

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO  
GAS NATURAL Y PETROQUIMICA**



***APLICACIÓN DE BIOREMEDIACION ANTE  
DERRAMES DE PETROLEO EN LA SELVA***

**TITULACION POR ACTUALIZACION DE CONOCIMIENTOS  
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO DE PETROLEO**

**ELABORADO POR:**

***CARMEN ELIZABETH PABLO BAZAN***

**LIMA - PERU**

2007

# Índice

---

<b>RESUMEN</b>	<b>Pagina</b> <b>4</b>
<b>CAPITULO I. INTRODUCCION</b>	<b>6</b>
I.1 Antecedentes	8
I.2 Definición De Problema	8
I.3 Justificación	9
I.4 Objetivos	9
<b>CAPITULO II. MARCO TEORICO</b>	<b>10</b>
II.1 Suelo Y Subsuelo	10
III.1.1. El Suelo	10
II.2 Petróleo	12
II.3 Hidrocarburos aromáticos	12
II.4 Hidrocarburos aromáticos policíclicos	13
II.5 Los derrames de sustancias peligrosas	14
II.6 Impacto ambiental por el uso del petróleo	14
II.7 Bioremediación de los hidrocarburos en el suelo	16
II.8 Desarrollo de los niveles guía de HTP en suelos	19
<b>CAPITULO III. DESARROLLO DEL TEMA</b>	<b>21</b>
III.1 Concepto De Remediación	21
III.2 Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos	21
III.2.1 Análisis del sitio y sus alrededores	22
III.2.2 Análisis hidrogeológico	23
III.2.3 Análisis químico de los contaminantes	24
III.2.4 Análisis Físicoquímico	24
III.3 Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos	24

<b>CAPITULO IV. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN</b>	<b>26</b>
<b>CAPITULO V. SELECCIÓN DE UNA TÉCNOLOGIA DE REMEDIACIÓN</b>	<b>32</b>
<b>CAPITULO VI. TÉCNOLOGIA DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICA</b>	<b>34</b>
VI.1 Bioremediación	34
VI.2 Funcionamiento de la bioremediación	35
VI.3 Bioremediación In Situ Para El Suelo	38
VI.3.1 Bioventeo	39
VI.3.2 Bioestimulación	40
VI.3.3 Bioaugmentación	41
VI.3.4 Biolabranza	42
VI.3.5 fitorremediación	43
VI.4 Bioremediación Ex Situ Para El Suelo	45
VI.4.1 Bioremediación en fase lodos	45
VI.4.2 Bioremediación en fase sólida	46
VI.5 Tratamiento de la tierra	47
VI.6 Biopilas de tierra	49
VI.7 Producción de abonos a partir de desechos	49
<b>CAPITULO VII. LA BIOREMEDIACIÓN COMO TÉCNOLOGIA OPTIMA EN EL TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS</b>	<b>50</b>
<b>CAPITULO VIII. OBSERVACIONES</b>	<b>55</b>
<b>CAPITULO IX. VENTAJAS DE LA BIOREMEDIACIÓN</b>	<b>56</b>
<b>CAPITULO X. DESVENTAJAS DE LA BIOREMEDIACIÓN</b>	<b>57</b>

<b>CAPITULO XI. CARACTERISTICAS DE LAS TÉCNICAS DE LA BIOREMEDIACIÓN</b>	<b>58</b>
XI.1 La bioremediación funciona para	58
XI.2 La bioremediación no funciona para	58
<b>CAPITULO XII. CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
<b>CAPITULO XIII. RECOMENDACIONES</b>	<b>60</b>
<b>CAPITULO XIV. ANEXOS</b>	<b>61</b>
<b>CAPITULO XV. GLOSARIO</b>	<b>64</b>
<b>CAPITULO XVI. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>70</b>

# Resumen

El derrame de productos durante las diferentes etapas del proceso, genera alteraciones al medio ambiente

El derrame o vertimiento de hidrocarburos o de sustancias químicas en lugares como suelo o agua, aun siendo de manera local y puntual, puede llegar a tener impactos negativos en ecosistemas enteros, afectando los recursos naturales, la economía y la sociedad (pero principalmente al ambiente).

Los impactos, aunque no tengan efectos muy drásticos en ocasiones, pueden ser muy severos al grado de que hábitats completos sean afectados en forma importante al punto de que su recuperación llegue a requerir periodos extremadamente largos, pues la degradación natural de la más simple de estas sustancias puede llevar decenas de años.

Los agresores de mayor preocupación son sin duda los hidrocarburos, que no son otra cosa que los compuestos del carbono más simples por estar constituidos únicamente por carbono e hidrógeno; obviamente, dentro de esta condición existen muchas formas moleculares y diversas características físico - químicas. Sin embargo, todos comparten la particularidad de ser lentamente biodegradables de ahí que su impacto sea tan negativo al medio ambiente cuando hay derrames en suelos.

La contaminación de suelos con hidrocarburos es un problema que se ha vuelto muy común en nuestros días, debido principalmente al extensivo uso y consumo de combustibles derivados del petróleo a todo lo largo del país y a las malas prácticas y falta de previsión en algunos casos. Estos acontecimientos impactan de manera negativa al entorno ecológico, es por eso que hoy en día los derrames por hidrocarburos se consideran como emergencia ambiental debido a que pueden poner en peligro a la salud humana y los recursos naturales.

La finalidad principal de este estudio es dar a conocer. Los principales impactos ambientales que se generan por los derrames de hidrocarburos, así como las técnicas más eficaces de remediación y al mismo tiempo incluir aquellas medidas de mitigación empleadas.

En este trabajo se presenta una revisión de las principales tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados, así como los datos que deben tomarse en cuenta para la selección de la tecnología más adecuada de acuerdo con las características del sitio a tratar, las propiedades del suelo y el tipo de contaminante.

Para los propósitos de exposición, las tecnologías de remediación para suelos fueron divididas tomando como base su principio de acción o tipo de tratamiento: biológico, fisicoquímico y térmico. Adicionalmente, se presentan los costos y tiempos estimados para la remediación de un sitio contaminado determinado.

Antes de considerar el uso de una tecnología de remediación para un sitio en particular, es indispensable contar con información del sitio y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar. Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento.

# CAPITULO I

## Introducción

Inicialmente, en la extracción del petróleo no se consideraba el bienestar del ambiente, lo que ha contribuido a la degradación del aire, el agua y el suelo. Los derrames han sido y serán el problema que las empresas de petróleo deben combatir. Durante mucho tiempo y hasta hace poco, nadie se preocupaba por el destino de los residuos generados por la actividad, dando por hecho que la naturaleza limpiaba el ambiente. Según fue cambiando la naturaleza y composición de los residuos, y al aumentar su cantidad y complejidad, esta capacidad (degradante y amortiguadora) empezó a alterarse.

La exploración y la explotación se realizaban de acuerdo a las prácticas de extracción que no contemplaban el cuidado del medio ambiente. A los derrames no se le daba la importancia que actualmente se les confiere y por tal razón aún en la actualidad existen áreas impactadas por éstos. Recién en los últimos años se tomo real conciencia de los problemas ambientales que puede acarrear un pozo de cualquier tipo, sino se realiza con una técnica adecuada, y sin tomar las precauciones necesarias para evitar la contaminación del ambiente.

En lo que respecta a las actividades de explotación propiamente dicha, entre los productos que se generan de la realización de una perforación petrolera se encuentra el material rocoso del pozo, el cual no se puede suponer que afecte al medio ambiente ya que una roca en parte molida no es un agente de por sí contaminante; pero es aquí donde entra en juego las diversas técnicas de perforación, para la realización de las mismas, se utiliza un fluido semiviscoso denominado “lodo de perforación” y que normalmente esta formado en base a la mezcla de agua y bentonita.

Sin embargo, la disposición de los materiales una vez finalizado las perforaciones, resulta un problema para las empresas. La práctica tradicional de perforaciones es el empleo de tanques para la disposición de los lodos. Es así que una vez concluida la perforación, quedaban esos tanques colmados con lodo contaminado con petróleo que en ocasiones carecían de protección (barreras antipájaro) o barrera hidráulica, impactándose el suelo y la fauna.

Debido al gran número de tanques preexistentes, durante su remediación se presento el inconveniente, no previsto oportunamente, de que hacer con la cantidad de productos acumulados en las mismas, puesto que no existe una única receta de disposición que asegure la minimización del impacto ambiental. Frente a tales riesgos, las empresas han aplicado la metodología de perforación de pozos con locación seca, o sea sin tanques

Esto consiste en utilizar equipos especiales de tratamientos de lodo, que hacen un uso más eficiente de los mismos, al separar mejor la fase líquida de la fase sólida, con lo cual el volumen final de esta última se reduce sustancialmente. De este modo se facilita el tratamiento y disposición final de ambas fases.

La contaminación al suelo con petróleo se registra ocasionalmente por derrames ante roturas de oleoductos, descontrol de pozos, rebalse de tanques, pérdidas en boca de pozo, etc. La situación planteada por los derrames de hidrocarburos antiguamente no tuvo un control y registro adecuado, debido a varias causas entre las que se pueden citar en primer lugar a que los mismos no se tratan de hechos u ocurrencias sistemáticas, sino que sucedían sólo eventualmente.

Por otra parte estos derrames fueron considerados como accidentes inevitables en la actividad de la industria petrolera. Es por eso que se tuvo que tomar las medidas de seguridad adecuadas que permitieran evitar el mayor número de accidentes y derrames posibles.

Por tal motivo se establecen normas para la prevención y control de la contaminación, lineamientos para elaboración de planes de contingencia en caso de derrames de hidrocarburos, y reglamentos con sus respectivas leyes.



