



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y MÉTODOS
PARA SU REMEDIACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

THANYA ESTHER RAMÍREZ MUÑIZ

**ASESOR DE TESIS
ING. RAUL SANCHEZ MEZA**



MÉXICO, D.F. A 15 DE OCTUBRE DE 2007.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos:

A mis Padres

A quienes desde pequeña han sido para mí las personas grandes y maravillosas que siempre he admirado.

A quienes son las personas más maravillosas del mundo, gracias por el apoyo moral, su cariño y comprensión que desde pequeña me han brindado, por guiar mi camino y estar siempre junto a mí en los momentos más difíciles.

A quienes sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme.

A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en persona de provecho.

A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aún con las riquezas más grandes de mundo.

A quienes me dieron un par de alas fuertes y me permitieron volar sola.

Gracias por guiar mi vida con energía, esto es lo que ha hecho de mí quien soy.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por darme la oportunidad continuar con mis estudios y proporcionarme la posibilidad de terminar una carrera.

ÍNDICE

	Página
1 Definiciones	1
2 Resumen	3
3 Introducción	4
3.1 Justificación	5
3.2 Objetivo	5
3.3 Alcance	5
4 La Política Ambiental en México	6
4.1 Marco Jurídico	7
4.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos	11
4.3 Reglamento de gestión integral de residuos.	12
5 Composición y propiedades fisicoquímicas del suelo	17
5.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo.	17
6 Contaminación del suelo.	21
6.1 Fuentes de Contaminación en México	21
6.2 Industria Minera.	22
6.3 Industria Petroquímica.	24

	Página
6.4 Agroquímicos	24
6.5 Estaciones de Servicio	26
7 Tecnologías de remediación del suelo	27
7.1 Clasificación de las tecnologías de remediación.	28
7.2 Tecnologías de remediación Biológicas.	32
7.2.1 Biorremediación.	32
7.2.2 Bioventeo	35
7.2.3 Fitorremediación	36
7.3 Tecnologías de remediación Físicoquímicas	39
7.3.1 Lavado de suelo	39
7.4 Tecnologías de remediación térmicas	42
7.4.1 Incineración	42
7.4.2 Desorción Térmica.	44
7.4.3 Pirolisis	47
8 Casos de remediación en México.	49
9 Empresas en México que proporcionan servicios de remediación de Suelo	51
10 Conclusiones	53
11 Bibliografía	55

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Factores interrelacionados entre sí que inciden en la remediación de un suelo	18
Figura 2	Ejemplo de biorremediación.	34
Figura 3	Ejemplo de fitorremediación	38
Figura 4	Ejemplo de Lavado de suelo	41
Figura 5	Ejemplo de Incineración	43
Figura 6	Ejemplo de Desorción Térmica	46

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Proceso minero y el ambiente	23
Tabla 2	Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.	30
Tabla 3	Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo al tipo de tratamiento	32
Tabla 4	Empresas que prestan servicios de remediación del suelo en México	51

1. Definiciones

Contaminación	La 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 cualesquiera 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
Incineración	Cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. En esta definición se incluye la pirólisis, la gasificación y plasma, sólo cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión en un ambiente rico en oxígeno.
Lixiviado	Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.
Prevención	El conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro del ambiente.
Remediación	Conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos, de conformidad con lo que se establece en esta Ley.
Residuos Peligrosos	Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley.

Restauración	Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.
Sitio Contaminado	Lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas.
Suelo	Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.
Suelo contaminado con hidrocarburos	Aquel en el cual se encuentran presentes hidrocarburos que por sus cantidades y características afecten la naturaleza del suelo

2. Resumen

Actualmente en México existen un sin número de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos ya sea orgánicos o inorgánicos, debido principalmente a los derrames de residuos peligrosos y por la industria en general, lo que nos pone en alerta para no perder un recurso no renovable, que sin duda es vital en la vida diaria de cualquier persona.

En el presente trabajo mencionan algunos artículos de la LGEEPA, de la LGEPPA en materia de residuos peligrosos y el Reglamento de gestión integral de residuos, leyes que regulan la prevención y control de la contaminación de los suelos, al igual que la remediación de los mismos. Con el único fin de situarnos dentro del marco legal en lo referente a la generación de la contaminación del suelo.

Se describen tanto la composición como las propiedades fisicoquímicas del suelo con el objeto de ubicarnos de las características propias del suelo, con el propósito de conocer un poco más sobre el mismo.

Así mismo se realiza una recopilación bibliográfica de información sobre algunas de las fuentes de contaminación en México, con el intención de conocer quienes son los principales generadores de la contaminación del suelo; así como la descripción de algunos métodos de remediación del suelo tanto biológicos, fisicoquímicos y térmicos, con el objeto de ver las ventajas y desventajas que presentan los mismos; y de esta manera que sirva de guía para los responsables de la contaminación, así como para los responsables técnicos o encargados de la remediación de los suelos contaminados.

3. Introducción.

El suelo es un recurso natural, es un elemento natural que se presta a la inducción del hombre y es susceptible de ser aprovechado en beneficio de éste. Pero por desgracia el descuido que éste ha tenido por el suelo, a hecho que éste pierda su fertilidad y su capacidad para degradar, entre otras funciones, y en conjunto con la contaminación es sin duda una amenaza para la fauna, la flora y en un futuro para los seres humanos, debido a la estrecha relación entre los diferentes integrantes de los ecosistemas.

Aunque actualmente en México se ha trabajado en la legislación del suelo, todavía falta mucho por hacer en este aspecto, queda por trabajar en la remediación del mismo por que aunque Reglamento de Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) menciona que se tiene que remediar aquel sitio contaminado, todavía no existen normas sobre los métodos de remediación en México, por lo que es necesario poner mas énfasis en este tema.

En los últimos años los casos de contaminación del suelo a nivel mundial se han visto en aumento, y esto es igual, tanto en sitios urbanos, como en naturales. Sin duda quien genera la mayor cantidad de estos contaminantes es la actividad industrial, que ya sea por ignorancia, intencionalmente o por descuido vierten los residuos peligrosos en el suelo, generando un problema para la sociedad, ya que en la actualidad se tienen estos en sitios sin control.

El principal problema social es que esto produce severos problemas a la salud de la población, además de daños al ambiente por la transferencia de estas sustancias químicas hacia el agua, aire y el suelo; y aunado a esto la imposibilidad de poder utilizar el suelo para los fines a los que fue destinado y mas aun limitándonos a carecer en un futuro de lugares para la siembra, la industria, nuevas zonas de vivienda y sin duda zonas de recreación.

Los métodos de remediación del suelo se dividen en biológicos, fisicoquímicos y térmicos, cada uno de estos presenta sus ventajas y desventajas, así como los contaminantes a tratar, adicionalmente se muestran los costos y tiempos estimados para la remediación de un sitio contaminado.

Actualmente, por desgracia no es posible obtener información sobre casos de de éxito en México relacionados con la remediación de suelos contaminados, aún cuando esta información puede ser de utilidad para cualquier persona interesada en el tema o en la solución de una problemática similar. Hace falta que las autoridades correspondientes pongan mayor énfasis en este aspecto y den una mayor difusión sobre estos temas.

3.1 Justificación:

Quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio y las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de un sitio, así como de daños a la salud como consecuencia de ésta, estarán obligados a reparar el daño causado, conforme a las disposiciones legales correspondientes.

Dado que actualmente en México la contaminación del suelo no ha tomado la importancia requerida y mas aún la remediación del mismo no es actualmente una prioridad; es necesario dar a conocer medidas de remediación de suelos contaminados con el fin de ayudar al conocimiento general de los mismos.

De tal forma que se presentan algunos de los métodos o técnicas usados para la remediación de suelos de manera que esta información sirva de guía para el conocimiento básico de los responsables de la contaminación, así como para los responsables técnicos o encargados de la remediación de los suelos contaminados.

3.2 Objetivo:

Hacer una investigación bibliográfica sobre algunos métodos de remediación del suelo de acuerdo a los tipos de contaminantes.

Publicar la aplicación de metodologías de remediación de suelos para la disminución de la contaminación de suelos con materiales y residuos peligrosos a fin de orientar a los responsables de la misma o a los responsables técnicos encargados de la remediación.

Facilitar información de tecnologías de remediación eficientes y limpias.

3.3 Alcance

Actualmente en México existen una infinidad de contaminantes del suelo por lo que en el presente trabajo se mencionarán algunas fuentes de contaminación en México por la importancia que estos tienen en la misma.

Debido a que existe en la actualidad una diversa gama de procedimientos o métodos de remediación de suelos en el presente trabajo se presentará únicamente una descripción de algunos de los métodos más usados.

4.- La política ambiental en México

En México, las leyes y normas que regulan el aspecto ambiental son relativamente nuevas. Aunque antes de la década de 1970 había leyes que se referían al uso de recursos naturales, el derecho ambiental surgió hace apenas tres décadas, ya que las leyes anteriores no se tomaban en consideración los aspectos relacionados con la conservación y la recuperación de los recursos naturales.

En México la Institución encargada de regular las políticas ambientales es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Y de ella se desglosan entre otras instituciones La Comisión Nacional del Agua (CNA), autoridad federal en materia de administración del agua y protección de cuencas hidrológicas, el Instituto Nacional de Ecología (INE) encargado de ejecutar proyectos relacionados con el ambiente y de elaborar la normatividad ambiental y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) encargada de vigilar la aplicación de las leyes ambientales,

En los últimos treinta años, la política ambiental ha transitado de un enfoque sanitario como respuesta a la contaminación del aire en las grandes ciudades, a una orientación de protección del equilibrio ecológico. No obstante, la SEMARNAT reconoce que todas estas adecuaciones no han modificado las tendencias de degradación del ambiente y de los recursos naturales, debido principalmente a dos factores: un presupuesto escaso para el sector y por otra parte que el tema ambiental continúa alejado de la toma de decisiones de política económica y de los sectores productivos. Por otro lado, la dependencia también reconoce que algunos de los programas y proyectos de desarrollo implementados en el país, especialmente las políticas agropecuarias y agrarias, han inducido procesos que favorecen la deforestación y el uso irracional del suelo.

Las disposiciones Jurídicas en Materia Ambiental en México se indican en el siguiente listado:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos Art. 27.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos.
- Reglamentos de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.
- NOM-052-SEMARNAT-005. Que Establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos.
- NOM-054- SEMARNAT -1993 Que Establece el Procedimiento para Determinar la Incompatibilidad entre dos o mas Residuos Considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052- SEMARNAT - 1993.

- NOM-098- SEMARNAT -2002. Protección Ambiental – Incineración de Residuos, Especificaciones de Operación y Límites de Emisión de Contaminantes.
- NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites Máximos permisibles de Hidrocarburos en suelos y las Especificaciones para su caracterización y Remediación.
- NMX-AA-091-1987 Calidad del Suelo– Terminología.
- NMX-AA-021-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Materia Orgánica.

4.1- Marco Jurídico

La prevención y control de la contaminación del suelos, así como su remediación tiene sus bases legales en la LGEEPA; que garantizan el cumplimiento de esta disposición jurídica. A continuación se presenta en forma de resumen los artículos más representativos de la LGEEPA.

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

III.- La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente.

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.

VI.- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

ARTÍCULO 3o.- Para los efectos de esta Ley se entiende por:

VI.- Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

VII.- Contaminante: Toda materia o energía en cualesquiera 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.

XXV.- Prevención: El conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro del ambiente.

XXXII.- Residuos peligrosos: Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

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

ARTÍCULO 5o.- Son facultades de la Federación:

I.- La formulación y conducción de la política ambiental nacional.

II.- La aplicación de los instrumentos de la política ambiental previstos en esta Ley, en los términos en ella establecidos, así como la regulación de las acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción federal.

V.- La expedición de las normas oficiales mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento en las materias previstas en esta Ley.

VI.- La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como para la preservación de los recursos naturales, de conformidad con esta Ley, otros ordenamientos aplicables y sus disposiciones reglamentarias.

XIV.- La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, substancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente.

ARTÍCULO 15.- Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios:

IV.- Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales.

XI.- En el ejercicio de las atribuciones que las leyes confieren al Estado, para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y, en general, inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se considerarán los criterios de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

ARTÍCULO 49.- En las zonas núcleo de las áreas naturales protegidas quedará expresamente prohibido:

I.- Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante.

ARTÍCULO 98.- Para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se considerarán los siguientes criterios:

- I. El uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no debe alterar el equilibrio de los ecosistemas.
- II. El uso de los suelos debe hacerse de manera que éstos mantengan su integridad física y su capacidad productiva.
- III. Los usos productivos del suelo deben evitar prácticas que favorezcan la erosión, degradación o modificación de las características topográficas, con efectos ecológicos adversos.
- IV.- En las acciones de preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, deberán considerarse las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural.
- V.- En las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse a cabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas.
- VI.- La realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

ARTÍCULO 134.- Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

- I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo.
- II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos.
- III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.
- IV.- La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar.
- 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 puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

ARTÍCULO 135.- Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:

- I. La ordenación y regulación del desarrollo urbano.
- II. La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios.
- III.- La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen.
- IV. El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

ARTÍCULO 136.- Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

I. La contaminación del suelo.

II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos.

III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.

IV. Riesgos y problemas de salud.

ARTÍCULO 151.- La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contrate 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 éstas independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los generó.

