

FITORREMEDIACION: UNA ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE  
SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

MARLON SERRANO GOMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE QUIMICA  
ESPECIALIZACION QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2006

FITORREMEDIACION: UNA ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACION DE  
SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

MARLON SERRANO GOMEZ

Monografía para optar al título de Especialista en Química Ambiental

Director  
Biólogo RICARDO RESTREPO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE QUIMICA  
ESPECIALIZACION QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2006

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	17
ABSTRACT	19
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO TEÓRICO	23
1.1 CONTAMINACIÓN DEL SUELO	23
1.1.1 Generalidades	23
1.1.2 El medio ambiente en Colombia	24
1.1.3 Efecto de los contaminantes	25
1.1.4 Fuentes de Contaminación	25
1.1.4.1 Contaminación por hidrocarburos en Colombia	31
1.2 REMEDIACIÓN DEL SUELO	33
1.2.1 Técnicas tradicionales	33



1.2.2.1 Principales características de los métodos de biorremediación	38
1.2.2.2 Ventajas y desventajas de la biorremediación	38
1.3 FITORREMEDIACIÓN	39
1.3.1 Definición	39
1.3.2 Fitorremediación vs técnicas tradicionales	40
1.3.3 Mecanismos de fitorremediación	40
1.3.3.1 Fitoextracción	41
1.3.3.2 Fitoestabilización	43
1.3.3.3 Fitodegradación	43
1.3.3.4 Rizofiltración	46
1.3.3.5 Fitovolatilización	46
1.3.3.6 Fitoestimulación	47
1.3.4 Plantas utilizadas en fitorremediación	49
1.3.5 Condicionantes en un proceso de fitorremediación	55
1.3.6 Ventajas y limitaciones de la fitorremediación	59
1.4 FITORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS	60
1.4.1 Consecuencias de la industria del petróleo	60
1.4.2 Fitorremediación una tecnología potencial para los trópicos	61
1.4.3 Fitorremediación de hidrocarburos	62

1.4.3.1 Degradación microbiana de los contaminantes orgánicos	64
1.4.3.2 Composición de los hidrocarburos	66
1.4.4 Especies tropicales potenciales en la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos	69 77
1.4.5 Influencia de los factores ambientales en los procesos de fitorremediación	82
2. CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	85

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Mecanismos de fitorremediación	28
Tabla 2. Plantas hiperacumuladoras de metales	39
Tabla 3. Leguminosas colectadas en suelos contaminados con petróleo	58
Tabla 4. Gramíneas colectadas en suelos contaminados con petróleo	59
Tabla 5. Otras especies de herbáceas (leguminosas o gramíneas) colectadas en suelos contaminados con petróleo	60

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Captación de metales (níquel) por fitoextracción	29
Figura 2. Destrucción de contaminantes orgánicos por fitodegradación	31
Figura 3. Proceso de rizofiltración	33
Figura 4. Procesos de fitorremediación	35
Figura 5. Mecanismos principales para la fitorremediación de hidrocarburos	48
Figura 6. Plantas utilizadas para la fitorremediación de suelos Contaminados	55
Figura 7. Simbiosis leguminosa y <i>Rhizobium sp.</i>	60

## RESUMEN

### TITULO\*: FITORREMEDIACION: UNA ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

Marlon Serrano Gómez\*\*

**Palabras claves:** fitorremediación, biorremediación, contaminación, hidrocarburos, suelos.

#### Contenido

Las actividades en la extracción del petróleo, involucran riesgos de derrames accidentales sobre los ecosistemas terrestres, implicando alteraciones en la estructura y naturaleza química del suelo (Saterbak, *et al.* 1999); las cuales pueden ser directas (contacto superficial, efectos tóxicos sobre organismos y obstrucción del intercambio de materia y energía) e indirectas (modificaciones de las condiciones físicas y nutricionales del suelo). (Prado, *et al.* 1995 y Block, *et al.* 1993).

Desde el punto de vista de la opinión pública, la contaminación del suelo no ha recibido gran atención, al resultar normalmente menos notoria que la contaminación del agua o del aire. Sin embargo es un problema de primera magnitud, debido a que el suelo es un soporte insustituible de la vida sobre la tierra.

Desde la mitad de la década de los 80s, la biorremediación se ha utilizado para recuperar suelos contaminados por residuos de la actividad industrial y doméstica

---

\* Trabajo de grado

\*\* Escuela de Química, Especialización en Química Ambiental, Ricardo Restrepo.

(Block, et al, 1993). Los procesos de biorremediación, evalúan la degradación del petróleo en ecosistemas terrestres por medio de microorganismos asociados a las raíces de las plantas.

La fitorremediación, es una herramienta natural, efectiva y de muy bajo costo en la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos, la cual se basa en la buena elección de algunas especies vegetales capaces de degradar o disminuir la toxicidad presente en el suelo y de esta manera lograr un proceso de recuperación de las áreas afectadas.

Con base en información bibliográfica, se plantean unas pautas a considerar en un proceso de fitorremediación, como es la identificación de las especies más apropiadas dadas las condiciones edáficas y la evaluación del proceso de restablecimiento de las comunidades bióticas y de las condiciones normales en el sistema alterado.

## **ABSTRACT**

### **TITLE\* : PHITOREMEDIATION: AN ALTERNATIVE FOR THE SOIL RECOVERY CONTAMINATED BY HYDROCARBONS**

Marlon Serrano Gómez\*\*

**Key words:** Phytoremediation, bioremediation, soil, hydrocarbon, soil, extraction.

## **CONTENT**

The activities performed during the extraction of oil involve risks related to accidental spillages on the land ecosystems, which imply alterations in the structure and chemical nature of soils (Saterbark, et al. 1999); which may be direct (superficial contact, toxic effects on the organisms and obstruction in the interchange of matter and energy) and indirect (modifications of the physical and nutritional conditions of soils). (Prado, et al. 1995 and Block, et al. 1993).

From the public opinion's point of view, the soil pollution has not gotten much attention, which turns it less evident than water pollution or air pollution. However, it is a problem of great magnitude, due to the fact that the soil is an irreplaceable support of life on earth.

---

\* Work of degree

\*\* School of Chemistry, Specialization in Environmental Chemistry, Ricardo Restrepo.

Since the mid 80's, bioremediation has been used to recover the soils polluted by waste coming from the industrial and domestic activity (Block, et al, 1993). The bioremediation processes evaluate the degradation of oil in land ecosystems by means of micro-organisms associated to the plants' roots.

The phytoremediation is a natural and effective tool of a very low cost for the recuperation of soils polluted by hydrocarbons, which is based on the good election of some vegetable species able to degrade o decrease the toxicity present in the soil and, therefore, achieve in this way a process of recuperation of the affected areas.

Based on the bibliographical information, some guidelines are proposed to consider in a process of phytoremediation, which is the identification of the most appropriate species according to the soil conditions as well as the evaluation of the process of re-establishment of the biological communities and the normal conditions in the system altered.

---

## INTRODUCCIÓN

La extracción y transporte de petróleo están afectando los ecosistemas terrestres (suelo) desde hace más de 40 años, en los campos de producción y a lo largo de los recorridos de los oleoductos, situación que ha provocado alerta y preocupación en Colombia por el impacto que se produce en el ecosistema, por ello, se hace necesario establecer mecanismos que permitan acelerar los procesos naturales de recuperación ecológica en las zonas afectadas por derrames de hidrocarburos mediante técnicas que permitan restaurar las áreas contaminadas.

La búsqueda de soluciones para disminuir la contaminación del suelo por hidrocarburos, radica en que éste es un medio insustituible de la vida sobre la tierra (Rodríguez-Maroto, *et al.*, 1993). Además, el transporte de los hidrocarburos en el suelo por su punto de fluidez es muy lento comparado con el agua; esta lentitud provoca un problema de mayor extensión en el tiempo para los organismos allí presentes. Entre los organismos más afectados se encuentran las plantas, las cuales pueden estar directamente perjudicadas en sus procesos fisiológicos por el contacto con estos contaminantes (hidrocarburos), sin embargo, las plantas presentan características que las tornan más atractivas para ser utilizadas en proyectos de biorremediación, como: absorción directa y posterior transformación a compuestos menos tóxicos (Erickson, *et al.*, 1994), oxigenación de la rizosfera, liberación de exudados para estimular el proceso de degradación y la transpiración elevada controlando el transporte de contaminantes orgánicos en el suelo.

Dentro de los procesos biológicos desarrollados para resolver problemas de contaminación del suelo (biorremediación), la fitorremediación es una técnica o

herramienta para seleccionar y utilizar especies de plantas capaces de extraer, asimilar, transformar y descomponer contaminantes presentes en suelos, sedimentos y sistemas acuíferos (Moreno y Corseuil, 1997 y Banks, *et. al.* 1997), logrando un proceso de recuperación ecológica de ecosistemas afectados y fortaleciendo la relación simbiótica entre las raíces de las plantas y los microorganismos, facilitando la transformación de los compuestos tóxicos del suelo.

Por esto, se plantea evaluar algunas técnicas utilizadas en fitorremediación, basado en revisión bibliográfica, como un tratamiento terciario para la recuperación ecológica de un ecosistema tan vital como el suelo o la descontaminación de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento; identificando las especies vegetales potenciales para esto (reportadas por otros autores) y definiendo las condiciones ideales (nutrientes, riego, textura de suelo) para el crecimiento y desarrollo de especies fitorremediadoras en suelos contaminados.

Por ello, se hace necesario establecer un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones que permitan abordar el tema de la fitorremediación, es decir tratar de integrar el tema dentro de un ámbito donde éste cobre sentido como una alternativa viable tanto para el hombre como para el medio.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 CONTAMINACIÓN DEL SUELO

**1.1.1 Generalidades.** Se entiende por suelo normalmente, aquella zona de la litosfera comprendida entre la superficie hasta la primera capa impermeable. Consiste fundamentalmente, en una mezcla de sólidos minerales, materia orgánica, agua y aire; mientras que un suelo contaminado se define como la alteración de la calidad de toda porción de terreno, superficial o enterrado, producida por actividades antrópicas como consecuencia directa o indirecta del vertido de residuos tóxicos y peligrosos, de modo que se impide, reduce o amenaza el desempeño de alguna de sus funciones de uso. (Arnaiz, J., 1991)

El origen de los suelos contaminados es tan diverso como la gama de actividades directa o indirectamente inducidas por el hombre: por ejemplo la utilización de pesticidas organoclorados que contaminan gravemente el terreno y por medio de las escorrentías, llega a las masa de agua dulce superficial con el consiguiente peligro para la salud.

Su incidencia sobre la salud humana o los ecosistemas se pone de manifiesto a través de las diferentes vías de contacto: aire, agua superficiales y agua

subterráneas, así mismo en la población expuesta por estas vías. En cualquier caso, el transporte de los contaminantes en el suelo es muy lento comparado con el desplazamiento en el aire o en el agua superficial, y ésta es la causa más probable de que la contaminación del suelo haya sido considerada menos importante.

**1.1.2 El medio ambiente en Colombia.** En conmemoración de sus 10 años, en Julio de 2004, el IDEAM entrega al país el Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia, que incluye entre otros temas nuevas cifras sobre las coberturas vegetales en el territorio nacional, índices de deforestación, desaparición de los nevados en el país, el estado actual de los diferentes recursos (agua, aire, suelo, biodiversidad y coberturas vegetales), a nivel nacional y en algunos casos, regional.

Entre los datos incluidos en el informe se presenta, un promedio de 101 mil hectáreas anuales de bosques se perdieron en Colombia durante los años 1994 y 2001, y aproximadamente el 0.09% del país en el año 2002 tenía un área cultivada de coca de 102.071 has, distribuidas en 21 de los 32 departamentos de Colombia. Estos y otros datos importantes están incluidos en el Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables que el IDEAM entrega al país.

La publicación también da a conocer el diagnóstico nacional más reciente de la gravedad y los efectos de los procesos de degradación de suelos y tierras por desertificación, erosión, salinización y deslizamientos de tierra; la transformación y deterioro de los ecosistemas naturales tales como bosques, páramos, sabanas, etc.; los listados actualizados de las especies amenazadas de Colombia; la lista preliminar de plantas invasoras en el territorio nacional, así como los efectos de la introducción de las especies exóticas en el ecosistema y en la biodiversidad marino-costera, entre otros temas.

