras sea desechada.

El aislamiento del material contaminado es otra de las tecnologías menos recomendables, porque el material contaminante no es destruido y es solamente confinado y alejado del exterior, a pesar que es monitoreado continuamente para que no presente filtraciones de las fosas, no deja de ser un riesgo constante cuando se presente algún fenómeno físico como sismos, precipitaciones pluviales, entre otros; que no se hayan analizado detenidamente y profesionalmente y puedan provocar fisuras al aislante o filtraciones.

El lavado de suelos es una técnica en constante desarrollo y posiblemente sea una de los tratamientos a futuro con mayor preferencia, solamente sería recomendable aumentar la investigación en lo que se refiere a agentes químicos que puedan ayudar a extraer con mayor propiedad los contaminantes del suelo y disminuir residuos.

Otra de las tecnologías a mi consideración más novedosa y con un futuro prometedor es el microencapsulamiento, pues el contaminante es capturado y aislado del resto del suelo, sin embargo es muy costoso, pues se cobra por metro cúbico de

material contaminado y por concentración del contaminante, lo cual hace su precio exageradamente elevado. Además, se debe estar seguro que en un lapso grande de tiempo la cápsula de silicato que envuelve al contaminante no fisurará provocando la salida del hidrocarburo, por lo cual se deben realizar investigaciones sobre el particular y garantizar su efectividad.

La incorporación de asfalto y cemento, es una de las técnicas que además de eliminar la contaminación, el material contaminado es aprovechado, sin embargo la mezcla con asfalto y cemento requieren de grandes adiciones de arena y numerosos análisis para formular la mezcla por lo que es un poco complicado y costoso en algunas ocasiones, pero la considero como una técnica muy prometedora y valiosa que puede ser utilizable para pequeñas cantidades de suelo contaminado.

La extracción hidráulica es una herramienta que cuando la contaminación ha alcanzado los acuíferos debe ser implantada como una técnica auxiliar en el tratamiento.

Por otra parte, después de analizar las tecnologías existentes y todo lo relacionado al tratamiento de suelos contaminados por GDCC, algunas propuestas que se pueden realizar con el objetivo de vislumbrar nuevas alternativas de saneamiento de suelos y modificar los criterios de limpieza, son las siguientes:

- Aumentar la investigación sobre genética bacteriana en el suelo para elevar la acción degradadora de los microorganismos y así elevar la eficiencia de la biodegradación.
- Evaluar la posibilidad de que los hidrocarburos impregnados en el suelo, en pequeñas concentraciones puedan servir como fuente de materia orgánica a los microorganismos del suelo y abono para las plantas, con el objetivo de ser mezclado con tierra fértil y reincorporarlo posteriormente.
- Realizar una lista jerárquica sobre el nivel de peligrosidad de los compuestos individuales más representativos que integran a las gasolinas, diesel, petróleo crudo y combustóleo, para tratarlos por separado. Es decir, no manejarlos como grupos, TPH, PAH, VOC, pues sólo unos cuantos compuestos de estos grupos se manejan como peligrosos. Así entonces, podríamos hablar sólo del benceno, tolueno, antraceno, benzopireno, etc., en lugar de disminuir también los TPH, que representan la

concentración de todos los hidrocarburos, a pesar de que no todos son peligrosos, por lo cual podríamos hablar de que se desapareciera como criterios a los TPH's y ser más abiertos en cuanto a los niveles de saneamiento.

- Evaluar la posibilidad de utilizar algún equipo de extracción para ver la factibilidad de manejar solventes que pudiesen extraer los contaminantes del suelo para pequeñas cantidades de material contaminado. El proceso podría ser similar al lavado de suelo pero utilizando algún solvente en lugar de un surfactante, es decir, el material contaminado sería mezclado con el solvente y extraería los hidrocarburos. Posteriormente, la solución sería mezclada con algún compuesto inmiscible para el solvente y los hidrocarburos formando así dos fases y ser separado subsiguientemente por decantación. La mezcla de hidrocarburos y solvente puede ser incinerado y aprovechar su calor a través de un intercambiador de calor.
- Exigir a las Autoridades Ambientales de nuestro país, la determinación de los lugares contaminados para dictaminar responsabilidades a los causantes de la contaminación y requerir su pronto tratamiento.
- Realizar investigaciones sobre los trenes de tratamiento para eficientar los proceso de saneamiento, es decir, evaluar la utilización de varias técnicas en un problema de contaminación para determinar cual sería el más factible.