Quienes generen, reusen o reciclen residuos peligrosos, deberán hacerlo del conocimiento de la Secretaría en los términos previstos en el Reglamento de la presente Ley. En las autorizaciones para el establecimiento de confinamientos de residuos peligrosos, sólo se incluirán los residuos que no puedan ser técnica y económicamente sujetos de reuso, reciclamiento o destrucción térmica o físico química, y no se permitirá el confinamiento de residuos peligrosos en estado líquido.

ARTÍCULO 151 BIS.- Requiere autorización previa de la Secretaría:

I.- La prestación de servicios a terceros que tenga por objeto la operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos.

II.- La instalación y operación de sistemas para el tratamiento o disposición final de residuos peligrosos, o para su reciclaje cuando éste tenga por objeto la recuperación de energía, mediante su incineración.

III.- La instalación y operación, por parte del generador de residuos peligrosos, de sistemas para su reuso, reciclaje y disposición final, fuera de la instalación en donde se generaron dichos residuos.

ARTÍCULO 152 BIS.- Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzca 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, para el predio o zona respectiva.

ARTÍCULO 170.- Cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico, o de daño o deterioro grave a los recursos naturales, casos de contaminación con repercusiones peligrosas para los ecosistemas, sus componentes o para la

salud pública, la Secretaría, fundada y motivadamente, podrá ordenar alguna o algunas de las siguientes medidas de seguridad:

I.- La clausura temporal, parcial o total de las fuentes contaminantes, así como de las instalaciones en que se manejen o almacenen especímenes, productos o subproductos de especies de flora o de fauna silvestre, recursos forestales, o se desarrollen las actividades que den lugar a los supuestos a que se refiere el primer párrafo de este artículo.

II.- El aseguramiento precautorio de materiales y residuos peligrosos, así como de especímenes, productos o subproductos de especies de flora o de fauna silvestre o su material genético, recursos forestales, además de los bienes, vehículos, utensilios e instrumentos directamente relacionados con la conducta que da lugar a la imposición de la medida de seguridad.

III.- La neutralización o cualquier acción análoga que impida que materiales o residuos peligrosos generen los efectos previstos en el primer párrafo de este artículo.

Asimismo, la Secretaría podrá promover ante la autoridad competente, la ejecución de alguna o algunas de las medidas de seguridad que se establezcan en otros ordenamientos.

ARTÍCULO 170 BIS.- Cuando la Secretaría ordene alguna de las medidas de seguridad previstas en esta Ley, indicará al interesado, cuando proceda, las acciones que debe llevar a cabo para subsanar las irregularidades que motivaron la imposición de dichas medidas, así como los plazos para su realización, a fin de que una vez cumplidas éstas, se ordene el retiro de la medida de seguridad impuesta.

4.2.- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos

La principal causa de la contaminación del suelo es el manejo y disposición inadecuada de los residuos peligrosos, a continuación se mencionan los artículos con respecto a el manejo, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos generados durante algún proceso u operación. Estas regulaciones son del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos (LGEEPA).

ARTICULO 4o.- Compete a la Secretaría:

III.- Controlar el manejo de los residuos peligrosos que se generan en las operaciones y procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, y de servicios.

ARTICULO 13.- El generador podrá contratar los servicios de empresas de manejo de residuos peligrosos, para cualquiera de las operaciones que comprende el manejo. Estas empresas deberán contar con autorización previa de la Secretaría y serán responsables, por lo que toca a la operación de

manejo en la que intervengan, del cumplimiento de lo dispuesto en el Reglamento y en las normas técnicas ecológicas que de él se deriven.

ARTICULO 18.- En los casos de áreas abiertas no techadas, no deberán almacenarse residuos peligrosos a granel, cuando éstos produzcan lixiviados.

ARTICULO 31.- La disposición final de residuos peligrosos se sujetará a lo previsto en este Reglamento y a las normas técnicas ecológicas que al efecto se expidan. Los sistemas para la disposición final de residuos peligrosos son:

I.- Confinamientos controlados.

II.- Confinamientos en formaciones geológicas estables.

III.- Receptores de agroquímico.

Los receptores de agroquímicos sólo podrán confinar residuos de agroquímicos o sus envases.

ARTICULO 35.- Los lixiviados que se originen en las celdas de confinamiento o de tratamiento de un confinamiento controlado, deberán recolectarse y tratarse para evitar la contaminación del ambiente y el deterioro de los ecosistemas.

ARTICULO 42.- Cuando por cualquier causa se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos peligrosos, durante cualesquiera 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:

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

4.3.- Reglamento de gestión integral de residuos.

De acuerdo a los Artículos 68, 69, 70, 71, 127 hasta 135 del Reglamento de Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), la responsabilidad para la reparación del daño o las acciones de remediación de un sitio contaminado es de:

ARTÍCULO 68.- Quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio, así como de daños a la salud como consecuencia de ésta, estarán obligados a reparar el daño causado, conforme a las disposiciones legales correspondientes.

ARTÍCULO 69.- Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de sitios con éstos, están obligadas a llevar a

cabo las acciones de remediación conforme a lo dispuesto en la presente Ley y demás disposiciones aplicables.

ARTÍCULO 70.- Los propietarios o poseedores de predios de dominio privado y los titulares de áreas concesionadas, cuyos suelos se encuentren contaminados, serán responsables solidarios de llevar a cabo las acciones de remediación que resulten necesarias, sin perjuicio del derecho a repetir en contra del causante de la contaminación.

ARTÍCULO 71.- No podrá transferirse la propiedad de sitios contaminados con residuos peligrosos, salvo autorización expresa de la Secretaría. Las personas que transfieran a terceros los inmuebles que hubieran sido contaminados por materiales o residuos peligrosos, en virtud de las actividades que en ellos se realizaron, deberán informar de ello a quienes les transmitan la propiedad o posesión de dichos bienes.

Además de la remediación, quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio se harán acreedores a las sanciones penales y administrativas correspondientes.

ARTÍCULO 127.- Quienes transfieran o adquieran la propiedad de sitios contaminados con residuos peligrosos, conforme a lo previsto en el artículo 71 de la Ley, deberán contar con autorización expresa de la Secretaría. Para tal efecto, presentarán la solicitud en el formato que al efecto se expida, la cual contendrá:

- I. Nombre, denominación o razón social y domicilio del enajenante y del adquirente.
- II. Datos de ubicación del sitio, describiendo sus colindancias, construcciones e infraestructura existente.
- III. Determinación expresa del responsable de la remediación.

A la solicitud se anexará la carta del adquirente en la que especifique que fue informado de la contaminación del sitio. La autorización de la Secretaría no impide la ejecución de actos de comercio o de derecho civil, únicamente tiene como efecto definir a quién corresponde realizar las acciones de remediación del sitio transferido.

ARTÍCULO 128.- En caso de que una transferencia se efectúe antes de la remediación o al término de ésta y no existiera pacto expreso respecto a quién corresponde llevar a cabo o concluir dicha remediación, se entenderá responsable de llevarla a cabo o concluirla a quien enajena el sitio.

El instrumento jurídico mediante el cual se perfeccione la transferencia del inmueble deberá contener la declaración del enajenante sobre la contaminación que en este caso tenga el sitio que se transfiere. Lo anterior, sin perjuicio de la responsabilidad que se convenga para la remediación del mismo.

ARTÍCULO 129.- Cuando existan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos accidentales de materiales peligrosos o residuos peligrosos que no excedan de un metro cúbico, los generadores o responsables de la etapa de manejo

respectiva, deberán aplicar de manera inmediata acciones para minimizar o limitar su dispersión o recogerlos y realizar la limpieza del sitio y anotarlos en sus bitácoras. Estas acciones deberán estar contempladas en sus respectivos programas de prevención y atención de contingencias o emergencias ambientales o accidentes. Lo previsto en el presente artículo no aplica en el caso de derrames, infiltraciones, descargas o vertidos accidentales ocasionados durante el transporte de materiales o residuos peligrosos.

ARTÍCULO 130.- Cuando por caso fortuito o fuerza mayor se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de materiales peligrosos o residuos peligrosos, en cantidad mayor a la señalada en el artículo anterior, durante cualquiera de las operaciones que comprende su manejo integral, el responsable del material peligroso o el generador del residuo peligroso y, en su caso, la empresa que preste el servicio deberá:

- I. Ejecutar medidas inmediatas para contener los materiales o residuos liberados, minimizar o limitar su dispersión o recogerlos y realizar la limpieza del sitio.
- II. Avisar de inmediato a la Procuraduría y a las autoridades competentes, que ocurrió el derrame, infiltración, descarga o vertido de materiales peligrosos o residuos peligrosos.
- III. Ejecutar las medidas que les hubieren impuesto las autoridades competentes conforme a lo previsto en el artículo 72 de la Ley.
- IV. En su caso, iniciar los trabajos de caracterización del sitio contaminado y realizar las acciones de remediación correspondientes.

ARTÍCULO 131.- El aviso a que se refiere la fracción II del artículo anterior se formalizará dentro de los tres días hábiles siguientes al día en que hayan ocurrido los hechos y contendrá:

- I. Nombre y domicilio de quien dio el aviso o nombre del generador o prestador de servicios y el número de su registro o autorización otorgados por la Secretaría.
- II. Localización y características del sitio donde ocurrió el accidente.
- III. Causas que motivaron el derrame, infiltración, descarga o vertido accidental.
- IV. Descripción precisa de las características fisicoquímicas y toxicológicas, así como cantidad de los materiales peligrosos o residuos peligrosos derramados, infiltrados, descargados o vertidos.
- V. Medidas adoptadas para la contención.

ARTÍCULO 132.- Los programas de remediación se formularán cuando se contamine un sitio derivado de una emergencia o cuando exista un pasivo ambiental.

Existe emergencia, para efectos del presente Capítulo, cuando la contaminación del sitio derive de una circunstancia o evento, indeseado o inesperado, que ocurra repentinamente y que traiga como resultado la liberación no controlada, incendio o explosión de uno o varios materiales peligrosos o residuos peligrosos que afecten la salud humana o el medio ambiente, de manera inmediata.

Se considera pasivo ambiental a aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. En esta definición se incluye la contaminación generada por una emergencia que tenga efectos sobre el medio ambiente.

ARTÍCULO 133.- En la elaboración del programa de remediación el interesado podrá determinar las acciones de remediación que se integrarán a la propuesta correspondiente, tomando como base lo establecido en las normas oficiales mexicanas aplicables o, en caso de no existir éstas, los niveles de remediación que se determinen con base en el estudio de evaluación de riesgo ambiental que se realice.

ARTÍCULO 134.- Los programas de remediación, según corresponda, se integran con:

- I. Estudios de caracterización.
- II. Estudios de evaluación del riesgo ambiental.
- III. Investigaciones históricas.
- IV. Las propuestas de remediación.

Los programas de remediación se elaborarán con base en el estudio de caracterización y, en su caso, en el de evaluación de riesgo ambiental. En la elaboración de los programas de remediación para pasivos ambientales también se considerarán las investigaciones históricas.

Estas investigaciones tendrán como finalidad establecer las actividades causantes de los daños ambientales realizadas en el sitio contaminado, los sucesos que condujeron a la contaminación del suelo, el subsuelo y los mantos acuíferos, las condiciones geo-hidrológicas que prevalecieron en el sitio, con base en informaciones documentales, así como la relación de quienes hubieren sido poseedores y de los usos que haya tenido el predio o predios en los cuales se localice el sitio contaminado.

ARTÍCULO 135.- Cuando se trate de emergencias, los programas de remediación de sitios contaminados con materiales peligrosos o residuos peligrosos incluirán los datos generales del responsable de la contaminación, incluyendo su actividad, los datos del responsable técnico de la remediación, el lugar y fecha en que ocurrió la emergencia y los resultados de los estudios de caracterización.

A dichos programas se integrarán los siguientes documentos:

- I. Planos del lugar a una escala tal que permita apreciar la información requerida, georeferenciados con coordenadas UTM y orientación geográfica, donde se muestren topografía, cuerpos de agua superficiales, puentes y caminos de acceso, las áreas dañadas de suelo y los puntos de muestreo, con las mismas denominaciones que se indican en los resultados de las determinaciones analíticas del contaminante.
- II. Documento comprobatorio de la cadena de custodia de las muestras.
- III. Planos isométricos de concentraciones y migración del contaminante en suelo y subsuelo.

- IV. Memoria fotográfica del sitio.
- V. El estudio de caracterización.
- VI. La propuesta de remediación.

La documentación descrita en las fracciones anteriores podrá entregarse a la Secretaría de manera paralela a la realización de las acciones contenidas en la propuesta de remediación del sitio.

Artículo 137.- Los programas de remediación, así como los estudios de caracterización y de riesgo ambiental se podrán llevar a cabo por el responsable de la contaminación o daño ambiental de manera directa o a través de los responsables técnicos que éste designe.

Los responsables técnicos a que se refiere el párrafo anterior podrán ser:

- I. Instituciones de educación superior con experiencia en la materia;
- II. Prestadores de servicios de tratamiento de suelos contaminados autorizados, o
- III. Otra persona, siempre que el responsable anexe al programa de remediación respectivo la documentación que acredite la formación profesional y experiencia en la remediación de sitios contaminados por materiales peligrosos o residuos peligrosos.

Los responsables de la contaminación o daño ambiental que designen como responsable técnico a las personas indicadas en las fracciones I o III del presente artículo, deberán otorgar seguro o garantía suficiente para cubrir los daños que pudieran generarse durante la ejecución de las acciones de remediación correspondientes.

5. Composición y propiedades fisicoquímicas del suelo

El suelo constituye un recurso natural de gran importancia, que desempeña funciones en la superficie terrestre como reactor natural y hábitat de organismos, así como soporte de infraestructura y fuente de materiales no renovables.