Con relación a las concentraciones de hidrocarburos del petróleo en la región Caribe, las mayores concentraciones aparecen en la zona de Cartagena, donde el nivel en aguas supera ampliamente la norma internacional ( $10 \mu\text{g/l}$ ) para aguas no contaminadas (UNESCO, 1974; en Garay, 1992 y 2002). Valores promedio de hasta  $50 \mu\text{g/l}$  han sido reportados en estaciones cercanas a los vertimientos industriales, refinería y fondeaderos de buques en la Bahía. Para las aguas del Golfo de Morrosquillo, Barranquilla, Santa Marta y San Andrés, se reportan valores entre  $5$  y  $10 \mu\text{g/l}$  (Garay, 1992 y 2002). Mientras que la zona de la Guajira presenta las menores concentraciones con valores promedio entre  $0,5$  y  $5 \mu\text{g/l}$ .

**1.1.3 Efectos de los contaminantes.** El suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en el comportamiento de los suelos. Los efectos desfavorables de los contaminantes en el suelo como sistema son (Porta, 1994):

- Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al superarse la capacidad de aceptación del suelo.
- Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar determinados elementos en la cadena trófica.
- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia.
- Disminución de las funciones de soporte de actividades de esparcimiento. Los espacios contaminados presentan problemas de salubridad para los usuarios.

**1.1.4 Fuentes de contaminación.** La contaminación de los suelos es provocada por diversas actividades antropogénicas, tales como:

- Mineras. Cientos de años de actividades mineras, han dejado montañas de residuos mineros conteniendo materiales potencialmente tóxicos, los cuales se exponen a las poblaciones, la flora y la fauna, a través del suelo, el aire y el

agua. En otros casos, existe el riesgo de fenómenos de bioacumulación en las distintas fases de las cadenas alimenticias (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina, 2001; Porta, 1994).

- Explotación de petróleo. Las intensas actividades petroleras y de obtención de los derivados regiones del país y en el mar, incluidas aquellas donde existe una vulnerabilidad ecológica, han contribuido a una severa contaminación por hidrocarburos y otro tipo de sustancias potencialmente tóxicas, que han penetrado al suelo y contaminado los cuerpos de agua (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina, 2001; Porta, 1994).

La industria petrolera es una de las más contaminantes. Tan solo 122 empresas en el mundo son responsables del 80% de la contaminación mundial y cinco de ellas, las famosas "cuatro hermanas" petroleras (Exxon-Mobil Oil, BP Amoco, Shell y Chevron-Texaco) son responsables del 10% de todas las emisiones de carbono en el planeta. Una gran contaminación de la tierra, aire y agua se producen durante el proceso de exploración, extracción, transporte y quema de combustibles fósiles, incluso en comercialización. Todo ello requiere de infraestructura como oleoductos, gasoductos, plataformas, carreteras, entre otras, amenazando con la deforestación de áreas naturales protegidas.

Según Oil Watch, por cada pozo de exploración se deforestan 2 hectáreas de bosques. "En la perforación exploratoria de petróleo y gas, se generan ciento de miles de pies cúbicos de desechos tóxicos que son vertidos en el ambiente sin ningún tratamiento", agregan. Esta contaminación también destruye la biodiversidad marítima y terrestre, la soberanía alimentaria de los pueblos y las economías ligadas a la naturaleza. Pese al conocimiento de que la quema de combustibles fósiles es la principal causa del Cambio Climático, las inversiones en energía fósil han sido 100 veces mayores que en otras formas de energía.

- Actividades agrícolas. El empleo de agroquímicos en actividades agropecuarias, frecuentemente mediante técnicas inadecuadas, constituye una de las formas de contaminación más importante, que impactan no sólo los suelos en donde se aplican, sino que llegan a través de los ríos hasta las zonas costeras afectando las especies marinas (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina, 2001; Porta, 1994).
- Actividades industriales. La producción de bienes de consumo ha generado importantes focos de contaminación, en primer término por la falta de conciencia ecológica que prevaleció por muchos años, y en segundo por el manejo inadecuado de materiales y todo tipo de residuos, lo cual representa un serio problema en aquellos lugares donde se desarrollan dichas actividades (Medina, 2001; Porta, 1994).

- Instalaciones de servicios. El riesgo de contaminación de acuíferos, por fugas en contenedores de materiales peligrosos, así como por derrames continuos de lubricantes, solventes orgánicos y otro tipo de sustancias, por prácticas inadecuadas en su manejo, principalmente en estaciones de servicio de gasolina, talleres de reparación de autotransportes, estaciones e instalaciones de ferrocarriles, terminales de autobuses, aeropuertos y diversas industrias (Medina, 2001; Porta, 1994).
- Uso de aguas residuales en irrigación de campos agrícolas. El empleo de aguas residuales para riego de cultivos agrícolas por su alto contenido de materia orgánica, que actúa como fertilizante, y otras sustancias nocivas, implica el riesgo de que los suelos y los cultivos se contaminen con los residuos químicos provenientes de descargas industriales y municipales (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina, 2001; Porta, 1994).
- Basureros a cielo abierto. La disposición inadecuada de los residuos sólidos municipales, que pueden contener residuos peligrosos, representa una seria amenaza de contaminación de los suelos y cuerpos de agua (Medina, 2001).
- Metales pesados. Las principales sustancias que se consideran causantes principales de problemas de contaminación son los metales (plomo, cadmio, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, arsénico, molibdeno, mercurio),

compuestos inorgánicos, compuestos aromáticos y poliaromáticos, hidrocarburos clorados y agroquímicos. Se considera metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a  $5 \text{ g/cm}^3$  cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor al 0.01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es este el caso de As, B, Ba y Se (García y Dorronsoro, 2001).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos: **a)** oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades traza por animales y plantas, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasando cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Mo, Mn, Ni, Se y Zn (Dorronsoro, 2001; Nedelkoska y doran, 2000); y **b)** metales pesados sin función biológica, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva a disfunciones en los organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro vías diferentes: pueden quedar retenidos en el suelo, ya que disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de absorción y precipitación; pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse en las cadenas tróficas; pasar a la atmosfera por volatilización y pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas (García y Dorronsoro, 2001).

La contaminación de suelos y las aguas subterráneas por metales pesados es uno de los principales problemas medioambientales en los países industrializados y en vías de desarrollo. Según estudios realizados por el Departamento de Energía de Estados Unidos (Riley *et al*, 1992), para una población de 18 plantas generadoras de energía e industriales y 91 vertederos de los residuos generados en ellas, en más del 50% de las plantas generadoras de energía y en el 35% de los vertederos aparece contaminación de suelos por metales. Asimismo, en el 60% de las plantas y el 50% de los vertederos se detectó contaminación de las aguas subterráneas por estos mismos elementos.

**1.1.4.1 Contaminación por hidrocarburos en Colombia.** La distribución de productos combustibles es una rama del sistema energético Nacional y, por tanto, resulta vital para el desarrollo del país. Esta labor la realiza la Empresa

Colombiana de Petróleos (ECOPETROL S.A.) a través de las gerencias de Oleoductos y Poliductos de la Vicepresidencia de Transporte (VIT), de las cuales forma parte una extensa red de líneas de transporte por medio de las cuales los productos combustibles derivados del petróleo son transportados desde las refinерías hasta los centros de distribución o consumo masivo. Debido a la gran inversión de capital que representa la planeación, diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de transporte de hidrocarburos por tubería, se ha desarrollado una tecnología para trasladar por una sola línea (poliducto) distintos productos sin afectar considerablemente sus especificaciones de calidad. Esta tecnología, a pesar de ser relativamente nueva (desde 1900 en adelante), ha sido y seguirá siendo objeto de profundos estudios, tendientes a optimizar los parámetros de operación y minimizar los costos de la misma. Pese a que éste es el método más rentable de transporte de productos derivados del petróleo, presenta una desventaja, cual es la de generar un volumen de producto que, por sus características, no puede considerarse dentro de las especificaciones de calidad de los productos que lo han formado. Este volumen, casi inherente a la tecnología del sistema y cuya supresión es imposible, sólo se puede reducir a valores técnica y económicamente manejables con la ayuda de estudios y políticas de optimización de la operación.

En la naturaleza, los hidrocarburos son eliminados del suelo por cualquiera de los siguientes procesos: biodegradación, emisión, percolación y drenaje superficial.

En los últimos años se ha prestado mucha atención a los métodos biológicos tanto para el tratamiento de residuos industriales como para la recuperación de sitios contaminados. Estos métodos se conocen genéricamente como procesos de biorremediación y tienen como objetivo el aprovechamiento y optimización de las capacidades biodegradadoras naturales.

## **1.2 REMEDIACIÓN DEL SUELO**

Las tecnologías utilizadas para el tratamiento de suelos contaminados, han generado grandes avances en los últimos años, aunque existen aun muchos problemas por resolver. Los métodos utilizados para la eliminación de los contaminantes del suelo implican procesos físicos, químicos y biológicos. La utilización del método mas apropiado en cada caso implica también una dificultad añadida.

**1.2.1 Técnicas tradicionales.** Las técnicas tradicionales de remediación del suelo contaminado involucran prácticas convencionales de ingeniería civil, aplicadas individualmente o en grupo. En estos procesos físicos, químicos y térmicos principalmente se requiere remover físicamente el suelo del sitio

contaminado o bien minimizar el riesgo de exposición (Brennan y Shelley, 1999; McIntyre, 2003).

Las técnicas tradicionales se clasifican en tres grupos:

- Contención. Incluye las técnicas denominadas de cobertura, barreras verticales y barreras horizontales. Al aplicar estos procesos el material contaminado se mantiene en su lugar, de manera que no entra en contacto con personas ni con el medio ambiente (Mcintyre, 2003; Mulligan, 2001; Seoane, 1999; US EPA, 1997).
- Solidificación y estabilización. Es el grupo de procesos en los que se mezclan o inyectan agentes de tratamiento al material contaminado para obtener residuos sólidos, reducir la solubilidad del contaminante, disminuir el área de contaminación expuesta o limitar el contacto entre fluidos y contaminantes (Mulligan, 2001; Seoane, 1999; US EPA 1997; US EPA, 2003).
- Separación y concentración. A esta categoría se encuentran las técnicas de lavado del suelo, enjuague *in situ* y pirometalurgia (Mcintyre, 2003; Mulligan, 2001; Seoane, 1999, US EPA, 1997; US EPA, 2003b).

Las técnicas antes mencionadas presentan varias desventajas como un alto costo, un elevado consumo de energía, destrucción del sitio contaminado y problemas de logística.

**1.2.2 Biorremediación.** Debido a las limitaciones que presentan las tecnologías tradicionales de remediación surge la necesidad de utilizar técnicas alternativas como la biorremediación. Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico (como ácidos grasos y CO<sub>2</sub>) o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

Los factores que influyen en el proceso biorremediación son: temperatura, disponibilidad de oxígeno y nutrientes, luz, humedad, pH del medio, estructura química de la sustancia a ser degradada.

Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza (por lo cual el proceso se denomina "atenuación natural"), sin embargo la velocidad de tales cambios es baja. Mediante una adecuada manipulación, sistemas biológicos pueden ser optimizados para aumentar la velocidad de cambio o degradación y

así usarlos en sitios con una elevada concentración de contaminantes. En general, las manipulaciones involucran producción e inmovilización de enzimas en determinados soportes y cambios genéticos a algunas cepas bacterianas.

Diversos contaminantes pueden ser eliminados por biorremediación: pesticidas, herbicidas, petróleo y sus hidrocarburos derivados, gasolina y metales pesados, entre otros, lo cual demuestra la validez de esta técnica para proteger el medio ambiente y reducir el uso de sustancias tóxicas.

Los procesos mediante los cuales funciona la biorremediación se pueden dividir en 3 grupos:

Degradación enzimática. Consiste en la utilización de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Dichas enzimas son previamente producidas en bacterias transformadas genéticamente con el gen que codifica para cada enzima en particular. Esta aplicación de la biotecnología lleva décadas en el mercado y hoy en día las compañías biotecnológicas ofrecen las enzimas y también los microorganismos genéticamente modificados.