Por todo lo anterior, existen varias cosas que hacer en pro del saneamiento de suelos y el rescate de nuestro medio ambiente y del hombre mismo.

CONCLUSIONES

La contaminación de suelos por hidrocarburos tales como Gasolina, Diesel, Crudo y Combustóleo se ha consolidado como un problema ambiental en México a pesar de que no se tiene un registro sobre la cantidad de sitios afectados.

México cuenta con muy poca experiencia en el tratamiento de suelos y aguas subterráneas, por lo cual es necesario el apoyo de la experiencia e investigación internacional. Posiblemente por ésta razón, las Autoridades Ambientales en nuestro país no han legislado eficientemente sobre el tema.

La falta de centros de investigación sobre la evaluación de nuevas tecnologías de tratamiento o modificación de las ya existentes, hacen considerablemente elevados los costos para el tratamiento.

Por lo cual, resulta imprescindible capacitar a técnicos e investigadores mexicanos en el tratamiento de suelos contaminados y de ésta manera crear un grupo especializado capaz de difundir sus conocimientos a sus colegas de nuestro país.

Así también, el apoyo de las Universidades en la investigación proporcionan una fuente de información importante en el conocimiento de nuevas alternativas de saneamiento.

Además, para los Ingenieros Químicos, el tratamiento de suelos contaminados proyecta un nuevo campo de trabajo y aplicación de nuestros conocimientos en la búsqueda de disminuir los deterioros causados por la contaminación. Por lo tanto, el Ingeniero Químico puede colaborar en cualquier punto del proceso de tratamiento, participando en la evaluación, instalación y supervisión del tratamiento, realizando tareas como: recopilación de información, muestreo, análisis de datos, diseño de equipo utilizado, planeación del proyecto, supervisión, etc., y hasta ser el gerente del proyecto.

De manera similar, la investigación es otra alternativa en la que el Ingeniero Químico puede desarrollarse, en la búsqueda de optimizar los procesos de tratamiento y en la innovación de nuevas técnicas de saneamiento. Por lo cual, la tesis exhorta a los Ingenieros Químicos a adentrarse al tratamiento de suelos y de igual manera proponer que en las universidades se realicen seminarios o se implanten materias relacionadas a este tema.

Por otra parte, resulta necesario evitar lo más posible la contaminación de suelos por GDCC minimizando los derrames de hidrocarburos, fomentando las medidas de control para evitar fugas en tanques y ductos. Además de atender a tiempo los accidentes para así evitar la infiltración más profunda de los contaminantes.

Así, el presente trabajo da a conocer las tecnologías, en forma general, que se han ido desarrollando para la limpieza de suelos contaminados y de esta manera eliminar o minimizar los sitios contaminados reconstruyendo el medio ambiente.

De las tecnologías analizadas, la biorremediación es una de las más recomendables en el tratamiento de suelos contaminados por gasolina, diesel, petróleo crudo y combustóleo, a pesar del gran tiempo de ejecución, pero resulta barato y eficiente. Otro sistema que puede ser instalado es la extracción de vapor y aumentar la efectividad del proceso, especialmente para gasolina y diesel. Para aguas subterráneas, tanto la extracción hidráulica como la biorremediación son aceptables y eficaces.

Así, la biorremediación se ha consolidado como un tratamiento eficiente en el tratamiento de suelos contaminados por GDCC en el mundo y una técnica útil para el saneamiento de la contaminación en México.