Reactor natural. El suelo es un elemento filtrante, amortiguador y transformador, que regula los ciclos del agua. Tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos. El suelo, además, promueve fenómenos de transpiración del aire a través de la superficie.

Hábitat de organismos y reserva genética. El suelo constituye, junto con el agua, el aire y la luz solar, el fundamento de la vida en los ecosistemas terrestres, alberga una gran diversidad de organismos y microorganismos.

Soporte físico de infraestructura. Por sus características físicas, químicas y mecánicas, el suelo posee propiedades de soporte para el desarrollo de actividades forestales, recreativas y agropecuarias, además de socioeconómicas como vivienda, industria y carreteras, entre otras.

Fuente de materiales no renovables. El suelo es un yacimiento de materias primas, como minerales no metálicos de interés para la construcción (piedra, mármol, caliza, yeso, arena), minerales metálicos (blenda, galena, siderita, pirita) y combustibles fósiles como el petróleo.

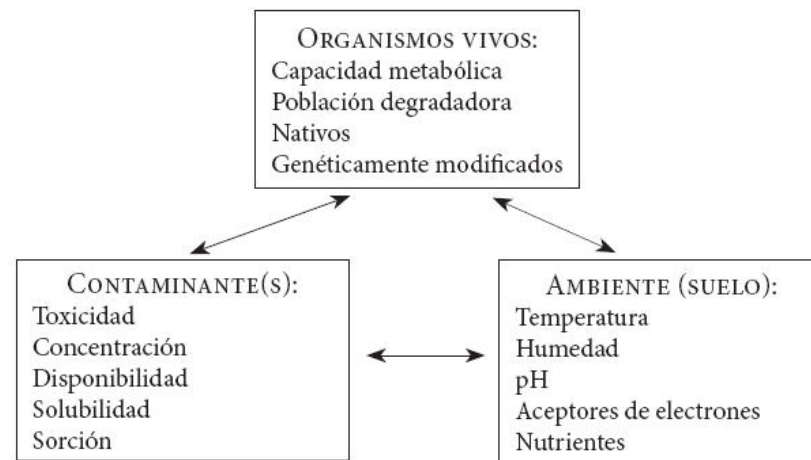
5.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo.

Antes de considerar la aplicación de cualquier tecnología de remediación, es fundamental conocer ciertas características, tanto del suelo (ambientales), como del contaminante y de los organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) presentes en el sitio, con potencial metabólico para degradar los contaminantes. De esta manera, los procesos de remediación dependen de estos tres factores que deben encontrarse en equilibrio (figura 1). La obtención de esta información requiere del muestreo y determinación de las características físicas y químicas que se describen a continuación.

Factores ambientales. Dentro de los factores más importantes para la remediación de un suelo se encuentran las condiciones ambientales y las características fisicoquímicas del suelo.

l) Temperatura. Puede afectar propiedades del contaminante así como la velocidad de un proceso de biorremediación, ya que la velocidad de las reacciones enzimáticas depende de ésta.

Figura 1. Factores interrelacionados entre sí que inciden en la remediación de un suelo



Fuente INE

II) Humedad. Una alta humedad en el suelo puede provocar problemas durante la excavación y el transporte así como aumentos en los costos durante el uso de métodos térmicos. La humedad también puede afectar los procesos de

biorremediación debido a que, en general, aunque todos los microorganismos necesitan agua para subsistir, debe existir un balance, ya que si el contenido de agua es muy bajo, la actividad microbiana se detiene, y si es muy alto, disminuye el intercambio gaseoso a través del suelo.

III) Tipo de suelo. La capacidad de retención de agua de un suelo varía en función de las fracciones orgánicas y minerales. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar. Asimismo, a mayor tamaño de partícula en la fracción mineral, la permeabilidad y la aireación son mayores. La capacidad de retención de agua en un suelo aumenta proporcionalmente al contenido de materia orgánica. Un suelo con alto contenido de humedad disminuye la movilidad de compuestos orgánicos y con ello la eficiencia de ciertas tecnologías, como el lavado de suelos.

IV) pH. El pH afecta la solubilidad y disponibilidad de macro y micro- nutrientes, la movilidad de metales y la reactividad de minerales. Generalmente, los metales son móviles a pH bajo, en forma de especies iónicas libres o como órgano-metales solubles; al pH alcalino forman carbonatos o fosfatos minerales insolubles. La actividad y crecimiento microbianos son fuertemente afectados por el pH. La mayoría de las bacterias tienen un rango óptimo de 6.5 a 8.5; si el suelo es ácido se favorece el crecimiento de hongos.

V) Aceptores de electrones. Su presencia es importante para la aplicación de tecnologías de biorremediación. La mayoría de estos son compuestos inorgánicos oxidados, como O_2 , NO_3^{2-} , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} y CO_2 .

VI) Potencial redox. Mide la oxidación relativa de una solución acuosa y normalmente se encuentra controlado por el contenido de humedad del suelo. En ambientes anaerobios reducidos, los metales precipitan debido a la presencia de iones ferrosos y carbonatos; en cambio, bajo condiciones oxidantes, los metales se hacen más solubles.

VII) Permeabilidad. Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías in situ. En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación. Características de los contaminantes.

La naturaleza y características del contaminante es otra variable de suma importancia para el éxito o fracaso de un proceso de remediación. Dentro de las más importantes se encuentran: toxicidad, concentración, disponibilidad, solubilidad y sorción del contaminante a las superficies sólidas.

I) Toxicidad. El factor clave para decidir la remediación de un sitio es la toxicidad para los seres vivos. La descarga de químicos tóxicos a un suelo implica, entre muchos otros problemas, que son generalmente resistentes a la biodegradación. La biorremediación se inhibe si un químico es tóxico para organismos degradadores.

II) Concentración. La concentración de un compuesto en un suelo es un factor de gran importancia para definir el uso de una tecnología de remediación en particular. En general, altas concentraciones inhiben la actividad microbiana; sin embargo, está depende de la estructura del contaminante. Algunos químicos pueden ser inhibitorios en baja concentración, mientras que otros pueden serlo en cantidades mayores.

III) Solubilidad. Es la cantidad de un elemento o compuesto que puede disolverse en agua. Los químicos difieren significativamente entre sí en cuanto a su solubilidad en agua. En general, ésta disminuye al aumentar el tamaño de la molécula y los compuestos polares son más solubles que los no polares. Mientras mayor es la solubilidad de un compuesto, mayor es su biodisponibilidad.

IV) Sorción. La sorción de un químico a la matriz sólida del suelo afecta su solubilidad y su biodisponibilidad. La sorción incluye la adsorción (retención superficial) y la absorción (captación hacia el interior de la matriz). Los cationes generalmente son sorbidos en sitios de intercambio catiónico en minerales arcillosos o superficies húmicas, mientras que los compuestos aniónicos y no iónicos quedan sorbidos en la materia orgánica. La sorción de un contaminante a las partículas del suelo puede no sólo provocar la falta de biodisponibilidad, sino que también dificultar su extracción química.

V) Volatilidad. Es la tendencia de un compuesto o un elemento para moverse de una fase líquida o sólida a una gaseosa. Entre los metales, el Hg y el Se tienen formas volátiles.

VI) Polaridad y carga iónica. Los compuestos no polares tienden a ser hidrofóbicos y se concentran en la materia orgánica del suelo. Los compuestos no polares generalmente tienen menor movilidad en el suelo que los polares. La carga iónica determina la capacidad de un compuesto para su adsorción en un sólido.

Factores microbiológicos. Es un factor de importancia para la aplicación de tecnologías biológicas. Este tipo de factores implica la verificación de la existencia de poblaciones de microorganismos degradadores, es decir, si existen grupos microbianos capaces de degradar o transformar el contaminante y si estos se encuentran en número suficiente. Las poblaciones microbianas pueden encontrarse en número suficiente en el sitio a tratar (autóctonas o nativas) o bien pueden adicionarse poblaciones nativas aumentadas en laboratorio u organismos genéticamente modificados.

6.- Contaminación del suelo.

La contaminación se define como la presencia en el ambiente de cualquier agente químico, físico o biológico o de una combinación de varios agentes, en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal o vegetal, o impidan el uso o goce de las propiedades y lugares de recreación. Se entiende por contaminación del suelo la introducción de un elemento extraño en el sistema del suelo, o bien la existencia de un nivel anormal que, ya sea por sí mismo o por su efecto sobre los restantes componentes, genera un efecto nocivo para la dinámica del suelo, sus ecosistema biológico (los organismos del suelo, sus consumidores), o es susceptible de transmitirse a otros sistemas.

La contaminación del suelo tiene fundamentalmente dos orígenes, el antrópico, y el natural. En el primer caso, las actividades del ser humano degradan el suelo como consecuencia de la sobreexplotación de diversas actividades, como la agricultura intensiva, el uso de determinados pesticidas, las actividades industriales sin ningún tipo de control en el vertido de determinadas sustancias, etc. El segundo tipo de contaminación, la de origen natural, el ser humano está presente de una forma menos directa, pero la actividad de éste favorece la contaminación. Se trata por ejemplo, de la erosión, o la desertificación, procesos naturales en los que el ser humano influye de manera evidente en la aceleración de éstos.

6.1 Fuentes de Contaminación en México.

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes, y muy difíciles de cuantificar de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos.

El número de sitios contaminados en México, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados por el INEGI, la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 2005 fue de 67,967 km². Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 750 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos.

Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados gasolinas, combustóleo, diesel, agroquímicos, gas LP y natural, entre otros. Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAP). De éstos, compuestos como los BPC se han almacenado en tambores que, en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente. Por su parte, los HAP se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP). Como se mencionó, en todo el país existen problemas de contaminación aún no cuantificados con precisión.

Sin embargo, pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación generados por el uso de agroquímicos, tanto fertilizantes (en especial los nitrogenados), como de pesticidas (fungicidas, herbicidas e insecticidas); los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (petróleo y derivados), así como los ligados a actividades mineras. A continuación se mencionan las principales fuentes de contaminación del suelos en México.

6.2 Industria Minera.

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica y en expansión durante la colonia; desde entonces ha contribuido en gran medida con el desarrollo económico del país, surtiendo insumos a una serie de industrias como la de la construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica.

De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, la industria minera en el país es principalmente metálica, y se dedica primordialmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo.

Las actividades mineras provocan en el suelo, además de su desaparición en el área afectada, que no siempre se recupera convenientemente, una contaminación en las zonas cercanas en las que se depositan gran cantidad de residuos sin valor para la explotación. Cuando la actividad extractiva está relacionada con metales pesados, materiales radiactivos o sustancias similares, nocivas para los seres vivos, la contaminación afecta a una gran superficie. Este efecto contaminante puede alcanzar a las aguas subterráneas cuando su magnitud es grande y en función de las condiciones climáticas y la permeabilidad de los suelos afectados. Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, en varias etapas de proceso, la industria minera ha generado durante décadas ininidad de desechos peligrosos.

La producción minera en México, se concentra en doce entidades: Sinaloa, Durango, Chihuahua, Guanajuato, Michoacán, Zacatecas, Colima, Sonora, Coahuila, San Luis Potosí, Hidalgo, y Jalisco. El desarrollo y modernización de este sector, como el de la mayor parte de la industria, lleva implícitos daños en la ecología, que no deben ser soslayadas en el diseño y ejecución de las políticas para su desarrollo. Esto explica que se haya pasado del objetivo principalmente correctivo en materia de cuidado del ambiente, que predominó en el pasado, a uno esencialmente preventivo, orientado hacia el desarrollo sustentable de esta actividad. La explotación de yacimientos y beneficios de minerales puede provocar alteraciones o impactar de manera negativa al entorno, esto se muestra en la tabla 1 en donde se ve la relación de la actividad minera y su impacto ambiental.

Tabla 1. Proceso minero y el ambiente

Fases	Descripción	Impacto Ambiental
Prospección	Estudios de gravimetría, geología superficial, geoelectrica, de susceptibilidad magnética y densidad.	Son procedimientos no invasivos que no generan impactos ambientales significativos
Exploración	Barrenación a diamante, obras y perforaciones directas (tajos, zanjos, etc.), construcción de caminos planillas de barrenación instalación de campamentos.	Las modificaciones que pueden generar, en algunos casos como la destrucción de la vegetación, suelen ser mitigables o, en su mayoría sujetas a procedimiento de protección y compensación ambiental.
Explotación	Transformación necesaria del ambiente para los objetos mineros, construcción y obras diversas (tiros, socavones, casa de máquinas, patios de depósito temporal de minerales, zona de descarga de material estéril, etc.).	Destacan los riesgos asociados a la operación de presas de jales, que pueden generar escurrimientos y arrastre de residuos minero – metalúrgicos peligrosos, de alto impacto ambiental, así como la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores.
Beneficio	Una vez realizada la experimentación metalúrgica necesaria, se define el método de concentración idóneo. Por lo general se reduce el tamaño del mineral, mediante la trituración y molienda. También comúnmente se lleva a cabo tratamientos previos a una fusión primaria.	La trituración y molienda puede provocar ruido, vibración y emisión de polvo que, sin embargo, son efectos de bajo impacto. El tratamiento de beneficio puede tener efectos ambientales negativos como: aguas residuales, residuos peligrosos, y en algunos casos emisiones a la atmósfera.
Fundición y refinación	Uso de hornos industriales para obtener metales y sus aleaciones hasta conformarlos como materias primaria para uso industrial. Eliminación de impurezas en los metales obtenidos para alcanzar una alta ley de contenido	Los contaminantes que producen se centran en las emisiones a la atmósfera, aunque también se generan residuos peligrosos y aguas residuales.