Remediación microbiana. La remediación microbiana consiste en el uso de los microorganismos directamente en el foco de contaminación. Estos microorganismos pueden ya existir en ese sitio o pueden ser originarios de otros

ecosistemas en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado (inoculación). En el primer caso, muchas veces suelen administrarse más nutrientes (adición de nutrientes) al medio con el fin de acelerar el proceso de biodegradación. Otra posibilidad es la de introducir cepas modificadas por técnicas de ingeniería genética, a las cuales se les introdujo el gen que codifica para una o más enzimas detoxificadoras (uso de microorganismos modificados genéticamente).

Fitorremediación. Se define como el conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados por medio de la utilización de plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas. Consiste en utilizar la capacidad de ciertas plantas (terrestres, acuáticas, leñosas, etc.) y los cultivos *in vitro* derivados de ellas con el fin de remover, contener o transformar productos contaminantes del entorno.

Las bases conceptuales de la fitorremediación provienen de la identificación de plantas que hiperacumulan metales. Existen plantas que tienen esta capacidad intrínseca pero también pueden obtenerse plantas con estas capacidades por medio de técnicas de ingeniería genética.

**1.2.21. Principales características de los métodos de biorremediación.** Los procesos de biorremediación presentan las siguientes características:

- **Adición de nutrientes.** Aplicado para superar la principal limitación sobre la velocidad de la biodegradación natural de petróleo.
- **Inoculación.** Aplicado para aprovechar la ventaja de las especies de microorganismos más eficientes en la degradación de petróleo.
- **Uso de microorganismos modificados genéticamente.** A pesar de la amplia variedad de microorganismos naturales, en algunos casos es necesario la utilización de microorganismos modificados. Esto permite degradar componentes de petróleo que no son degradados por microorganismos naturales. Su desarrollo y utilización debe afrontar importantes restricciones legales

### **1.2.2.2 Ventajas y desventajas de la biorremediación.**

#### Ventajas

- Generalmente sólo origina cambios físicos menores sobre el medio
- Cuando se usa correctamente no produce efectos adversos significativos
- Puede ser útil para retirar algunos de los compuestos tóxicos del petróleo

- Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas
- Es menos costosa que otras tecnologías

### Desventajas

- Para muchos tipos de vertidos su efectividad no ha sido determinada
- Muy difícil aplicación en el mar
- El tiempo necesario para actuación es largo
- Su implementación es específica para cada lugar contaminado
- Su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y las características del vertido.
- Requiere de grandes extensiones para su implementación

## **1.3 FITORREMEDIACIÓN**

**1.3.1 Definición.** Es el uso de plantas y su microbiota asociada, para remover, contener, o reducir contaminantes ambientales. (Cunningham *et al.*, 1996). Los contaminantes pueden ser orgánicos e inorgánicos y se encuentran presentes en los suelos, los sedimentos, las aguas superficiales y las aguas subterráneas (Tsao, 2003). Éstos abarcan los metales pesados, los metaloides, los radionuclides, las sales, los agroquímicos, los hidrocarburos, los compuestos organoclorados y las aguas residuales.

**1.3.2 Fitorremediación vs. técnicas tradicionales.** La fitorremediación es considerada en todo el mundo como una tecnología innovadora para el tratamiento de residuos tóxicos – sólidos o líquidos - con el objeto de recuperar suelos y aguas contaminadas.

Si bien la factibilidad de su empleo aún está siendo evaluada desde diferentes perspectivas, los estudios que se disponen coinciden en señalar que se trata de una técnica más limpia, simple, efectiva y aún de menor costo, en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, tales como el reemplazo de suelos, la solidificación, el lavado o la incineración.

Estos últimos, han sido asociados con altos índices de contaminación atmosférica, y, por otra parte, requieren de altos costos. Otra ventaja que ofrece la fitorremediación sobre los métodos tradicionales es que permite la eliminación selectiva de contaminantes y su recuperación para futuros usos.

**1.3.3 Mecanismos de fitorremediación.** Entre las diversas categorías de la fitorremediación se destacan: la fitoextracción, la fitoestabilización, la fitodegradación, la rizofiltración y la fitovolatilización, de acuerdo a la contaminación tratada (Tabla 1).

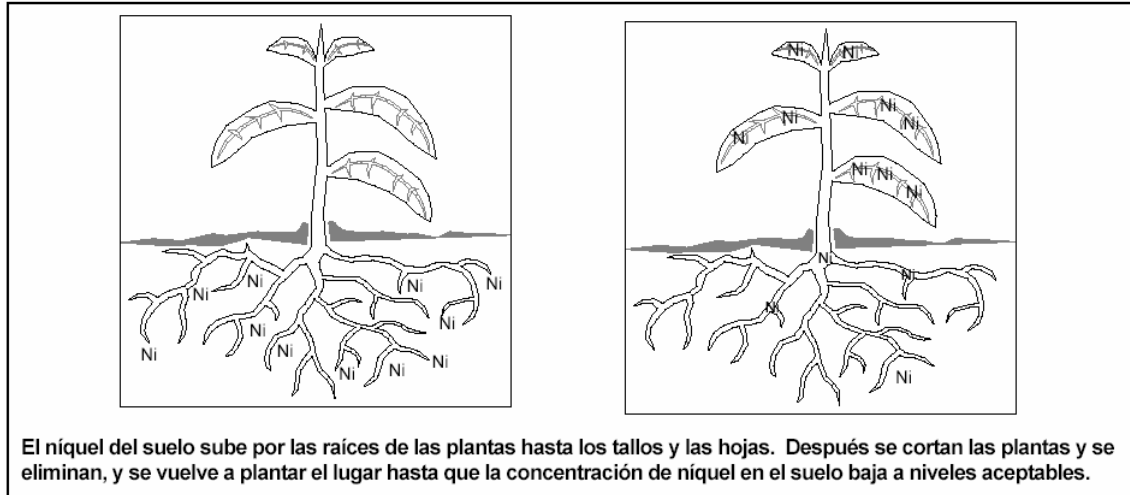
**1.3.3.1 Fitoextracción.** Conocida también como fitoacumulación, es la captación de metales contaminantes por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos, algunas plantas consumen cantidades extraordinarias de metales en comparación con otras (Figura 1a y 1b).

**Tabla 1.** Mecanismos de fitorremediación

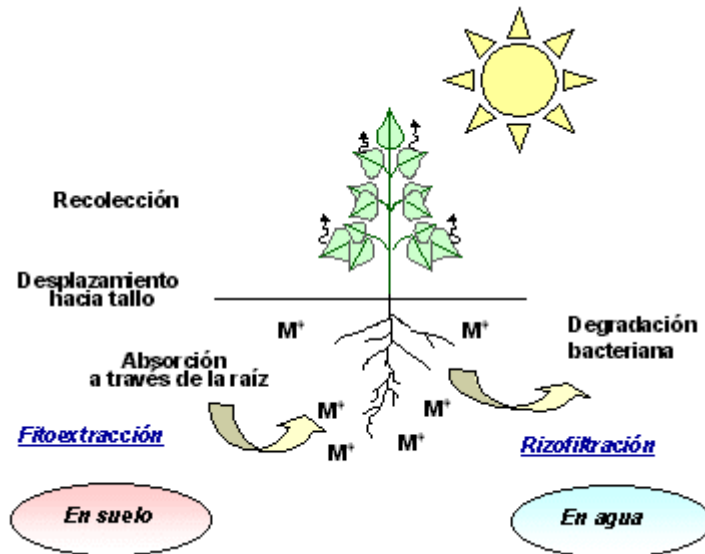
<b>Tipo</b>	<b>Proceso involucrado</b>	<b>Contaminación Tratada</b>
<b>Fitoextracción</b>	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente, la parte aérea)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc.
<b>Rizofiltración</b>	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc, isótopos radiactivos, compuestos fenólicos
<b>Fitoestabilización</b>	Las plantas tolerantes a los metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje de napas subterráneas o al aire.	Lagunas de desechos de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados
<b>Fitoestimulación</b>	SE usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
<b>Fitovolatilización</b>	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
<b>Fitodegradación</b>	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DTN, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: EPA542-F-96-025. Medidas Fitocorrectivas Septiembre, EUA, 1996

Figura 1. Captación de metales (níquel) por fitoextracción



Fuente: EPA542-F-96-025. Medidas Fitocorrectivas Septiembre, EUA, 1996



Fuente: Miliarium Aureum, S.L. Boletín Informativo. 2001. [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)

Se seleccionan una de estas plantas o varias de este tipo y se plantan en un sitio según los metales presentes y las características del lugar. Después de un tiempo

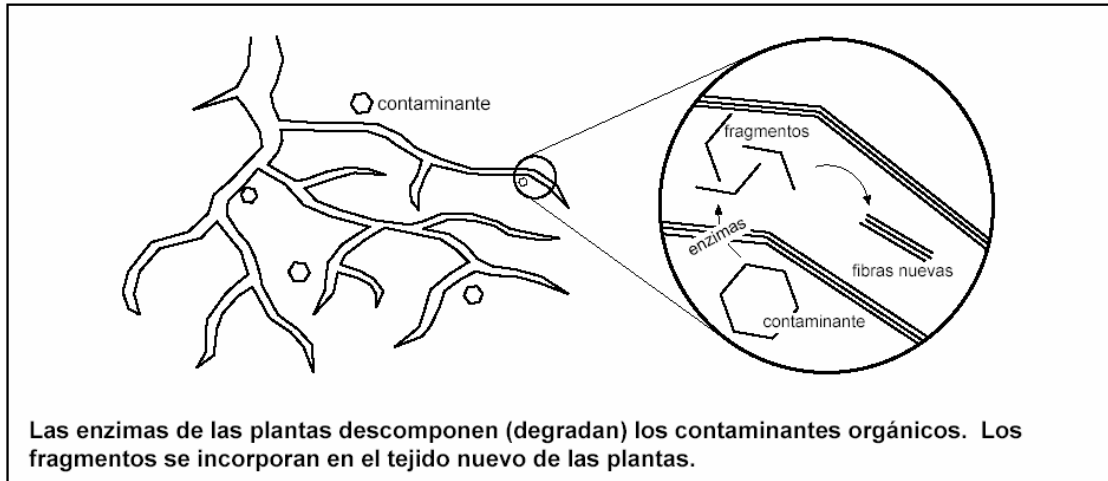
cuando las plantas han crecido, se cortan y se incineran o se deja que se transformen en abono vegetal para reciclar los metales. Este procedimiento se puede repetir la cantidad de veces que sea necesario para reducir la concentración de contaminantes en el suelo a límites aceptables. Si se incineran las plantas, las cenizas deben colocarse en un vertedero para desechos peligrosos, pero la cantidad de ceniza será sólo alrededor del 10% del volumen de los desechos que habría que eliminar si se excavara el suelo contaminado para tratarlo. Los mejores candidatos para la fitoextracción son el níquel, el zinc y el cobre porque son los preferidos de las 400 plantas, aproximadamente, que se sabe que absorben cantidades extraordinarias de metales. Se están estudiando y probando plantas que absorben plomo y cromo.

**1.3.3.2 Fitoestabilización.** Uso de plantas para transformar los metales del suelo en formas menos tóxicas (o no tóxicas). Las plantas se utilizan para eliminar la biodisponibilidad de los metales tóxicos del suelo para que así no puedan ser utilizados por otro tipo de plantas a las cuales puede resultar perjudiciales.

**1.3.3.3 Fitodegradación.** Las plantas y microorganismos asociados se pueden utilizar para degradar los agentes contaminantes del suelo. La fitodegradación es un proceso mediante el cual las plantas degradan (descomponen) contaminantes

orgánicos. En algunos casos, los contaminantes degradados en moléculas más simples se usan para acelerar el crecimiento de las plantas (Figura 2). Las plantas tienen enzimas, categoría amplia de sustancias químicas que causan reacciones químicas rápidas. Algunas enzimas se descomponen y convierten desechos de municiones, otras degradan solventes clorados tales como tricloroetileno (TCE) y otras degradan herbicidas. La biodegradación intensificada se produce en la zona del suelo circundante a las raíces de las plantas, donde se dan las mayores actividades de los microorganismos (la rizosfera). Es un proceso mucho más lento que la fitoextracción. Los microorganismos (levaduras, hongos o bacterias) consumen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales se alimentan y obtienen energía. Algunos microorganismos pueden digerir sustancias orgánicas tales como combustibles o solventes, que son peligrosas para los seres humanos, y descomponerlas en productos inocuos mediante un proceso llamado biodegradación. Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas (azúcar, alcohol y ácidos) contienen carbono orgánico, del cual se alimentan los microorganismos del suelo, y los nutrientes adicionales intensifican su actividad. Además, las plantas aflojan la tierra y transportan agua al lugar, facilitando así la biodegradación. Los árboles pueden realizar una acción de bombeo orgánico cuando sus raíces bajan hacia la capa freática, formando una masa densa de raíces que absorbe una gran cantidad de agua. Los álamos, por ejemplo, absorben 113 litros de agua por día, y hay una variedad de álamo (*Populus deltoides*) que absorbe hasta 1.325 litros por día.