GLOSARIO

- Acuífero:** Son formaciones geológicas, cuyas estructuras permiten que fluyan por ellas cantidades apreciables de agua, en condiciones naturales normales.
- Acuífero confinado:** Cuerpo de agua subterránea que se encuentra entre dos capas de rocas del suelo, las cuales limitan su flujo y las condicionan a desplazarse paralelamente a las capas limitantes.
- Acuífero libre:** Cuerpo de agua subterránea, la cual se desplaza en cualquier dirección del suelo, pues no se encuentra atrapada o confinada entre las capas de roca del suelo.
- Advención:** Proceso en el cual los contaminantes se mueven de la misma manera que fluye el agua subterránea.
- Agua subterránea:** Cuerpo de agua que se encuentra en el suelo.
- Amensalismo:** Una población daña a otra.
- Arcilla:** Roca sedimentaria muy pequeña cuyo tamaño es menor de 0.002 mm.
- Arena:** Roca sedimentaria cuyo tamaño es mayor de 0.050 mm.
- Bacteria:** Son organismos unicelulares que se reproducen rápidamente y pueden vivir en condiciones muy diferentes en presencia de oxígeno (aeróbicas), o en ausencia de oxígeno (anaeróbicas).
- Bacteria aerobia:** Bacteria que realiza su metabolismo en presencia de oxígeno.
- Bacteria anaerobia:** Bacteria que lleva a cabo su metabolismo sin presencia de oxígeno.
- Bentonita:** Arcilla de grano muy fino

- Biaumentación:** Técnica de biorremediación en la cual se agregan microorganismos al suelo cuando éste cuenta con poca o nula población biodegradadora de contaminantes.
- Biestimulación:** Técnica de biorremediación en la cual se agregan nutrientes (Nitrógeno y fósforo, principalmente) y oxígeno para estimular el crecimiento y la población de los microorganismos degradadores.
- Biodegradación:** proceso biológico mediante el cual microorganismos tales como bacteria y hongos, descomponen a formas más simples la materia orgánica como parte de su metabolismo.
- Biomasa:** Es una determinación indicativa que cuantifica la masa total de organismos existentes en un hábitat dado.
- Biorremediación:** Técnica de tratamiento la cual utiliza microorganismos, como bacterias, para la desintegración de los contaminantes.
- BTEX:** Grupo formado por Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos, para el tratamiento de suelos.
- Cemento portland:** Cemento de color similar a la piedra de las canteras inglesas.
- Comensalismo:** Una especie se beneficia y vive a expensas de otra.
- Contaminación:** Presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.
- Contaminante:** Toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.
- Evaluación del sitio:** Determinación cualitativa y cuantitativa del grado de afectación de un área contaminada, mediante estudios de campo (muestreo) o bibliográficos.

Horizonte: Capas horizontales que dividen al suelo en función de ciertas características, tal como el contenido de minerales, materia orgánica, texturas del suelo, etc.

Hormigón: Mezcla de cemento, agua, cemento y grava.

Impacto ambiental: Es la alteración favorable o desfavorable del ambiente por la acción del hombre o de la naturaleza.

Infiltración: Penetración de agua u otro compuesto líquido en el suelo.

Landfarming: Técnica ex situ de biorremediación, la cual consiste en colocar y extender el material contaminado sobre una superficie y labrar o revolverlo para incrementar la oxigenación y aumentar el tiempo de tratamiento, además de adicionar nutrientes o microorganismos.

Landfill: Técnica ex situ de biorremediación, la cual consiste en acondicionar una celda o pila con un sistema de aireación a través de una red de tuberías de PVC que oxigenará el suelo, colocado por encima, aumentando así la biorremediación.

Limo: Depósito sedimentario cuyas partículas se encuentran en el rango de 0.002-0.050 mm.

Metabolismo: Proceso bioquímico de reacciones óxido-reducción desarrollado por los organismos para la producción de energía a partir de sustancias absorbidas por éstos.