Fuente SEMIP

6.3 Industria Petroquímica.

La industria petroquímica en México se ha desarrollado rápidamente, sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con importantes daños a la salud de los habitantes de la zona, así como la contaminación del suelo y agua, y el deterioro al equilibrio ecológico de los ecosistemas.

Entre las causas que han generado este deterioro ambiental por la contaminación de cuerpos de agua y suelos a lo largo de todo el país, se encuentran las siguientes:

- (I) Manejo inadecuado y abandono de materiales y residuos peligrosos
- (II) Mantenimiento inadecuado o falta de éste en instalaciones petroleras
- (III) Explosiones en instalaciones de alto riesgo
- (IV) Fugas en líneas de conducción
- (V) Derrames de hidrocarburos

En el inventario de residuos peligrosos de PEMEX en el 2005 reportan la generación de más de 700 mil toneladas de residuos peligrosos. El volumen de hidrocarburos líquidos derramados en el 2005 representa el 0.7 por ciento de las emisiones y descargas totales.

El 92.1 por ciento de este volumen fue consecuencia de 39 derrames ocurridos en instalaciones de PEMEX Refinación y el resto se debió a mil 179 derrames en instalaciones de PEMEX Exploración y Producción. Los residuos peligrosos generados por las operaciones de PEMEX representan el 22 por ciento de las emisiones y descargas totales. El 86 por ciento del volumen total se compone de tres tipos de residuos:

- 73 por ciento, lodos y recortes de perforación.
- 8 por ciento, lodos aceitosos de las refinerías y la región norte de PEMEX Exploración y Producción.
- 6 por ciento, aceites gastados de las refinerías y complejos petroquímicos.

Y con esto se puede estimar la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames. Algunos de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por actividades petroleras son Tabasco y Veracruz.

6.4 Agroquímicos.

El uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México. Muchos de los plaguicidas empleados en el país hasta la fecha, se han prohibido en otros países por su toxicidad. Sin embargo, el número de plaguicidas se incrementa a razón de 10% al año. Esto ha permitido que el número de productos que entran en contacto con la población, se incrementa en más de seis veces.

Los plaguicidas son el nombre genérico que recibe cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se destina a controlar cualquier plaga, incluidos los vectores de enfermedades humanas y de animales, así como las especies no deseadas que causen perjuicio o que interfieran con la producción agropecuaria y forestal. (SEMARNAP, 1999).

Los plaguicidas pueden clasificarse de acuerdo con los siguientes criterios:

- Concentración: Ingrediente activo, Plaguicida técnico, plaguicida formulado.
- Organismos que controlan: Insecticidas, Acaricidas, Bactericidas, Rodenticidas, Avicidas, etc.
- Presentación de formulaciones: Sólidos, Líquidos y Gases.
- Modos de acción. de contacto, Repelentes, de ingestión, Defoliantes, Fumigantes.
- Composición química: Organoclorados, Triazinas, Organofosforados, Compuestos de cobre, Piretroides, Organoazufrados, etc.
- Uso al que se destinan: Agrícola, Urbano, Pecuario, Industrial, Forestal y Domestico.

El movimiento del plaguicida se relaciona estrechamente con la forma de aplicación siendo una de ellas la aplicación directa la cual considera productos de tipo granular o inyectados, esta es la primera en que llegan las más altas concentraciones al suelo, aunque esta forma disminuye la probabilidad de su disposición en el medio ambiente.

Otra forma de aplicación es la no intencional, la cual se origina por la dispersión del producto al momento de su aplicación. Los problemas de dispersión ocurren durante el rociado terrestre o aéreo, mismo que es influido por la formulación del plaguicida, parámetros de aplicación tal como el diseño de la boquilla y propiedades de fluidez, condiciones meteorológicas, altura de liberación y tamaño del área tratada.

Un alto porcentaje más del 30%, de una aplicación por rociado puede llegar a moverse 15 cm o más lejos del área tratada, si las condiciones son ideales para la dispersión, es decir, que se presenten vientos. Resultando entonces importante el tamaño de la gota para favorecer o no la dispersión, pues se ha encontrado que las gotas pequeñas producto del rociado, tienden a desplazarse más lejos que las gotas grandes.

En México se usa el 60% de los 22 plaguicidas como perjudiciales para la salud y el medio ambiente. De ellos el 42% se fabrican en el país. De 90 plaguicidas que han sido cancelados o restringidos en los Estados Unidos, 30 se usan en México. Todas estas sustancias son compuestos químicos tóxicos y por su aplicación en tierras de cultivo, evidentemente son compuestos que se encuentran como contaminantes de grandes extensiones de suelos en todo el país.

6.5 Estaciones de Servicio

Los productos combustibles que diariamente se utilizan en el transporte tanto público como privado tales como gasolina, diesel, combustóleo, gasóleo, gas avión y gas LP, son producidos y distribuidos en México por PEMEX. La comercialización a menudo de gasolina y diesel, se lleva a cabo en estaciones de servicio (gasolineras) y en estos lugares uno de los riesgos ambientales que involucra el manejo de estas estaciones, son los derrames o fugas de combustibles que provocan la contaminación, tanto del suelo, como del agua en los sitios donde se encuentran los tanques de almacenamiento.

Y si duda otra fuente de contaminación del suelo en México son todas las empresas y aquellos pequeños negocios que contaminan al tirar sus desperdicios de residuos peligrosos, ya sea por ignorancia, intencionalmente o por descuido vierten los residuos peligrosos sin importarles el daño que puedan causar directamente al suelo.

Existen otra serie de actividades en las que el efecto contaminante no es tan evidente como en las anteriores, como sucede con la caza, que deja grandes cantidades de plomo y otros metales utilizados en los cartuchos. Las áreas urbanas son otra gran fuente de contaminación por la enorme producción de residuos, así como las vías de comunicación por los gases desprendidos por los motores de explosión. En este sentido hay que tener cada vez más en cuenta el intenso tráfico aéreo que deja gran cantidad de residuos en la atmósfera y que indefectiblemente terminan en el suelo. Otra fuente de contaminación son los tiraderos de basura en donde se encuentran todo tipo de envases los que en algún momento contuvieron algún residuo peligroso y en donde están expuestos el suelo, los animales e incluso las personas, al mal manejo de residuos peligrosos.

7.- Tecnologías de remediación del suelo

Las técnicas de restauración de suelo se han desarrollado en gran medida, debido a las acciones de los gobiernos de exigir a través de la expedición de leyes y reglamentos, a los responsables de la contaminación del suelo se encarguen de la limpieza de los mismos.

En la legislación mexicana el término remediación se define como el conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos (Fuente Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos).

El término tecnología de tratamiento implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA 2001). Estas tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y las posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente.

Las opciones de remediación para sitios contaminados, dependen de cuatro consideraciones generales:

- 1.- El tipo de contaminante y sus características físicas y químicas determinan si un sitio requiere ser remediado y la manera en la que el contaminante debe tratarse. Además, dichas propiedades determinan cómo puede ser el movimiento del contaminante y si éste es o no persistente en el ambiente. La estructura química de un contaminante determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para establecer los límites de limpieza.
- 2.- La localización y las características del sitio, así como el uso de suelo (industrial, residencial o agrícola), fundamentalmente afectan la meta de la limpieza y los métodos que pueden emplearse para alcanzarla.
- 3.- Las características naturales de los suelos, sedimentos y cuerpos de agua, a menudo determinan las particularidades de los sistemas de tratamiento. Para suelos o lodos, el manejo del material a tratar (conversión del contaminante a una forma en la que pueda tratarse y/o transportarse desde la fuente de la contaminación hasta el lugar de tratamiento), es el paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento. Los pretratamientos para modificar las características naturales de un suelo contaminado pueden ser componentes muy caros en un proceso de remediación.
- 4.- Las capacidades de las tecnologías de remediación pueden variar ampliamente en función de las condiciones específicas del sitio. Las tecnologías de remediación pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante del suelo o destruyendo el contaminante.

El uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, planta piloto o gran escala) y por supuesto que de su costo. Cada sitio a tratar presenta un reto único. No obstante, cada sitio puede analizarse en términos de un juego limitado de características fundamentales y de una solución que sea efectiva en cuanto a los costos de dichas características.

7.1 Clasificación de las tecnologías de remediación.

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios:

- 1.- Estrategia de remediación
- 2.- Lugar en que se realiza el proceso de remediación
- 3.- Tipo de tratamiento.

Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación. A continuación se describen con más detalle estas clasificaciones anteriores:

1.- Estrategia de remediación. Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

- Destrucción o modificación de los contaminantes. Con estas tecnologías se busca alterar la estructura química del contaminante.
- Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).
- Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

2.- Lugar de realización del proceso de remediación. En general, se distinguen dos tipos de tecnología:

- In situ. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del mismo, sin necesidad de excavar el sitio; se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.

- Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse on site u off site.

On site: el suelo contaminado se mueve físicamente de su lugar original y puede:

- I) Colocarse en un área preparada, la cual ha sido diseñada para mejorar el tratamiento y/o prevenir el transporte de contaminantes a partir del sitio.
- II) Llevarse a un área de almacenamiento mientras se prepara el sitio original para poder usarse y después colocar el suelo removido para tratamiento, la preparación del lecho puede consistir en colocar una capa de arcilla o una membrana plástica para retardar el transporte de contaminantes.
- III) Tratarse en una planta móvil llevada al sitio.

Off site: el suelo contaminado se remueve completamente del sitio y se transporta a una planta de tratamiento permanente en otra parte, generalmente el suelo se vuelve a poner en el sitio después de tratarlo.

En la tabla 2 se mencionan las ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.

3.- Tipo de tratamiento. Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento:

- Tratamientos biológicos

Estos procesos consisten en el uso de microorganismos naturales o desarrollados para degradar, transformar o remover los contaminantes químicos presentes en el suelo. Los procesos biológicos pueden transformar materiales tóxicos en elementos no tóxicos tales como agua, bióxido de carbono y otros productos inocuos; el tratamiento biológico es altamente sensible a cambios en la composición orgánica y las concentraciones del material que se está tratando, generalmente no tiene efecto sobre sustancias inorgánicas disueltas, inclusive niveles significativos de algunos compuestos químicos inorgánicos llegan a inhibir la actividad biológica o hasta matar a los microorganismos.

- Tratamientos fisicoquímicos.

Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

Algunos constituyentes químicos presentes en los sitios contaminados se pueden tratar por medio de procesos de separación y purificación que consisten en técnicas tales como: filtración, centrifugación, flotación, destilación, evaporación, extracción con solventes, osmosis inversa, adsorción con carbón activado, decantación e inmovilización de constituyentes por solidificación.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.

	In situ	Ex situ
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar ○ Menos costosas 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Menor tiempo de tratamiento ○ Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mayores tiempos de tratamiento ○ Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo ○ Dificultad para verificar la eficacia del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Necesidad de excavar el suelo ○ Aumento en costos e ingeniería para equipos ○ Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante

Fuente INE

Existen otro tipo de técnicas que separan o concentran los materiales tratados aprovechando la diferencia en las características físicas tales como densidad, presión de vapor, tamaño de partícula. Los procesos físicos rara vez se usan como la opción de tratamiento final para cualquier material contaminado, en general los objetivos de muchos de estos métodos son:

- I) Separar los materiales peligrosos de aquellos que se consideran menos peligrosos.
- II) Separar diferentes tipos de materiales peligrosos en varias corrientes que requieren diferentes métodos de tratamiento.
- III) Pretratar un material contaminado antes de su disposición final.

Otros compuestos químicos o materiales contaminados se pueden separar o transformar en menos peligrosos, mediante tratamientos químicos, estos procesos involucran el uso de reacciones químicas para transformar los compuestos peligrosos en sustancias menos tóxicas. Estas técnicas son: precipitación, neutralización, hidrólisis, fotólisis, oxidación reducción y deshalogenación.

- Tratamientos térmicos.

Las tecnologías de tratamiento térmico emplean calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo. Este tipo de procesos a través del control de temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, convierten los materiales peligrosos en dióxido de carbono, agua y otros productos de combustión. La degradación térmica es aplicable a materiales contaminados que contienen concentraciones significativas de compuestos orgánicos y se pueden realizar a través de diferentes tipos de incineración o pirolisis.

Dependiendo del tipo de material contaminado que se está tratando, resultan diferentes productos finales; la degradación térmica de compuestos orgánicos produce principalmente como subproductos agua, nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, gases ácidos y partículas. Si están presentes metales una parte de estos pueden emitirse a la atmósfera.

Además de las clasificaciones anteriores, las tecnologías de remediación pueden clasificarse con base en el tiempo que llevan en el mercado y al grado de desarrollo en el que se encuentran, en tecnologías tradicionales y en tecnologías innovadoras (EPA 2001).

- Tecnologías tradicionales. Son tecnologías utilizadas comúnmente a gran escala, cuya efectividad ha sido probada. La información disponible acerca de costos y eficiencia es de fácil acceso. Entre las tres tecnologías tradicionales usadas con mayor frecuencia, se encuentran: la incineración in situ y ex situ, la solidificación/estabilización, la extracción de vapores y la desorción térmica.

- Tecnologías innovadoras. Son tecnologías propuestas más recientemente, que pueden encontrarse en diferentes etapas de desarrollo (investigación, escala piloto o gran escala). Su limitado número de aplicaciones genera la falta de datos acerca de sus costos y eficiencias. En general, una tecnología de tratamiento se considera novedosa si su aplicación a gran escala ha sido limitada.