Figura 2. Destrucción de contaminantes orgánicos por fitodegradación



Fuente: EPA542-F-96-025. Medidas Fitocorrectivas Septiembre, EUA, 1996

La acción de bombeo de las raíces disminuye la tendencia de los contaminantes superficiales a descender hacia el agua subterránea y el agua potable. En zonas agrícolas, los álamos plantados a lo largo de cursos de agua reducen el excedente de fertilizantes y herbicidas que va a parar a los cursos de agua y al agua subterránea. Asimismo, los árboles plantados en vertederos como sustitutos orgánicos de la tradicional capa de arcilla o de plástico absorben agua de lluvia que, de lo contrario, se filtraría por el vertedero y llegaría al fondo en forma de “lixiviado” contaminado.

**1.3.3.4 Rizofiltración.** Utilización de las raíces de las plantas para extraer los diferentes metales tóxicos o aceites que se puedan encontrar en aguas contaminadas ya sean superficiales o profundas. Se ha visto que esta técnica puede ser mejorada insertando microorganismos simbióticos específicos en la rizosfera de la planta. La rizofiltración es similar a la fitoextracción, pero las plantas que se usan para la limpieza se cultivan en invernaderos con las raíces en agua, en vez de tierra (Figura 3).

Cuando las plantas tienen un sistema de raíces bien desarrollado, se recoge agua contaminada de un vertedero, se transporta hasta el lugar donde están las plantas y se colocan las plantas en esta agua. Las raíces absorben el agua junto con los contaminantes. A medida que las raíces se saturan de contaminantes, se cortan y se eliminan. Además de extraer metales del agua, la rizofiltración puede ser útil para descargas industriales, escorrentía de tierras agrícolas, drenaje de minas de ácidos y contaminantes radiactivos. Por ejemplo, las semillas de girasol dieron resultado para retirar contaminantes radiactivos del agua de una laguna en una prueba realizada en Chernobyl (Ucrania).

**1.3.3.5 Fitovolatilización.** Los agentes contaminantes absorbidos por las plantas son convertidos en sus fases volátiles (gases) y liberados a la atmósfera por los estomas (cada una de las aberturas microscópicas de la epidermis de las plantas

superiores, en especial de las hojas o partes verdes). La fitovolatilización se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera. Los álamos, por ejemplo, volatilizan el 90% del TCE que absorben.

**1.3.3.6 Fitoestimulación.** Las raíces de las plantas son capaces de estimular microorganismos los cuales van a degradar los agentes contaminantes de la rizosfera.

**Figura 3.** Proceso de rizofiltración



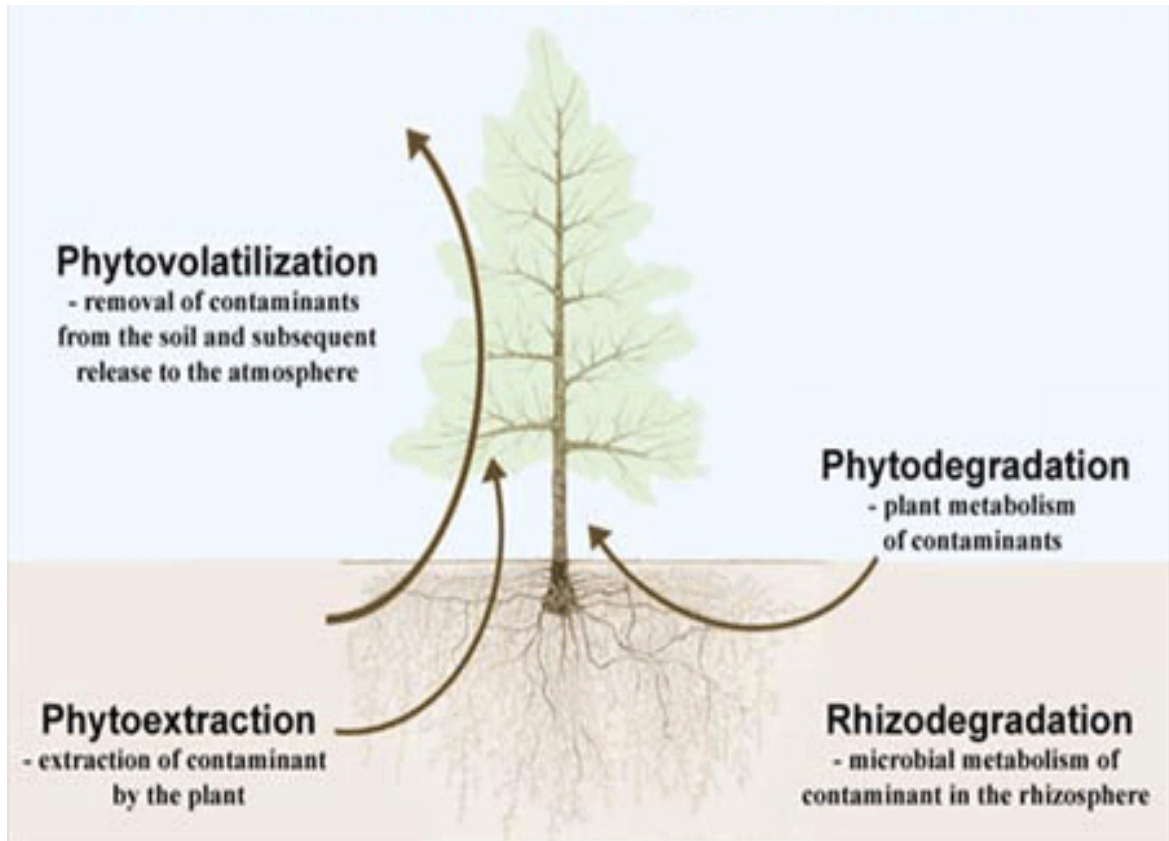
Fuente: Miliarium Aureum, S.L. Boletín Informativo. 2001. [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)



Fuente: Miliarium Aureum, S.L. Boletín Informativo. 2001. [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)

De los diferentes tipos de mecanismos de fitorremediación, la fitoextracción y la rizofiltración son las más importantes ya que se ocupan de la descontaminación de suelos que poseen metales pesados (Figura 4). Los metales pesados como por ejemplo: zinc, plomo, níquel, cromo, etc., constituyen uno de los problemas de los problemas de mayor dificultad para solucionar, esto es debido a su naturaleza inorgánica ya que esta no es susceptible a biodegradarse.

**Figura 4.** Procesos de fitorremediación



Fuente: Miliarium Aureum, S.L. Boletín Informativo. 2001. [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)

**1.3.4 Plantas utilizadas en fitorremediación.** Las plantas denominadas fitorremediadoras, poseen atributos ideales la capacidad para acumular el (los) metal (es) de interés, preferiblemente en la parte superior de la planta; son tolerantes a la concentración del metal acumulado; crecen rápido; generan elevada producción de biomasa; resultan fácilmente cosechables y contienen sustancias que impiden que los herbívoros las consuman, para prevenir la

transferencia de metales pesados a la cadena alimenticia (Garbisu y Alkorta, 2001; Gisbert et al. 2003; Kärenlampi et al. 2000; McIntyre, 2003).

Se conocen alrededor de 400 especies de plantas con capacidad para absorber selectivamente alguna sustancia. En la mayoría de los casos, no se trata de especies raras, sino de cultivos bien conocidas. Así, el girasol (*Heliantus annuus*) es capaz de absorber en grandes cantidades el uranio depositado en el suelo, bien por accidentes nucleares (como el de Chernobil) o por el uso bélico de proyectiles contruidos a base de este metal (como es el caso de Bosnia). Los álamos (género *Populus*) absorben selectivamente níquel, cadmio y zinc. También la conocida *Arabidopsis thaliana*, es capaz de acumular cobre y zinc. Otras plantas comunes que se han ensayado con éxito como posible especies fitorremediadoras en el futuro inmediato son la alfalfa, la mostaza, el tomate, la calabaza, el esparto, el sauce y el bambú. Incluso existen especies vegetales capaces de eliminar la alta salinidad del suelo, gracias a su capacidad para acumular el cloruro de sodio. Una hierba llamada *Amaranthus retroflexus* ha mostrado ser 40 veces más efectiva que sus competidoras en absorber el amenazador cesio-137 radiactivo, que es uno de los más peligrosos contaminantes de las centrales nucleares.

De acuerdo a Clemens y col. (2002), el proceso de acumulación de metales involucra en general a los siguientes mecanismos:

- a)** Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo, son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece. (Fernández y Maldonado, 2000). Los iones metálicos son movilizados por la secreción de quelantes o por la acidificación de la rizosfera.
- b)** Las raíces capturan los metales hidratados o a los complejos metal – quelante por medio de sistemas de transporte como bombas primarias, canales iónicos y transportadores. Dentro de las células los metales quelados principalmente por fitoquelatinas; el exceso de metales es transportado por la vacuola.
- c)** Los metales se transportan de las raíces a la parte aérea vía el xilema, dentro de él los metales se presentan como iones hidratados o como complejo metal- quelante principalmente con histidina y ácido cítrico como ligantes.
- d)** Después de penetrar el apoplasto de las hojas, los metales se distribuyen dentro de la célula, manteniendo cada organelo las concentraciones dentro de rangos fisiológicos específicos. El exceso de metales esenciales y no esenciales (como Pb y Cd) se almacena en las vacuolas.

Dentro de las plantas fitorremediadoras se destacan las llamadas fitoacumuladoras, las cuales son capaces de crecer en suelos contaminados con metales tóxicos y acumularlos a niveles extraordinariamente elevados. Por definición las plantas hiperacumuladoras de Pb, Ni, Co y Cu, son aquellas capaces de acumular en la parte aérea más de 1000mg/Kg de peso seco; en tanto que las plantas hiperacumuladoras de Cd acumulan 100mg/Kg de peso seco. Se han reportado más de 400 diferentes especies de plantas bioacumuladoras (Garbisu y Alkorta, 2001; Gisbert et al. 2003; Lasat 2002; McGrath et al, 2001; Piechalack et al, 2002; Raskin et al, 1997; Wong, 2003). En la Tabla 2 se presentan algunos ejemplos de plantas capaces de acumular cuatro o más metales, incluyendo plomo y cadmio (McIntyre, 2003).

Otra de las plantas utilizadas en procesos de recuperación es el manglar, ya que es uno de los ecosistemas más productivos de la tierra. Cerca de dos terceras partes de las especies de peces, tanto de mar como de agua dulce, dependen de éste. En sus raíces se desarrolla infinidad de fauna y flora acuática y su follaje es área de alimentación y refugio de innumerables especies (García, 1994). Estas plantas han desarrollado una serie de adaptaciones fisiológicas y morfológicas las que han hecho de el mangle una de las especies más exitosas a nivel de la costa, permitiéndoles colonizar áreas hostiles donde otras especies son incapaces de sobrevivir (Snedaker y Getter, 1985).

**Tabla 2.** Plantas hiperacumuladoras de metales.

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	NÚMERO DE ELEMENTOS	ELEMENTOS
<b>Plantas acuáticas</b>			
<i>Azolla filiculoides</i>	Helecho acuático	4	Cu, Ni, Mn, Pb
<i>Bacopa monnieri</i>	Bacopa	5	Cd, Cr, Cu, Hg, Pb
<i>Eichornia crassipes</i>	Jacinto de agua	6	Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn
<i>Hidrilla verticillata</i>	Maleza acuática	4	Cd, Cr, Hg, Pb
<i>Lemna minor</i>	Lenteja de agua	4	Cd, Cu, Cr, Hg
<i>Pistia stratiotes</i>	Lechuga de agua	4	Cd, Cr, Cu, Hg
<i>Salvinis molestia</i>	Salvinia	4	Cr, Ni, Pb, Zn
<i>Spirodela polyrrhiza</i>	Flores de agua	5	Cd, Cr, Ni, Pb, Zn
<i>Vallisneria americana</i>	Valisneria lisa	4	Cd, Cr, Cu, Pb
<b>Plantas de ornato</b>			
<i>Brassica juncea</i>	Mostaza	7	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, U
<i>Helianthus annus</i>	Girasol	4	Cs, Pb, Sr, U
<b>Plantas terrestres</b>			
<i>Agrostis castellana</i>	Vallico	5	Al, As, Mn, Pb, Zn
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Carraspique	7	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Co
<i>Athyrium yokoscense</i>	Helecho	4	Cd, Cu, Pb, Zn

Fuente: C.M. Frick, R.E. Farrell and J.J. Germida. Department of Soil Science. University of Saskatchewan. Saskatoon, SK Canada. December, 1999.