Microencapsulamiento: Técnica de tratamiento en el cual el contaminante es envuelto o encapsulado por una capa de silicato impidiendo su difusión a otras partes del suelo.

Nivel de limpieza: Concentración máxima de contaminantes en el suelo, señalado por las Autoridades Ambientales para el tratamiento de éste.

Nivel freático: Nivel que divide a una zona saturada de agua con una zona seca en el suelo.

PAH: Grupo formado por Hidrocarburos aromáticos de 2 o más anillos unidos como antraceno o fenantreno.

Perfil del suelo: Corte seccional del suelo que muestra las capas u horizontes que lo forman.

Perfil estatigráfico: Diagrama que representa a los horizontes o estratos del suelo.

Permeabilidad: Es la medida de resistencia a fluir de un líquido, y es independiente de las propiedades del líquido.

Remediación activa: Limpieza o saneamiento de suelos contaminados a través de la acción del hombre.

Remediación pasiva: Limpieza o saneamiento de suelos contaminados por medios naturales, sin la participación del hombre.

Residuo peligroso: Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

Sinérgico: Interacción entre do cosas u objetos.

Subsuelo: El suelo se refiere a la superficie y subsuelo hacia lo profundo, sin existir una referencia para saber que tan profundo es el suelo y donde comienza el subsuelo.

Suelo: El término suelo se deriva del latín solum, que significa piso o terreno. En general el suelo se refiere a la superficie suelta de la Tierra, para distinguirlo de la roca suelta. El suelo sostiene a las plantas y a otro tipo de organismos, estén o no relacionados con éstas.

Técnica ex situ: Técnica de tratamiento de suelo que esta diseñada para aplicarse fuera del lugar contaminado a través del traslado del material contaminado a otra

zona, donde será tratado y posteriormente reincorporado a su lugar de origen.

Técnica in situ: Técnica de tratamiento de suelo que se aplica directamente en el lugar contaminado sin excavación y traslado del suelo a otra parte.

TPH: Grupo formado por todos los hidrocarburos impregnados en el suelo.

Tubo shelby: Muestreador para suelo compuesto por un tubo de metal de pared delgada con una punta cónica truncada por donde entra el material del suelo.

VOC: Grupo formado por los elementos volátiles como Benceno, Estireno, Xileno, etc.

Zona saturada: Es la parte del suelo que se encuentra saturada de agua y se refiere principalmente a los acuíferos, los cuales contienen el agua subterránea.

Zona vadosa: También llamada zona no saturada, pues es la parte del suelo que no se encuentra saturada de agua y comprende desde la superficie hasta el nivel freático.

ABREVIATURAS

CCME: Canadian Council of Ministers of the Environmental (Consejo Canadiense de Ministros Ambientales).

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental).

GDCC: Gasolina, Diesel, Crudo y Combustóleo.

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

NOM: Normas Oficiales Mexicanas.

ppm: partes por millón (miligramos del contaminante/gramo de suelo).

SEMARNAP: Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

BTEX: Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos.

TPH: (Total Petroleum Hydrocarbons). Total de hidrocarburos del petróleo.

PAH: (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons). Hidrocarburos aromáticos polinucleares.