En la tabla 3 se mencionaran las Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo al tipo de tratamiento.

En la siguiente sección se presentan algunas de las tecnologías de remediación más utilizadas para tratar suelos contaminados, con base en el tipo de tratamiento (biológico, fisicoquímico, térmico), señalando sus principios de operación, principales ventajas, limitaciones y costos estimados. Es importante aclarar que los costos que se presentan, son promedios obtenidos de la aplicación de cada tecnología en los EUA. y están dados en dólares americanos (Fuente EPA).

Tabla 3. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo al tipo de tratamiento.

	Ventajas	Desventajas
Tratamientos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Son efectivos en cuanto a costos ♦ Son tecnologías más benéficas para el ambiente ♦ Los contaminantes generalmente son destruidos ♦ Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Requieren mayores tiempos de tratamiento ♦ Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos ♦ No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano
Tratamientos fisicoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Son efectivos en cuanto a costos ♦ Pueden realizarse en periodos cortos ♦ El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos ♦ Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación
Tratamientos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Permite tiempos rápidos de limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Es el grupo de tratamientos más costoso ♦ Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo ♦ Intensivos en mano de obra y capital

Fuente INE

7.2 Tecnologías de remediación Biológicas.

7.2.1 Biorremediación.

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía.

La biodegradación de compuestos en condiciones de campo dependen de la temperatura, el tipo de compuesto a degradar, niveles de oxígeno disuelto, contenido de humedad del suelo, permeabilidad, potencial de oxidoreducción, pH, disponibilidad y concentración de los contaminantes, disponibilidad de nutrientes y de la comunidad microbiológica natural. El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales.

Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos totales del petróleo (HTP), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), pesticidas (2,4-D), conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos poli cíclicos (HAP).

La biorremediación puede emplear:

- Organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos).
- Puede realizarse in situ o ex situ.
- En condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno).

En condiciones Aerobias en la presencia de suficiente oxígeno, y otros elementos nutrientes, los microorganismos convertirán en última instancia muchos contaminantes orgánicos en bióxido de carbono y agua.

La Biorremediación del suelo implica típicamente la filtración o la inyección del agua subterránea o del agua incontaminada mezclada con los alimentos y saturada con oxígeno disuelto. Una irrigación de la galería o de aerosol de la infiltración se utiliza típicamente para los suelos contaminados bajos, y los pozos de inyección se utilizan para suelos contaminados más profundos.

En la Biorremediación in situ se ha demostrado que en climas fríos, la baja temperatura retarda el proceso de la remediación. Para los sitios contaminados donde los suelos tienen temperaturas bajas, se pueden utilizar las mantas de calor para cubrir la superficie del suelo y aumentar la temperatura del mismo, así como favorecer la degradación.

La Biorremediación se puede clasificar como una tecnología a largo plazo que pueda tomar varios años para la limpieza del suelo.

En condiciones Anaerobias en ausencia del oxígeno, los contaminantes orgánicos serán metabolizados en última instancia al metano, a las cantidades limitadas de bióxido de carbono, y a las cantidades de rastro de gas de hidrógeno. Bajo condiciones de reducción de sulfato, el sulfato se convierte al sulfuro o al sulfuro elemental, y bajo condiciones de reducción de nitrato, el gas del nitrógeno se produce en última instancia.

Los contaminantes se pueden degradar a veces a los productos intermedios o finales que pueden ser menos, igualmente, o más peligroso que el contaminante original. Por ejemplo, TCE anaerobio se biodegrada al cloruro de vinilo que es más tóxico. Para evitar tales problemas, la mayoría de los proyectos del biorremediación se conducen in situ.

El sistema abierto es similar al abandonamiento con las virutas de madera en un trazador de líneas o una superficie dura que se cubra. La temperatura no se controla en este tipo de sistema. La temperatura óptima para la biodegradación con el hongo de la putrefacción que degrada se extiende a partir del 30 a 38° C (86 a 100° F). El calor de la reacción de la biodegradación ayudará a mantener la temperatura del proceso en grado óptimo. En la figura 2 se muestra ejemplo de biorremediación.

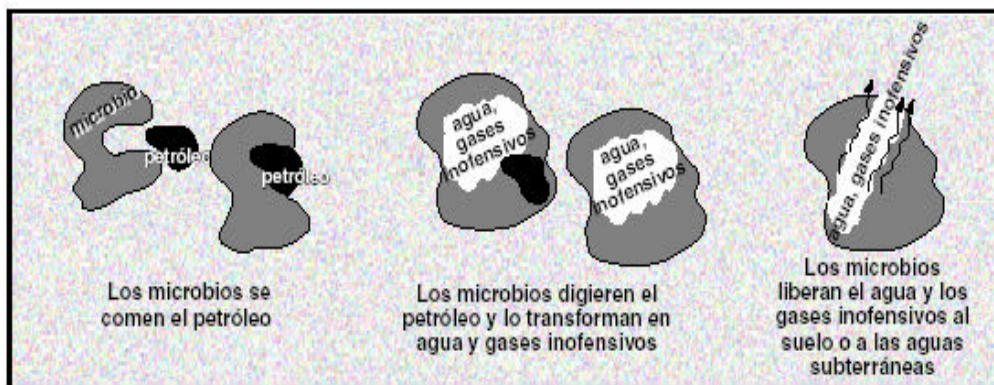


Figura 2. Ejemplo de Biorremediación.

Aplicación

Las técnicas de Biorremediación se han utilizado con éxito en la remediación del agua subterránea de los suelos, del lodo, y de áreas contaminadas con los hidrocarburos del petróleo, los solventes, los pesticidas, los preservativos de madera, y otros productos químicos orgánicos. Los estudios en planta piloto han demostrado la eficacia de la degradación microbiana anaerobia de nitrotoluenos en los suelos contaminados con las basuras de las municiones.

El tratamiento del biorremediación no requiere de la calefacción, requiere de entradas relativamente baratas, tales como alimentos, y no genera a menudo

algún residuo tóxico. También, cuando está conducido in situ, no requiere la excavación de medios contaminados. Comparado con otras tecnologías, tales como desorción y la incineración (que requieran la excavación y calefacción), el tratamiento químico (que puede requerir los reactivos químicos relativamente costosos) y el lavado del suelo in situ (que limpia con un chorro de agua), la biorremediación puede gozar de una ventaja en cuanto a costo en el tratamiento.

Limitaciones

Los factores que pueden limitar la aplicación y la eficacia del proceso incluyen:

- Las metas de la limpieza no pueden ser logradas si en el suelo no están en contacto el contaminante con los microorganismos.
- La circulación de soluciones a base de agua a través del suelo puede aumentar la movilidad del contaminante y hacer necesario el tratamiento del agua subterránea subyacente.
- Las trayectorias preferenciales del flujo pueden disminuir seriamente, en el contacto entre los líquidos y los contaminantes inyectados a través de las zonas contaminadas.
- Las altas concentraciones de metales pesados, de hidrocarburos con cadena larga, o de sales inorgánicas pueden ser tóxicas para los microorganismos.
- La Biorremediación se retarda en las bajas temperaturas.
- Las concentraciones del peróxido de hidrógeno mayor de 100 a 200 PPM en agua subterránea inhiben la actividad de los microorganismos.
- Un sistema de tratamiento superficial o adsorción del carbón, se puede requerir para tratar el agua subterránea extraída antes de la re-inyección o de la disposición.
- Las condiciones del suelo pueden ser demasiado ácidas o alcalinas, puede haber falta de nutrientes que se necesitan para usar las sustancias químicas como fuente de alimentos (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre o elementos traza).

Tiempos de remediación

El tiempo que demora biorremediar un sitio depende de diversos factores:

- Tipo y cantidad de sustancias químicas dañinas presentes
- Dimensión y profundidad de la zona contaminada
- Tipo de suelo y condiciones reinantes
- Si la descontaminación ocurre sobre la superficie o debajo de ella

Los factores antes mencionados varían de un sitio a otro. Puede demorar varios meses o hasta varios años, que los microbios coman la cantidad suficiente de sustancias químicas dañinas para limpiar el sitio.

7.2.2 Bioventeo

El bioventeo es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural in situ de cualquier compuesto aerobio degradable en el suelo proporcionando el oxígeno a los microorganismos existentes en el mismo.

El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores. Además de la degradación de las fuentes residuales fijadas por adsorción del combustible, se biodegradan los compuestos volátiles mientras que los vapores se mueven lentamente a través de suelo.

Aplicaciones.

Se utiliza para tratar compuestos orgánicos biodegradables, semivolátiles (COS) o no volátiles. Además de favorecer la degradación de contaminantes adsorbidos, pueden degradarse compuestos orgánicos volátiles (COV), por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo. Se ha utilizado con éxito para remediar suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes no clorados, pesticidas y conservadores de la madera, entre algunos otros químicos.

Limitaciones.

Algunos factores que pueden limitar la efectividad del bioventeo son:

- El tipo y la concentración del contaminante.
- Falta de nutrientes.
- Dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario.
- El contenido de agua extremadamente bajo del suelo puede limitar la biodegradación y la eficacia de bioventeo.
- Las bajas temperaturas pueden retardar la remediación, aunque esta se ha demostrado en climas extremadamente fríos.

Costos.

Sus costos de operación varían entre 79 y 970 USD/m³. Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo.

Tiempos de remediación

Es una tecnología en la que los tiempos de limpieza pueden variar desde algunos meses hasta varios años.

7.2.3 Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ como ex situ. Las plantas ayudan a eliminar muchos tipos de contaminación como metales, plaguicidas, explosivos y el petróleo en el suelo y las aguas subterráneas. Las plantas también contribuyen a impedir que el viento, la lluvia y las aguas subterráneas extiendan la contaminación a otras zonas.

La fitorremediación es más eficaz en los sitios donde hay baja concentración de contaminantes. Al tomar por las raíces el agua y los nutrientes que se hallan en los suelos y las aguas subterráneas, las plantas extraen del suelo las sustancias químicas perjudiciales. La cantidad de contaminación que puede eliminar una planta depende entre otros factores de la profundidad hasta la que puedan crecer sus raíces.

Las raíces de los árboles penetran más profundo que las raíces de las plantas más pequeñas, por lo que se emplean las raíces de los primeros para eliminar los contaminantes que se encuentran a mayor profundidad. Una vez extraídas del suelo y dentro de la planta, las sustancias químicas se ven sometidas a uno o varios procesos:

- Se almacenan en las raíces, los tallos y las hojas.
- Se transforman en sustancias químicas menos perjudiciales en el interior de la planta.
- Se transforman en gases que se liberan al aire cuando la planta transpira (respira).

La fitocorrección puede tener lugar incluso sin que las raíces de la planta extraigan las sustancias químicas. Por ejemplo, las sustancias químicas pueden pegarse a las raíces de las plantas. También pueden transformarse en sustancias químicas menos dañinas mediante la acción de los organismos o microbios que viven en las raíces de las plantas. Se deja que las plantas crezcan y que extraigan o sorban las sustancias químicas. Luego se las corta y destruye, o se las recicla cuando los metales almacenados en ellas pueden volverse a utilizar.

Por lo general, los árboles se dejan crecer y no se cortan. Las plantas que se cultivan para la fitocorrección también pueden contribuir a impedir que las sustancias químicas dañinas pasen de un sitio contaminado a otras zonas. Las plantas limitan la cantidad de sustancias químicas que puede arrastrar el viento o la cantidad de lluvia que penetra en el suelo o que fluye hacia otros sitios.

Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización.

La rizodegradación se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica. Durante la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), y posteriormente éstos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción).

En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo. La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación.

Se emplea la fitocorrección porque se aprovecha procesos naturales de las plantas. Requiere menos equipamiento y trabajo que otros métodos ya que las plantas hacen la mayor parte de las tareas. Además, los árboles y las plantas pueden hacer más atractivos los sitios. Se puede limpiar un sitio sin necesidad de cambiar el suelo contaminado ni de extraer el agua subterránea contaminada por bombeo. De ese modo se puede evitar que los trabajadores entren en contacto con las sustancias químicas dañinas.

Antes de iniciar la fitocorrección, se estudia si las plantas que se cultivan para eliminar la contaminación pueden resultar dañinas para los seres humanos. Se examinan las plantas y el aire para verificar que las plantas no liberen gases dañinos a la atmósfera.

Puede que algunos insectos y animales pequeños se coman las plantas que se emplean como fitocorrección. Los científicos estudian esos animales para ver si las plantas los dañan. Los científicos también estudian si esos animales constituyen una amenaza para los animales mayores que se alimentan de ellos. En general, las plantas no son dañinas para los seres humanos siempre y cuando no se coman. En la figura 3 se muestra ejemplo de fitorremediación.

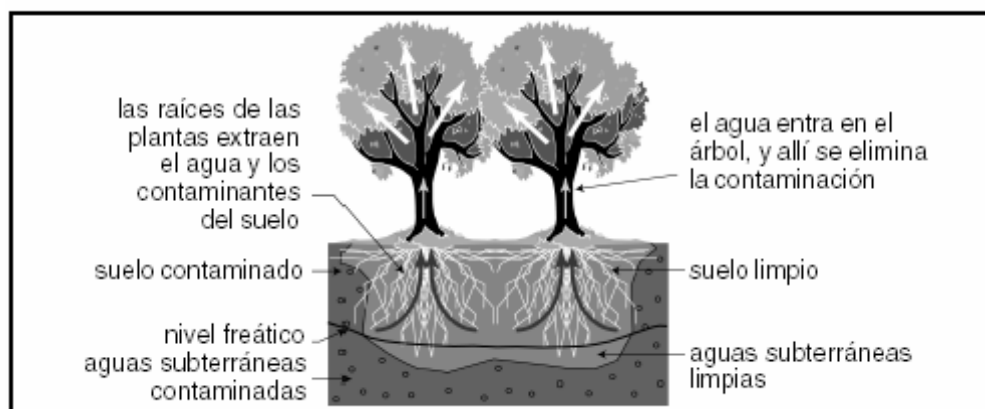


Figura 3. Ejemplo de fitorremediación.