Reglamento para la Protección Ambiental en las actividades de Hidrocarburos,  
DECRETO SUPREMO N° 015-2006-EM

Considerando, que el DC N° 042-2005-EM aprobó el texto único de la ley N° 26221 Que norma las actividades de hidrocarburos en el territorio nacional y que el artículo 87 modificada por la ley N° 26734 señala que OSINER organismo supervisor de inversión en energía, y el M.E.M. es el que se encarga de dictar el reglamento del medio ambiente para las actividades de hidrocarburos.

La ley N° 28611 norma regula y modifica la situación legal en cuanto al medio ambiente en todo el territorio peruano. Con fecha 02/03/2006

## **I.1 Antecedentes**

Los derrames de hidrocarburos no sólo representan peligro para el suelo, sino también para el aire, agua y principalmente para quienes están en contacto directo con estos tres factores tan indispensables para los seres vivos.

Los hidrocarburos tienen el poder de causar daños sumamente graves en algunas especies de seres vivos y afectan también la salud de los seres humanos, de ahí la necesidad de emitir información para reducir, evitar o influir en la minimización de los derrames de hidrocarburos.

Una variedad de sustancias contaminantes puede eliminarse mediante distintas tecnologías; una de ellas es la bioremediación, como una opción sumamente innovadora para reducir los efectos de derrames de petróleo y sus derivados.

## **I.2 Definición del Problema**

Los derrames de hidrocarburos, implican pérdidas económicas, de tiempo y de recursos, así como también grandes impactos negativos al medio (contaminación de fauna, flora, suelos, agua subterránea, daños a la salud humana, etc.).

### **I.3 Justificación del estudio de las causas y efectos**

Se realizan estudios por derrame de hidrocarburos a través de las diferentes situaciones en la industria del petróleo para dar a conocer los riesgos, el número de accidentes diversos, los daños a la salud, las posibles pérdidas tanto económicas como de recursos naturales, se enunciarán y evaluarán diversas medidas de remediación, desde las más comunes hasta las de última generación, tratando de crear conciencia en la población en general.

Junto con los estudios químicos, geológicos e hidrológicos, del potencial de riesgo de sitios contaminados, se dará a conocer la estimación de la actividad microbiana y la cuantificación de las poblaciones microbianas que aportan información sobre el estado de la microflora del suelo e indican que tipos de microorganismos pueden existir en el suelo contaminado.

### **I.4 Objetivos**

Difundir la protección y remediación de los suelos contaminados por hidrocarburos, difundir la tecnología de la Bioremediación que es una tecnología que utiliza microorganismos para la limpieza de contaminantes químicos en el suelo. Esta tecnología está basada en la activación de la degradación microbiana de compuestos tóxicos en sitios contaminados optimizando los factores ambientales, tales como concentración de nutrientes, contenido de agua, pH, reacciones fisicoquímicas, suplemento de oxígeno y disponibilidad y reacción de los contaminantes frente a los microorganismos y temperatura.

## **CAPITULO II**

### **Marco Teórico**

Para lograr comprender como afecta los derrames de hidrocarburos es necesario saber qué es el suelo. Por ser el primer receptor del contaminante, además de que la palabra suelo tiene muchos significados porque existe una gran diversidad de suelos en el mundo dificultando con ello una definición precisa.

#### **II.1 Suelo y Subsuelo**

Primero que nada se debe saber que el suelo y el subsuelo son términos que difícilmente pueden emplearse por separado. En un lenguaje coloquial, suelo es la superficie, y subsuelo es hacia la profundidad; sin existir una referencia para saber qué tan profundo es el suelo y donde empieza el subsuelo.

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural que desempeña diversas funciones, entre las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos y de protección a los mismos; también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimenticia, además de ser el espacio en el cual se realizan actividades agrícolas, ganaderas, y áreas verdes de generación de oxígeno.

##### **II.1.1 El Suelo**

Constituye la capa superficial del manto, cuya profundidad es variable. Está compuesto por partículas minerales, organismos vivos, materia orgánica, agua y sales. La mayoría de los componentes provienen de la meteorización de rocas, descomposición de restos vegetales, y la acción de microorganismos descomponedores.

El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes; sin él, la vida vegetal en la superficie no existiría y, en consecuencia, no se producirían alimentos para la vida vegetal y/o animal y por ende ni para el ser humano.

El suelo es un medio muy complejo, compuesto de tres fases principales; la sólida (50 %); la líquida, y la gaseosa los otros 50%, que esta dispuesta en diferentes formas, tanto macroscópico, como microscópico, para formar cientos de diferentes tipos de suelos conocidos en el mundo.

Un suelo limpio presenta una gran diversidad de especies de microorganismos (bacterias, hongos y algas), por cada gramo de suelo hay alrededor de 4 mil especies de microorganismos, mientras que un suelo contaminado con hidrocarburos presenta poca diversidad de microorganismos, abundando aquellos que tienen la capacidad de degradar al contaminante, además un suelo contaminado con hidrocarburos presenta disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos, así como aumento del manganeso y hierro intercambiable y aumento del fósforo disponible.

Un suelo que esta siendo biorremediado presentará abundancia de especies de microorganismos que degradarán a los compuestos químicos presentes, pues para cada componente químico de los hidrocarburos hay un determinado microorganismo que lo va a degradar. Son indicadores físicos y químicos de la calidad de un suelo los valores de carbono orgánico, nitrógeno, materia orgánica y respiración del suelo, si estos indicadores no exceden los valores normales para cada tipo de suelo nos indicarían que se trata de un suelo limpio.

Un suelo biorremediado debe ser sometido a un monitoreo microbiológico constante a fin de observar la disminución en abundancia de microorganismos degradadores de hidrocarburos por falta de alimento y la repoblación por microorganismos propios de un suelo limpio, este cambio en la variedad de especies nos sirven como indicadores microbiológicos.

## **II.2 Petróleo**

El petróleo es una mezcla compleja que contiene principalmente hidrocarburos, compuestos con átomos de carbono e hidrogeno y otros constituyentes metálicos. La complejidad del petróleo y sus derivados se incrementa con el número de carbonos. En este sentido hay 75 posibles combinaciones para moléculas que contienen 10 átomos de carbono, pero hay 366000 combinaciones posibles para moléculas que contienen 20 átomos de carbono, lo cual hace imposible identificar todos los componentes. Por lo tanto al petróleo y sus derivados los caracterizan en términos de su rango de ebullición y su número de carbono aproximado.

Los petróleos de mejor calidad son aquellos que se clasifican como: livianos los que tienen más de 26° API, los intermedios se sitúan entre 20° y 26° API, y los pesados por debajo de 20° API.

Los hidrocarburos pueden ser agrupados en hidrocarburos parafínicos, olefínicos naftenicos y aromáticos

## **II.3 Hidrocarburos Aromáticos.**

Dentro de la clasificación de aquellos hidrocarburos en los cuales se hará mayor énfasis están los aromáticos, ya que por sus características fisicoquímicas resultan de mayor impacto para la salud humana y ambiental. Se les llama aromáticos debido a que muchos compuestos de esta serie tienen olores intensos y casi siempre agradables. El hidrocarburo aromático más sencillo es el benceno.

Los compuestos aromáticos, son contaminantes ambientales comunes en lugares en los que han ocurrido derrames de petróleo fundamental de toda la serie aromática.

Debido al crecimiento industrial, se ha puesto en aumento un gran número de contaminantes ambientales, entre ellos los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

## **II.4 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos**

Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de bioremediación se han usado con éxito para tratar suelos contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos han estado presentes como contaminantes desde los inicios de la vida del hombre, ya que son compuestos naturales presentes en el medio ambiente. Estos hidrocarburos pertenecen a 100 sustancias químicas diferentes que se forman durante la combustión incompleta del carbón, petróleo y gasolina, basuras y otras sustancias orgánicas como tabaco y carne a la parrilla.

La principal característica que presentan estos compuestos sobre la salud, es su capacidad para inducir la formación de cáncer en los organismos expuestos.

Ciertos hidrocarburos aromáticos policíclicos tienen una fuerte actividad carcinogénica y con otros sin embargo no existe tal evidencia.

Es importante señalar la consideración que se tiene de que todos los hidrocarburos aromáticos policíclicos en general, son sospechosos de ser carcinogénicos en un grado u otro.

El fenantreno, aunque no se ha demostrado aun su potencial carcinogénico, se toma como HAP modelo para llevar a cabo estudios de bioremediación en el suelo.

En el suelo es probable que se adhieran firmemente partículas de ciertos hidrocarburos aromáticos policíclicos, y estos se movilizan a través del suelo y contaminan el agua subterránea.

## **II.5 Los Derrames de Sustancias Peligrosas**

Son cualquier descarga, liberación, rebose, o vaciamiento de hidrocarburos u otras sustancias peligrosas en estado líquido, que se presenten en tierra y/o en cuerpos de agua

Las emergencias ambientales son causadas principalmente por fallas humanas que dan origen a derrames de algún tipo de sustancia (principalmente hidrocarburos) en el suelo, y con ello la contaminación en una primera fase, debido a que también ocasionan daños a la flora y fauna, al agua y aire, incluso afecta la salud en forma de irritación de vías respiratorias, ojos, piel, etc. Así como a largo plazo, con algún tipo de cáncer, por ejemplo. .

Debido a la problemática que enfrenta el tener un gran número de sitios contaminados con hidrocarburos y demás sustancias peligrosas, a continuación se van a estudiar algunos elementos técnicos que puedan servir como base para evaluar el daño de un sitio ante la presencia de contaminantes y la manera de como se debe proceder a la reparación del mismo.

## **II.6 Impacto Ambiental por el uso del Petróleo**

Las etapas que componen el procesamiento del petróleo son: explotación, transporte, refinamiento, almacenamiento y uso.

Las alteraciones ambientales que cada una provoca varían, y son responsabilidad de diferentes sectores de la población y zonas donde se producen.