VOC: (Volatile Organic Compounds). Compuestos orgánicos volátiles.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANNAMALAI, K. "Rate Controlling Model For Bioremediation of Oil Contaminated Soil". *Environmental Progress*. November, 1993.
2. BALL, Raymond. "Design Considerations for Soil Cleanup by Soil Vapor Extraction". *Environmental Progress*. Ergots, 1990.
3. BARO, Alfredo. "Biodegradación Microbial Del Petrel". Premix, 1988.
4. Breviary de Terminus y Concepts Sorb Eclogue y Protection Ambient. *Generic de Protection Ambient. Talkers Graphics de la Niacin*. Mexico, 1991.
5. BROWN, George. "Operaciones Básicas de la Ingeniería Química". Editorial Marín. España, 1965.
6. BROWN, Kandi. "Bioremediation: In Situ and EX Situ Applications for Refineries". *National Petroleum Refiners Association*. USA, 1992.
7. BRUNNER, Calvin. "Hazardous Waste Incineration". Mc Graw-Hill. Segunda Edición. Singapur, 1994.
8. CALABRESE, Edward J. "Hydrocarbon Contaminated Soil and Groundwater". Ed. Lewis Publishers. USA, 1992.
9. *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89)*.
10. *Enciclopedia Océano*, 1994.
11. EPA SW-846 Solid Waste. 1986.
12. *Guidance for Petroleum-Impacted Sites: Soil Screening Levels*. Mayo, 1996.
13. HARLEY, John. "Laboratory Exercises in Microbiology". Editorial C. Brown Publishers. USA, 1990.
14. *Hoja de Datos de Seguridad para Sustancias*. Pemex. México, 1997.
15. *Interim Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites*. Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 1996.
16. KRUMBEIN, W. "Estatigrafía y Sedimentación". Ed. Centro Regional de Ayuda Técnica. México, 1969.
17. *La Responsabilidad Jurídica en el Daño Ambiental*. UNAM y Pemex. México, 1998.
18. LESAGE, Suzanne. "Groundwater Contamination and Analysis at Hazardous Waste Sites". Ed. Marcel Decker, Inc. USA, 1992.
19. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Ed. Delmar, 1996.

20. LYMAN, J. "Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments". C. K. Smoley, Inc. USA, 1994.
21. MC CANN, Michael. "Remediation of a VOC-Contaminated Superfund Site Using Soil Vapor Extraction, Groundwater Extraction, and Treatment: A Case Study". Environmental Progress. Agosto, 1994.
22. MORRISONS. "Chemical for Controlling Contamination". Chemical Engineering. Agosto, 1993.
23. NELSON J. Michael. "In Situ Biodegradation of TCE Contaminated Groundwater" Environmental Progress. Agosto, 1990.
24. Normas Oficiales Mexicanas. 1993.
25. Oficio Unido. Criterios Interinos de Limpieza Propuestos. Pemex, 1996.
26. Pemex Ambiente y Energía. Los Restos del Futuro. UNAM y Pemex. México, 1995.
27. PERRY. "Manual del Ingeniero Químico". Mc Graw-Hill. Segunda Edición. México, 1982.
28. REEVE N. Royer. "Environmental Analysis". University of Greenwich, 1994.
29. Reglamentos de la Ley General del Equilibrio Ecológico. Pemex. Gerencia de Protección Ambiental. 1990.
30. Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soil. Ed. Donald L. Wise . USA, 1994.
31. Remediation Technology Application and Cost Guide. The Air Force Center for Environmental Excellence. Agosto, 1994.
32. Requisitos Técnico-Administrativos que Deben Cumplir los Promovientes de Servicios para la Restauración de Sitios Contaminados por Materiales y/o Residuos Peligrosos. SEMARNAP, 1997.
33. ROGERS, Jean. "A Screening Protocol for Bioremediation of Contaminated Soil". Environmental Progress. Mayo, 1993.
34. Saneamiento de Suelos y mantos Freáticos (Biorremediación). Contaminación por Hidrocarburos. CONIQQ. 1997.
35. SARA, Martín. "Standard Handbook for Solid and Hazardous Waste Facility Assessments". Lewis Publishers. USA, 1994.
36. SHOUBARY, W. "Soil Washing Enhancement with solid sorbents". Environmental Progress. 1996.

37. STANLEY, E. "Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment". Lewis Publishers. USA, 1990.
38. STOKMAN, Sofia. "Soil Contamination: Dealing with Petroleum Spills". Chemical Engineering. Enero, 1997.
39. Tecnologías para Remediación de Suelos y Mantos Freáticos. CONIQQ. México, 1997.
40. WILSON, David. "Hazardous Waste Sites Soil Remediation". Ed. Marcel Decker, Inc. USA, 1994.
41. WISE, Donald L. "Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soil" .Ed . Marcel Decker, Inc. USA, 1994.