Aplicaciones.

Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAP; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y órgano fosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn. Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

Limitaciones.

Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación:

- El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar.
- Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas.

- Puede depender de la estación del año.
- No es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos.
- La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden movilizarse o bioacumularse en animales.

Costos

Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado puede costar entre 483 y 626 USD/m³. Requiere menos equipamiento y trabajo que otros métodos ya que las plantas hacen la mayor parte de las tareas. Además, los árboles y las plantas pueden hacer más atractivos los sitios.

Tiempos de remediación

El tiempo que demora descontaminar un sitio mediante el empleo de la fitocorrección depende de diversos factores:

- Tipo y cantidad de plantas que se emplean.
- Tipo y cantidad de sustancias químicas dañinas presentes.
- Dimensión y profundidad de la zona contaminada.
- Tipo de suelo y condiciones reinantes.

Los factores antes mencionados varían de un sitio a otro. Habría que reponer las plantas en el caso de que fueran destruidas por las condiciones del tiempo o los animales. Eso prolongaría el período requerido para eliminar la contaminación. A menudo demora muchos años.

7.3 Tecnologías de remediación fisicoquímicas.

Como ya se mencionó, los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición, mientras que las tecnologías de biorremediación son principalmente métodos destructivos, las fisicoquímicas incluyen las tres estrategias básicas de acción sobre el contaminante (destrucción, separación e inmovilización).

Al igual que el resto de las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse in situ o ex situ. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías se aplican in situ.

7.3.1 Lavado de suelo

El lavado del suelo consiste en separar y limpiar aquella parte que está más contaminada. Esto reduce la cantidad de suelo que requiere una limpieza más profunda. El lavado del suelo por sí solo puede ser insuficiente para limpiar completamente el suelo contaminado; por lo tanto, la mayoría de las veces esta técnica se utiliza junto con otros métodos que complementan la limpieza.

Antes de utilizar el método de lavado del suelo, se tamiza el material extraído del área contaminada a fin de retirar los objetos de mayor tamaño, como piedras o escombros. Se coloca el suelo tamizado en una unidad de lavado, una vez en la lavadora, se agrega agua y a veces detergentes.

La mezcla de suelo y agua pasa a través de tamices, paletas mezcladoras y atomizadores de agua. Se retira entonces el agua contaminada que queda del lavado para llevarla a una planta de tratamiento. El agua limpia puede ser utilizada nuevamente en la unidad de lavado o simplemente desecharse.

El limo y la arcilla, que contienen la mayor parte de los contaminantes, se analizan para determinar qué proporción de elementos químicos aún retienen. Algunas veces se elimina la contaminación por completo en el agua de lavado, pero en general, tanto el limo como la arcilla requieren mayor limpieza.

El limo y la arcilla pueden pasarse nuevamente por la unidad de lavado o puede usarse otro método para su limpieza como por ejemplo la biorremediación o desorción térmica; otra posibilidad es desechar el suelo contaminado en un vertedero.

Así mismo, se analiza si la arena y grava que se depositan en el fondo de la unidad de lavado aún contienen contaminantes químicos. Si la contaminación persiste, se las trata nuevamente en la unidad de lavado, en caso de ser necesario se utiliza otro método para completar la limpieza.

Generalmente, el lavado del suelo se realiza en el sitio, de esta manera se evita los riesgos inherentes al transporte de suelo contaminado desde el sitio hasta la planta de limpieza. Durante la excavación y la limpieza, un equipo de control de contaminación de aire se ocupa del polvo y otros problemas potenciales de contaminación del aire. Casi nunca se liberan químicos al aire desde la unidad de lavado, pero de cualquier forma, se realizan análisis del aire en el sitio a fin de asegurar que no se liberen contaminantes químicos en cantidades peligrosas. También se realizan análisis del suelo para asegurarse de que esté limpio antes de colocarlo nuevamente en el sitio. Si se diseña e implementa en forma correcta, el lavado del suelo es un método seguro.

La mayor ventaja del lavado del suelo es que reduce la cantidad de suelo que requiere una limpieza más profunda. Esta reducción disminuye los costos de limpieza y los costos de desecho de materiales contaminados. El lavado del suelo puede eliminar diversos tipos de contaminación, también es útil cuando en suelo está muy contaminado. En la figura 4 se muestra ejemplo de Lavado de suelo.

Aplicaciones.

El lavado de suelos se ha utilizado con éxito para tratar suelos contaminados con hidrocarburos, HAP, PCP, pesticidas y metales pesados. Por medio de inundación, pueden recuperarse compuestos inorgánicos (metales), y tratarse COV, COS, gasolinas y pesticidas.

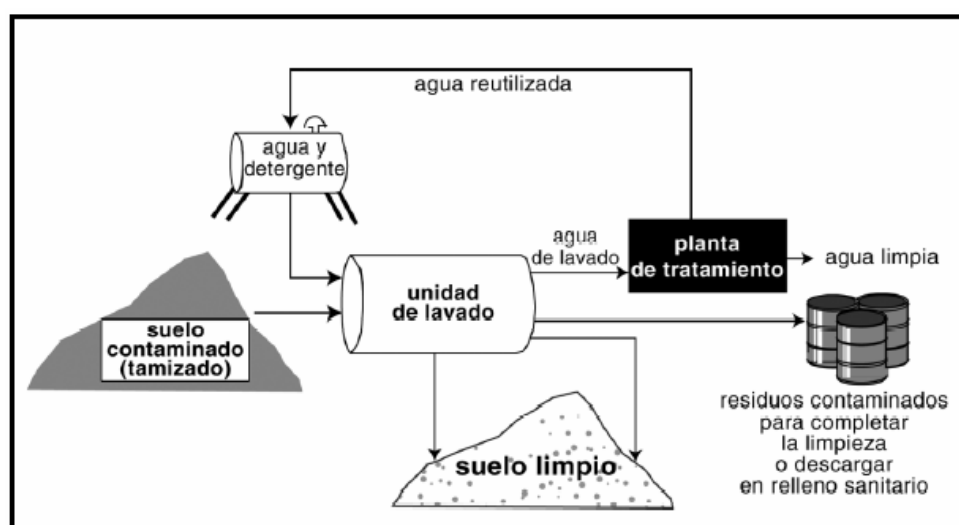


Figura 4. Ejemplo de Lavado de suelo.

Limitaciones.

- Las soluciones utilizadas y los solventes pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo.
- Es difícil tratar suelos poco permeables o heterogéneos.
- Los surfactantes usados en el lavado pueden adherirse al suelo y disminuir su porosidad.
- Los fluidos pueden reaccionar con el suelo reduciendo la movilidad de los contaminantes.

- En general, se requiere tratar previamente los suelos con alto contenido de materia orgánica y es necesario tratar los vapores generados.
- Requieren remoción del suelo y generalmente se requiere otra tecnología para el tratamiento del suelo.
- Puede no ser efectivo en cuanto a costos en los casos de escasa contaminación. Tampoco resulta efectivo con relación al costo si se utiliza para suelos que contienen grandes cantidades de limo o arcilla.

Costos.

Los costos para la inundación oscilan entre 20 y 200 USD/m³, y para el lavado el costo promedio es de 150 USD/m³.

Tiempos de remediación.

El tiempo que se requiere para limpiar un sitio mediante el lavado del suelo depende de diversos factores:

- La cantidad de lino, arcilla y escombros que haya en el suelo.
- El tiempo y cantidad de contaminación en el suelo.
- El tamaño de la unidad de lavado (las unidades más grandes pueden limpiar hasta 100 yardas³ de suelo por día).

La limpieza mediante el uso del lavado de suelo puede tomar desde unas pocas semanas hasta varios meses, según el sitio.

7.4 Tecnologías de remediación térmicas

Los tratamientos térmicos ofrecen tiempos muy rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Sin embargo, estas diferencias son menores en las aplicaciones ex situ que in situ. Los altos costos se deben a los costos propios para energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra. Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción, separación e inmovilización de contaminantes. Los procesos térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad (separación), quemado, descomposición (destrucción) o fundición de los contaminantes (inmovilización).

Las tecnologías térmicas de separación producen vapores que requieren de tratamiento; las destructivas producen residuos sólidos (cenizas) y, en ocasiones, residuos líquidos que requieren de tratamiento o disposición. Es importante hacer notar que para ambos tipos de tratamiento, el volumen de residuos generados que requieren de tratamiento o disposición, es mucho menor que el volumen inicial.

La mayoría de las tecnologías térmicas pueden también aplicarse in situ y ex situ. Dentro de las tecnologías térmicas ex situ, principalmente se encuentran la incineración, pirólisis y desorción térmica.

7.4.1 Incineración

Es un proceso térmico por medio del cual los materiales contaminados se exponen a calor excesivo en algún tipo de incinerador e involucra la destrucción térmica de los contaminantes por calentamiento. En los procesos de incineración tanto in situ como ex situ, se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1,200 °C, dependiendo de la intensidad del calor, los contaminantes se evaporan y/o se destruyen en compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno.

Los compuestos tóxicos se reducen a elementos básicos como hidrógeno, carbono, cloro, nitrógeno, etc; los cuales se combinan con el oxígeno para formar sustancias no tóxicas tales como agua, bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, también se producen cenizas inertes, materia orgánica, ácido clorhídrico, pequeñas concentraciones de materiales orgánicos y óxidos metálicos.

Las cenizas generadas deben disponerse en rellenos sanitarios. Generalmente se utilizan combustibles para iniciar el proceso de combustión. Las eficiencias de remoción y destrucción de los incineradores operados adecuadamente exceden el 99.99%. Sin embargo, los gases de combustión generalmente requieren de tratamiento. Existen diferentes tipos de incineradores:

- Combustión de lecho circulante (CLC). Utilizan altas velocidades en la entrada de aire, lo que provoca la circulación de los sólidos, creando una zona de combustión turbulenta favoreciendo la destrucción de hidrocarburos tóxicos.

Los incineradores de CLC operan a temperaturas menores que los incineradores convencionales (790 a 880 °C).

La alta turbulencia que producen los CLC produce una temperatura uniforme alrededor de la cámara de combustión; también mezcla totalmente el material de desecho durante la combustión. La mezcla homogénea y la temperatura baja de la combustión reducen gastos de explotación y las emisiones de los gases, tales como el óxido del nitrógeno (NOx) y el monóxido de carbono (CO).

- Lecho fluidizado. Utiliza aire a alta velocidad para provocar la circulación de las partículas contaminadas y opera a temperaturas mayores a 870 °C.

- Tambor rotatorio. La mayoría de los incineradores comerciales son de este tipo, y están equipados con un dispositivo de postcombustión, un extintor y un sistema para el control de emisiones. Son cilindros rotatorios con una ligera inclinación que opera a temperaturas por arriba de los 980 °C. En la figura 5 se muestra ejemplo de Incineración.

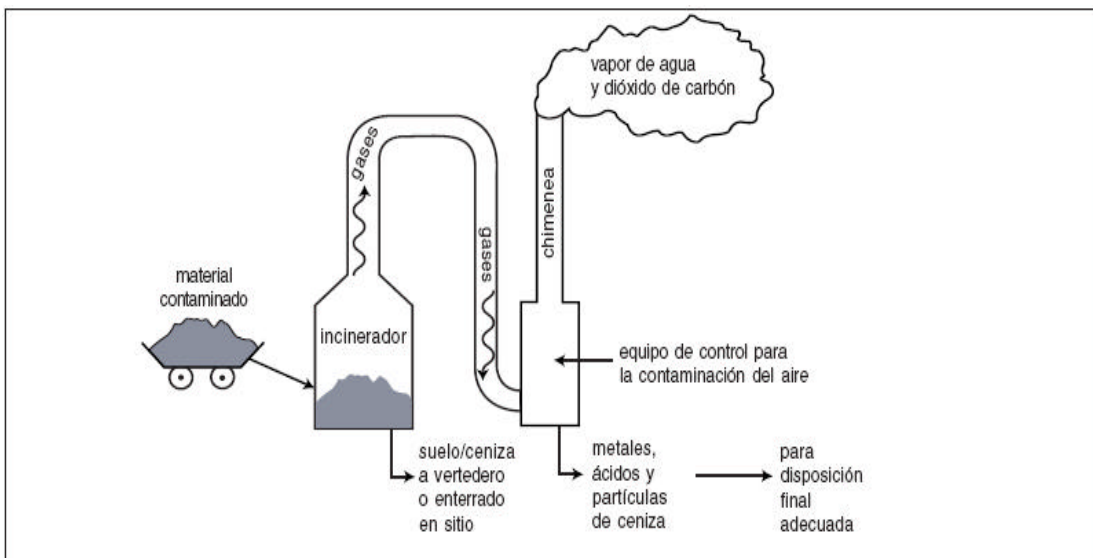


Figura 5. Ejemplo de Incineración.

Aplicaciones.

Se usa para remediar suelos contaminados con explosivos, residuos peligrosos como hidrocarburos clorados, BPC y dioxinas.

Limitaciones.