El manglar desarrolla un tipo especial de raíces que estabilizan los suelos protegiéndolos de la erosión (Calton, 1974) y depurándolos de sustancias tóxicas (Silva *et al.*, 1990), haciéndolo que sean pioneras en la recuperación y que favorezcan posteriormente la recolonización.

Aunque no se registran experiencias relacionadas directamente con el control de metales pesados como el bario en aguas de producción de petróleo utilizando manglar, existen investigaciones que dan soporte científico en los estudios realizados por Lacerda *et al.* (1985a, 1985b, 1987). Encuentran que *R. mangle* es un filtro biológico de algunos metales pesados provenientes de la industria metalúrgica (Mn, Fe, Zn, Cu, Pb y Cd), los cuales, en más de un 99%, son quelados principalmente en el sedimento y el resto es fijado en los tejidos perennes y de características leñosas como raíces y tallos. La utilización de manglar como filtro biológico es una innovación en el campo industrial para el control y mejoramiento ambiental, convirtiéndose en la alternativa biológica que ofrece la naturaleza (Grosso *et al.*, 1996).

Debido a la excesiva contaminación por metales pesados se está trabajando en ingeniería genética para conseguir plantas transgénicas que puedan ser utilizadas en fitorremediación, ya que así se podrán obtener una gran diversidad de plantas que puedan acomplejar los metales pesados.

### **1.3.5 Condicionantes en un proceso de fitorremediación**

En cualquier caso, la contaminación que afecta a las aguas subterráneas usualmente se produce por infiltración a través del suelo, lo que hace por lo general necesario un análisis conjunto del sistema suelo-agua subterránea, para determinar los mecanismos de contaminación responsables del problema, y las alternativas a la remediación. En concreto, tres son los factores fundamentales a considerar al analizar las alternativas de remediación: el foco de contaminación, el mecanismo de infiltración, y el tipo de contaminante:

- El foco, que puede ser puntual o difuso.
- El mecanismo puede ser o bien un acceso directo del contaminante al acuífero o a capas profundas del suelo, ya sea por mecanismos antrópicos (pozos) o naturales (sumideros), o bien un acceso difuso, a través de una infiltración en sentido estricto del contaminante en el suelo. El primer caso es más problemático a primera vista, puesto que afecta de forma mucho más rápida y completa a las aguas subterráneas, pero es más sencillo de solucionar a medio-largo plazo, puesto que una parte importante de la solución consiste en impedir ese acceso. La infiltración, por su parte, suele implicar un menor grado de afectación a las aguas subterráneas, debido a la capacidad de atenuación del suelo, pero a su vez esto hace que el suelo

quede afectado, lo que a menudo prolonga el problema en el tiempo y el espacio.

- El tipo de contaminante es siempre fundamental para definir las posibilidades de remediación. Las principales alternativas en este sentido pueden ser las siguientes:

- Partículas en suspensión. Suelen ser poco problemáticas, debido a que tienden a ser filtradas con facilidad por el suelo, o en el propio subsuelo. No obstante, en el caso de infiltraciones directas a acuíferos con menor capacidad de filtrado, pueden llegar a presentar un problema.

- Salas en disolución. Los componentes aniónicos o catiónicos que el agua lleva en disolución pueden ser captados en grado variable por los mecanismos naturales de depuración del suelo (sistemas coloidales con capacidades sorcitivas). Como ya sabemos, unos son más problemáticos que otros, lo que hace también muy variada la gama de soluciones que pueden adoptarse para su eliminación, si bien una de las más adecuadas suele ser la extracción y tratamiento de las aguas contaminadas, por lo general sencilla en este tipo de casos.

- Otros contaminantes físico-químicos. En relación con lo anterior, la presencia de sales en disolución a menudo va acompañada de acidez, alcalinidad, condiciones redox inapropiadas, etc. Como en el caso anterior, la infiltración a través del suelo, o la naturaleza de la roca que constituye el acuífero, a menudo mitiga el problema, pero éste puede ser en el detalle muy variado, y admitir diversas alternativas de remediación.

- NAPLs. Corresponden a las siglas en inglés de “*Non Aqueous Phase Liquid*”: fase líquida no acuosa, es decir, líquidos inmiscibles con el agua, y de menor densidad, es decir, suelen ser hidrocarburos derivados del petróleo, que por lo general no tienden a infiltrarse en presencia de agua, debido a que flotan sobre ésta.

- DNAPLs. Corresponden a las siglas en inglés de “*Dense Non Aqueous Phase Liquid*”: fase líquida densa no acuosa, es decir, líquidos inmiscibles con el agua, y de mayor densidad que ésta, que pueden ser de naturaleza diversa, y que constituyen en la actualidad un serio problema por la persistencia y capacidad de infiltración y migración de estos productos en el subsuelo. Algunos de ellos corresponden a disolventes orgánicos, como el Tricloroetano, empleado en tintorería.

Con estas cuestiones básicas, el primer estudio a llevar a cabo para definir las posibilidades de remediación de un problema de este tipo es el de distribución geométrica de los contaminantes en el área problema, que puede ser básicamente de tres tipos:

**Generalizada.** Es decir, que afecte aproximadamente por igual a todo un acuífero o a todo un suelo. Suele ser consecuencia de contaminación difusa o directa, y por lo general corresponde a sales en disolución, con un potencial de difusión alto.

**Puntual.** Afecta solamente a un área de extensión limitada, y suele estar constituida por un contaminante químico o un líquido inmiscible con agua, con escasa capacidad de infiltración, ya sea por su naturaleza o su escaso volumen, o por la naturaleza del terreno que la alberga.

**Plumas.** Las plumas son la derivación de una contaminación puntual, cuando persiste durante largos periodos de tiempo, o está constituida por un volumen importante de contaminantes.

**1.3.6 Ventajas y limitaciones de la fitorremediación.** Puesto que los costos para la recuperación de un sitio, son siempre un punto principal para los dueños y los reguladores de la tierra, la rentabilidad es una de las ventajas más grande de la fitorremediación. Para los hidrocarburos del petróleo, las técnicas microbianas de la remediación (*ex situ*) se extienden entre US\$ 20.000 y 60.000 por hectárea, mientras que el biorremediación *in situ* cuesta US\$ 7.500 a 20.000 por hectárea (Cunningham et al. 1996). Además, es una tecnología discreta que mantiene la estructura general del suelo; es por lo tanto, conveniente para las áreas grandes y pobladas. Por otra parte, la cubierta de la vegetación previene la lixiviación de contaminantes y la dispersión del polvo contaminado con el viento y la lluvia, y la funcionalidad y la calidad biológicas del suelo se mejora. En caso de de grandes zonas contaminadas, la fitorremediación se pueda utilizar como un paso final para cerrar sitios después de que otras tecnologías de limpieza se hayan utilizado para tratar los “puntos calientes” (Schnoor, 1997).

Como cualquier otra tecnología de limpieza, también la fitorremediación tiene sus limitaciones. Los agentes contaminadores tienen que estar dentro de los niveles tolerados por las plantas y dentro de las zonas accesibles por las raíces (a excepción de control hidráulico), y tienen que ser biodegradables. El tiempo requerido para fitorremediación es por lo general mayor que para otras técnicas de biorremediación. Además, en algunos casos, la fitorremediación puede también causar la contaminación adicional indeseada por el lanzamiento de compuestos

volátiles a la atmósfera por la planta, o migración de los contaminantes por flujo de los exudados solubles de la planta.

## **1.4 FITORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS**

**1.4.1 Consecuencias de la industria de petróleo.** El efecto ambiental de la industria de petróleo es múltiple. La construcción de una red de pozos de perforación exige la degradación de la tierra y en algunos casos se presentan escapes de gas que puede causar explosiones (Silva, 1999a). Además, el líquido de perforación y los cortes del taladro se acumulan y se recogen en hoyos inútiles, generando volúmenes significativos de material contaminado. La basura consiste en una amplia gama de componentes como los hidrocarburos del petróleo, los metales pesados, los productos químicos de la producción, los líquidos que perforan y los altos contenidos en sal.

Otra consecuencia ambiental considerable de la producción petrolífera (Quilici y Olivares 1995, Prado et al. 1999) son las rupturas de la tubería, que pueden ocurrir debido a razones autógenas del equipo y de la pipa de bombeo, al sabotaje y a los terremotos (Freedman 1993). Mientras que las salidas de la tubería causan una contaminación territorial limitada, las salidas del soplo del pozo (un escape incontrolado del aceite de pozos bajo alta presión) pueden contaminar

varios millares de hectáreas.

El petróleo crudo afecta el crecimiento vegetal por dos maneras: (i) por el contacto directo con la planta dando por resultado la ruptura de la membrana de la célula y muerte de la célula, índice reducido de la fotosíntesis y transpiración, clorosis y germinación inhibida de la semilla (Prado *et al.*, 1999; Currier *et al.*, 1954), y indirectamente alterando condiciones físicas y alimenticias en suelo. Las condiciones anaerobias e hidrofóbicas interfieren con las relaciones del suelo-planta-agua (Swader, 1975) disminuyendo la absorción del agua y de los alimentos. Algunos componentes del petróleo crudo o de su biodegradación, pueden asemejarse a la estructura de ciertas hormonas del crecimiento vegetal (Gudin y Harada, 1974) lo que conduce a la interrupción del geotropismo o aún al crecimiento de la planta (Gudin y Syrratt, 1975; Bossert y Bartha, 1985). Las consecuencias son la eliminación de la cubierta vegetal y erosión subsecuente del suelo, y una simplificación de la estructura de las comunidades de plantas y animales.

**1.4.2 Fitorremediación una tecnología potencial para los trópicos.** La fitorremediación representa un alto potencial en las zonas tropicales puesto que la degradación microbiana es promovida por temperaturas calientes continuas, y la reproducción de las plantas no es limitada por condiciones hibernales (aunque

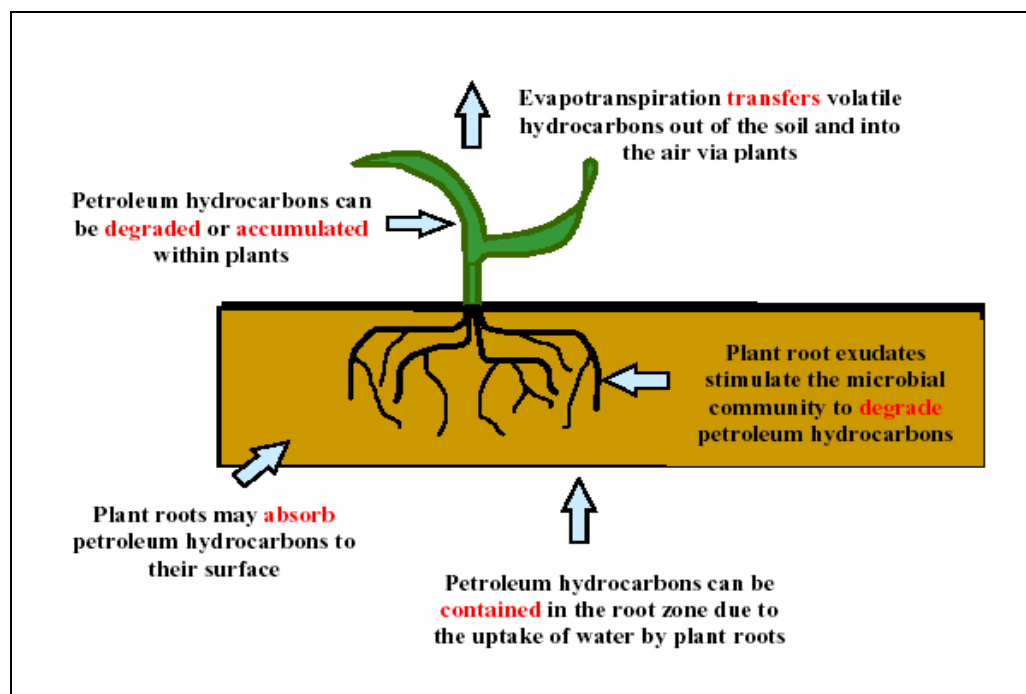
puede ser afectada por sequía estacional). Además, tiene un interés especial debido a su economía, particularmente cuando deben ser tratadas grandes zonas contaminadas, por ejemplo en un derrame provocado por la ruptura de un oleoducto.

Mientras que en zonas templadas, la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo se ha estudiado intensivamente en los últimos 15 años, apenas se tiene información sobre su uso en las zonas tropicales y sobre las especies de plantas más convenientes, además no se sabe si los mecanismos de fitorremediación que fueron estudiados en zonas templadas se pueden aplicar a las zonas tropicales con sus condiciones climáticas y edáficas particulares.

**1.4.3 Fitorremediación de hidrocarburos.** El mecanismo principal para la fitorremediación de hidrocarburos es el estímulo de los microorganismos de la rizosfera de la planta (Figura 5). Por lo menos veintiocho géneros bacterianos se han aislado, así como algunos géneros de hongos con capacidad para degradar hidrocarburos. (Bossert y Compeau, 1995). Además, algunas cyanobacterias y algas han estado implicadas en la biodegradación de hidrocarburos (Cerniglia 1993).

Los hongos también han sido evaluados para la degradación de hidrocarburos. Boldu et al. (2002) estudiaron el papel del hongo *Cladophialophora sp.* sobre la degradación de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno. El hongo no fue capaz de degradar el benceno, pero degradó los compuestos alcalinizados (tolueno, etilbenceno y xileno). El mecanismo de degradación fue una combinación de asimilación y cometabolismo. El tolueno y el etilbenceno fueron usados como fuente de carbono y energía. En el proceso degradativo actúa la enzima monooxigenasa la cual se encargó de la degradación del tolueno, etilbenceno y el xileno.

**Figura 5.** Mecanismos principales para la fitorremediación de hidrocarburos.



Fuente: C.M. Frick, R.E. Farrell and J.J. Germida. Department of Soil Science. University of Saskatchewan. Saskatoon, SK Canada. December, 1999.

Otros microorganismos, menos estudiados pero que también contribuyen a la degradación de agentes contaminantes en el suelo, son las cianobacterias. Abed et al. (2002) estudiaron el papel de las especies *Phormidium* y *Oscillatoria* sobre la degradación de hidrocarburos. Los resultados señalan que en 7 días se había degradado el n-octadecano y el ristano en un 25 y 34%, respectivamente. Estos valores demuestran el potencial de estas cianobacterias para el desarrollo de futuras técnicas de biodegradación en suelos contaminados con hidrocarburos.

**1.4.3.1 Degradación microbiana de los contaminantes orgánicos.** Ocurre normalmente como resultado de la acción del microorganismo sobre el contaminante para su propio crecimiento y reproducción (Comité de Biorremediación et al., 1993). Los contaminantes orgánicos no solamente proveen a los microorganismos una fuente del carbono, también proporcionan los electrones que los organismos utilizan para obtener la energía (Comité de Biorremediación et al., 1993). El metabolismo microbiano básico sobre los contaminantes implica la respiración aerobia (respiración en la presencia del oxígeno); aunque existen algunas variaciones en el metabolismo que incluyen la respiración anaerobia, el cometabolismo, la fermentación, el deshalogenación y el uso de compuestos inorgánicos como donantes del electrón (Comité de Biorremediación et al., 1993). Lo más interesante del proceso, es la capacidad de

las bacterias distribuir rápidamente la información genética el uno al otro, así permitiendo que se adapten rápidamente a los cambios ambientales, tales como la exposición a los contaminantes nuevos (Bollag *et al.*, 1994). En general, los procesos metabólicos de los microorganismos actúan sobre una amplia gama de compuestos, realizan reacciones más difíciles que la degradación, y transforman contaminantes en moléculas más simples que los de plantas (Cunningham y Berti, 1993). Sin embargo, no todos los microorganismos degradan contaminantes orgánicos de manera semejante. La ruta de degradación aerobia de hidrocarburos por los microorganismos procarióticos, tales como bacterias, implica una enzima, la dioxigenasa, la incorporación de dos átomos de oxígeno molecular en el contaminante, y la producción de compuestos menos tóxicos tales como ácidos, alcoholes, bióxido de carbono y agua (Gibson y Subramanian, 1984; Eweis *et al.*, 1998; Pothuluri y Cerniglia, 1994). En contraste, la degradación por los hongos eucarióticos implica inicialmente la incorporación de solamente un átomo de oxígeno en el hidrocarburo, que es similar al mecanismo de la degradación encontrado en los mamíferos (Sutherland, 1992; Cerniglia *et al.*, 1986; Cerniglia y Gibson, 1979; Pothuluri y Cerniglia, 1994). Aunque la mayoría de las transformaciones fúngicas dan lugar a la formación de compuestos que son menos tóxicos, algunos de los metabolitos que se producen durante la degradación fungicida pueden ser más tóxicos que los compuestos iniciales (Sutherland, 1992). Hay varios puntos de interés con respecto a las comunidades microbianas implicadas en la fitorremediación de contaminantes orgánicos. Por

ejemplo, la composición y el tamaño de la comunidad microbiana en la rizosfera depende de especie de planta, de la edad de la planta, y del tipo del suelo (Campbell, 1985; Atlas y Bartha, 1998; Bossert y Bartha, 1984). La comunidad microbiana también puede variar con historia de la exposición; es decir, las comunidades microbianas del suelo pueden experimentar el enriquecimiento selectivo de la especie contaminante-tolerante cuando están expuestas a un contaminante por un período del tiempo prolongado (Anderson *et al.*, 1993). Por otra parte, una cierta especie de bacterias puede degradar una variedad amplia de compuestos lo que ocurre sin tener que primero adaptarse a las condiciones contaminadas (Siciliano y Germida, 1998b). Las rutas catabólicas en especies de *Pseudomonas*, por ejemplo, permiten que estas bacterias degraden una variedad de contaminantes aromáticos (ej., tolueno, m-xileno, y naftalina) sin tener que sintetizar una gran cantidad de diversas enzimas (Houghton y Shanley, 1994).

**1.4.3.2 Composición de los hidrocarburos.** La razón de la amplia variedad de mecanismos y de microorganismos implicados en la degradación de los hidrocarburos del petróleo tiene que ver con la complejidad de su composición. El petróleo crudo contiene millares de diversas clases de moléculas del hidrocarburo (Reis, 1996). Puede también contener cantidades significativas de otros elementos como el sulfuro (0-10%), el nitrógeno (0-1%), el oxígeno (0-5%) y algunos metales pesados.

Los componentes principales del petróleo crudo se pueden agrupar en varias clases de compuestos (Huesemann y Moore 1993, Jokuty *et al.*, 1996, Reis 1996):

- ✓ **Compuestos saturados.** Son alcanos con estructuras alifáticas ( $C_nH_{2n+2}$ ) o parafinas, o alcanos cíclicos saturados ( $C_nH_{2n}$ ) o naftanos. Los alcanos y los cicloalcanos desempeñan un papel importante en la evaluación del proceso de bioremediación. Los alcanos de cadena lineal son fácilmente biodegradables, seguidos por los alcanos ramificados y los alcanos cíclicos con el aumento de números de anillos saturados. Los microorganismos con la capacidad de degradar alcanos son comunes en la naturaleza debido a la semejanza de estos compuestos con sustancias que se producen naturalmente (ej. Las ceras). Las bacterias que degradan estos compuestos, son principalmente los géneros *Pseudomonas*, *Acinetobacteria*, *Nocardia*, *Rhodococcus* y *Mycobacteria*. Dentro de las levaduras y de los hongos (micromycetes), *Candida*, *Rhodotorula*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* y *Trichoderma* son altamente degradantes (Fritsche, 1999).
  
- ✓ **Compuestos aromáticos.** Son los compuestos que tienen por lo menos un anillo del benceno como parte de su estructura química. Los compuestos aromáticos pequeños (uno o dos anillos) son bastante solubles en agua, pero también se evaporan rápidamente del petróleo crudo derramado. Dentro de

estos hidrocarburos monoaromáticos son altamente tóxicos el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno (BTEX). Los hidrocarburos poliaromáticos (estructuras aromáticas condensadas con más de dos anillos de benceno), son altamente persistentes y cancerígenos. Los compuestos aromáticos con uno o dos anillos se biodegradan en un período corto, mientras que la persistencia aumenta con el aumento del número de anillos aromáticos. Los monoaromáticos son degradados por una amplia gama de microorganismos, especialmente por especies de los géneros *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, así como también, algunas levaduras y mohos (Fritsche, 1999).

- ✓ **Resinas y asfaltenos.** Ambos grupos son hidrocarburos poliaromáticos grandes que contienen átomos diferentes tales como nitrógeno, sulfuro y oxígeno. Los metales tales como níquel, vanadio y hierro también se asocian a los asfaltenos.

Los factores que afectan la toxicidad de los hidrocarburos del petróleo incluyen el peso molecular, la clase del hidrocarburo, el organismo expuesto al hidrocarburo, y la etapa del ciclo vital del organismo expuesto. Para hidrocarburos de tipo similar, la toxicidad tiende a aumentar al disminuir el peso molecular. Moléculas más pequeñas tienden a ser más tóxicas que las moléculas grandes, puesto que pueden entrar en las células y el tejido fino de la planta. Por lo tanto, los petróleos

crudos ligeros y los productos refinados tienden a ser más tóxicos que los petróleos crudos pesados, porque los petróleos crudos pesados tienen un peso molecular más alto. Algunos de los hidrocarburos menos tóxicos incluyen el dodecano y la parafina por su alto peso molecular, que incluso se utilizan en la cocina, para la preparación de alimentos y velas. Los hidrocarburos más tóxicos son los compuestos aromáticos de bajo punto de ebullición (ej. BTEX), además los hidrocarburos más tóxicos también tienden a tener una alta solubilidad en el agua, lo que hace a la molécula más accesible para ser absorbida por las plantas y los animales (Reis, 1996)

**1.4.4 Especies tropicales potenciales en la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.** Al buscar especies para fitorremediación, la colección de plantas tolerantes en sitios contaminados es el primer paso en un procedimiento largo de la evaluación. Antes de los experimentos de invernadero para probar el efecto de la degradación de una especie planta en los hidrocarburos del petróleo en suelo, se debe realizar una preselección de las especies recogidas en el lugar de interés. Los criterios importantes que deben cumplir estas plantas además de la tolerancia a los hidrocarburos del petróleo, son la facilidad de propagación y un sistema favorable de la raíz. La especie nativa o endémica debe ser preferida puesto que ella se adapta a las condiciones ambientales que prevalecen. El conocimiento sobre la propagación es un requisito

previo para experimentos futuros de invernadero o de campo, especialmente al trabajar con la especie nativa de la cual no hay semilla comercial disponible (Figura 6).

Puesto que la fitorremediación de suelos contaminados por petróleo se basa principalmente en la biodegradación en la rizosfera (Frick *et al.*, 1999), el sistema de la raíz de la planta es una de las características más importantes. Las plantas y sus raíces pueden influenciar indirectamente la degradación alterando las condiciones físicas y químicas del suelo (Cunningham *et al.*, 1996), por ejemplo, aumentando la aireación y así proporcionando el oxígeno para la degradación de contaminantes; realzan la actividad microbiana al proporcionar exudados (Tate, 1995; Gather *et al.*, 1996; Schnoor, 1997), conduciendo a las poblaciones microbianas que son 5 a 100 veces mayores en la rizosfera que en el suelo en general (Anderson *et al.*, 1993). Además, las enzimas asociadas a la raíz son capaces de transformar agentes contaminadores orgánicos directamente en el suelo (Gather *et al.*, 1996). Por lo tanto, el sistema de la raíz, la morfología de la raíz, la profundidad del crecimiento de la raíz y el éxito del establecimiento de la planta son parámetros principales (Kirk *et al.*, 2002). Sin embargo, se deben tomar en consideración otros factores como el ciclo vital, las condiciones de cultivo y mantenimiento de las plantas y las posibles malezas.

**Figura 6.** Plantas utilizadas para la fitorremediación de suelos contaminados.



Fuente: C.M. Frick, R.E. Farrell and J.J. Germida. Department of Soil Science. University of Saskatchewan. Saskatoon, SK Canada. December, 1999.

La identificación de la contaminación del suelo se basa en la examinación visual con la ayuda de un taladro y de verificar que las raíces de las plantas estén en contacto con el suelo contaminado. El número de los sitios en los cuales una especie se encuentra se define como frecuencia. Las especies encontradas en varios sitios son consideradas más acertadas en la colonización de suelos contaminados que las especies que se encuentren en un solo sitio. La densidad demográfica se clasifica en: alta, medio y bajo, respectivamente, por la inspección visual subjetiva. Una alta densidad demográfica, es aquella donde se observa el

crecimiento coherente de individuos de una especie, mientras que una densidad media se refiere a los individuos que ocurren con frecuencia en un sitio sin la formación de poblaciones coherentes extensas. La densidad demográfica baja corresponde a un crecimiento dispersado de individuos en un sitio.

Durante la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo, los componentes tóxicos se pueden metabolizar por las enzimas de la planta en la planta o en el suelo (Jordahl *et al.*, 1996). El mecanismo responsable de la mayoría de la degradación de los hidrocarburos del petróleo dentro de la planta o el suelo, es el estímulo del crecimiento y de la actividad de microorganismos que degradaban en la rizosfera (Frick *et al.*, 1999). Este efecto de la rizosfera ocurre debido a las características físicas y químicas mejoradas del suelo en la rizosfera y a la excreción de los exudados de la raíz (Siciliano y Germida, 1998). Debido a la penetración de la raíz, se aflojan los agregados del suelo y aumenta la fuente del oxígeno en el suelo (Aprill y Sims, 1990). El oxígeno es un factor decisivo para el crecimiento y la actividad del microorganismo aerobio del suelo y es el paso inicial de la degradación de un número de compuestos del producto químico tales como compuestos aromáticos (Yeung *et al.*, 1997). La actividad microbiana también se ve estimulada por un número de substratos proporcionados en la rizosfera, tal como enzimas, vitaminas, hormonas que promuevan el crecimiento microbiano (Lynch, 1977).

Poseer un sistema de raíz ramificado, se considera particularmente conveniente para la fitorremediación, puesto que ofrecen una rizosfera mayor para la actividad y el crecimiento microbianos (Aprill y Sims, 1990). Las raíces de legumbres no son muy ramificadas, sino que pueden generalmente alcanzar capas más profundas del suelo que hierbas y de esta manera, causar un efecto sobre contaminantes localizados más profundos (Kirk *et al.*, 2002). Además, su simbiosis con el *Rhizobium spp.* (el cual permite la fijación del nitrógeno) aporta nitrógeno (N) adicional al suelo y así ser más competitiva en suelos pobres nutrientes (Figura 7). Esta condición es de especial interés puesto que la contaminación con hidrocarburos del petróleo aumenta la relación de C/N considerablemente y conduce a una deficiencia acentuada de N. Las tablas 3, 4 y 5 muestran un listado de plantas colectadas en suelos contaminados con petróleo.

**Tabla 3.** Leguminosas colectadas en suelos contaminados con petróleo.

Nombre de la especie	Familia	Ciclo vital	Distribución
<i>Chamaecrista rotundifolia</i> (Pers) Greene	Caesalpinaceae	Bianual	Tropical
<i>Chamaecrista hispidula</i> (Vahl) H.S. Irwin y Barneby	Caesalpinaceae	Perenne	América subtropical
<i>Chamaecrista flexuosa</i> (L) Greene	Caesalpinaceae	Perenne	America subtropical
<i>Aeschynomene brasiliiana</i> (Poir) DC	Fabacea	Perenne	
<i>Aeschynomene</i> L sp.	Fabacea	Perenne	América subtropical
<i>Desmodium glabrum</i> (Mill) DC	Fabacea	Perenne	América subtropical
<i>Calopogonium mucunoides</i> Desv.	Fabacea	Bianual	Amplia distribución en los trópicos, especies cultivadas
<i>Centrosema brasilianum</i> (L) Benth (nuevo nombre <i>C. pubescens</i> Benth)	Fabacea	Perenne	Especies cultivadas, América Subtropical
<i>Stylosanthes capitata</i> Vogel	Fabacea	Perenne	Especies cultivadas, América subtropical
<i>Stylosanthes guianensis</i> (Aubl.) Sw	Fabacea	Perenne	Especies cultivadas, América subtropical
<i>Zornia latifolia</i> Sm	Fabacea	Perenne	Sudamérica
<i>Zornia filifolia</i> Domin	Fabacea	Perenne	
<i>Mimosa camporum</i> Benth	Mimosaceae	Anual	América subtropical
<i>Mimosa orthocarpa</i> Spruce	Mimosaceae	Anual	México, Norte y Sudamérica
<i>Mimosa somnians</i> Humb y Bonpl. Ex Wild	Mimosaceae	Anual	América subtropical
<i>Schrankia leptocarpa</i> DC	Mimosaceae	Anual	América subtropical, Africa

**Fuente:** Merkl, Nicole. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in tropics. 2004

**Tabla 4.** Gramíneas colectadas en suelos contaminados con petróleo.

Nombre de la especie	Familia	Ciclo vital	Distribución
<i>Cyperus aggregatus</i> (wild) Endl	Cyperaceae	Perenne	América Subtropical
<i>Cyperus compressus</i> L.	Cyperaceae	Anual	América subtropical, Africa
<i>Fimbristylis cymosa</i> R. Br.	Cyperaceae	Anual	América subtropical
<i>Andropogon fastigiatus</i> Sw	Poaceae	Anual	América subtropical
<i>Anthephora hermaphrodita</i> (L) Kuntze	Poaceae	Annual	América tropical
<i>Asistida pittieri</i> Henrard	Poaceae	Perenne	Venezuela, Colombia y Guyana
<i>Asistida riparia</i> Trin	Poaceae	Perenne	Desde Panamá hasta Brasil
<i>Asistida venezuelae</i> Henrard	Poaceae	perenne	Venezuela, Ecuador
<i>Axonopus anceps</i> (Mez) Hitch	Poaceae	perenne	Desde Trinidad hasta Brasil
<i>Axonopus canescens</i> (Nees) Pilg.	Poaceae	perenne	Venezuela
<i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst. Ex. A. Rich). Stapf	Poaceae	perenne	Especies cultivadas, nativa de Africa
<i>Brachiaria decumbens</i> Staff.	Poaceae	perenne	Especies cultivadas, nativa de Africa
<i>Brachiaria humidicola</i> (Rendle) Schweick	Poaceae	perenne	Especies cultivadas, nativa de Africa
<i>Cenchrus pilosus</i> Kunth	Poaceae	anual	Desde México hasta Norte y Sur América
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L) Wild.	Poaceae	anual	
<i>Eragrostis ciliaris</i> (L) R. Br	Poaceae	anual	América subtropical, Africa
<i>Eragrostis guianensis</i> Hichc.	Poaceae	anual	Venezuela, Guyana
<i>Eragrostis mypurensis</i> (H.B.K.) Steud	Poaceae	anual	América subtropical
<i>Eragrostis viscosa</i> (Retz) Trin.	Poaceae	anual	América subtropical, Africa
<i>Panicum maximum</i> Jacq.	Poaceae	perenne	Especies cultivadas, nativa de Africa, amplia distribución en los trópicos
<i>Pappophorum pappiferum</i> (Lam) Kuntze	Poaceae	perenne	Norte y Suramérica
<i>Rhynchelytrum repens</i> (Wild) C. E.	Poaceae	anual	América subtropical, africa

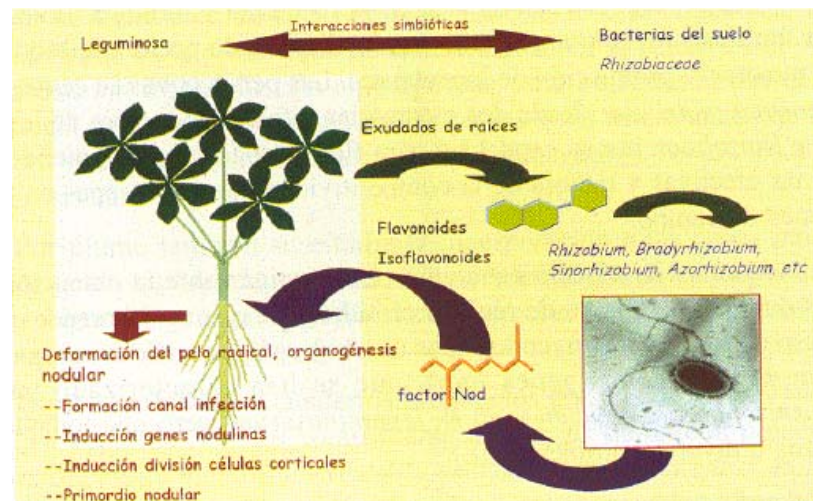
**Fuente:** Merkl, Nicole. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in tropics. 2004

**Tabla 5.** Otras especies de herbáceas (leguminosas o gramíneas) colectadas en suelos contaminados con petróleo

Nombre de la especie	Familia	Ciclo vital	Distribución
<i>Tridax procumbens</i> L.	Compositaceae	anual	Tropical
<i>Jacquemontia tamnifolia</i> (L) Grises	Convolvulaceae	perenne	América subtropical, África
<i>Microstachys comiculata</i> (Vahl) Grises	Euphorbiaceae	anual	Suramérica
<i>Hyptis</i> sp. Jacq.	Lamiaceae		
<i>Hyptis suaveolens</i> (L) Point	Lamiaceae	anual	Tropical
<i>Pavonea cancellata</i> (L) Cav	Malvaceae	anual	América subtropical
<i>Sida cordifolia</i> L.	Malvaceae	perenne	Tropical
<i>Sida</i> L. sp.	Malvaceae		
<i>Pasiflora foetida</i> L.	Passifloraceae	perenne	Tropical
<i>Borreria capitata</i> (R: y P.) DC	Rubiaceae	perenne	América subtropical
<i>Borreria laveis</i> (Lam.) Griseb.	Rubiaceae	perenne	América subtropical
<i>Borreria</i> sp. G. Mey.	Rubiaceae		
<i>Borreria verticillata</i> (L) G. Mey	Rubiaceae	perenne	América Tropical
<i>Diodia teres</i> Walt	Rubiaceae	anual	América subtropical
<i>Melochia</i> sp. L	Sterculiaceae		
<i>Waltheria indica</i> L.	Sterculiaceae	perenne	Tropical
<i>Piriqueta viscosa</i> Griseb.	Tumeraceae	anual	Venezuela, Bolivia

**Fuente:** Merkl, Nicole. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in tropics. 2004.

**Figura 7.** Simbiosis leguminosa y *Rhizobium* sp.



Fuente: De Felipe Antón, María Rosario. Biotecnologías limpias en agricultura. Centro de Ciencias medioambientales, CSIC.

**1.4.5 Influencia de los factores ambientales en los procesos de fitorremediación.** Los factores ambientales afectan o alteran los mecanismos de fitorremediación. El tipo de suelo y el contenido de materia orgánica pueden limitar la biodisponibilidad de los contaminantes del petróleo. El contenido de agua y humedad en el suelo afecta el crecimiento planta/microorganismos y el oxígeno disponible requerido para la respiración aerobia. Además, la temperatura afecta varios de los procesos que ocurren. La disponibilidad de nutrientes puede influenciar el índice y el grado de degradación en suelo contaminado por aceite. Finalmente, la luz del sol puede transformar los compuestos iniciales en otros compuestos, que pueden tener diversos grados de toxicidad y biodisponibilidad que los compuestos originales.