En la actividad petrolera el manejo durante la producción y procesamiento de hidrocarburos y combustibles, en algunos casos conlleva a la contaminación del suelo debido a que los tanques, oleoductos y diversas instalaciones sufren pérdidas, los líquidos migran hacia el suelo y subsuelo, hacia el agua subterránea

(Zona saturada-acuífero) o superficialmente hacia un bajo topográfico o curso de agua.

No solo las contaminaciones se producen por roturas de los sistemas de almacenaje o de transporte, sino por el mal manejo del producto que puede provocar impactos negativos en la ecología regional, como por ejemplo derrames desde oleoductos en mal estado, mal funcionamiento de válvulas, etc.

El petróleo en el suelo, que pasa a considerarse como un contaminante, se convierte en un riesgo para la salud humana y el ecosistema. En algunos casos, la contaminación no solo provoca problemas de toxicidad, sino que además puede ocasionar grandes riesgos de accidentes (explosiones y/o incendios) debido a la acumulación de gases en el suelo.

La industria petrolera en su conjunto ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental. Por su amplia gama de productos, por su infraestructura petrolera integrada por pozos, baterías de separación, procesadores de gas, centrales de almacenamiento y bombeo, red densa de ductos y tanques para el confinamiento de desechos sólidos y líquidos procedentes de la perforación y mantenimiento de los pozos.

Estas instalaciones poseen riesgos de fuga de petróleo, diesel y gasolina por rotura de los ductos, por filtración y derrame de aguas aceitosas desde las presas y por las inundaciones durante el periodo de lluvias.

Los suelos han sufrido degradaciones de todo tipo, el desconocimiento de los efectos que podrían provocar, la ausencia de medios suficientes para su tratamiento, así como las malas prácticas por muchos años, ha tenido como consecuencia la depositación sucesiva e incontrolada de los mismos,

Por otra parte, cuando se realiza un estudio de evaluación o de caracterización de un sitio contaminado con hidrocarburos, es necesario determinar diversos parámetros físicos y químicos y, el resultado que lo que se obtiene se considera



aceptable. Sin embargo el valor real puede estar modificado de acuerdo con el tiempo, tipo y cantidad de hidrocarburo que se haya derramado sobre un suelo específico así como a sus propiedades.

Un factor determinante en los posibles efectos por hidrocarburos, es la textura del suelo, es decir, por la presencia proporcional de partículas como arenas, limos o arcilla. Además es importante conocer las características físicas y químicas de un suelo que se ha impactado con hidrocarburos y que son básicas si se requiere diseñar alguna tecnología de restauración.

Así por ejemplo la porosidad, pH, humedad temperatura y contenido de microorganismos son indispensables para los procesos de bioremediación .En el caso de aplicar métodos de extracción de vapor del suelo, se requiere conocer su porosidad, permeabilidad y textura. En los últimos años se ha prestado una especial atención a las técnicas de recuperación que posibilitan su reutilización

El proceso comienza con una idea de cómo tratar el suelo contaminado, este concepto pasa por una idea de investigación para comprobar su factibilidad .Si el concepto es útil entonces se hace una prueba de la técnica en pequeña escala en un laboratorio, si da resultado, se ensaya en pequeña escala sobre el terreno, y si también da resultado, la técnica se usara en gran escala.

El desarrollo de técnicas es un proceso permanente, se va evaluando en distintos sitios y se mejora con su uso.

## **II.7 Biodegradación de los hidrocarburos en el suelo**

La biodegradación de los hidrocarburos, ha sido debidamente estudiada y documentada. La bioremediación es reconocida como un método efectivo de bajo costo para tratar el suelo y otros residuos de exploración y producción que contengan hidrocarburos de petróleo.

La biodegradación de los hidrocarburos del petróleo consiste en una remoción selectiva de ciertos compuestos derivados de hidrocarburos (alcanos, alquenos, aromáticos, y polares), que son metabolizados por microorganismos autoctonos del suelo. Como consecuencia los hidrocarburos del petróleo son convertidos a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y biomasa ( $\text{CH}_2\text{O}$ ).

Existen muchos factores que afectan la duración y cinética de la remoción de hidrocarburos. Como son la propiedad del suelo, su pH, temperatura, humedad, aereación, y estado de los nutrientes; característica de los hidrocarburos; y la ecología de las poblaciones microbianas presentes en el suelo.

Respecto al proceso de biodegradación de hidrocarburos se establece una relación con la carga inicial encontrada de hidrocarburos de petróleo. Estudios desarrollados para el American Petroleum Institute sobre prácticas de tratamiento de suelos, mostró que entre el 70 y 90% de los hidrocarburos presentes fue removido del suelo. La efectividad de la bioremediación es dependiente del tipo de hidrocarburo, poblaciones microbianas, y condiciones del tratamiento.

El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de microorganismos para la degradación de los contaminantes orgánicos, a través de la actividad biológica que altera la estructura molecular del contaminante.

Antes del proceso de bioremediación se determina la concentración de hidrocarburos totales de petróleo del residuo a tratar, luego el material es tratado por medio de mezclado mecánico continuo hasta su recuperación.

Los procesos biológicos de degradación de hidrocarburos de petróleo, requieren el aporte de elementos como son el Nitrógeno y el Fósforo, los cuales actúan como nutrientes de los microorganismos. Los mismos son incorporados en forma de fertilizantes de uso agrícola. Las sales usualmente utilizadas y agregadas al suelo son las siguientes:

- Fosfato diamónico, para el aporte de nitrógeno y fósforo.
- Hidróxido de Potasio

- Urea para el aporte de nitrógeno.

La masa incorporada de nutrientes se determina a partir de la concentración inicial de residuos sólidos y semisólidos a tratar.

El proceso de bioremediación requiere el control de los niveles de nitrógeno así como también de los niveles de fósforo y de hidrocarburos totales de petróleo. Debido a que es un proceso en el que se involucran microorganismos, el número de microbios también es un factor que se debe tener en cuenta. La representación abundante de bacterias y hongos capaces de metabolizar hidrocarburos dan al suelo un ambiente relativamente favorable para la biodegradación de hidrocarburos.

La adición de petróleo al suelo enriquece selectivamente aquel sector de la comunidad microbiana capaz de adaptarse y utilizar el nuevo sustrato. Sin embargo, los componentes tóxicos del petróleo pueden inhibir selectivamente miembros de la comunidad microbiana, produciendo baja en el tamaño de la población y diversidad de especies dentro del suelo. Las bacterias y hongos son los principales responsables de la biodegradación de petróleo en el suelo, aunque la relativa contribución de cada uno de estos grupos no es clara, por lo que es importante determinar el tipo de bacterias y hongos capaces de utilizar al petróleo como fuente de carbono y energía, Para que la biorremediación sea eficaz, los contaminantes deben ser susceptibles de ataque microbiano (transformación metabólica), los productos metabólicos deben ser inocuos, y el proceso no debe tener efectos secundarios adversos en los ecosistemas.

Los petróleos con grados API >30 son fácilmente biodegradados, mientras que los petróleos con grado API <20 serán degradados lentamente. El valor guía de hidrocarburos totales de petróleo del 1% en peso (P/P) parece estar fundado en recientes investigaciones sobre biodegradación de los hidrocarburos de petróleo

## Factores que influyen en la biodegradación de Suelos

La velocidad de descomposición de los microorganismos va a depender de su concentración, de determinadas características del suelo (disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura) y de la estabilidad del contaminantes. La temperatura es el principal factor limitante para la biodegradación.

Dado que los microorganismos requieren nitrógeno y fósforo para incorporarse en la biomasa, el aprovechamiento de estos nutrientes en un suelo con derrame es un factor crítico para su posible degradación. Los hidrocarburos de 17 y 18 átomos son hidrocarburos saturados. Las bacterias atacan primero a estos últimos, luego con menor eficiencia a los aromáticos y finalmente a los ramificados.

### 11.8 Desarrollo de niveles guía de HTP en suelos

Históricamente, la industria del petróleo produjo derrames de petróleo y generó residuos derivados de la actividad. Como consecuencia de los daños producidos, se desarrollo un valor guía del 1% en peso (P/P) de hidrocarburos totales de petróleo en suelos. En un principio este valor guía fue aplicado empíricamente, para luego fundamentarse en estudios de investigación detallado.

El valor guía del 1% en peso (P/P) de HTP se estableció en base a dos criterios: El primero fue el impacto de los hidrocarburos sobre la vegetación, y el segundo fue la movilidad hacia el agua subterránea. O sea, la movilidad o biodegradabilidad de los hidrocarburos del petróleo fueron los factores más importantes para evaluar el valor guía.

El petróleo crudo derramado de una formación en producción, o los lodos de perforación con petróleo son la principal fuente de contaminación en los residuos de exploración y producción.

Históricamente, los análisis de los hidrocarburos del petróleo en residuos de exploración y producción, han sido informados como grasas y aceites HTP, o carbono orgánico total.

El valor guía de 1% fue desarrollado para responder a las necesidades de la sociedad y la industria, las guías pertenecen a la Utah (EEUU)

Si bien en algunas situaciones resulte aplicable alcanzar niveles más bajos al 1% de HTP, en suelos, puede resultar difícil en otras, debido sobre todo a la presencia de hidrocarburos recalcitrantes.

La agencia de protección ambiental de los estados unidos y la organización mundial de la salud USEPA es la encargada de establecer las normas para el control de la salud y del medio ambiente.

## **CAPITULO III**

### **Desarrollo del Tema**

#### **III.1 Concepto de Remediación**

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la Remediación se define como el conjunto de actividades que tienen que ver con la recuperación y restablecimiento de las condiciones originales que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

De acuerdo con el diccionario de la Lengua Española, restaurar es recuperar, restablecer o volver a poner algo en el estado que antes tenía.

Aunque el término remediación no está registrado en los diccionarios de la lengua española, y que no ha sido incluido en documentos oficiales peruanos, ha empezado a ser utilizado en cierto tipo de investigaciones relacionadas con la limpieza de sitios contaminados.