- Es necesario tratar los gases de combustión (dioxinas y furanos); para el tratamiento de BPC y Dioxinas, deben emplearse incineradores fuera del sitio.
- Los metales pesados pueden producir cenizas que requieren estabilización.
- Para tratar metales volátiles (Pb, Cd, Hg y As) se necesitan sistemas de limpieza de gases.
- Los metales pueden reaccionar con otros elementos en la corriente de la alimentación, tal como sulfuro, formando compuestos más volátiles y más tóxicos que la especie original.

Costos

Los costos de incineradores fuera del sitio oscilan entre 914 y 1540 USD/ton; para tratar suelos contaminados con dioxinas y BPC los costos van desde los 1,500 a 6,000 USD/ton.

Tiempos de remediación.

Es una tecnología de corto a largo plazo.

7.4.2 Desorción Térmica.

La desorción térmica elimina las sustancias químicas dañinas del suelo y otros materiales, como lodo y sedimentos, utilizando calor para transformar dichas sustancias químicas en gases. Esos gases se recolectan empleando un equipo especial. El polvo y las sustancias químicas dañinas se separan de los gases y se eliminan con seguridad y el suelo limpio se regresa al sitio. La desorción térmica no es igual a la incineración, que se emplea para destruir las sustancias químicas.

Los procesos de DT consisten en calentar el suelo, esto acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para posteriormente ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de un sistema de vacío. Es un proceso de separación física no destructivo.

La desorción térmica emplea un equipo denominado desorbedor para limpiar los suelos contaminados. Los suelos se extraen mediante excavación y se ponen en el desorbedor. Ese equipo funciona como un horno grande cuyas temperaturas oscilan entre 90 a 540 °C. El calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, cuando los suelos se calientan lo suficiente, las sustancias químicas dañinas se evaporan. Para preparar los suelos para el desorbedor, los trabajadores deberán triturarlos, secarlos, mezclarlos con arena o extraerles los detritos. De ese modo el desorbedor puede limpiar los suelos de manera más pareja y fácil.

Durante cada paso del proceso, los trabajadores emplean equipo especial para controlar el polvo del suelo y recolectar los gases dañinos que se liberan al aire. Los gases contaminados se separan del aire limpio utilizando un equipo de recolección de gases con el uso de un sistema de vacío. Los gases se convierten nuevamente en líquidos y/o materiales sólidos. Esos líquidos o sólidos contaminados se eliminan de manera segura.

Antes de devolver el suelo limpio al sitio, los trabajadores lo rocían con agua para refrescarlo y controlar el polvo. Si el suelo todavía contiene sustancias químicas dañinas, los trabajadores lo limpian más volviéndolo al desorbedor. También pueden emplear otros métodos de descontaminación. Si el suelo está limpio, se devuelve al sitio. Si no, es enviado a un vertedero soterrado.

Con base en la temperatura de operación, la DT puede clasificarse en dos grupos (EPA 2001):

- Desorción térmica de alta temperatura (DTAT). Es una tecnología a gran escala en la cual los desechos son calentados a temperaturas que varían entre los 320 y los 560 °C. Frecuentemente se utiliza en combinación con la incineración, dependiendo de las condiciones específicas.

- Desorción térmica de baja temperatura (DTBT). Los desechos se calientan a temperaturas entre 90 y 320 °C. Es una tecnología a gran escala que se ha probado con éxito en el tratamiento de varios tipos de suelos contaminados con hidrocarburos totales del petróleo (HTP).

La DT puede implementarse por:

- (i) Inyección a presión de aire caliente.
- (ii) Inyección de vapor.
- (iii) Calentamiento del suelo por ondas de radio (radio frecuencia) que producen energía que se transforma en energía térmica.

La desorción térmica se ha empleado en muchos sitios a lo largo de los años. Se debe cerciorar que los materiales se manejen con seguridad en cada etapa del proceso. También se debe examinar el aire para verificar que no se liberen ni gases ni polvo al aire en cantidades dañinas, también se examina el suelo para verificar que esté limpio antes de devolverlo al sitio.

La desorción térmica funciona bien en todos los sitios de suelos secos y con determinados tipos de contaminantes, como alquitrán de hulla, sustancias químicas que preservan la madera, y los solventes. A veces la desorción térmica funciona donde no se pueden emplear otros métodos, como en sitios con gran cantidad de contaminación en el suelo.

La desorción térmica puede resultar más rápida que la mayoría de los demás métodos, eso es importante en el caso de que deba eliminarse rápidamente la contaminación del sitio contaminado para que se pueda emplear para otros fines. A menudo cuesta menos construir y operar el equipo para la desorción térmica que el equipamiento que requieren otros métodos de descontaminación que emplean calor. En la figura 6 se muestra ejemplo de Lavado de suelo.

Aplicaciones.

El proceso de DT puede aplicarse en general, para la separación de compuestos orgánicos de desechos, así como para suelos contaminados con hidrocarburos. Los sistemas de DTBT pueden usarse para tratar COV no halogenados y gasolinas y, con menor eficiencia, para COS. Los procesos de DTAT se utilizan principalmente para tratar COS, HAP, BPC y pesticidas, pero pueden aplicarse también para COV y gasolinas.

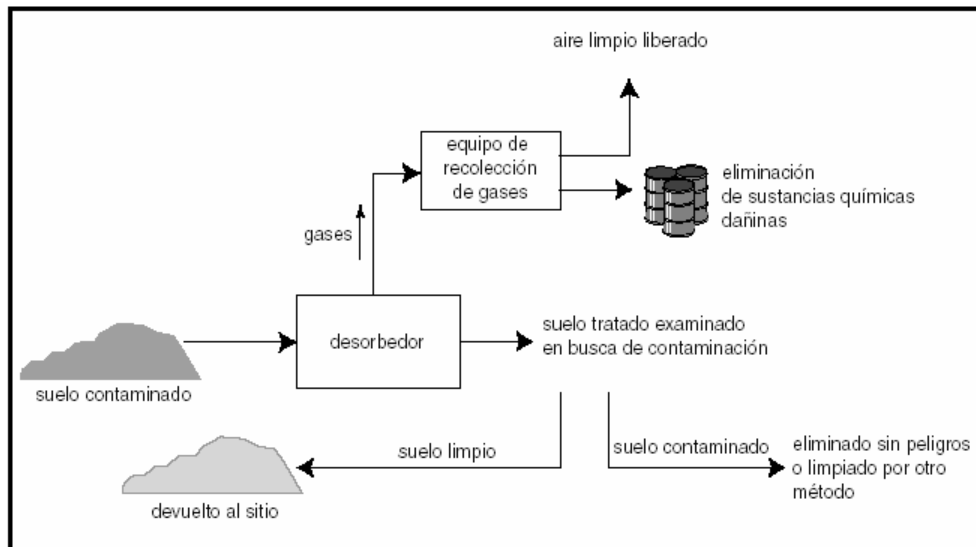


Figura 6. Ejemplo de Desorción Térmica.

Limitaciones.

Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y la eficacia del proceso incluyen:

- Su uso varía en función de la temperatura que pueda alcanzarse durante el proceso seleccionado.
- Estas tecnologías no son efectivas en zonas saturadas, suelos muy compactos o con permeabilidad variable, además de que producen emisiones gaseosas.
- El tamaño de partícula y el tipo de materiales pueden afectar la aplicabilidad o costo en los sitios específicos.
- La desecación puede ser necesaria para alcanzar niveles aceptables del contenido de agua del suelo.
- La alimentación altamente abrasiva puede dañar la unidad del procesador.
- Los metales pesados en la alimentación pueden producir un residuo sólido tratado que requiera la estabilización.

Costos.

La limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos por DT varía entre 110 y 350 USD/m³. En términos generales, la DT con uso de vapor puede costar más de 400 USD/m³.

Tiempos de remediación.

Los sistemas de desorción térmica pueden descontaminar más de 20 toneladas de suelo contaminado por hora. El tiempo que demora eliminar la contaminación de un sitio mediante el empleo de la desorción térmica depende de lo siguiente:

- Cantidad de suelo contaminado.
- Condiciones del suelo (¿Está seco o húmedo?).
- Tipo y cantidad de sustancias químicas dañinas presentes.

La descontaminación puede demorar sólo unas pocas semanas en sitios pequeños con poca cantidad de sustancias químicas. Si el sitio es grande y los niveles de sustancias químicas elevados, la descontaminación puede demorar años.

7.4.3 Pirolisis

La Pirólisis es la descomposición química de materia orgánica causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno u otros reactivos, excepto posiblemente el vapor de agua. También se puede definir como el proceso en el que se someten a altas temperaturas los residuos en ausencia de o con poco oxígeno. Cuando en una incineradora se reduce el nivel de oxígeno por debajo del óptimo para la combustión, se dice que la planta funciona “con aire controlado” o en “modo pirolítico” ó como la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo.

Un ejemplo de pirólisis es la destrucción de neumáticos usados. En este contexto, la pirólisis es la degradación del caucho de la rueda mediante el calor en ausencia de oxígeno. El proceso también ocurre cuando se quema un combustible sólido compacto, como la madera. De hecho, las llamas de un fuego de madera se deben a la combustión de gases expulsados por la pirólisis, no por la combustión de la madera en sí misma.

El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire.

Los productos primarios formados de la pirólisis de materiales orgánicos, en diferentes proporciones de acuerdo con las condiciones del proceso, son:

- I) Gases residuales (metano, etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros).
- II) Condensados acuosos y aceitosos.
- III) Residuos sólidos carbonosos que pueden usarse como combustible.

La aplicación de la pirólisis al tratamiento de residuos ha ganado aceptación en la industria junto con otras tecnologías avanzadas de tratamiento de residuos pero no los elimina sino que los transforma en carbón, agua, otros residuos líquidos, partículas y metales pesados, cenizas tóxicos en algunos casos; vertiendo al aire desde sustancias relativamente inocuas hasta muy tóxicas y reduciendo así su volumen. Esta destilación destructiva obviamente imposibilita el reciclado o la reutilización.

La pirólisis se puede utilizar también como una forma de tratamiento térmico para reducir el volumen de los residuos y producir combustibles como subproductos. También ha sido utilizada para producir un combustible sintético para motores de diésel a partir de residuos plásticos.

Aplicaciones.

Se utiliza para tratar COS y pesticidas. Puede aplicarse para tratar BPC, dioxinas, desechos de alquitrán y pinturas, suelos contaminados con creosota y con hidrocarburos. Ha mostrado buenos resultados en la remoción de BPC, dioxinas, HAP y otros compuestos orgánicos. La pirólisis no es efectiva para destruir o separar compuestos inorgánicos de un suelo contaminado. Los metales volátiles se pueden quitar como resultado de las temperaturas más altas asociadas al proceso, pero no se destruyen.

Limitaciones.

- Se requieren tamaños de partícula específicos y manipulación del material.
- Altos contenidos de humedad (mayor a 1%) aumentan los costos.
- Los medios con metales pesados requieren estabilización; es necesario tratar los gases de combustión.
- La alimentación altamente abrasiva puede potencialmente dañar la unidad del procesador.

8.- Casos de remediación en México.

Existe restricción en el acceso a la información sobre los casos de éxito en la remediación de suelos contaminados con residuos peligrosos en México, ya que las empresas que proporcionan servicios de remediación de suelos no comparten las estrategias y las tecnologías usadas, por otra parte las empresas que han practicado remediación de suelo en sus instalaciones han decidido cuidar su imagen como empresas ecológicas, al igual que sus estrategias de ventas, al no dar a conocer el grado de contaminación que han tenido dentro de sus centros de trabajo.

Por otra parte las autoridades han sido juez y parte en cuestiones de contaminación de suelo, tal es el caso de PEMEX, CFE y SEMARNAT, en donde por lo general se desconocen las sanciones y las responsabilidades de los servidores públicos que se han visto involucrados en casos de daños ambientales por contaminación del suelo, así como las acciones, y en su caso, los métodos que han utilizado para remediar el suelo, lo que sin duda pone más trabas en la obtención de la información. En el caso de PEMEX se han expuesto algunos casos de tratamiento de suelos contaminados, sin embargo no representan una parte importante del total de los casos que se conocen a diario a través de los medios de comunicación.

A continuación se mencionan algunos sitios en donde se han aplicado métodos de remediación del suelo.

- Los Ex-Talleres de Ferrocarriles Nacionales de México (en liquidación) en Aguascalientes.
- Disposición de 29 mil toneladas de lodos aceitosos localizados en la refinería de Minatitlán.

Se sabe que en la anterior administración se decidió dar inicio de trabajos de remediación, debido a la urgente necesidad de atender el problema de contaminación del suelo y considerando el riesgo que éstos representan al medio ambiente y a la salud de poblaciones aledañas. En el 2004 se dio inicio a la remediación a 4 predios considerados como pasivos ambientales, sin embargo aun no se ven resultados en estos y mucho menos se puede acceder a la información de remediación de los mismos; estos son:

- Cromatos de México, Tultitlán, Estado de México. Se revisó la información existente, se efectuó una investigación histórica, y se desarrollaron trabajos preparatorios de ingeniería ambiental. También se inició una caracterización complementaria en el marco del estudio de factibilidad técnico-financiero en este predio.
- La Pedrera, Guadalcázar, San Luís Potosí. Se firmó un acuerdo para establecer un plan de trabajo entre la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental del gobierno estatal, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Metales y Derivados, Tijuana, Baja California. Se retiraron para su tratamiento y disposición final 471 toneladas de residuos peligrosos y suelos contaminados con plomo del predio.
- Ex confinamiento de residuos peligrosos CYTRAR, Hermosillo, Sonora. Se transfirió la propiedad del confinamiento a la SEMARNAT. Se firmó

un convenio de remediación entre SEMARNAT, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad y el Gobierno del Estado de Sonora para realizar el estudio de caracterización, evaluación, y propuesta de remediación y/o tratamiento del confinamiento. Del mismo modo se realizó un estudio de caracterización del sitio.