✓ **La estructura del suelo, la textura, el tipo de suelo y el contenido de materia orgánica** influyen en los procesos de fitorremediación. En los términos de la influencia de la estructura del suelo, Alexander *et al.* (1997) identificaron que el fenantreno puede ser absorbido por los nanoporos (poros del suelo con los diámetros <100 nm) que son inaccesibles a los organismos (es decir, no biodegradable). La textura del suelo puede también influir en la biodisponibilidad del contaminante. Por ejemplo, la arcilla es capaz de atrapar las moléculas más fácilmente que la arena (Brady y Weil, 1996). Consecuentemente, la biodisponibilidad de contaminantes puede ser más baja en suelos con el alto contenido de la arcilla. En ayuda de este concepto,

Carmichael y Pfaender (1997) encontraron que los suelos con partículas más grandes (ej., arena) tenían típicamente mayor mineralización de hidrocarburos que suelos con partículas más pequeñas (ej, limo y arcilla), posiblemente debido a la mayor biodisponibilidad de los contaminantes en los suelos arenosos. La materia orgánica del suelo une los compuestos lipofílicos, de tal modo que se reduce su biodisponibilidad (Cunningham *et al.*, 1996). Un alto contenido orgánico del carbón (el > 5%) en suelo, generalmente provoca una gran absorción y, por lo tanto, disponibilidad baja, mientras que un contenido orgánico moderado del carbón (1 a 5%) puede generar una mayor disponibilidad (Otten *et al.*, 1997). El tipo del suelo puede influenciar la calidad o cantidad de exudados de la raíz, que pueden influir en los procesos de fitorremediación. Más específicamente, la investigación de Bachmann y Kinzel (1992) indica una correlación entre el tipo del suelo y los niveles de aminoácidos, de azúcares, y de ciertas actividades enzimáticas en la rizosfera.

- ✓ **El agua y la disponibilidad de oxígeno** son importantes para el desarrollo en general de plantas y de microorganismos (Eweis *et al.*, 1998). El riego no es solamente un componente importante de organismos vivos, también sirve como medio del transporte para llevar los nutrientes a toda la biota del suelo y para arrastrar los residuos. Si el contenido de agua del suelo es bajo, habrá una pérdida de actividad microbiana y deshidratación de plantas. Demasiada humedad da lugar a un intercambio limitado del gas y a la creación de zonas

anóxicas en donde la degradación es dominada por los microorganismos anaerobios. Además, el oxígeno se puede proporcionar a la rizosfera como exudado de la planta. La cantidad de oxígeno que se transfiere de la raíz depende del tipo de planta (Vance, 1996). Las plantas herbáceas de tierras anegadas tienen típicamente una alta capacidad de transportar oxígeno de sus raíces a la rizosfera. Inversamente, las plantas herbáceas de terrenos secos o poco húmedos, así como también las plantas arboladas tienen una capacidad pobre para el transporte de oxígeno hacia la rizosfera. Esta característica permite que dichas plantas sobrevivan en las condiciones saturadas bajo las cuales la mayoría de las plantas terrestres morirían, además, estas condiciones permiten que las poblaciones bacterianas localizadas en la rizosfera, puedan ayudar a degradar contaminantes orgánicos.

- ✓ **La temperatura** afecta varios de los mecanismos de fitorremediación. En general, la degradación microbiana se duplica por cada aumento de 10°C en la temperatura. (Eweis *et al.*, 1998; Wright *et al.*, 1997). En un experimento que implicaba la biorremediación de aceite e hidrocarburos, se obtuvo un promedio del 72% durante el verano comparado con el 56% durante invierno, aunque la exposición del invierno fue 42 días más de largo (Wright *et al.*, 1997). La diferencia estacional fue pensada para ser el resultado de una diferencia de 10°C en temperatura entre el verano caliente y los períodos frescos del invierno.

✓ **Los nutrientes** adecuados en el suelo se requieren para apoyar el crecimiento de plantas y de sus microorganismos asociados. Xu y Johnson (1997) han demostrado que los hidrocarburos del petróleo pueden reducir perceptiblemente la disponibilidad de los nutrientes en suelo. Una disponibilidad de nutrientes baja resulta del hecho de que los hidrocarburos del petróleo tienen alto contenido de carbono, pero pobres en contenidos de nitrógeno y de fósforo. Mientras que los microorganismos del suelo degradan los hidrocarburos, utilizan o inmovilizan los nutrientes disponibles (es decir, nitrógeno y fósforo) creando deficiencias nutrientes en suelo contaminado.

Biederbeck et al. (1993) encontraron que, al colocar un lodo inútil aceitoso en suelo arenoso, el suelo tenía niveles muy bajos del nitrato debido a la inmovilización del nitrógeno por las poblaciones bacterianas en crecimiento, que degradaban el aceite, así como la supresión de bacterias fijadoras de nitrógeno. La tendencia era similar para el fósforo, que era inicialmente bajo después de la incorporación debido a la inmovilización por una biomasa microbiana que se ampliaba, pero más adelante se hizo más disponible. Los hidrocarburos del petróleo también pueden limitar la accesibilidad de los nutrientes a las plantas y a los microorganismos reduciendo la disponibilidad del agua en la cual se disuelven los nutrientes (Schwendinger, 1968). Las deficiencias nutrientes en el suelo causado por los hidrocarburos del petróleo se pueden compensar por el uso del fertilizante o del abono verde al suelo.

- ✓ **La radiación solar** puede generar reacciones en los hidrocarburos, por la luz ultravioleta en agua contaminada o en la superficie del suelo. Tales reacciones implican aumento de la polaridad, de la solubilidad de agua, y de la toxicidad de los compuestos antes de ser tomados por la planta (McConkey *et al.*, 1997; Ren *et al.*, 1994; Huang *et al.*, 1993). Los hidrocarburos que se pueden modificar de este modo incluye el antraceno, el fenantreno, el benzopireno, el fluorantreno, el pireno, y la naftalina. El incremento en los efectos tóxicos (tales como crecimiento reducido) también pueden resultar de la penetración de la radiación ultravioleta en tejido fino de planta. (Duxbury *et al.*, 1997).
  
- ✓ Los **procesos del desgaste por la acción atmosférica** incluyen la volatilización, la evapotranspiración, la fotomodificación, la hidrólisis, la lixiviación y la biotransformación del contaminante. Estos procesos reducen selectivamente la concentración de contaminantes fácilmente degradables y los compuestos más recalcitrantes restantes en el suelo. Los contaminantes dejados atrás son los compuestos típicamente permanentes o semi-volátiles que se repartieron preferencialmente a las partículas de la materia orgánica o de la arcilla de suelo, que limita su biodisponibilidad y el grado a los cuales puedan ser degradados (Bossert y Bartha, 1984; Cunningham y Ow, 1996; Bollag, 1992; Cunningham *et al.*, 1996). Carmichael y Pfaender (1997) observaron que la biodisponibilidad del contaminante era un factor importante que limitaba la degradación (> 60 años) los hidrocarburos.

## 2. CONCLUSIONES

La fitorremediación representa una técnica más limpia, simple, efectiva y aún de menor costo, en relación con los métodos fisicoquímicos tradicionales, además, otra ventaja que ofrece es que permite la eliminación selectiva de contaminantes y su recuperación para futuros usos.

Las plantas denominadas fitorremediadoras, poseen la capacidad para acumular ciertas sustancias contaminantes de interés, como hidrocarburos, metales pesados, entre otras. Se conocen alrededor de 400 especies de plantas con capacidad para absorber selectivamente alguna sustancia. En la mayoría de los casos, no se trata de especies raras, sino de cultivos bien conocidos, como el girasol (*Heliantus annuus*), el helecho acuático (*Azolla filiculoides*), la lenteja de agua (*Lemna minor*).

Una especie prometedora para los procesos de fitorremediación en zonas costeras tropicales es el manglar, debido a que sus adaptaciones fisiológicas y morfológicas permiten el desarrollo de un tipo especial de raíces que estabilizan los suelos protegiéndolos de la erosión y depurándolos de sustancias tóxicas, especialmente contaminantes provenientes de la industria petrolera.

Como cualquier otra tecnología la fitorremediación tiene sus limitaciones. Los agentes contaminadores tienen que estar dentro de los niveles tolerados por las plantas y dentro de las zonas accesibles por las raíces y tienen que ser biodegradables. El tiempo requerido para fitorremediación es por lo general mayor que para otras técnicas de biorremediación. Además, en algunos casos, la fitorremediación puede también causar la contaminación adicional indeseada por el lanzamiento de compuestos volátiles a la atmósfera por la planta, o migración de los contaminantes por flujo de los exudados solubles de la planta.

El mecanismo principal para la fitorremediación de hidrocarburos es el estímulo de los microorganismos de la rizosfera de la planta. Varios géneros de bacterias, hongos, cyanobacterias y algas han estado implicados en la biodegradación de hidrocarburos.

Al considerar la fitorremediación como estrategia recuperación de suelos contaminados, se deben considerar el clima y las características del suelo, como factores que influenciarán la eficacia del proceso y de los tipos de plantas que se utilizarán. El tipo de suelo y el contenido de materia orgánica pueden limitar la biodisponibilidad de los contaminantes del petróleo; el contenido de agua y humedad en el suelo afecta el crecimiento planta/microorganismos y el oxígeno disponible requerido para la respiración aerobia; además, la temperatura afecta varios de los procesos que ocurren, así como también, la luz del sol puede

transformar los compuestos iniciales en otros compuestos, que pueden tener diversos grados de toxicidad y biodisponibilidad que los compuestos originales.

La fitorremediación representa un alto potencial en las zonas tropicales debido a que la degradación microbiana es promovida por temperaturas calientes continuas, y la reproducción de las plantas no es limitada por condiciones hibernales.

Se debe conocer sobre los tipos de hidrocarburos en el sitio de interés, junto con cualquier metal, las sales, y/o los pesticidas asociados, con el fin de garantizar la efectividad del proceso de fitorremediación. Después de la caracterización del sitio y del contaminante, se debe seleccionar las plantas y los microorganismos apropiados, identificando si hay las especies nativas que se podrían utilizar en el proceso de fitorremediación.

La fitorremediación es considerada en todo el mundo como una tecnología innovadora para el tratamiento de residuos tóxicos (sólidos o líquidos) con el objeto de recuperar suelos y aguas contaminadas.

## BIBLIOGRAFÍA

Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. In: Methods of soil analysis: Chemical and Microbiological Properties. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeny, D.R. (Eds.), pp. 831-871.

Anderson, T.A., Guthrie, E.A., y Walton, B.T. 1993. Bioremediation in the rhizosphere - Plant roots and associated microbes clean contaminated soils. *Environmental Science and Technology* 27(13), 2630-2636.

Aprill, W. y Sims, R.C. 1990. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. *Chemosphere* 20, 253-265.

Bossert, I. y Bartha, R. 1984. The fate of petroleum in soil ecosystems. In: *Petroleum Microbiology. Atlas*, R. (Ed.), pp. 435-474. Macmillan Publishing, New York.

Bossert, I. and Bartha, R. 1985. Plant growth on soils with a history of oily sludge disposal. *Soil Science* 140(1), 75-77.

Cunningham S.D., Anderson T.A., Schwab P.A., y HSU F.C. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Advances in Agronomy* 56, 55-114.

Gunther, T., Dornberger, U., y Fritsche, W. 1996. Effects of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil. *Chemosphere* 33, 203-215.

Potter, T.L. and Simmons, K.E. 1998. Composition of Petroleum Mixtures. Total petroleum hydrocarbon criteria working group series, Vol. 2. Amherst Science Publishing, Amherst.

Merkel, Nicole. 2004. Phytoremediation of Petroleum- Contaminated Soils in the Tropics. Margraf Publishers GmbH, Scientific Books.

Prado, M., M. Correa, J. Rodriguez-Grau and M. Carneiro. 1993. Oil sludge landfarming biodegradation experiment conducted at a tropical site in eastern Venezuela. *Waste Management & Research* (11), 97-106

Prado, M. A., A. Quilici y F. Ortega. 1995. Estudio descriptivo y funcional de la vegetación en áreas contaminadas por derrames de hidrocarburos. *VISION TECNOLOGICA*. V 2 (1): 51-58.

Prado, M. A., M. S. López y J. Boissiere. 1996. Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el uso de leguminosas inoculadas. *VISION TECNOLOGICA*. V 1 (2):22-29.

Song, H., Pedersen, T.A., Bartha, R. 1986. Hydrocarbon mineralization in soil: Relative bacterial and fungal contribution. *Soil Biology and Biochemistry* 18, 109-111.

Tsao, D. T. 2003. Phytoremediation. Springer, Berlin.

Yeung, P.Y., Johnson, R.L., y Xu, J.G. 1997. Biodegradation of Petroleum Hydrocarbons in Soil as Affected by Heating and Forced Aeration. *Journal of Environmental Quality* 26, 1511-1516.