#### **III.2 Caracterización de un sitio contaminado por Hidrocarburos**

La caracterización de un suelo afectado por hidrocarburos u otras sustancias peligrosas permite conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador, y el comportamiento de los contaminantes en él. Los estudios preliminares de dicha caracterización corresponden a los de una auditoría ambiental.

La evaluación del daño es algo que debe ser muy preciso, ya que de ahí se genera la información que será utilizada tanto para la definición de responsabilidades, como para el planeamiento de las medidas de mitigación, limpieza y dado el caso, restauración.

Es una actividad en la que necesariamente coinciden diversas disciplinas, las mismas que deben interactuar para arrojar resultados completos.

Cuando ocurre un derrame en suelos o en cuerpos de agua, los contaminantes inmediatamente tienden a dispersarse hacia y hasta donde el medio físico lo permita. Las características fisicoquímicas del contaminante, así como las propias del sitio, determinan su permanencia o migración.

Esta es la razón por la que derrames subterráneos que ocurrieron en el pasado, años después se detectan fuera del área donde acontecieron, y alejados varios metros e incluso kilómetros del predio donde acontecieron, en dirección de la corriente de agua subterránea. Ejemplos de lo anterior se presentan comúnmente en zonas aledañas a poliductos, centros de almacenamiento y distribución de combustibles, así como en estaciones de servicio. Todos los hidrocarburos son insolubles en agua, y por ser menos densos que ésta tiende a flotar.

Esta característica es importante porque marca la estrategia de diagnóstico en un sitio contaminado. Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Otros productos químicos no se ven, tampoco huelen; únicamente son percibidos por análisis químicos. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de detectarse por su color y aspecto.

### **III.2.1 Análisis del Sitio y sus Alrededores**

En principio se requiere un plano del terreno donde se encuentran las instalaciones a fin de identificar la infraestructura subterránea (tanques y ductos), los talleres de mantenimiento, las zonas de disposición de desechos e instalaciones antiguas.

Estos datos servirán para detectar la fuente de contaminación, por lo que es de gran utilidad ubicar las instalaciones en un plano que incluya las zonas circundantes y así definir sitios que servirán de control.

También resulta procedente recopilar datos hidrogeológicos, relacionados con la profundidad del nivel freático, la dirección del flujo de la corriente subterránea y la conductividad hidráulica; información que servirá para pronosticar la migración hacia el acuífero. Un plano de ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción permitirá predecir el efecto sobre la población aledaña.

Para esta actividad es indispensable visitar el lugar; una parte importante de la información se puede obtener cuando se entrevista a los trabajadores y a los pobladores del lugar, pero también es necesario recurrir a la investigación bibliográfica. A continuación se mencionan los conceptos que deben ser investigados:

### **III.2.2 Análisis Hidrogeológico**

La importancia del análisis hidrogeológico del sitio es su aportación de elementos para entender la forma en que se han movido los contaminantes del punto específico donde ocurrió un derrame y hacia donde se tienen zonas afectadas.

Esta investigación ayuda a conocer si la migración de los factores de riesgo ha sido producto de un proceso natural, o bien ocasionado por la acción del hombre.

Durante la caracterización hidrogeológica se debe obtener la siguiente información:

- Profundidad del nivel freático
- Dirección y velocidad del flujo del agua subterránea
- Espesor de producto libre (cuando este ha alcanzado el nivel freático)
- Definición tridimensional de la mancha de contaminación subterránea
- Perfiles estratigráficos.

La información respectiva servirá para definir los puntos donde se deberán perforar los pozos de monitoreo, y donde se habrán de tomar muestras de suelo a diferentes profundidades.



### **III.2.3 Análisis Químico de los Contaminantes**

Los análisis químicos que se practican en las muestras de suelo y agua, sirven para conocer la naturaleza y concentración de los contaminantes; así se podrá tener una idea de la distribución que guardan éstos en la zona afectada; para ello se utilizan análisis químicos, entre los cuales los más utilizados son los siguientes:

### **III.2.4 Análisis Físicoquímico**

Se lleva a cabo para conocer qué tan afectado se encuentra un suelo por la presencia de contaminantes; se practica simultáneamente en una muestra de suelo no contaminado que sirva como control para hacer comparaciones. La muestra control se toma de una zona no contaminada, cercana a la zona dañada para asegurar que comparta sus características. Las determinaciones que se realizan son:

- PH
- Humedad
- Capacidad de retención del agua
- Concentración de materia y carbono orgánicos
- Contenido de materia inorgánica
- Contenido de carbono inorgánico
- Porosidad
- Permeabilidad
- Tipo de suelo

## **III.3 Alternativas Tecnológicas Para la Remediación de Suelos**

Uso de tecnologías de remediación:

Las actividades de investigación realizadas dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo físicoquímico, como la incineración, y la

solidificación /estabilización. Posteriormente surgieron otras innovadoras como la desorción térmica, la extracción con vapor, el lavado de suelo y las de tipo biológico. Otras más recientes fueron la vitrificación, y el venteo.

Actualmente existen en el mercado mundial diversas tecnologías para remediación que se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas son aplicables a todos los casos. Para estar seguros de esto se deben realizar estudios de factibilidad a nivel laboratorio, y de ser posible, pruebas de demostración en campo.

Antes de iniciar un tratamiento de remediación es muy importante cerrar la fuente de contaminación, para asegurar la efectividad de cualquier estrategia planeada. A continuación se analiza de manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación de sitios contaminados con hidrocarburo de petróleo.

El comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la selección adecuada de una tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito, las obtendremos si consideramos tanto las propiedades del contaminante como las del sitio contaminado.

## **CAPITULO IV**

### **Clasificación De Tecnologías De Remediación**

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

- Estrategia de remediación;
- Lugar en que se realiza el proceso de remediación, y
- Tipo de tratamiento.

Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación.

### **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. Este tipo de tecnologías 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 a través de métodos físicos o químicos.

**Lugar en el que se realiza el 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 suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.
- Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento y se realiza fuera del sitio.

En La tabla 1 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de ambos tipos de tecnología.

**Tabla 1. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.**

	<b>In situ</b>	<b>Ex situ</b>
<b>Ventajas</b>	- Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar - Potencial disminución en costos	- Menor tiempo de tratamiento - Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente
<b>Desventajas</b>	-Mayores tiempos de tratamiento - Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo del proceso	- Necesidad de excavar el suelo Aumento en costos e ingeniería para equipos - Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante

### **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 (bioremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- 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. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de bioremediación. 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 bioremediación 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. Entre las tecnologías fisicoquímicas para tratamiento in situ, se encuentra, el lavado de suelos (LS), la extracción por solventes (ES), la extracción de vapores (EV) y la solidificación/estabilización (S/E).

- Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo. 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). Producen vapores que requieren de tratamientos

La mayoría de las tecnologías térmicas pueden también aplicarse in situ y ex situ

A que se llama tecnologías tradicionales

- Tecnologías tradicionales. Son tecnologías utilizadas comúnmente a gran escala, cuya efectividad ha sido probada. Cuando se tiene información disponible acerca de sus costos es eficiente y es de fácil acceso. Entre las 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.

**Tabla 2. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo al tipo de tratamiento.**

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

## Trenes de tratamientos

Cuando dos o más tecnologías innovadoras o tradicionales pueden usarse juntas se conoce como “trenes de tratamiento”. Estos trenes de tratamiento son procesos integrados o bien, una serie de tratamientos que se combinan en una secuencia para proporcionar el tratamiento necesario. En general, los trenes de tratamiento se emplean cuando no todos los contaminantes en un medio particular pueden tratarse con una sola tecnología.

Por ejemplo, un suelo contaminado con compuestos orgánicos y metales puede tratarse primero por biorremediación para eliminar los compuestos orgánicos y después por tecnologías fisicoquímicas S/E para reducir la lixiviación de los metales. En otros casos, un tren de tratamientos puede usarse para:

- (i) Hacer un medio más fácilmente tratable por una tecnología subsecuente;
- (ii) Para reducir la cantidad de desechos que necesitan un tratamiento posterior con una tecnología subsecuente y más costosa;
- (iii) Para disminuir el costo total del tratamiento



## CAPITULO V

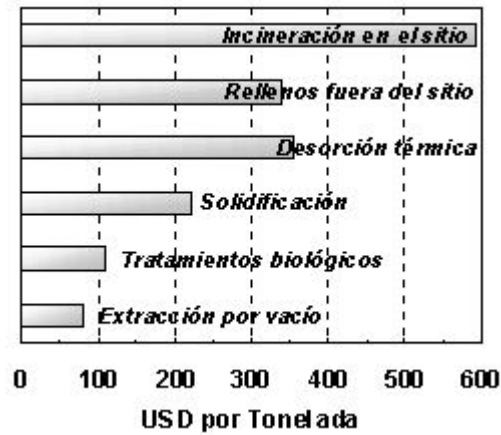
### Selección De Una Tecnología De Remediación

De acuerdo con la información antes presentada, puede decirse que la selección de una tecnología de remediación para un suelo con características particulares, contaminado con uno o más contaminantes, básicamente depende de los siguientes criterios:

- Características ambientales, geográficas, demográficas, hidrológicas y ecológicas del sitio.
- Tipo de contaminante (orgánico o inorgánico), concentración y características fisicoquímicas.
- Propiedades fisicoquímicas y tipo de suelo a tratar.
- Costo de las posibles tecnologías a aplicar.

En cuanto a costos, como se ha mencionado, las tecnologías térmicas son las más costosas del mercado, mientras que dentro de las más económicas se encuentran las tecnologías de bioremediación aplicadas in situ. En la figura 3 a continuación, se muestran los costos promedio para los diferentes tipos de tecnologías de remediación.

**Cuadro 1**



Es importante aclarar que aunque el uso de ciertas tecnologías puede generalizarse para cierto grupo de contaminantes, no debemos de olvidarnos de las características de los suelos y de las condiciones ambientales, que son dos casos completamente diferentes.

La principal tecnología empleada para los contaminantes volátiles es la extracción de vapores. Mientras que para los HAP se tratan generalmente por bioremediación.

## CAPITULO VI

### Tecnologías De Remediación Biológicas (Bioremediación)

#### VI.1 Bioremediación

Resulta una promesa para el medio ambiente; consiste en el uso de microorganismos naturales (enzimas, levaduras, hongos, o bacterias) para descomponer o *degradar* sustancias peligrosas en otras menos tóxicas o que no sean tóxicas. Los microorganismos, igual que los seres humanos, comen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales obtienen nutrientes y energía. Esta técnica puede llegar a ser la mejor opción respecto a las anteriores debido a que es 100% natural, de bajo costo y menos agresiva hacia la naturaleza.

El proceso obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos; y la actividad biodegradadora que es estimulada por la adición de nutrientes, utiliza los contaminantes como fuente de alimento y energía.

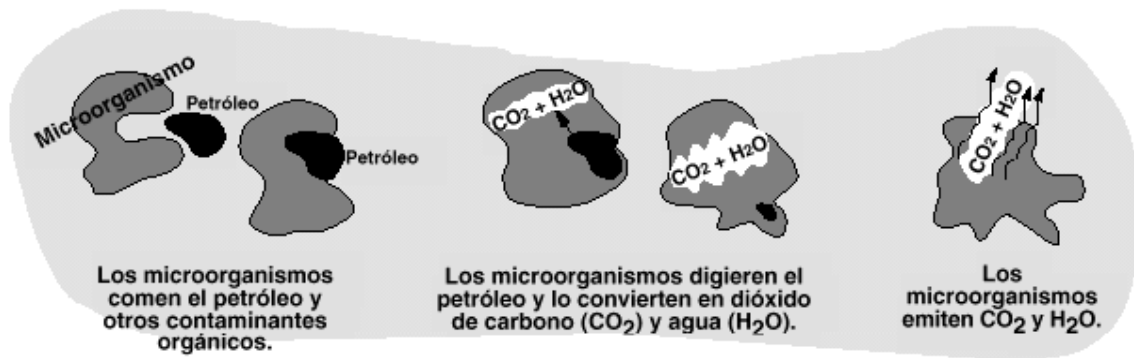
Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de Bioremediación, que en los últimos años ha surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados en donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar residuos orgánicos en compuestos químicamente más sencillos principalmente en dióxido de carbono y agua, es la mejor desde los puntos de vista ambiental, sin embargo, no puede aplicarse a todos los casos.

Una vez degradados los contaminantes, la población de microorganismos se reduce porque ha agotado su fuente de alimentos. Las poblaciones pequeñas de microorganismos sin alimentos o los muertos no presentan riesgos de contaminación, ya que se quedan en el suelo y forman parte de la materia orgánica.

Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza, sin embargo, la velocidad de tales cambios es baja, aunque mediante una adecuada manipulación estos sistemas biológicos pueden ser optimizados a fin de aumentar la degradación, y así utilizarlos en sitios con una elevada concentración de contaminantes. Una variedad de contaminantes pueden ser eliminados por Bioremediación; a saber, pesticidas, herbicidas, petróleo, gasolina, y metales pesados, solventes (benceno, tolueno) explosivos (TNT) cloro fenoles conservadores de la madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)

**Fig. 1**

### **Esquema de la Biodegradación aerobia en el Suelo**



## **VI.2 Funcionamiento de la Bioremediación**

Los microorganismos deben estar activos para poder desempeñar su tarea correctiva. Cuando se facilita el crecimiento de los microorganismos, aumenta la población microbiana creando condiciones ambientales óptimas para disminuir la toxicidad de la mayor cantidad posible de contaminantes. El tipo de bioremediación que se use dependerá de varios factores; entre ellos, el tipo de microorganismos presentes, las condiciones del lugar, y la cantidad y toxicidad de

los productos químicos contaminantes. Hay diversos microorganismos que degradan distintos tipos de compuestos, y sobreviven en condiciones diferentes. Los microorganismos autóctonos son los que viven en un lugar determinado. Para estimular su crecimiento, tal vez sea necesario proporcionarles una temperatura apropiada del suelo, oxígeno y nutrientes.

## **Microbiológicas**

Las comunidades microbianas presentes en suelos contaminados tienden a estar dominadas por aquellas bacterias que pueden sobrevivir a la toxicidad presente en el ambiente siendo capaces de utilizar al contaminante para crecer; en este sentido el contaminante “desbalancea”, más que toxifica, las comunidades ecológicas del suelo.

“Los microorganismos resistentes a los contaminantes presentes en su hábitat, suelo en este caso, normalmente fracasan en realizar algunas de sus funciones ecológicas específicas”. Teóricamente la diversidad de especies presentes en el suelo puede ser un indicador de los efectos de la contaminación, en particular la aparición de microorganismos resistentes a ésta en una comunidad, puede ser de utilidad al momento de decidir por un indicador biológico de impacto.

En relación a la toxicidad, se sabe que algunos grupos de microorganismos tienen la capacidad de ser más resistentes a contaminantes que otros en particular ante la presencia de metales.

Así también se observó que si bien el número de bacterias no variaba con respecto a la presencia de contaminantes, al realizar análisis de las comunidades a través de métodos moleculares, se observa que a medida que aumenta la concentración de contaminantes en el suelo, el perfil de análisis de la comunidad disminuía las “comunidades microbianas tienden a responder ante la presencia de contaminantes del petróleo, cambiando su estructura a una que favorezca a organismos capaces de sobrevivir a las nuevas condiciones a expensas de otros organismos que son reprimidas”.

## **Bacterias**

“El petróleo es una fuente de carbono, es un nutriente. Lo que para nosotros es un elemento tóxico, para las bacterias es una fuente de alimento. Éstas tienen una capacidad metabólica enorme, mucho mayor que la nuestra; ésa es la clave de la biorremediación y el motivo por el que nuestra actividad industrial no nos ha arruinado demasiado el medio ambiente.” Las bacterias tienen problemas nutricionales similares a los nuestros. Para estar funcionales, comen una fuente de carbono, una de nitrógeno y una de fósforo. El petróleo contiene un exceso de carbono, y lo mismo que nosotros no podemos alimentarnos sólo de aceite o azúcar, ellas necesitan un equilibrio. Para fomentar la degradación del crudo, nosotros suplementamos la mancha de petróleo con fósforo y nitrógeno; así las bacterias encuentran todos los nutrientes que necesitan, logran una dieta equilibrada, y ya pueden crecer y consumir el componente y quitarnos el problema.”

## **Hongos**

Los hongos tienen hábitats muy diversos, sin embargo la mayoría son terrestres y habitan en el suelo, desempeñando una actividad importante en la mineralización del carbono orgánico. Cuando se compara a los hongos con las bacterias, en general, estos tienen requerimientos nutricionales muy simples, pero su desarrollo es más lento, por lo que requieren mayor tiempo de incubación para su cultivo. Para ciertos HC está demostrado que los hongos tienen la capacidad de degradar cadenas largas y complejas con mayor eficiencia que las bacterias.

## **Algas**

Otros microorganismos, menos estudiados pero que también contribuyen a la degradación de agentes contaminantes en el suelo inducen su degradación fotoquímica en donde la almacenan, de esa manera reducen el riesgo de daño ecológico.

Si la actividad biológica que se necesita para degradar un contaminante en particular no está presente en el suelo, se pueden añadir al suelo afectado microorganismos de otros sitios cuya eficacia se haya comprobado. Estos son

microorganismos exógenos. Es posible que haya que modificar las condiciones del suelo del lugar nuevo, para que éstos proliferen.

La bioremediación puede aplicarse en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. En las aeróbicas, los microorganismos usan el oxígeno disponible en la atmósfera para funcionar. Con suficiente oxígeno convertirán muchos contaminantes orgánicos en dióxido de carbono y agua. En condiciones anaeróbicas, la actividad biológica tiene lugar en ausencia de oxígeno, de modo que los microorganismos descomponen compuestos químicos del suelo para liberar la energía que necesitan. A veces, en los procesos aeróbicos y anaeróbicos de descomposición de los contaminantes originales se crean productos intermedios de toxicidad menor, igual o mayor.

La bioremediación puede usarse como método para descontaminar el suelo. Estas medidas se clasifican en dos grandes categorías: *in situ* y *ex situ*. Con medidas biocorrectivas *in situ* se trata la tierra contaminada en el lugar donde se encuentra.

Las medidas biocorrectivas *ex situ* consisten en excavar el suelo contaminado para aplicar el tratamiento, obviamente en otro lugar ajeno al que se encuentra en un inicio, la contaminación.

### **VI.3 Bioremediación in Situ Para el Suelo**

Con las técnicas *in situ* no es necesario excavar el suelo contaminado, de modo que son menos costosas, levantan menos polvo y liberan menos contaminantes que las técnicas *ex situ*. Además, se puede tratar una gran cantidad de tierra por vez. Sin embargo, las técnicas *in situ* pueden llevar más tiempo que las técnicas *ex situ*, pueden ser difíciles de manejar y son más eficaces en suelos permeables (arenosos o que no sean compactos).

Las técnicas *in situ* buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente

puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos bioaumentación) y/o humedad, además del control de temperatura y pH

### **VI.3.1 Bioventeo**

El bioventeo es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aeróbicas. 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

#### Aplicaciones

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

#### Limitaciones

Algunos factores que pueden limitar la efectividad del bioventeo son:

- (i) El tipo y la concentración del contaminante
- (ii) Falta de nutrientes
- (iii) Bajo contenido de humedad



(iv) Dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario

### Costos y tiempos de remediación:

Es una tecnología en la que los tiempos de limpieza pueden variar desde algunos meses hasta varios años, y sus costos de operación varían entre 10 y 70 \$/m<sup>3</sup>. 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

### **VI.3.2 Bioestimulación**

La bioestimulación implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos in situ

#### Aplicaciones.

Se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con gasolinas, y pesticidas. Estudios a escala piloto, han mostrado la biodegradación de suelos contaminados con desechos de municiones.

Limitaciones. Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O<sub>2</sub>.

Otros factores que pueden limitar su aplicación, incluyen:

- (i) Que el tipo del suelo no favorezca el crecimiento microbiano

- (ii) Incremento en la movilidad de los contaminantes
- (iii) Obstrucción en los pozos de inyección provocada por el crecimiento microbiano.

## Costos y tiempos de remediación

La limpieza de una pluma de contaminación, puede tomar varios años. Su costo oscila entre 30 y 100 \$/m<sup>3</sup>. La naturaleza y profundidad de los contaminantes y el uso de bioaumentación pueden aumentar sus costos.

### **VI.3.3 Bioaumentación**

Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar, depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores

#### **Aplicaciones.**

Se ha usado con éxito para tratar suelos contaminados con Herbicidas é insecticidas.

#### **Limitaciones**

Antes de llevar a cabo la bioaumentación en un sitio, deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de metabolizar o utilizar el contaminante como fuente de carbono, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa.

## Costos y tiempos de remediación

Es una tecnología que puede durar varios meses o años, y su utilización no implica mucho capital ni costos de operación.

### **VI.3.4 Biolabranza**

Durante el proceso de biolabranza, la superficie del suelo contaminado es tratada en el mismo sitio por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados. La diferencia entre la biolabranza y el composteo, es que en la biolabranza, se mezcla el suelo contaminado con suelo limpio, mientras que el composteo generalmente se realiza sobre el suelo

.

#### Aplicaciones

Los contaminantes tratados con éxito por biolabranza, incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, PCP, creosota y coque, además de algunos pesticidas HTP.

#### Limitaciones

La biolabranza debe manejarse con cuidado para prevenir la contaminación de acuíferos, superficies de agua, aire o en la cadena alimenticia. El mayor problema es la posibilidad de lixiviados de los contaminantes hacia el suelo y el agua. Otra limitante para su utilización, es que por la incorporación de suelo contaminado en suelo limpio, se genera un gran volumen de material contaminado.

No es recomendable su uso para contaminantes diluidos, ni tampoco cuando no todos los contaminantes son biodegradables

## Costos y tiempos de remediación

Es una tecnología de mediano a largo plazo. El costo para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre 30 y 70 \$/ m<sup>3</sup>

### **VI.3.5 Fitoremediación**

La fitoremediación utiliza la vegetación para la descontaminación del suelo, o sea que a través de las plantas se puede 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.

Algunas plantas tienen la capacidad de concentrar metales en sus tejidos y en algunos casos son capaces de capturar y degradar plaguicidas, explosivos o hidrocarburos del suelo. Además las plantas contribuyen a reducir la acción del viento y lluvia sobre la zona contaminada por lo que evitan que la contaminación se extienda a otras zonas.

Gracias al sistema de captación de nutrientes de las plantas estas pueden extraer del subsuelo los contaminantes que son introducidos en sus tejidos junto al agua y las Sales necesarias para el desarrollo de los vegetales.

Una vez extraído del suelo y ya dentro de la planta, los productos químicos pueden seguir diferentes rutas fisiológicas, que se acumulan en ciertos tejidos (raíces, tallos u hojas)

Los contaminantes son captados por las raíces y posteriormente éstos son acumulados hacia los tallos y hojas, las plantas limitan la movilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que absorben los contaminantes inmovilizándolos, los contaminantes dentro de los tejidos de la planta hacen que se transforme por acción del metabolismo vegetal en otras sustancias químicas de toxicidad inferior u oxidadas en su totalidad y liberadas a la atmósfera en forma de gases de la respiración, en algunos casos los compuestos a tratar pueden quedar adsorbidos a las raíces de

las plantas sin llegar a entrar en ellas o ser degradadas por la acción de las bacterias del suelo.

En la fitoremediación, estas plantas crecen en sitios contaminados, luego se recogen y finalmente se queman, Es necesario recolectar las plantas antes de que pierdan sus hojas o empiecen a podrirse o retornen al suelo.

La ventaja de la fitoremediación es su bajo costo, beneficios estéticos y su naturaleza no intrusiva.

## Aplicaciones

Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes.

## Limitaciones

Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación:

- (i) El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar
- (ii) Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas
- (iii) Puede depender de la estación del año
- (iv) No es efectiva para tratar contaminantes fuertemente absorbidos
- (v) La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden movilizarse o bioacumularse en animales.

## **VI.4 Bioremediación Ex Situ Para el Suelo**

Las técnicas ex situ llevan menos tiempo, son más fáciles de controlar y se usan para tratar una gama más amplia de contaminantes y tipos de suelo que las técnicas in situ. No obstante, requieren la excavación y el tratamiento del suelo afectado antes de la bioremediación en sí y, a veces, incluso después. Entre las técnicas ex situ cabe señalar la bioremediación de fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y las de fase sólida en donde los suelos se colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza), en donde se agrega agua y nutrientes

### **VI.4.1 Bioremediación de Fase de Lodos**

El biorreactor de lodos, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido, y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado

Las condiciones en el biorreactor se controlan a fin de crear el medio óptimo para que estos degraden los contaminantes. Una vez concluido el tratamiento, se separa el agua de los sólidos, y se eliminan o se someten a un tratamiento posterior si todavía tienen contaminantes.

Los biorreactores pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, ya que es posible combinar controlada y eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación. Es la tecnología más adecuada cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones

El tratamiento biológico de fase de lodos puede ser relativamente rápido en comparación con otros procesos biológicos, particularmente para la arcilla

contaminada. El éxito depende en gran medida del tipo de suelo y de las propiedades químicas del material contaminado. Esta técnica es particularmente útil en los casos en que se necesitan medidas correctivas rápidas.

Aplicaciones. Los biorreactores de lodos aeróbicos, se utilizan principalmente para tratar HTP, COS no halogenados y COV. Se utilizan también reactores secuenciales de lodos aeróbicos/anaeróbicos para tratar BPC, COS halogenados, pesticidas y desechos de artillería.

### Limitaciones

Algunos factores que pueden limitar el uso y efectividad de los biorreactores son:

- El suelo debe tamizarse
- Suelos heterogéneos y arcillosos pueden generar problemas de manipulación
- Los productos intermediarios pueden ser más tóxicos que el contaminante original (en caso de explosivos o solventes clorados)
- Los residuos pueden requerir de tratamiento o disposición final

### Costos y tiempos de remediación.

Los biorreactores de lodos pueden clasificarse como una tecnología de corto a mediano plazo. El uso de biorreactores de lodos oscila entre 130 y 200 \$/m<sup>3</sup>.

## **VI.4.2 Bioremediación de la fase sólida (compostage)**

Bioremediación en fase sólida

El compostage es un proceso biológico controlado, por medio del cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables.

Se somete la tierra a un tratamiento en la superficie, con sistemas de recolección para evitar la fuga de contaminantes. Se controla la humedad, el calor, los nutrientes y el oxígeno a fin de propiciar la biodegradación para aplicar este tratamiento.

Estos sistemas son relativamente sencillos de usar y de mantener, aunque ocupan mucho lugar y la limpieza lleva más tiempo que con los procesos de fase de lodos. Los de tratamiento de fase sólida abarcan el tratamiento de la tierra, biopilas de tierra y la producción de abonos a partir de desechos.

## **VI.5 Tratamiento de la Tierra**

Este método es un tanto sencillo, se excava el suelo contaminado y se esparce la tierra en una plataforma con un sistema incorporado para recoger cualquier "lixiviado" o líquido contaminante que se escurra del suelo. Se da vuelta la tierra periódicamente para mezclar aire con los desechos. Asimismo, se controla la humedad y los nutrientes.

La bioremediación llevará más tiempo si los nutrientes, el oxígeno o la temperatura no están bien controlados. En algunos casos, la reducción de la concentración de contaminantes podría atribuirse más a la volatilización que a la biodegradación. Cuando el proceso tiene lugar en lugares cerrados donde se regulan los contaminantes volátiles que se escapan, las pérdidas por volatilización se reducen al mínimo.

### **Aplicaciones**

Se utiliza para remediar suelos contaminados con, gasolinas, HTP, HAP. Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y



toxicidad de explosivos (TNT). El uso de estrategias de composteo, se ha adoptado seriamente en los últimos años.

## Limitaciones

Algunas limitaciones del proceso son:

- (i) Necesidad de espacio
- (ii) Necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar la liberación de COV
- (iii) Incremento volumétrico del material a tratar
- (iv) No pueden tratarse metales pesados

## Costos y tiempos de remediación

El costo del composteo está en función de:

- (i) La cantidad y fracción de suelo a tratar
- (ii) Disponibilidad de agentes de volumen
- (iii) Tipo de contaminantes y proceso
- (iv) Necesidad de tratamientos previos y/o posteriores
- (v) Necesidad de equipos para el control de COV. Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses.

Los costos típicos se encuentran entre 130 y 260 \$/m<sup>3</sup>

## **VI.6 Biopilas de Tierra**

La tierra contaminada se amontona en pilas de varios metros de altura sobre un sistema de distribución de aire con el propósito de conseguir la aireación con una bomba de vacío. La humedad y los nutrientes se mantienen en un nivel óptimo para la bioremediación. Los montones de tierra pueden colocarse en lugares cerrados. Los compuestos volátiles son fáciles de controlar porque generalmente se integran a la corriente de aire que se hace pasar por la pila.

## **VI.7 Producción de Abono a Partir de Desechos**

Se mezclan desechos biodegradables con un agente que les dé más volumen, como paja, heno o mazorcas para facilitar el suministro de la cantidad óptima de aire y agua a los microorganismos.

Como tipos comunes están: La producción de abono en recipientes con agitación mecánica (los desechos se colocan en un recipiente para el tratamiento donde se mezclan y airean); y la producción de abono en hileras en donde (los desechos se colocan en pilas alargadas, o sea hileras, y se mezclan periódicamente mediante tractores o equipo similar).

## CAPITULO VII

### **La Bioremediación como Tecnología Óptima en el Tratamiento de Suelos Contaminados con Hidrocarburos**

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos son por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como por la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en la mayoría de los casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla, y además se encuentran intemperizados.

En general los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando se encuentran en contacto con ella. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto se hacen evidentes a simple vista. Si se depositan en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arrastran los compuestos solubles.

Gasolina, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo; durante su trayectoria son absorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático; Ahí se dispersan de acuerdo con la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

La característica más importante de la bioremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes. Algunos pueden ser completamente degradados, en forma tal que se cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono y agua, entonces se habla de una completa mineralización.

En sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos no atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollan capacidad degradadora. En estos casos la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos.

Una ventaja importante de la bioremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos. Es difícil hacer una comparación de costos, de ahí que conviene conocer las características de cada sitio en particular; pero en términos generales, se puede decir que es por lo menos diez veces más económica que la incineración y tres veces más económica que algunas tecnologías fisicoquímicas de inmovilización.

Este bajo costo se debe a varios factores, como son un menor gasto de energía; bajo costo de los nutrientes; y la operación en condiciones ambientales. Eso hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo, como el nuestro.

La bioremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados en compuestos inocuos, como el bióxido de carbono. Además, cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La versatilidad de esta alternativa tecnológica se basa en que puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica degradadora de la flora bacteriana autóctona; bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesario añadir microorganismos degradadores exógenos; o bien bioventeo, cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar.

En cualquiera de las opciones anteriores puede realizarse fuera del sitio (*ex situ*) si la contaminación está en el suelo superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado grandes profundidades, e inclusive el manto freático.

Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permiten colectar lixiviados de tal manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la bioremediación, el suelo puede destinarse al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas originales.

A pesar de ser la tecnología más empleada en el ámbito mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación, por ejemplo; los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente se aplicaron el composteo y la biolabranza (*land-farming*), así como el uso de reactores con cepas puras de bacterias degradadoras combinado con el de bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Posteriormente se aplicaron otras técnicas innovadoras como la bioestimulación y el bioventeo. La diferencia entre las diversas tecnologías de bioremediación se aprecia en la siguiente tabla:

**Tabla N° 3**

**Base de Funcionamiento de cada tipo de Tecnología utilizada en la bioremediación de suelos Contaminados**

<b>Tecnología</b>	<b>Base de funcionamiento</b>
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Bioaumentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad de degradar contaminantes.
Bioventeo	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular, y se revuelve periódicamente.

Además, durante la remediación de suelos y de agua subterránea contaminada por hidrocarburos se utilizan las siguientes tres técnicas principales.

**Tabla N° 4**

**Remediación de Suelo y de agua Subterránea Contaminada por Hidrocarburos**

Remediación física	Extracción por bombeo de producto libre
Remediación química	Inyección de agentes tenso-activos y extracción de agua, hidrocarburos disueltos y tenso-activos
Bioremediación	Eliminación de hidrocarburos mediante Microorganismos.

## CAPITULO VIII

### **Observación**

No todos los tipos de desechos y no todas las condiciones de los sitios son comparables. Es necesario investigar cada sitio y someterlo a pruebas por separado.

Se deben emplear criterios científicos y técnicos para determinar si una técnica es apropiada para un sitio en especial.



## CAPITULO IX

### Ventajas de la Bioremediación

- Se usan microorganismos naturales cuyo hábitat es el suelo, para descomponer sustancias peligrosas en sustancias menos tóxicas, o que no sean tóxicas.
- Es un proceso natural, eficaz en función del costo, que puede aplicarse a muchos desechos orgánicos comunes.
- Por su costo y eficiencia ofrece ventajas sobre otros sistemas utilizados para la degradación, o separación de contaminantes en suelo y agua
- El suelo puede ser reutilizado
- Las bacterias exógenas o degradadoras de los contaminantes mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan

## CAPITULO X

### Desventajas de la Bioremediación

- En las arcillas es muy difícil llevar a cabo una bioremediación (permeabilidad)
- Requiere de mucho tiempo (depende del tipo de contaminante)
- En ocasiones, las bacterias se inhiben por la alta concentración de la contaminación
- Muchas veces la disminución de hidrocarburos es por la volatilización

## **CAPITULO XI**

### **Características de las Técnicas de Bioremediación**

- Económicas: más baratas que otras tecnologías
- Efectivas: los contaminantes son realmente transformados
- Versátiles: el proceso se adapta a las condiciones del sitio según sus requerimientos
- Seguras: “amables con el ambiente”

#### **XI.1 La Bioremediación Funciona para:**

- Compuestos orgánicos en suelos y cuerpos de agua (biodegradables o biotransformables)
- Compuestos inorgánicos en cuerpos de agua (bioacumulables o biotransformables)
- Compuestos orgánicos e inorgánicos en suelos (biotransformable)

#### **XI.2 La Bioremediación no Funciona para**

- Compuestos orgánicos recalcitrantes (no son biodegradables)

## CAPITULO XII

### Conclusiones

- Los derrames de hidrocarburos generalmente se deben a fallas mecánicas o errores humanos.
- Las diferentes técnicas de remediación permiten elegir cuál es la más apropiada de acuerdo con las características y necesidades del sitio contaminado para así lograr el saneamiento adecuado conforme a las necesidades del ambiente y las posibilidades principalmente económicas de la empresa responsable del accidente.
- Existe un gran número de sitios contaminados que requieren ser saneados, lo cual implica un gran costo para llevarse a cabo; esto obliga a buscar técnicas menos costosas por lo que creemos que la técnica más acorde con este tipo de necesidades es la bioremediación, que posee características que benefician tanto a la economía como al ambiente.
- Un suelo contaminado con hidrocarburo presenta poca diversidad de microorganismos abundando aquellos que tienen la capacidad de degradar al contaminante.
- Un suelo que esta siendo biorremediado presentará abundancia de especies de microorganismos que degradaran a los compuestos químicos presentes, pues para cada componente químico de los hidrocarburos hay un determinado microorganismo que lo va a degradar el cual va a ser empleado en las técnicas de biorremediación.
- Un suelo biorremediado debe ser sometido a un monitoreo microbiológico constante a fin de observar la disminución en abundancia de microorganismos degradadores de hidrocarburos por falta de alimento y la repoblación por microorganismos propios de un suelo limpio.

## CAPITULO XIII

### Recomendaciones

Adaptar estas recomendaciones como una forma de inversión, ya que con ello se reducirá el número de accidentes y por tanto las pérdidas económicas disminuirán también.

Promover la bioremediación como forma de remediar suelos contaminados con hidrocarburos y demás sustancias químicas.

Se deben tener registros de las características químicas de los suelos antes, durante y después de la biorremediación a fin evaluar la disminución de compuesto químicos propios de hidrocarburos.

## CAPITULO XIV

### ANEXOS

#### **Fotografías tomadas de la selva peruana**

Afortunadamente, la mayoría de los derivados del petróleo son relativamente fáciles de degradar y por lo tanto razonablemente degradados por las distintas formas de degradación microbiana, las fotografías tomadas pertenecen a un suelo de la selva peruana (zona de trompeteros) impactado con borra, la borra es retirada de los tanques y puesta al suelo para efectuar el tratamiento. Lo que se almacena en el fondo de los tanques, se llama borra.

Las técnicas de biorremediación que se han recomendado como aplicable para el saneamiento de la tierra contaminada en la selva (zona de trompeteros) son el

#### **Landfarming in situ**

Mediante esta técnica se trata el suelo contaminado con hidrocarburos en el mismo sitio en el que se encuentra, sin ser excavado y trasladado a otro lugar. Esta incluye las siguientes actividades: Limpieza y preparación del terreno.

Análisis de la línea de base de niveles de contaminación.

Acopio del material de préstamo. Se preferirá material (geomembrana) para mezcla que permita obtener una elevada permeabilidad al agua y aire de la mezcla resultante.

Tendido del material para la mezcla.

Tendido del terreno.

Instalación de equipos.

Aplicación de nutrientes (50% de nitrógeno, 5% de fósforo y 1% de potasio; estos nutrientes deben ser aplicados disueltos en agua, por aspersión periódica mediante el uso de mochilas o manguera.)

Reconformado del terreno.

Volteo de la capa superficial del terreno y adición de nutrientes adicionales de acuerdo a las mediciones de la evolución de la degradación de los contaminantes. Monitoreo: Se efectuará una medición semestral durante el lapso de dos años de los sitios remediados.

**Landfarming ex situ:**

Mediante esta técnica el suelo contaminado con Hidrocarburos se transporta a un área especialmente acondicionada para tal fin. El suelo contaminado se esparcen en una capa de hasta 30 cm. De espesor, se añaden nutrientes por aspersión y el terreno se voltea periódicamente para favorecer la aireación de esta capa de suelo. La implementación de esta técnica esta sujeta a la disponibilidad de grandes áreas planas con drenaje adecuado, tales como canteras abandonadas en las inmediaciones del sitio contaminado y a la disponibilidad de vías de acceso para maquinaria pesada al sitio.

Extracción de material de canteras para remediación de suelos: Se habilitarán canteras en zonas próximas al sitio por remediar a efectos de obtener material de préstamo para el mezclado de los suelos o sedimentos contaminados con tierra nativa. La finalidad del mezclado con tierra nativa es la distribuir los hidrocarburos en el área tan uniformemente como sea práctico para minimizar concentraciones localizadas. La cantidad de material de préstamo necesario está determinada por le contenido de hidrocarburos del suelo a tratar. Generalmente los productos de petróleo pueden aplicarse hasta un 5% en peso (%TPH) como punto de partida para la Bioremediacion del terreno.





## CAPITULO XV

### Glosario

**Acuífero:** Capa o sección de tierra o estrato de roca permeable que puede almacenar agua dulce en su interior, denominada agua subterránea.

**Adsorción:** Proceso por el cual un gas, vapor, materia disuelta o partículas suspendidas son captadas o adheridas en la superficie de otro material tanto por fuerzas físicas como químicas. Ver: absorción

**Aerobio Estricto:** Organismo que necesariamente requiere de oxígeno para su respiración.

**Ambiente:** El conjunto de elementos naturales o inducidos por el ser humano, que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados

**Anaerobio:** Organismo que deriva energía necesaria para el desarrollo de su vida a partir de cambios químicos que no involucren al oxígeno.

**Autóctono:**

Propio de la zona

**Biodegradable:** Sustancia que se descomponen con relativa rapidez debido a la acción de organismos tales como bacterias y hongos.

**Biogeoquímicos:** El organismo es un sistema de tránsito de las sustancias inorgánicas, mientras en el ecosistema esas sustancias circulan entre los organismos y el medio ambiente, por lo que se les denomina ciclos. Estos ciclos reciben la denominación de biogeoquímicos, por pasar por los seres vivos (bios = vida), el suelo (geo = tierra) y estar sujetos a reacciones químicas con uso y liberación de energía.

**Biomasa:** Cantidad de materia orgánica producida o existente en un ser vivo y que se encuentra en forma de proteínas, carbohidratos, lípidos, y otros compuestos orgánicos. Se mide en peso fresco, peso seco (una vez que se ha

sometido a desecación a temperaturas moderadas), en términos energéticos (Kcal.), etc. MATERIA VIVA.

**Biota:** Todos los organismos, incluyendo animales, plantas, hongos, y los microorganismos encontrados en un área o región determinada.

**Combustible:** Un combustible es cualquier sustancia que causa una reacción ultra hiperpotagena con el oxígeno de forma violenta, con producción de calor, llamas y gases.

**Conservación:** La gestión de los recursos ambientales, aire, agua, suelo y organismos vivos, para obtener su permanencia y conseguir el nivel más alto en la calidad de vida; la gestión en este contexto incluye estudios, investigación, legislación, administración, preservación, utilización, y supone educación y formación.

**Contaminación:** La introducción al ambiente de un compuesto en cantidad tal que incrementa su concentración natural, y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de materia y energía, provocando con ello una intervención negativa en el bienestar y la salud de los organismos vivos.

**Contaminante:** Toda materia o energía que al incorporarse al ambiente resulte nociva para los organismos vivos que lo habitan, y para los bienes materiales del individuo.

**Coque:** es un combustible obtenido de la destilación de la hulla calentándola a temperaturas muy altas en hornos cerrados que la aíslan del aire, y sólo contiene una pequeña fracción de las materias volátiles que forman parte de la misma. Es producto de la descomposición térmica de carbones bituminosos en ausencia de aire.

Cuando la hulla se calienta, desprende gases, que son muy útiles industrialmente, entonces nos queda el carbón de coque. Es liviano y poroso.

**Dióxido de Carbono:** Gas compuesto por carbono y oxígeno, es producido por la respiración y descomposición de desechos orgánicos. Formula: CO<sub>2</sub>. ANHIDRIDO CARBÓNICO.

**Desarrollo sustentable:** Proceso participativo para mejorar continuamente calidad de vida de las actuales y futuras generaciones, que implica el respeto a naturaleza y la distribución equitativa de los beneficios del progreso

**Ecosistema:** La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el medio físico, en un espacio y tiempo determinados

**Encapsulación:** consiste en aislar los residuos en una **matriz** que evite su exposición a los posibles agentes que puedan facilitar su dispersión.

**Evaluación de impacto ambiental:** Procedimiento mediante el cual las autoridades competentes determinan la procedencia o no de obras o actividades específicas, estableciendo en su caso, las condiciones a que éstas deban sujetarse para evitar o atenuar efectos negativos en el equilibrio ecológico o el ambiente  
**Impacto ambiental:** Todo aquel efecto positivo o negativo ocasionado por diversas acciones inherentes a proyectos de desarrollo, sobre los factores naturales, sociales y culturales en un lugar y tiempo determinados

**Fisiología:** Estudio del funcionamiento normal de los organismos vivos.

**Fenantreno:** Compuesto aromático policíclico, el fenantreno es una sustancia cristalina incolora, con un olor aromático débil .se usa en la fabricación tinturas, explosivos y drogas, y en la investigación biológica.

**Heterótrofo:** Organismos que se alimentan de compuestos orgánicos proveniente de otros organismos o de los subproductos de éstos.

**Hidrogeología:** La hidrogeología es una rama de las ciencias geológicas que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación. Es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión,

movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, etc).

**Intemperización:** Cambios ambientales (temperatura, luz, viento etc.) a los que la roca sólida se encuentra expuesta en la superficie terrestre, experimentando demolición y degradación.

**Inoculación:** introducción de una bacteria.

**Inocuo:** inofensivo, que no causen daño.

**Lixiviado:** Líquido generado por escurrimiento de lluvias, sustancias derramadas y condensación de vapores de residuos depositados en rellenos sanitarios, basureros y confinamientos controlados. Es el producto del lavado, reacción, arrastre y percolación de residuos enterrados y contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos. Es una mezcla líquida de color café oscuro, casi negro. Se considera muy peligroso por su alta probabilidad de contaminar los depósitos (reservas) de agua de los subsuelos ubicados por debajo de su lugar de generación.

**Macroscópico:** Dícese del objeto o fenómeno cuyas dimensiones permiten apreciarlo a simple vista.

**Meteorización:** es la alteración que se produce en las rocas al entrar en contacto con la atmósfera.

**Microscópico:** Un cuerpo microscópico es un objeto que por su tamaño, es imposible verlo a simple vista, se necesitan aparatos como microscopios electrónicos para poder verlo.

**Microflora:** Comprende algas microscópicas, bacterias y hongos. Generalmente se refiere a la flora del suelo.

**Microorganismo:** Organismo microscópico, como bacterias, hongos, algas unicelulares y protozoarios. Vulgarmente son conocidos como microbios.

**Micro nutrientes:** Sustancias minerales que las plantas necesitan, pero en cantidades muy pequeñas, es decir a manera de trazas (que no se pueden medir por métodos químicos convencionales).

**Mineralización:** es la degradación completa de moléculas orgánicas relativamente complejas a bióxido de carbono, es la descomposición a dióxido de carbono, agua, y compuestos celulares

**Mitigación:** Implementación deliberada de decisiones o actividades diseñadas para reducir los impactos indeseables de una acción propuesta sobre el ambiente afectado.

**Monitoreo:** Observación, medición y evaluación repetitiva y continua de información sobre salud y/o ambiente, o datos técnicos con propósitos definidos, de acuerdo con esquemas preestablecidos en el espacio y el tiempo, y utilizando métodos comparativos para inferir y reunir información.

**Nivel freático:** Altura que alcanza la capa acuífera subterránea más superficial.

**Nutriente:** Término genérico para cualquier sustancia que pueda utilizarse en los procesos metabólicos del organismo.

**Percolación:** Filtración del agua hacia las capas profundas de un terreno saturado. El agua puede proceder de la lluvia o de los regadíos. Penetración del agua a través del suelo hacia la capa de agua subterránea o napa freática.

**Prevención:** El conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro del ambiente

**Protección:** El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente, y prevenir y controlar su deterioro.

**Recalcitrantes:** los microorganismos no poseen enzimas para degradarlos. De aquí que se consideren no biodegradables o recalcitrantes.

**Residuos peligrosos:** Todos aquellos residuos en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológico-infecciosas, irritantes o mutagénicas, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente

**Subsecuente:** se refiere a subsiguiente, siguiente, sucesivo.

**Suelos Intemperizados:** son suelos contaminados por largos períodos de tiempo.

**Sustrato:** Materia donde se desenvuelven los diversos seres vivos del ecosistema tanto terrestre como acuático.

**Primera ley de la Termodinámica:** la primera ley no es otra cosa que el principio de conservación de la energía aplicado a un sistema de muchísimas partículas principio que establece que la energía puede transformarse de una forma a otra, pero que nunca puede crearse o destruirse.

**Turbosina:** Derivado del petróleo crudo producido por destilación fraccionada

## CAPITULO XVI

### Bibliografía

El presente trabajo se ha realizado consultando diferentes fuentes por vía informática.

<http://www.tesis.bioetica.org/pab2->

[4,htm,http://www.monografias.com/trabajos20/remediación-suelos.shtml](http://www.monografias.com/trabajos20/remediación-suelos.shtml)

<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/consultapublicacion.htm/?id-Instituto>  
Nacional de Ecología (INE) 2002.

[http://www.ine.gob.mx/pub=3728id-Petróleos mexicanos \(PEMEX\) 2001. Informe 2001: Seguridad, salud y medio ambiente. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, PEMEX, México. Tema=98dir=consulta; www.imt.mxpublicaciones@imt.mx](http://www.ine.gob.mx/pub=3728id-Petróleos%20mexicanos%20(PEMEX)%202001.%20Informe%202001:%20Seguridad,%20salud%20y%20medio%20ambiente.%20Dirección%20Corporativa%20de%20Seguridad%20Industrial%20y%20Protección%20Ambiental,%20PEMEX,%20México.%20Tema=98dir=consulta;www.imt.mxpublicaciones@imt.mx)