De enero a julio de 2005 se inició la remediación de Tekchem en Salamanca, Guanajuato; Metrometal y Norestaño, en Reynosa, Tamaulipas; y Jales Mineros de Nacozari, en Nacozari de García, Sonora, con los siguientes resultados:

- Tekchem. Cuenta con un estudio ambiental actualizado con la cantidad de suelos a remediar, residuos peligrosos a tratar y alternativas de remediación. También se revisaron los términos de referencia para elaborar en el presente año las bases técnicas de la licitación pública para la contratación de la empresa remediadora del sitio.
- Metrometal. Se realizan estudios para diagnosticar las acciones de remediación, así como la gestión de fondos.
- Norestaño. Se cuenta con una fianza de la empresa que está interesada en retirar los residuos peligrosos y realizar la posterior remediación del suelo.
- Jales Mineros, Nacozari de García, Sonora. En febrero de 2005 se efectuó una visita en coordinación con el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) y la empresa BRGM de Francia para la caracterización de los contaminantes depositados.

También se sabe de 2 predios más donde no se conoce que resultados se han obtenido en el proceso de remediación de los mismos:

- Ex - Unidad Industrial Fertimex, Salamanca, Guanajuato
- Minas Nuevo Mercurio, Mazapil, Zacatecas.

Estos son algunos de los casos en donde se conoce que se han implementando medidas para la remediación de suelos contaminados, aunque aun se desconoce el éxito que han tenido; sin embargo por conocer muchos predios que han sido contaminados con residuos peligrosos y los resultados que se han obtenido en los mismos.

Los recursos para efectuar dichos trabajos de gestión solo se aplican para aquellos sitios prioritarios considerados como metas presidenciales. Con el cumplimiento de las acciones lo que pretende la actual administración es iniciar la recuperación o restablecimiento de las condiciones del suelo de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico.

9.- Empresas en México que proporcionan servicios de remediación del Suelo.

En México la única entidad que da las autorizaciones a empresas para remediar sitios contaminados es la SEMARNAT, y es esta entidad quien solamente tiene conocimiento del total de empresas que prestan este servicio.

Por desgracia la SEMARNAT no proporciona un listado del número total de empresas que realizan remediación del suelo y mas aun estas empresas no quisieron proporcionar información el éxito de la remediación del suelo, ya que comentan que esto les puede afectar al divulgar sus estrategias comerciales.

En la tabla 4 se nombran algunas empresas que prestan servicios de remediación del suelo en México.

Nombre de la Empresa	Ubicación	Método de remediación que utiliza	Portal de Internet
Biosfera Desarrollo Ambiental	Querétaro	Biorremediación	www.grupobiosfera.com
Pruebas de Hermeticidad y Servicios Ambientales	Estado de México	Lavado de suelo Biorremediación	www.pruhesa.com
Cía Cars de México	Veracruz	Biorremediación	www.ciacarsmexico.com
Eco Limpio	Saltillo	Biorremediación Lavado de suelo Trenes de tratamiento	www.ecolimpio.com
Operadora Intergrupo	Estado de México	Especialistas en restauración de contaminación con hidrocarburos	www.operadoraintergrupo.com
Ingeniería Ambiental y Biorremediación	Guadalajara	Biorremediación in situ y on site	www.inambio.com
ATS Meridian de México	D.F.	Biorremediación Bioventeo	www.atsmeridian.com.mx

Servicios Profesionales Especializados	Monterrey	Tratamientos Biologicos	www.spe.com.mx
IA Estudios y Proyectos	Estado de México		
Mir Ambiental	Monterrey		

10.- Conclusiones

La disposición inadecuada de los residuos peligrosos, los derrames accidentales de sustancias químicas durante su transporte y las actividades industriales como la petrolera y minera; son la causa principal de la contaminación del suelo.

En la actualidad existen diversos métodos de remediación del suelo, sin embargo dentro de este trabajo exponemos algunos, que por su manejo han resultado funcionales para la eliminación de la contaminación de suelos por sustancias peligrosas.

Las biorremediación es una tecnología que se han limitado para el tratamiento de compuestos orgánicos biodegradables como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), en cambio la fitorremediación se puede ocupar para separar algunos compuestos inorgánicos no biodegradables. Estas tecnologías son mas amigables para el ambiente y son tecnologías de costos relativamente bajos, pero los tiempos de limpieza son prolongados pueden durar hasta varios meses.

Las tecnologías de remediación fisicoquímicas se usan mas para tratar sitios con características geológicas difíciles, los costos de estas tecnologías no son elevados y los tiempos que se ocupan son de mediano a corto plazo. En cuanto a las tecnologías térmicas, en estas se puede reducir significativamente los tiempos de limpieza, aunque sin duda son métodos más costosos.

Algunas de éstas tecnologías de remediación se han aplicado con éxito en Estados Unidos, pero en México se desconoce el éxito que éstas han tenido, ya que el derecho a la información en cuanto a saber los sitios contaminados por residuos peligrosos y los métodos de remediación utilizados en aquellos sitios contaminados no esta disponible a cualquier persona, lo que dificulta la posibilidad de compartir la información que puede ser de utilidad en otros casos en similares o en condiciones semejantes.

La experiencia sobre restauración del suelo va en progreso, pero todavía falta desarrollar tecnologías de restauración mas efectivas y menos costosas, que lleven en lo posible a la recuperación de las propiedades naturales del suelo permitiendo continuar con su manejo de acuerdo a su uso, ya que el suelo es un recurso no renovable que debe cuidarse.

Es un hecho que al observar la dificultad en la difusión de los métodos de remediación que han tenido éxito en México se observa que existe un nulo interés por parte de los responsables de la contaminación de suelos, así como de las instituciones encargadas de vigilar que esto no suceda.

Con este trabajo se logra proponer algunos métodos de remediación de suelos importantes, en el sentido de su uso, sus costos y beneficios sin embargo es difícil sugerir algunos de estos ya que se desconoce el éxito que han tenido en

cuestión del tratamiento del suelo, el tiempo de restauración y el costo real, así como su impacto en beneficio del ambiente.

El trabajo desarrollado permite inducir al conocimiento general de la contaminación del suelo, así como de algunos de los métodos de remediación usados.

Se carece de normas específicas para la remediación del suelo contaminado por lo que se sugiere la elaboración de las mismas, por lo que se sugiere desarrollar Normas Oficiales Mexicanas sobre el uso de los métodos de remediación del suelo, esto en conjunto con las autoridades ambientales y sanitarias correspondientes, con asesoría de instituciones educativas nacionales y extranjeras que cuenten con la experiencia suficiente en este tema. De igual manera es necesario tener un inventario de sitios contaminados, con el objeto de conocer el número total de estos y así priorizar la remediación de suelos en aquellos sitios que tengan riesgos importantes al ambiente.

11.- Bibliografía

Las referencias bibliográficas indicadas a lo largo del trabajo se refieren a aquellos documentos en los que se extraen ideas o partes de textos. Las demás referencias bibliográficas fueron consultadas para la elaboración del presente trabajo y se incluyen para las personas que requieran profundizar en temas de contaminación del suelo y su remediación.

Documentos

- 1.- Pedro Cesar Cantu Martínez. 2004. Contaminación ambiental. Editorial Diana.
- 2.- Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers.
- 3.- Blanca E. Jiménez Cisneros. 2003. La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiados. Editorial Limusa.
- 4.- Semple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. Environ. Pollution.
- 5.- Ramón Sans Fonfria y Joande Pablo Ribas. 2002. Ingeniero Ambiental contaminación y tratamientos. Editorial Alfaomega marcombo.
- 6.- Sellers, K. 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers.
- 7.- Bill T. Ray. 2003. Environmental Engineering. Editorial PWS publishing Company.
- 8.- Alexander, M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. Academic Press, San Diego. Introduction to Soil Microbiology. Wiley, New York.
- 9.- William J. Mitsch y Even Erick Jogensen. 2000. Ecological Engineering. Editorial Wiley.
- 10.- Bower, E.J. y A.J.B. Zehnder 1993. Bioremediation of organic compounds putting microbial metabolism to work. Trends Biotechnol.
- 11.- Louis Theodore y Joseph Reynolds. 1999. Introduction to hazardous waste incineration. Editorial John Wiley & sons.
- 12.- Cortinas, C. y C. Mosler (eds.) 2002. Gestión de residuos peligrosos. UNAM, México.
- 13.- Iqbal Ahmad, S. Hayat and John Pichtel. 2004. Heavy metal contamination of soil. Editorial Science publishers, Inc.

- 14.- Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P. Chang y E.D. Schroeder 1998. Bioremediation Principles. McGraw-Hill International Editions.
- 15.- Eve Riser – Roberts. 1999. Remediation of petroleum contaminated soils. Editorial Lewis Publishers.
- 16.- Kreiner, I. 2002. Tecnologías para el tratamiento de residuos peligrosos. En: Cortinas, C. y C. Mosler (eds.). Gestión de residuos peligrosos. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- 17.- Semple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. Environ. Pollution.
- 18.- John E. Matthews. 2005. Handbook of Bioremediation. Editorial Lewis Publishers.
- 19.- Ik Iskandar. 2002. Environmental restoration of metals contaminated soils. Editorial Lewis Publishers.
- 20.- Singh and OP Ward. 2004. Applied Bioremediation and Phytoremediation. Editorial Springer.
- 21.- Leeson, A., and Hinchee, R.E, 1996. Principles and Practices of Bioventing, Volume I: Bioventing Principles, prepared by Battelle Memorial Institute for U.S. Air Force and U.S. EPA.
- 22.- Hoepfel, R.E., R.E. Hinchee, and M.F. Arthur. 1997. "Bioventing Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons," J. Ind. Microbiol.
- 23.- Boyajian, G. E. and Devedjian, D. L., 1997. "Phytoremediation: It Grows on You", Soil & Groundwater Cleanup, February/March.
- 24.- USAEC, 1997. "Phytoremediation of Lead" in Innovative Technology Demonstration, Evaluation and Transfer Activities, FY 96 Annual Report, Report No. SFIM-AEC-ET-CR-97013.
- 25.- California Base Closure Environmental Committee (CBCEC). 2005. Treatment Technologies Applications Matrix for Base Closure Activities, Revision 1, Technology Matching Process Action Team, November.
- 26.- Shah, J.K., T.J. Schultz, and V.R. Daiga. 2000. "Pyrolysis Processes." Section 8.7 in Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, ed. H.M. Freeman. McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
- 27- Energy and Environment Research Center, 1994. Thermal Recycling of Plastics. Energy and Environment Research Center, University of North Dakota, Grand Forks, ND.

28.- Anderson, W.C., 1993. Innovative Site Remediation Technology Thermal Desorption, American Academy of Environmental Engineers.

29.- California Base Closure Environmental Committee (CBCEC), 1994. Treatment Technologies Applications Matrix for Base Closure Activities, Revision 1, Technology Matching Process Action Team, November, 1994.

30.- Legrega MD Buckingham & PL Evans. 2003. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. Editorial Mc Graw – Hill.

31.- Seoanez Calvo Mariano. 2002. Contaminación del suelo estudio tratamiento y gestión. Editorial Limusa.

Páginas de Internet

Universidad Nacional Autónoma de México

<http://www.unam.mx/>

<http://www.ejournal.unam.mx/>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

<http://www.semarnat.gob.mx>

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

<http://www.profepa.gob.mx>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática

<http://www.inegi.com>

Secretaría de energía, minas e industria paraestatal

<http://www.cnsns.gob.mx>

Sistemas de autodiagnóstico

<http://www.contactopyme.gob.mx>

Diaria Oficial de la Federación

<http://www.dof.gob.mx>

Pemex

<http://www.pemex.com>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

<http://www.epa.gov/TIO>.

Technology Innovation Program

<http://www.clu-in.org>

Ingeniero Ambiental

<http://www.ingenieroambiental.com>

Cámara de diputados

<http://www.diputados.gob.mx>

Secretaría del Medio Ambiente

<http://www.sma.df.gob.mx>

Comisión Federal de Electricidad

<http://www.cfe.org.mx>

Ambiental Net

<http://www.ambiental.net>

Ambiente Ecologico

<http://www.ambiente-ecologico.com>

Consejo Nacional de Industriales Ecologistas A.C. (CONIECO)

<http://www.conieco.com.mx/>

CyberAmbiental.com

<http://www.cyberambiental.com>

Instituto nacional de ecología

<http://www.ine.org.mx>

Reglamentos y Normas

- Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos.
- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

- Normas Oficiales Mexicanas (NOM'S):
 - NMX-AA-021-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Materia Orgánica.
 - NMX-AA-091-1987 Calidad del Suelo - Terminología.
 - NOM-138- SEMARNAT /SS-2003. Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación.
 - NOM-098- SEMARNAT -2002. Protección Ambiental – Incineración de Residuos, Especificaciones de Operación y Límites de Emisión de Contaminantes.
 - NOM-054- SEMARNAT -1993 Que Establece el Procedimiento para Determinar la Incompatibilidad entre dos o mas Residuos Considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052- SEMARNAT - 1993.
 - NOM-052-SEMARNAT-005. Que Establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos