



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN CIENCIAS E INGENIERÍA

*“FITORREMEDIACIÓN EN LA RECUPERACIÓN DE
SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA”*

TRABAJO MONOGRÁFICO

Para obtener el título de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

DIANA BEATRIZ GUTIÉRREZ SÁNCHEZ

DIRECTOR

M.I.A. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA

Chetumal, Quintana Roo, México. Agosto, 2004

Ø 43847



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISION CIENCIAS E INGENIERIA

Lic. Cristina Caamal
Jefa del Área de Titulación

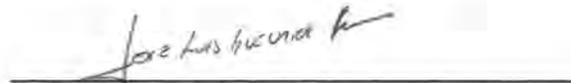
Por este medio se notifica que el trabajo monográfico que lleva por título "Fitorremediación en la recuperación de suelo y agua subterránea" realizado por la alumna Diana Beatriz Gutiérrez Sánchez se revisó y aprobó por el siguiente comité de tesis como requisito previo para obtener el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

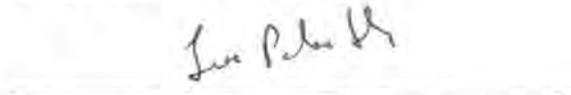
DIRECTORA


M.I. Norma Angélica Oropeza García

ASESOR


Ing. José Luis Guevara Franco

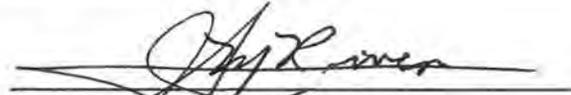
ASESOR


Biol. Laura Patricia Flores Castillo

ASESOR


M.C. Juan Carlos Ávila Reveles

ASESOR


M.C. José Martín Rivero Rodríguez

Chetumal, Quintana Roo, 16 de Agosto de 2004

c.c. M.C. Lourdes Castillo Villanueva
Directora de la DCI

DEDICATORIA

Este trabajo, símbolo de muchos años de esfuerzo, está dedicado a:

Dios, que ha puesto en mi camino a muchas personas que me han ayudado a ser cada día mejor, que ha llenado mi vida de felicidad y amor.

Mis padres

Elmer Flaviano Gutiérrez Avilés, por ser un padre maravilloso.

Alma Beatriz Sánchez Montejo, por ser mi madre y amiga.

Mis hermanitas, a las cuáles adoro.

Maria Lidieth, por ser mi eterna compañera.

Ruth Hermila, por su alegría.

Marco Antonio Carballo Matos, por tu comprensión y amor, porque le has dado mucha felicidad a mis días.

AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas quiero agradecer a **Dios** por darme una familia sin igual, por darme amigos y maestros sinceros, quienes han compartido sus experiencias y conocimientos conmigo.

Por el esfuerzo que ha hecho para que nunca falte nada en casa, por su ejemplo de honestidad y rectitud, gracias **Papá**, por tu sabiduría.

Por tus sacrificios, tus noches de desvelo, tus cuidados, tu amor, cariño y comprensión, gracias **Mamá**, sin ti mi vida no sería igual.

Por compartir tus juguetes, tu infancia, tu cariño, tus alegrías, por considerarme tu amiga, por estar siempre conmigo, gracias **Lidieth**, te quiero mucho.

Por ser alegre, sencillita y carismática, por ser la alegría del hogar, gracias **Ruth**, te quiero mucho.

A **Marco Antonio Carballo Matos**, por tu amor, tu apoyo, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por comprenderme, por escucharme, te amo.

A la **M.I. Norma Angélica Oropeza García**, por sus enseñanzas, su dedicación y compromiso, por su ayuda y su tiempo. Mi más sincera admiración.

A los asesores, gracias por dedicarle tiempo a este trabajo:

Biol. Laura Patricia Flores Castillo

Ing. José Luis Guevara Franco

M. C. José Martín Rivero Rodríguez

M. C. Juan Carlos Ávila Reveles

Gracias a todos los maestros que compartieron sus enseñanzas en el salón de clases.

A mi familia en general, pero un especial agradecimiento a mi tío **Jaime Sánchez** y **Carmen Jiménez**, porque siempre que necesitamos su ayuda nunca nos defraudaron.

A mis primos **Teresa Gutiérrez Alcocer** y **José Gutiérrez Alcocer**, deseo agradecerles infinitamente por su ayuda invaluable.

Y a todas aquellas personas que creyeron en mí y a todos los que en algún momento ayudaron en mi formación.

A mis mascotas que desde niña me han motivado a cuidar del ambiente.

ÍNDICE

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	I
JUSTIFICACIÓN	III
OBJETIVOS GENERALES	IV
OBJETIVOS ESPECIFICOS	IV
LISTA DE TABLAS	V
LISTA DE FIGURAS	V
CAPITULO I CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA	
1.1 Importancia ambiental del suelo.....	1
1.2 Características del suelo.....	3
1.2.1 Características físicas.....	3
1.2.2 Características químicas.....	6
1.2.3 Características biológicas.....	7
1.3 Características de las aguas subterráneas.....	8
1.4 Contaminación de suelos.....	9
1.5 Contaminación de las aguas subterráneas.....	11
CAPITULO II PROCESOS DE TRATAMIENTO	
2.1 Tratamientos Térmicos.....	13
2.2 Tratamientos Fisicoquímicos.....	13
2.3 Tratamientos Biológicos.....	14
CAPITULO III TRATAMIENTO BIOLÓGICO	
3.1 Generalidades del tratamiento biológico.....	17
3.2 Procesos de Biorremediación In Situ.....	18
3.2.1 Bioventeo.....	19

3.2.2 Bioestimulación.....	20
3.2.3 Bioaumentación.....	20
3.2.4 Biolabranza.....	21
3.2.5 Fitorremediación.....	21
3.2.6 Aspersión de aire / Bioaspersión.....	22
3.3 Procesos de Biorremediación Ex Situ.....	23
3.3.1 Biorremediación en fase sólida (composteo).....	23
3.3.2 Biorremediación en fase de lodos (biorreactores).....	24
3.4 Comparación de los procesos de Biorremediación.....	24

CAPITULO IV FITORREMEDIACIÓN

4.1 Procesos de Fitorremediación.....	25
4.1.1 Rizofiltración.....	29
4.1.2 Fitotransformación.....	31
4.1.3 Fitovolatilización.....	35
4.1.4 Fitoextracción.....	36
4.1.5 Fitoestabilización.....	38
4.1.6 Rizodegradación.....	41
4.2 Suelos contaminados en México.....	43
4.3 Ventajas y desventajas de la fitorremediación.....	46

CAPITULO V CONCLUSIONES.....	48
-------------------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA.....	50
--------------------------	-----------

GLOSARIO.....	61
----------------------	-----------

ANEXO 1.....	65
---------------------	-----------

ANEXO 2.....	69
---------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

El suelo es la base necesaria para la vida en los ecosistemas terrestres y en gran parte de los ecosistemas acuáticos continentales. Es el medio en el que las plantas echan raíces y del cual obtienen los minerales, es el lugar en el que se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica y donde van a parar los nutrientes en los ciclos minerales. Las raíces ocupan una parte considerable del suelo, sosteniendo las partes exteriores de las plantas y funcionando como bombas de absorción de agua y minerales en solución, necesarios para la fotosíntesis y para otros procesos biogeoquímicos. La vegetación, además, influye en la formación del suelo, sobre sus propiedades físicas y químicas y su contenido en materia orgánica. De este modo, el suelo actúa como una vía de conexión entre el mundo orgánico y el mundo inorgánico, una vía que puede ser fácilmente alterada e incluso destruida por las actividades humanas.

En la República Mexicana existe actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos. En México, al igual que en Estados Unidos de América, la mayor parte de los suelos contaminados que están sometidos a algún tipo de tratamiento lo hacen bajo procedimientos in situ, lo cual significa alrededor del 88% de los casos. Del total de las empresas autorizadas para remediar suelos en México, más de la mitad emplean métodos biológicos, siendo los más utilizados el composteo y la biolabranza.

Los residuos pueden degradarse de manera natural, muchos de los contaminantes orgánicos presentes en ellos, son eventualmente transformados o degradados. Cuando se utiliza algún tipo de tratamiento, éste depende de la facilidad de aplicación, de los métodos de tratamiento, de la disposición de instalaciones especiales, y de la oportunidad de aumentar los procesos biológicos.

El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de microorganismos o vegetales para la degradación de los contaminantes orgánicos. La actividad biológica altera la estructura molecular del contaminante, y el grado

de alteración determina si se ha producido biotransformación o mineralización. La primera implica la descomposición de un compuesto orgánico en otro similar no contaminante o menos tóxico, mientras que la mineralización es la descomposición a dióxido de carbono, agua, sales minerales y compuestos celulares.

El tratamiento puede realizarse en el sitio contaminado (in situ) o fuera de él. Un tratamiento in situ se ve afectado por las restricciones locales, reglamentación ambiental, densidad poblacional o por otras causas que impidan su aplicación. Cuando esto ocurre, el residuo peligroso y el suelo o agua contaminada son llevados a otra parte para su tratamiento (ex situ).

El presente trabajo esta enfocado a la fitorremediación que utiliza plantas como una técnica de limpieza pasiva de suelos, estéticamente agradable, dependiente de la energía solar y usada para un amplia gama de contaminantes. Se emplea en zonas no muy extensas y donde la contaminación no está a mucha profundidad. Aunque las medidas fitorremediadoras son mucho más lentas que los métodos mecánicos y alcanzan solamente la profundidad hasta la cual llegan las raíces, pueden eliminar los últimos restos de contaminantes atrapados en el suelo que a veces quedan con las técnicas mecánicas de tratamiento. Cuando se emplean árboles, en vez de plantas más pequeñas, la contaminación se puede remover a mayor profundidad porque las raíces de los árboles penetran más en el suelo.

JUSTIFICACIÓN

En la biorremediación se aprovechan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destruir), transformar o remover los contaminantes y convertirlos en productos metabólicos inocuos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía.²¹

Dentro de los procesos de biorremediación se encuentra la fitorremediación que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ como ex situ.

La contaminación aguda y difusa de los suelos, los sedimentos y el agua requieren de tecnologías de lucha eficaces y sostenibles. En este sentido la fitorremediación es un concepto relativamente nuevo. El uso de plantas para limpiar, o al menos estabilizar, zonas degradadas por la contaminación química es una tecnología muy atractiva, ya que la presencia de las plantas combina la reducción de la toxicidad con una evidente mejora en la habitabilidad del ecosistema.

Esta monografía pretende ser utilizada como material de consulta para futuras generaciones de la Universidad de Quintana Roo y otras Instituciones locales que necesiten un marco de referencia completo acerca de este tipo de métodos de biorremediación de suelos y aguas subterráneas.

El presente trabajo también está muy relacionado con la temática actual de biorremediación de suelos y aguas subterráneas, técnica importante en la Ingeniería Ambiental, ya que en nuestros días los procesos biológicos, son en general, los más usados en todo el mundo, debido a su bajo costo y fácil aplicación. En el caso de Quintana Roo, estos métodos podrían usarse para la recuperación de corrientes y costas contaminadas con diferentes sustancias o materiales, como se plantea en el capítulo IV, con el uso de manglares en la remoción de materia orgánica procedente de las aguas residuales descargadas por los drenajes pluviales sin tratamiento previo.

Por último se introducen casos de estudio realizados en diferentes países y en México en los que se aplica la fitorremediación para contaminantes específicos.

OBJETIVOS GENERALES

- 1) Realizar una investigación bibliográfica de los procesos de fitorremediación de suelos y aguas subterráneas.
- 2) Comparar las técnicas usadas en la fitorremediación de suelos y aguas subterráneas
- 3) Comparar los diversos casos de estudio realizados en diferentes partes del mundo y México.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1) Realizar una reseña de los diferentes tratamientos para la recuperación de suelos (térmicos, fisicoquímicos, biológicos).
- 2) Establecer las diferencias entre las técnicas de fitorremediación para el tratamiento de los suelos y las aguas subterráneas, mediante cuadros comparativos.
- 3) Revisar cuáles son las aplicaciones de la fitorremediación en México.
- 4) Plantear las ventajas y desventajas de las técnicas de fitorremediación.

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Esquema de la movilidad de contaminantes hacia un pozo alimentado por el acuífero.

FIGURA 2 Esquema de la contaminación en pozos.

FIGURA 3 Circulación de los nutrientes entre las plantas y el suelo.

FIGURA 4 Esquema del flujo de oxígeno, agua y compuestos químicos a través del árbol.

FIGURA 5 Destrucción de contaminantes orgánicos por fitotransformación.

FIGURA 6 Procesos de la fitovolatilización, la fitodegradación y la fitoextracción que ocurren en diferentes partes de la planta.

CAPITULO I CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA

1.1 Importancia ambiental del suelo

El suelo es la fina capa de materia fértil que recubre la superficie de la Tierra. La profundidad del suelo y sus propiedades fisicoquímicas varían de acuerdo con el lugar, en general el suelo tiene cinco componentes principales: 1) partículas minerales inorgánicas, 2) residuos* orgánicos, 3) agua, 4) gases y 5) sistemas biológicos.⁴

El conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo lo hacen un sistema clave, especialmente importante en los ciclos biogeoquímicos superficiales, en los que actúa como un reactor complejo, capaz de realizar funciones de filtración, descomposición, neutralización, inactivación, almacenamiento, etc. Por todo ello el suelo actúa como una barrera protectora de otros medios más sensibles, como los hidrológicos y los biológicos.⁴

La mayoría de los suelos presentan una elevada capacidad de autodepuración. Esta capacidad de autodepuración tiene un límite diferente para cada situación y para cada suelo. Cuando se alcanza ese límite el suelo deja de ser eficaz e incluso puede funcionar como una fuente de sustancias peligrosas para los organismos que viven en él o en otros medios relacionados.⁴

Un suelo contaminado es aquél que ha superado su capacidad de autodepuración o amortiguamiento para una o varias sustancias, y como consecuencia, pasa de actuar como un sistema protector a ser causa de problemas para el agua, la atmósfera y los organismos. Al mismo tiempo se modifican los equilibrios biogeoquímicos y aparecen cantidades anómalas de determinados componentes que originan modificaciones importantes en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.⁴

Existen un sin número de sitios contaminados en todo el mundo, por ejemplo la producción de explosivos como el RDX (Hexahidro 1,3,5-trinitro-1,3,5 triazina) y TNT (2,4,6-trinitro-tolueno) ha conducido a la contaminación de numerosas áreas de los Estados Unidos y el mundo, como Milán, Tennessee y Middletown, en Estados Unidos. También es preocupante la contaminación del agua con antracina y

* La definición aparece en el glosario

metolacoloro. México no está exento de tener lugares contaminados, los más comunes son los sitios contaminados con hidrocarburos y metales pesados, por ejemplo Veracruz, Tabasco y Campeche.^{40, 78}

El volumen ocupado por cada uno de los componentes, en un suelo superficial se encuentra distribuido en general como sigue: materia mineral, 45%; materia orgánica, 5%; agua, 25% y aire, 25%. El suelo, es formado a través de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos sobre el medio rocoso original, a través de la meteorización. El suelo constituye el soporte material para el desarrollo de organismos vivos, la mitad de su volumen es espacio poroso.^{1, 2}

El volumen de agua y aire guardan una relación inversamente proporcional entre sí, ya que la entrada de agua en el suelo elimina el aire y al eliminar el agua por medio del drenaje, la evaporación o el crecimiento de las plantas, el espacio poroso que estaba ocupado por el agua es ocupado nuevamente con aire.²

El agua presente en el suelo, también llamada disolución del suelo*, es una fina capa acuosa que rodea las partículas edáficas y tiene una importancia decisiva para el desarrollo de los procesos químicos en el medio natural, ya que actúa como intermediario entre la litosfera* y los organismos vivos, un ejemplo claro son las plantas que toman el agua rica en elementos minerales y estas al descomponerse forman los coloides orgánicos* del suelo. Los coloides* intercambian solutos* con la disolución del suelo* del mismo modo que lo hacen los coloides inorgánicos*, formados en los procesos de meteorización* del material originario.^{1, 2}

Por otra parte la disolución del suelo* tiene una interrelación clara con la atmósfera a través del balance entre el agua de lluvia absorbida y la evaporación. También tiene una relación indirecta con los gases atmosféricos, puesto que se establece un intercambio de gases entre la atmósfera y el aire del suelo. Al mismo tiempo existe un equilibrio entre el aire del suelo y la disolución del suelo*, mediante el cual se transfieren solutos*.²

Finalmente, dependiendo del balance evaporación – absorción agua de lluvia, tiene lugar la infiltración de agua edáfica hacia horizontes más profundos, en un proceso en el que esta va interaccionando con el medio edáfico circundante, intercambiando elementos y alimentando los acuíferos subterráneos.¹

* La definición aparece en el glosario

1.2 Características del suelo

1.2.1 Características físicas.

Los suelos se distinguen por diferencias en sus propiedades físicas y químicas. Entre las propiedades físicas se incluyen el color, la textura, la estructura, la humedad y la profundidad. Todas estas propiedades pueden ser muy diferentes en un suelo y otro.

En las regiones templadas, los colores negro – parduzco y pardo oscuro, especialmente en el horizonte A, indican generalmente una cantidad considerable de materia orgánica. El horizonte B de suelos con buen drenaje puede variar en cualquier parte entre un color pardo claro y colores rojizos o amarillentos. Los colores pardo oscuro y negruzcos, especialmente en los horizontes más profundos, indican un drenaje pobre. El cuarzo, el caolín los carbonatos de calcio y magnesio, el yeso y varios compuestos de hierro ferroso, dan colores blanquecinos y grisáceos al suelo.¹³

El tamaño relativo de las partículas del suelo se expresa mediante el término *textura*, el cual se refiere al grado de finura o grosor. Más específicamente, la textura es la proporción relativa de arena, limo y arcilla. La proporción y magnitud de muchas reacciones físicas y químicas en los suelos están gobernadas por la textura, debido a que ésta determina el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren las reacciones.²

La fracción inorgánica del suelo constituye el 45% de la composición edáfica. Según el tamaño de las partículas minerales, se pueden distinguir tres tipos de fracciones: la fracción más gruesa (arena), con tamaños de partícula entre 2 y 0.05 mm (milímetros), la fracción fina (limo), con tamaños comprendidos entre 0.05 y 0.002 mm, y finalmente la fracción muy fina (arcilla), con tamaños inferiores a 0.002 mm. Las partículas de arena son comparativamente de tamaño grande y por lo tanto, exponen una superficie pequeña comparada con la expuesta por un peso igual de partículas de arcilla o de limo.²

Debido a que la arena y el limo están formados principalmente por partículas que resultan de la descomposición de rocas y minerales, difieren principalmente en tamaño. Como una consecuencia, el limo tiene un área superficial (m^2/g) mayor,

una velocidad de intemperización más rápida, una liberación de nutrientes solubles para el crecimiento vegetal mayor que en la arena y gran capacidad para retener el agua disponible para el crecimiento vegetal. Los suelos con una capacidad mayor para retener agua contra la fuerza de la gravedad se caracterizan por tener alto contenido de arcilla.²

A su vez, la textura de un suelo da una idea de su porosidad, que es una medida del volumen de poros o espacios por volumen del suelo. Normalmente del 40 al 60% del volumen del suelo son poros, por los cuales puede circular el aire y el agua.²

Por otra parte el tamaño medio de los poros de un suelo determina su permeabilidad, es decir, la velocidad con que el fluido acuoso y el aire se mueven de las capas altas del suelo a las más profundas.²

Las partículas de arcilla, dada su gran superficie específica, intercambian iones de la disolución del suelo, que es lo que hace que tenga un buen poder de retención de nutrientes. No obstante, se compactan muy fácilmente, por lo que su capacidad de retención es buena y, su capacidad de infiltración es baja, por esta razón los suelos arcillosos suelen estar inundados. En el lado opuesto están los suelos arenosos, los cuales, si bien son fácilmente cultivables, tiene poca capacidad de retención de agua y de nutrientes, debido al gran tamaño de poros que los caracteriza. El suelo franco*, es un suelo formado por una mezcla determinada de arcilla, arena y limo, que presenta unas propiedades óptimas para el cultivo. En concreto, la proporción de cada una de las fracciones inorgánicas que caracteriza un suelo franco* gira entorno de un 40% de arena, un 40% limo y un 20% arcilla.²

Cuando se considera el arreglo de las partículas del suelo, se utiliza el término *estructura* la cual da una indicación de cómo se unen las partículas edáficas. La estructura se refiere a la agregación de partículas primarias de suelo (arena, limo, arcilla) en partículas compuestas o grupo de partículas primarias, las cuales están separadas de los agregados adyacentes por superficies de ruptura.²

La estructura modifica la influencia de la textura respecto de las relaciones de humedad y aire, disponibilidad de nutrientes para la planta, acción de microorganismos y desarrollo de la raíz.²

* La definición aparece en el glosario

Debido sobretodo a la infiltración de agua edáfica que produce una cierta meteorización* química, se desarrolla una estructura secuencial en capas distintas según la profundidad (horizontes). El conjunto de los horizontes, denominado perfil, da una idea de la estructura global de un suelo.¹

Los distintos horizontes de un suelo, los cuales pueden distinguirse visualmente, tienen diferentes propiedades físicas y químicas, dependiendo del proceso de formación del suelo. En general, en un suelo pueden distinguirse los siguientes tres horizontes (de menos a más profundos):

- ❖ Horizonte A: Está constituido de partículas minerales y materia orgánica fresca y parcialmente descompuesta. Es una zona del suelo donde se produce mucha lixiviación, principalmente de sales de Fe, Al y Mn. Contrarrestando la acumulación de materia orgánica procedente de organismos vivos, tiene lugar una transferencia de compuestos orgánicos sencillos hacia horizontes más profundos. En este horizonte, predominan los materiales silícicos.¹
- ❖ Horizonte B: Se produce la acumulación de los compuestos de lixiviación procedentes del horizonte A, en esta región tiene lugar una lixiviación moderada y la oxidación de materia orgánica. Este horizonte tiene óxidos de Fe(III), por lo que generalmente tiene cierta coloración entre amarilla y marrón. Así mismo, hay presencia predominante de silicatos laminares.¹
- ❖ Horizonte C: Es el más profundo y se caracteriza prácticamente por la inexistencia de lixiviación, esta es una zona de meteorización pobre y se observa la presencia de material poco particulado.¹

A causa de los procesos de oxidación de la materia orgánica y de la formación de óxidos en los tres horizontes hay un consumo neto de oxígeno edáfico, lo que conlleva a un empobrecimiento de O_2 con la profundidad. El fenómeno se observa por la producción de CO_2 paralela a la disminución de materia orgánica al aumentar la profundidad.¹

Las partículas del suelo no se encuentran aisladas debido a que forman agregados estructurales llamados peds*, o agregados del suelo que están formados por

* La definición aparece en el glosario

partículas individuales (minerales, materia orgánica y huecos) y le confieren al suelo una estructura determinada.²

Las arenas que son el material inerte se unen mediante la materia orgánica, las arcillas y otros agentes cementantes, se dice que cuando las arcillas están dispersas, el suelo carece de estructura y si están floculadas, forman estructura.³

Los agregados del suelo o peds* se clasifican con base en su forma, como esféricos, laminares, en forma de bloque, de prismas, columnar, en bloques angulares, en bloques subangulares, y en granular.^{3, 13}

1.2.2 Características Químicas

Por lo que se refiere a la composición química la fracción inorgánica del suelo se compone de minerales primarios y secundarios. Los minerales primarios son aquellos que han sido formados a elevadas temperaturas y derivados de forma inalterada de rocas ígneas y metamórficas. Son minerales primarios, el cuarzo ((SiO₂)_n), los feldspatos ((SiO₂)_n), las micas (K(Al₂(Si₃Al)O₁₀(OH)₂)), los piroxenos ((SiO₃²⁻)_n), los anfíboles ((Si₄O₁₁⁶⁻)_n), etcétera.¹

Los minerales secundarios, se forman a bajas temperaturas derivados de rocas sedimentarias y también por meteorización* de minerales primarios. Los minerales de la fracción arcillosa, los compuestos de azufre, carbonatos y diversos óxidos son minerales secundarios.¹

Si bien la materia orgánica del suelo representa solamente el 5% en peso de un suelo productivo, juega un papel importante en la fertilidad.¹

Generalmente, la materia orgánica del suelo regula los procesos químicos, biológicos y físicos que en él ocurren.⁴

En los procesos químicos la materia orgánica interviene en:

- ❖ El suministro de elementos químicos como el nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes para las plantas.
- ❖ La estabilización de la acidez del suelo.
- ❖ La capacidad de cambio catiónico de los suelos.
- ❖ La capacidad de intercambio aniónico, donde se acumulan nitratos, fosfatos y sulfatos.

* La definición aparece en el glosario

- ❖ La regulación de los niveles de disponibilidad de nutrientes principales y de elementos químicos menores.
- ❖ Los fenómenos de adsorción que inactivan los plaguicidas.⁴

La materia orgánica también afecta propiedades físicas del suelo por ejemplo:

- ❖ En la estructura del suelo, favorece la formación de agregados, disminuye la plasticidad y la agregación global del suelo.
- ❖ En el uso del agua mejora la infiltración, reduce la evaporación, mejora el drenaje y la estructura, lo que favorece la aireación, favorece el calentamiento y a través de los coloides orgánicos* ayuda a retener el agua.
- ❖ En el color del suelo favorece o dificulta la absorción de la energía solar.⁴

Las sustancias húmicas formadas a partir de la descomposición de materia orgánica, tienen propiedades coloidales debido a su tamaño y carga (retienen agua, hinchan, contraen, fijan soluciones en superficie, dispersan y flocculan). La materia orgánica es por tanto una fase que reacciona con la solución del suelo y con las raíces.³

La materia orgánica fija iones de la solución del suelo, los cuales quedan débilmente retenidos, están en posición de cambio, evita por tanto que se produzcan pérdidas de nutrientes en el suelo. La capacidad de cambio es de 3 a 5 veces superior a la de las arcillas, y por tanto una buena reserva de nutrientes.³

Influye en el pH mediante la producción de compuestos orgánicos que tienden a acidificar el suelo y al mismo tiempo es un agente de alteración por su carácter ácido. Lo que descompone los minerales Influye en el estado de dispersión/floculación del suelo.³

1.2.3 Características biológicas

El interior del suelo posee unas condiciones ambientales drásticamente diferentes del ambiente sobre su superficie o por encima de ésta; aún así los requerimientos esenciales no son muy distintos. Al igual que los organismos que viven fuera del suelo, los seres edáficos necesitan espacio vital, oxígeno, alimento y agua. Sin la presencia y la intensa actividad de los seres vivos, el suelo no se desarrollaría como

* La definición aparece en el glosario

lo hace. Los habitantes del suelo, desde las bacterias y los hongos hasta las lombrices de tierra, transforman los minerales inertes en materia viva.¹³

El suelo posee varias propiedades relevantes para la vida de los organismos. Es estructural y químicamente estable. Su atmósfera está casi saturada o lo está por completo, hasta que la humedad del suelo baja de cierto punto crítico. El suelo actúa como refugio contra temperaturas, vientos, luz o sequedad extremos. Estas condiciones permiten que la fauna edáfica realice ajustes sencillos frente a condiciones poco favorables. Los espacios porosos son de gran importancia, ya que determinan el espacio vital, la humedad y las propiedades gaseosas del ambiente del suelo.¹³

1.3 Características de las aguas subterráneas

El agua pura no existe en la naturaleza, contiene sales disueltas en proporción variable, puede contener arcillas y otros materiales coloidales o en suspensión que también le dan cierta turbidez y hace necesario un tratamiento previo para un uso concreto.⁷

Las aguas subterráneas son aquellas que se han filtrado desde la superficie de la tierra hacia abajo por los poros del suelo. Las formaciones de suelo y roca que se han saturado de líquido se conocen como depósitos de agua subterránea, o acuíferos, comúnmente el agua es extraída de estos depósitos por medio de pozos. Las aguas subterráneas son menos susceptibles a la contaminación que las de superficie, aunque, una vez contaminadas, su restauración aun si es posible es difícil y de largo plazo.⁷

Las aguas subterráneas tienen una mayor oportunidad de reducir materiales en suspensión por las mayores superficies de contacto a las que están expuestas lentas velocidades de circulación, así como mayor presión y temperatura a las que están sometidas y facilidad de disolver CO₂. Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de las aguas superficiales. Estas mismas condiciones físicas a las que son sometidas las aguas subterráneas suponen asimismo una reducción de las materias en suspensión y de la materia orgánica, debido ésta última a la acción de los propios microorganismos del terreno.⁷

1.4 Contaminación de suelos

En muchas zonas, los suelos han sido enormemente alterados. Muchos han sido cubiertos de cemento, otros removidos por excavaciones, actividades mineras o por la construcción de carreteras, y expuestos de esta manera a la erosión por el viento y el agua. Los horizontes superiores son con frecuencia mezclados por las actividades agrícolas, o compactados por maquinaria pesada y apisonadoras.¹³

Los suelos protegidos por la vegetación mantienen su integridad. La vegetación minimiza la acción del viento y dispersa las gotas de lluvia, reduciendo su fuerza erosiva. El agua se filtra poco a poco entre la hojarasca, penetrando posteriormente en el suelo. Si la cantidad de lluvia supera la capacidad del suelo para absorberla, el agua en exceso se desplaza por la superficie, pero la vegetación disminuye su movimiento.¹³

Al verse desprovistos de la cubierta protectora de vegetación y hojarasca, a causa de la labranza, tala de árboles, pastoreo y construcción de carreteras y estructuras urbanas, los suelos quedan expuestos a la erosión: la remoción de partículas por el viento y el agua, con una velocidad mayor que la de formación de suelo nuevo. La pérdida de las capas superiores ricas en humus, con una notable capacidad absorbente y de estructura granular, deja al descubierto las capas inferiores pobres en humus, menos absorbentes, más inestables y fácilmente erosionables.¹³

Un suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en el comportamiento de los suelos. Las sustancias, a esos niveles de concentración se vuelven tóxicas para los organismos del suelo, observándose una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo.⁴

Los agentes contaminantes son muy diversos, dentro de ellos tenemos los metales pesados, las emisiones ácidas atmosféricas, la utilización de agua de riego salina y los fitosanitarios.⁴

Estos agentes contaminantes proceden generalmente de actividades humanas como se muestra a continuación:⁴

- ❖ Los metales pesados en pequeñas dosis pueden ser beneficiosos para los organismos vivos al ser utilizados como micronutrientes, pero pasado cierto umbral se convierten en elementos nocivos para la salud.⁴
- ❖ Las emisiones ácidas atmosféricas procedentes de la industria, del tráfico y de los abonos nitrogenados que sufren el proceso de desnitrificación, provocan la disminución del pH del suelo con lo que se puede superar la capacidad de amortiguamiento y liberar elementos.⁴
- ❖ Utilización de agua de riego salina. El mal uso del agua de riego provoca la salinización y la solidificación del suelo. En el primer caso se produce una acumulación de sales más solubles que el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) que interfieren en el crecimiento de la mayoría de los cultivos y plantas no especializadas. En el segundo caso se produce una acumulación de sodio intercambiable que tiene una acción dispersante sobre las arcillas y de solubilización de la materia orgánica, que afecta negativamente a las propiedades físicas del suelo, por lo que el medio será menos apto para el crecimiento de los cultivos.⁴
- ❖ Fitosanitarios, dentro de estos se encuentran los insecticidas, herbicidas, fungicidas y fertilizantes. Son, generalmente, productos químicos sintéticos y sus efectos dependen tanto de las características de las moléculas orgánicas como de las características del suelo. Los fertilizantes además de contener metales pesados, producen contaminación por fosfatos y nitratos.⁴
- ❖ Los contaminantes minerales son aquellas sustancias solubles en el agua, tales como Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , etcétera. En general casi no interfieren en el terreno y se mueven a velocidad similar a la del agua. Salvo el efecto del cambio iónico y algunas precipitaciones de los menos solubles apenas son modificados, este tipo de contaminación puede considerarse como irreversible, excepto en condiciones reductoras para el NO_3^- y el $\text{SO}_4^{=}$ y en condiciones oxidantes para el Fe^{++} y Mn^{++} .⁷
- ❖ La contaminación por derivados del petróleo es frecuente y sus consecuencias pueden ser graves. Esta contaminación puede producirse por fugas de depósitos, vertidos accidentales, al enterrar los residuos* que los

* La definición aparece en el glosario

contienen, aguas provenientes del aglutinado de caminos asfaltados, riego de caminos de tierra con aceites residuales, etcétera.⁷

1.5 Contaminación de aguas subterráneas

El aumento de la población es una de las causas de contaminación en los mantos freáticos, ya que el agua de los abastecimientos públicos utilizada para fines domésticos produce la evacuación prácticamente del mismo volumen, pero con sus características alteradas. La elevación del nivel de vida brinda asimismo un aumento del consumo per capita y por consiguiente de los caudales vertidos de aguas residuales, en las que se introducen cada vez más compuestos químicos de difícil depuración.⁷

El desarrollo de los países que trae consigo su industrialización, requiere grandes cantidades de agua para las distintas actividades mineras, metalúrgicas, químicas, etcétera, lo que a su vez genera contaminación por las aguas vertidas con elementos tóxicos que afectan la calidad del agua en su estado natural, tanto en fuentes superficiales como subterráneas.⁷

Los tiraderos de basura son, asimismo, focos de contaminación al arrastrar la lluvia en forma superficial o filtrándose a través del suelo, ciertos elementos solubles que se incorporan a los recursos de agua existentes, y aún en mayor grado si entran directamente en contacto con aguas superficiales o subterráneas.⁷

Los fertilizantes utilizados en la agricultura y las fosas sépticas introducen, entre otros elementos, fósforo y nitrógeno, como se puede observar en la figura 1; estos elementos favorecen la proliferación de algas en las aguas superficiales, y reducen la calidad de las aguas subterráneas.⁷

Otro factor es la utilización de productos radioactivos para fines científicos e industriales, como una fuente potencial de contaminación, lo cual se produce en las explosiones nucleares y en forma de polvo atmosférico llega al suelo y a las aguas subterráneas a través de la lluvia.⁷

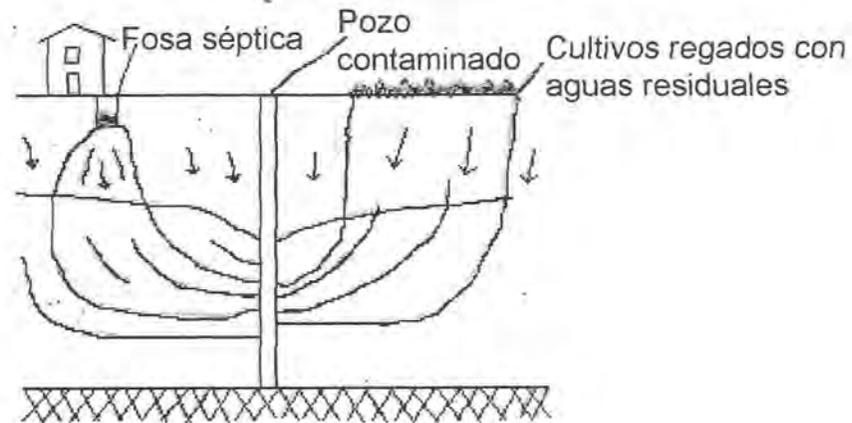


Figura 1 Esquema de la movilidad de contaminantes hacia un pozo alimentado por el acuífero.⁷

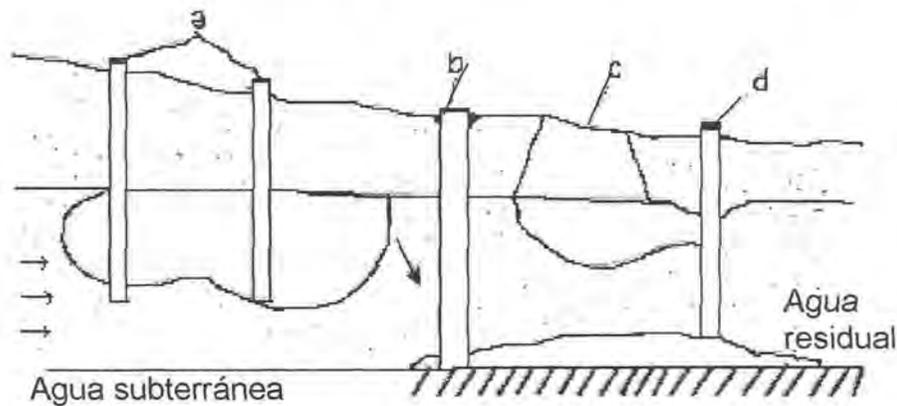


Figura 2. Esquema de la contaminación en pozos superficiales.⁷

Las aguas subterráneas pueden sufrir contaminación directa cuando se introducen sustancias contaminantes en el acuífero, por ejemplo el vertido en pozos de inyección, o bien una contaminación indirecta, por dilución, cuando esta se produce por contaminación de la recarga natural o por entrada de aguas contaminadas debido a la alteración de las condiciones hidrodinámicas preexistentes, tales como las producidas a causa de bombeos, drenajes, etcétera; por ejemplo, en la figura 2 podemos observar la contaminación de los pozos superficiales por el deficiente acabado de los pozos (a) y la contaminación de los mismos (b y d) a partir de un pozo de difusión de residuales (c).⁷

CAPITULO II PROCESOS DE TRATAMIENTO

En general para la remediación de suelos y aguas subterráneas se emplean los métodos fisicoquímicos, térmicos y biológicos.

2.1 Tratamientos Térmicos

En el tratamiento térmico se busca la destrucción de los contaminantes mediante el suministro de calor. Se trata de un tratamiento ex situ (cuando el suelo se traslada a una instalación de tratamiento).⁴

La incineración se define como la oxidación térmica de la materia orgánica a dióxido de carbono, agua, y cenizas inertes. Se pueden producir sustancias orgánicas parcialmente quemadas, materia inorgánica particulada (ceniza fina), gases ácidos (HCl) y óxidos de azufre (principalmente SO_2), según el material que se alimente y las condiciones de combustión.⁴

En la incineración la combustión de los contaminantes se consigue sometiendo al suelo a altas temperaturas (alrededor de 1000°C). El tratamiento se desarrolla en dos fases. En una primera se oxidan la mayor parte de los contaminantes. El proceso se completa en la segunda fase en la que se mantiene al suelo a altas temperaturas durante el tiempo necesario para conseguir la destrucción completa de los contaminantes y gases.¹⁰

2.2 Tratamientos Fisicoquímicos

Los tratamiento fisicoquímicos los podemos dividir para su estudio en químicos y en físicos, pero por lo regular al aplicar un tratamiento físico tenemos que aplicar también un químico por eso están íntimamente ligados.

Los tratamientos físicos se utilizan para la separación de sólidos y líquidos, entre ellos se encuentra la centrifugación, la flotación, la sedimentación y la filtración. El carbón activado es eficaz para la extracción de sustancias orgánicas tóxicas. Para la separación de componentes específicos se puede emplear uno de los procesos de membrana semipermeable (ósmosis inversas*, diálisis* o electrodiálisis*). La destilación es otro proceso físico útil para separar compuestos específicos.¹¹

* La definición aparece en el glosario

El tratamiento químico es un componente indispensable de la mayor parte de las operaciones de tratamiento de residuos peligrosos*. Se trata de depurar el suelo mediante la degradación de los contaminantes por reacciones químicas. Frecuentemente se trata de reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos.¹⁰

Algunos ejemplos comunes de su aplicación son los siguientes:

- ❖ Oxidación (de cianuros a cianatos, por cloración alcalina)
- ❖ Reducción (de Cr^{6+} a Cr^{3+})
- ❖ Precipitación (de Cd, Hg, etc., con sulfuros)
- ❖ Ajuste de pH (de lechada de cal, con el licor agotado de baños limpiadores de metales)
- ❖ Intercambio iónico (extrae las sustancias inorgánicas metálicas y no metálicas)
- ❖ Estabilización/ Solidificación (de lodos inorgánicos, y de suelos contaminados con agentes que se unen).⁴

2.3 Tratamientos Biológicos

El tratamiento biológico consiste en potenciar el desarrollo de un organismo con capacidad de degradación de contaminantes.¹⁰

El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de microorganismos y/o vegetales para la degradación de los contaminantes orgánicos. La actividad biológica altera la estructura molecular del contaminante y el grado de alteración determina si se ha producido biotransformación* o mineralización*.¹¹

Los procesos biológicos se aplican frecuentemente al tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos y pueden ser aplicados en fase sólida o líquida. Los procesos en fase sólida son aquellos en donde el suelo se trata con un contenido de agua mínima. En el caso de los procesos en fase lodo se suspende el suelo en agua. Una ventaja de los procesos en fase sólida es que las bajas velocidades de transferencia de materia permiten trabajar a niveles de contaminación que serían tóxicos para los microorganismos si se realizaran en fase líquida. Por otro lado los sistemas sólidos son capaces de sustentar el crecimiento

* La definición aparece en el glosario

de microorganismos que no desarrollan bien en fase líquida (hongos) y producen complejos enzimáticos capaces de oxidar compuestos complejos.¹¹

La degradación de un contaminante en suelo depende de una serie de factores, entre ellos, actividad de los microorganismos y transferencia de masa desde el suelo hasta el microorganismo.^{10,11}

Los microorganismos pueden degradar contaminantes en forma de cultivos puros* (especie única) o cultivos mixtos* (varias especies que mantienen una relación simbiótica). Cuando se trata de este último caso, el tratamiento biológico implica una compleja interacción de especies microbianas. La velocidad de crecimiento y la utilización de sustratos es generalmente superior en cultivos mixtos que en cultivos puros. En una mezcla de poblaciones los consumidores primarios inician el proceso de degradación y los consumidores secundarios utilizan los productos metabólicos de los primeros para degradarlos.¹¹

La biorremediación se puede dividir de acuerdo a la forma de aplicarse (esto se estudiará en el capítulo tres) como sigue:

❖ Técnicas de Biorremediación In Situ

- Bioventeo
- Bioestimulación.
- Bioaumentación
- Biolabranza
- Fitorremediación

❖ Procesos de Biorremediación Ex Situ

- Biorremediación en fase sólida (composteo)
- Biorremediación en fase de lodos (biorreactores)

Se pueden aplicar técnicas in-situ (en el lugar donde se encuentra el suelo contaminado) o ex-situ (cuando el suelo se traslada a una instalación para su tratamiento).¹¹

Las técnicas in situ buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes

* La definición aparece en el glosario

(bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, especies vegetales (fitorremediación) además del control de temperatura y pH.^{12, 24}

El tratamiento ex-situ de suelos, sedimentos y otros sólidos contaminados con hidrocarburos se puede realizar en un variado número de procesos en fase sólida y en fase lodo.¹¹

Los procesos de biorremediación ex situ, incluyen: (i) procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y (ii) de biodegradación en fase sólida, en donde los suelos colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biorreactores), en donde se agrega agua y nutrientes.^{12, 24}

CAPITULO III TRATAMIENTO BIOLÓGICO

3.1 Generalidades del tratamiento biológico

El tratamiento biológico es la degradación o absorción de contaminantes por la acción de microorganismos o vegetales que modifican la estructura molecular de los compuestos orgánicos. El grado de alteración determina si se ha producido biotransformación* o mineralización*. La biotransformación se refiere a la descomposición de un compuesto orgánico en otro similar generalmente más simple y en la mineralización se produce la descomposición total de las moléculas orgánicas en dióxido de carbono, agua, residuos* inorgánicos inertes y el resto se incorpora a las estructuras de los microorganismos.¹⁴

El tratamiento biológico de suelos y agua subterránea contaminada involucra el uso de microorganismos o vegetales para la degradación de los contaminantes en su mayoría orgánicos.¹⁴

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. El tratamiento biológico depende de la actividad catabólica de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía. Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. Los procesos de biorremediación incluyen reacciones de oxidación-reducción, sorción, intercambio iónico, incluso reacciones de complejamiento* y quelación*.^{13, 22, 23}

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse in situ o ex situ, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, aguas subterráneas, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo,

* La definición aparece en el glosario

solventes, explosivos, clorofenoles, contaminantes fitosanitarios, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos, etc.^{13, 22, 23, 24}

La biodegradación de los contaminantes en el ambiente es un proceso complejo cuyos aspectos cuantitativos y cualitativos dependen de la naturaleza y cantidad del contaminante, de las condiciones locales y estacionales, y de la composición de la comunidad microbiana autóctona.¹³

La aplicación de técnicas de biorremediación de suelos a diferentes escalas exige un intenso seguimiento y control de las variables operacionales.¹⁴

Los parámetros críticos a considerar en un tratamiento biológico son:

- ❖ Tipo y concentración de contaminante
- ❖ Concentración de microorganismos
- ❖ Concentración de nutrientes
- ❖ Aireación
- ❖ Condiciones macroambientales
- ❖ Presencia de inhibidores
- ❖ Biodisponibilidad del contaminante.¹⁴

El tamaño de los constituyentes que forman el residuo* varía desde una sencilla molécula a diferentes agrupaciones. Para que se produzca la degradación, el residuo, como sustrato, tiene que entrar primero en contacto con la parte más externa de la célula bacteriana o de la planta.¹⁴

De forma general, la actuación de una gran variedad de enzimas, que no necesariamente es producida por la misma especie bacteriana o vegetal, degrada los residuos orgánicos a compuestos más simples.¹⁴

3.2 Procesos de Biorremediación In Situ

Las técnicas in situ buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Lo que generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y humedad, además del control de temperatura y pH.^{13, 25}

* La definición aparece en el glosario.

Los métodos in situ consisten en acelerar el crecimiento de los microorganismos biodegradadores presentes en las zonas saturadas y normalmente se trata de eliminar los tóxicos presentes en el acuífero.¹⁶

La biorremediación in situ para el agua subterránea acelera los procesos naturales de biodegradación que tienen lugar en la región subterránea debajo de la capa freática. En los lugares donde tanto el suelo como el agua subterránea están contaminados, esta técnica sirve para tratar ambos.¹⁶

3.2.1 Bioventeo

El bioventeo es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores.^{13, 22}

La cantidad, ubicación y profundidad de los pozos dependen de muchos factores geológicos y consideraciones técnicas.¹⁶

Se puede usar un ventilador para forzar la entrada de aire en el suelo por empuje o tracción por los pozos de inyección. El aire provee una fuente constante de oxígeno lo que incrementa el crecimiento de microorganismos presentes en el suelo de manera natural, también pueden emplearse aditivos como ozono o nutrientes (nitrógeno o fósforo) para estimular el crecimiento bacteriano.^{16, 17}

El bioventeo usa el aire extraído junto a una serie de sondas de inyección de vapor. El aire extraído opera a presiones extremadamente bajas, dando un flujo de oxígeno sin una significativa volatilización de contaminantes del suelo. La capacidad del tratamiento depende del número de sondas de inyección, del tamaño de la extracción y de las características del sitio como la porosidad del suelo.¹⁷

El bioventeo es más aplicable en sitios donde la profundidad del agua excede los tres metros y el suelo superficial no requiere tratamiento o será tratado con otro método. Los suelos más profundos y sitios con niveles freáticos más profundos pueden ser tratados si la superficie es encapsulada.¹⁷

En los lugares donde se ha aplicado el bioventeo, éste tiene el potencial de ser el método de remediación más bajo en costo.¹⁷

3.2.2 Bioestimulación.

La bioestimulación implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y oxígeno) a través del suelo contaminado para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos in situ.^{13, 22}

En acuíferos subterráneos, se perfora un pozo hasta el acuífero, se extrae agua contaminada y se inyecta una solución con nutrientes saturada de oxígeno. El principal problema que se tiene con esta técnica es que el agua inyectada no puede distribuirse adecuadamente en toda la zona contaminada, además de que las diferencias en la disposición y la densidad de las capas del suelo pueden formar flujos preferenciales sin llegar a los lugares contaminados, o contaminar las aguas subterráneas.¹⁶

3.2.3 Bioaumentación

Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación*. El tamaño del inóculo a utilizar, depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores.^{13, 14}

Las poblaciones especializadas en degradar cierto tipo de compuestos son seleccionadas por cultivos enriquecidos o por manipulación genética. Los cultivos enriquecidos incluyen la exposición de los microorganismos a elevadas concentraciones de contaminantes o mezcla de contaminantes.¹⁷

Entre los factores que pueden limitar el éxito de la inoculación están la concentración del contaminante, pH, temperatura, salinidad y presión osmótica* e hidrostática*, estos factores pueden actuar solos o en conjunto para inhibir la

* La definición aparece en el glosario

sobrevivencia de los microorganismos. El ambiente del subsuelo puede contener sustancias u otros organismos que pueden ser tóxicos o inhibidores del crecimiento. Casi siempre las inoculaciones suelen ser más exitosas en ambientes controlados, como en los biorreactores.¹⁷

3.2.4 Biolabranza

Durante el proceso de biolabranza la superficie del suelo contaminado es tratada en el mismo sitio por medio del arado (mezcla suelo limpio con suelo contaminado).¹³

Las operaciones de este tratamiento son diseñadas para promover la actividad microbiológica aeróbica, ya que es el oxígeno transferido al suelo el componente crítico de operación. Para proveer una adecuada aireación, la máxima profundidad a la cual el suelo puede ser tratado es de 45 cm aproximadamente.¹⁸

El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, removiéndose periódicamente para favorecer su aireación. El pH, temperatura y aireación se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados. La diferencia entre la biolabranza y el composteo es que en la biolabranza, el suelo contaminado es mezclado con suelo limpio, mientras que en el composteo generalmente se realiza sólo con el suelo contaminado.^{13, 22, 26}

También se le puede hacer algunas modificaciones como agregar agua, fertilizantes, limo, etcétera, para hacer las condiciones más óptimas para el crecimiento microbiano.¹⁸

La biolabranza también puede darse ex situ mediante celdas. En las celdas puede ser manejado con mayor facilidad el crecimiento y actividad microbiana y promover la biodegradación.¹⁸

3.2.5 Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ como ex situ.¹³

La fitorremediación usa plantas para limpiar los contaminantes del suelo, tomando las ventajas de las plantas y sus habilidades naturales para acumular, o degradar constituyentes del suelo y del agua. La biorremediación realizada con plantas, a veces se refiere a un tipo de fitorremediación, incluye la interacción de las raíces de la planta con los microorganismos asociados con el sistema de raíces para remediar suelos que contienen elevadas concentraciones de compuestos orgánicos. Esta técnica puede proveer una efectividad al método de remediación del suelo y aguas subterráneas contaminadas, con metales, residuos* radioactivos, y varios tipos de compuestos orgánicos, con menos desechos secundarios y un menor impacto ambiental, los cuales podrían ser generados con el uso de un método tradicional de remediación.¹⁷

Todas las plantas necesitan nutrientes, incluyendo metales, del suelo y el agua. Algunas plantas tiene la capacidad de almacenar grandes cantidades de metales, que no necesariamente son útiles de acuerdo a sus requerimientos. Además, algunas plantas pueden tomar compuestos orgánicos del medio ambiente y degradarlos para luego usarlos en sus procesos fisiológicos.¹⁷

Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la rizofiltración, la fitoextracción, la fitodegradación, la fitoestabilización, la fitotransformación y la fitovolatilización.^{22, 27}

3.2.6 Aspersión de aire / Bioaspersión

La aspersión de aire incluye inyectar un gas (comúnmente aire/oxígeno) bajo presión dentro de una zona saturada de compuestos volátiles para transferirlos a una zona insaturada en la cual serán degradados. El término Bioaspersión es usado para destacar los aspectos de la biorremediación en el proceso de tratamiento o para referirse a una situación donde la biodegradación es el proceso de remediación dominante, tomando a la volatilización en forma secundaria. El aire inyectado bajo el nivel freático incrementa la concentración de oxígeno y mejora la velocidad de degradación biológica de los contaminantes orgánicos por acción natural de los microorganismos. La adición de aire a los procesos de

* La definición aparece en el glosario

biorremediación es favorable para la eliminación de contaminantes menos volátiles como diesel y desechos de aceites.¹⁷

La velocidad de inyección de aire debe ser cuidadosamente controlada para prevenir la transferencia de constituyentes volátiles a la atmósfera pueden usarse para prevenir o limitar las pérdidas de contaminantes. Pueden ser usadas algunas formas de recobrar vapores y proteger al mismo tiempo las aguas subterráneas. La aspersión de aire es barata, distribuye el oxígeno a través del sitio más rápidamente y tiene menos problemas operacionales que otros métodos como la bioestimulación.¹⁷

3.3 Procesos de Biorremediación Ex Situ

Los procesos de biorremediación ex situ, incluyen:

Procesos de biodegradación en fase sólida (el suelo se coloca en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza), y se agregan agua y nutrientes).^{13, 25}

Procesos de biodegradación en fase de lodos (el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes).^{13, 25}

3.3.1 Biorremediación en fase sólida (composteo)

El composteo es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados utilizando compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso. Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas.^{21, 23, 24}

Las pilas estáticas (biopilas) son una forma de composteo en el cual, además de agentes de volumen, el sistema se adiciona con agua y nutrientes, y se coloca en áreas de tratamiento (que incluyen alguna forma de aireación y sistemas para colectar lixiviados). Las pilas de suelo generalmente se cubren con plástico para

controlar los lixiviados, la evaporación y la volatilización de contaminantes, además de favorecer su calentamiento. ^{13, 23}

Este proceso emplea el uso de un sistema de ventilación forzada para airear los suelos. Este tipo de sistemas permite el uso de pilas profundas de suelo y se puede incorporar técnicas de bioventeo. Los requerimientos para mejorar la biodegradación en pilas de composta son:

- ❖ El intercambio de aire para remover y tratar componentes volátiles y también para proveer del oxígeno necesario para el crecimiento microbiano,
- ❖ La humedad,
- ❖ El pH, y
- ❖ Los nutrientes. ¹⁸

3.3.2 Biorremediación en fase de lodos (biorreactores)

Los biorreactores pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, ya que es posible combinar y controlar eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación. Es la tecnología más adecuada cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones. Uno de los reactores más utilizados para biorremediar suelos es el biorreactor de lodos, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido, y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en una fase sólida. El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado. ^{13, 21, 26}

3.4 Comparación de los procesos de biorremediación

En la tabla que se presenta en el anexo 1 se describen las ventajas, desventajas o limitaciones, costos y el tipo de contaminante que es capaz de degradar cada proceso de tratamiento de la biorremediación.

Como se puede observar la principal ventaja de la fitorremediación, frente a las demás técnicas de biorremediación es su costo, debido a que la aplicación de esta tecnología es más barata que las demás técnicas de biorremediación.

CAPITULO IV FITORREMEDIACIÓN

4.1 Procesos de Fitorremediación

Fitorremediación (el prefijo fito- significa planta) es un término general que se refiere a varios usos de plantas para limpiar o corregir sitios extrayendo contaminantes del suelo y agua subterránea. Las medidas fitocorrectivas consisten en el uso de plantas y árboles para limpiar agua y suelo contaminado. Cultivar plantas en un lugar contaminado, y en algunos casos cosecharlas, como método correctivo es una técnica pasiva estéticamente agradable que aprovecha la energía solar y se emplea junto con métodos de limpieza mecánicos o en algunos casos en vez de este tipo de métodos.²⁹

Las plantas actúan como filtros o trampas y pueden descomponer o degradar contaminantes orgánicos o estabilizar contaminantes inorgánicos, esta técnica ha sido aplicada para limpiar metales, fitosanitarios, solventes, explosivos, petróleo crudo, hidrocarburos poliaromáticos y lixiviados de rellenos sanitarios.²⁹

La fitorremediación se fundamenta en los procesos naturales que ocurren en las plantas los cuales incluyen (ver figuras 3 y 4):²⁸

- ❖ Captación de metales y ciertos compuestos orgánicos del suelo y el agua.
- ❖ Acumulación o procesamiento de esos compuestos por lignificación*, volatilización, metabolismo y mineralización*.
- ❖ Uso de enzimas para convertir moléculas orgánicas complejas en moléculas simples.
- ❖ Incremento del contenido de carbono y oxígeno del suelo alrededor de las raíces a través de la liberación de exudados (líquidos liberados de los tejidos de las plantas) y la descomposición de los tejidos de las raíces.
- ❖ Captura de agua subterránea y utilización para los procesos de la planta.

La fitorremediación incluye un número de diferentes procesos que pueden tratar el contaminante por degradación, remoción (a través de acumulación o disipación), o inmovilización:⁴⁵

1. Degradación (Destrucción o alteración de los contaminantes orgánicos)

* La definición aparece en el glosario

Rizodegradación: Se lleva a cabo en la rizósfera (el suelo que rodea a las raíces). Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica.²⁸

Fitotransformación: la degradación de moléculas orgánicas complejas a moléculas simples y la incorporación de esas moléculas dentro de los tejidos de la planta.²⁸

2. Acumulación (Contención o remoción de los contaminantes orgánicos o metales)

Fitoextracción: la extracción y acumulación de contaminantes en plantas con tejidos cosechables incluyendo raíces y pequeños brotes. En este proceso los contaminantes son captados por las raíces, y posteriormente éstos son acumulados o traslocados* hacia los tallos y hojas.²⁸

Rizofiltración: La absorción, concentración y precipitación de metales pesados por las raíces de la planta.²⁸

3. Disipación (Remoción de contaminantes orgánicos o inorgánicos en la atmósfera)

Fitovolatilización: Consiste en el empleo de plantas con capacidad para descontaminar un suelo por volatilización de sus contaminantes.²⁸

4. Inmovilización (Contención de contaminantes orgánicos e inorgánicos)

Fitoestabilización: Incluye la absorción y la precipitación de contaminantes, principalmente metales, por medio de plantas, reduciendo su movilidad y previniendo su migración al agua subterránea o al aire o su entrada en la cadena alimenticia.²⁸

Actualmente se conoce una gran diversidad de plantas que han sido identificadas por su potencial para facilitar la fitorremediación de sitios contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. En la mayoría de los estudios realizados, han sido utilizadas algunas variedades de césped y legumbres.^{39, 40, 41, 42, 43}

Otro ejemplo es el uso de árboles con raíces profundas como los álamos que capturan agua subterránea y retardan la migración del contaminante, sin embargo, los árboles utilizan grandes cantidades de agua y después la transpiran, lo cual es un depresor potencial del nivel freático local. A través de los procesos de captura que se lleva a cabo en los árboles, el agua subterránea contaminada que podría

* La definición aparece en el glosario

migrar a capas más profundas del suelo, es retenida en la zona de las raíces de los álamos, donde la degradación puede ocurrir por fitorremediación o fitoestimulación.

28

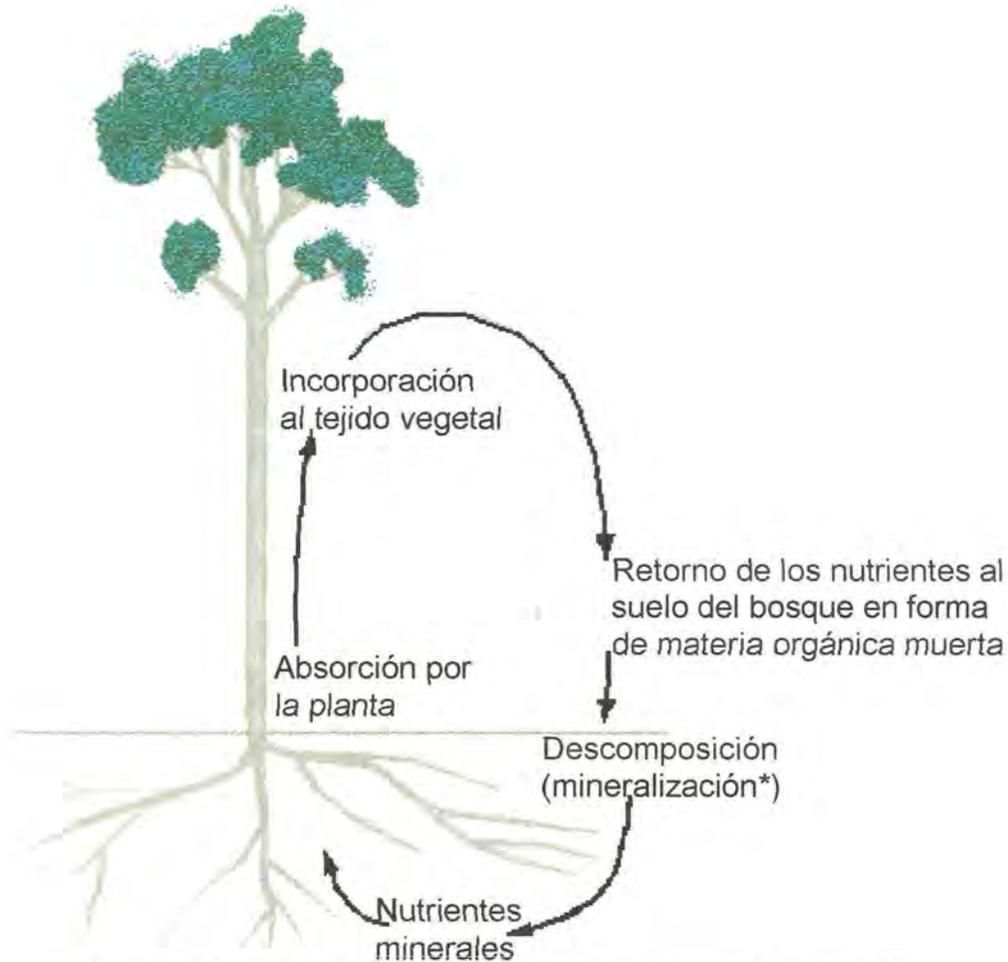


Figura 3 Circulación de los nutrientes entre las plantas y el suelo ¹³

Una vez que las plantas han acumulado suficiente material residual, los brotes pueden ser cosechados y las raíces removidas, con una subsiguiente eliminación o un método de procesamiento del material cosechado lo cual dependerá de:

- ❖ La toxicidad del producto final del proceso químico realizado en la planta,
- ❖ El lugar de almacenamiento
- ❖ Y la concentración relativa del contaminante en los tejidos de la planta.

La figura 4 muestra el flujo de masas a través de la madera, la tolerancia a la saturación del contaminante y cómo los mecanismos de transporte del oxígeno,

agua y carbono pueden variar de una especie a otra. Las plantas abastecen de oxígeno al suelo rizosférico, pero algunas raíces también necesitan de oxígeno para su respiración. El volumen de las raíces es la clave del mecanismo que adhiere carbono orgánico al suelo.³²

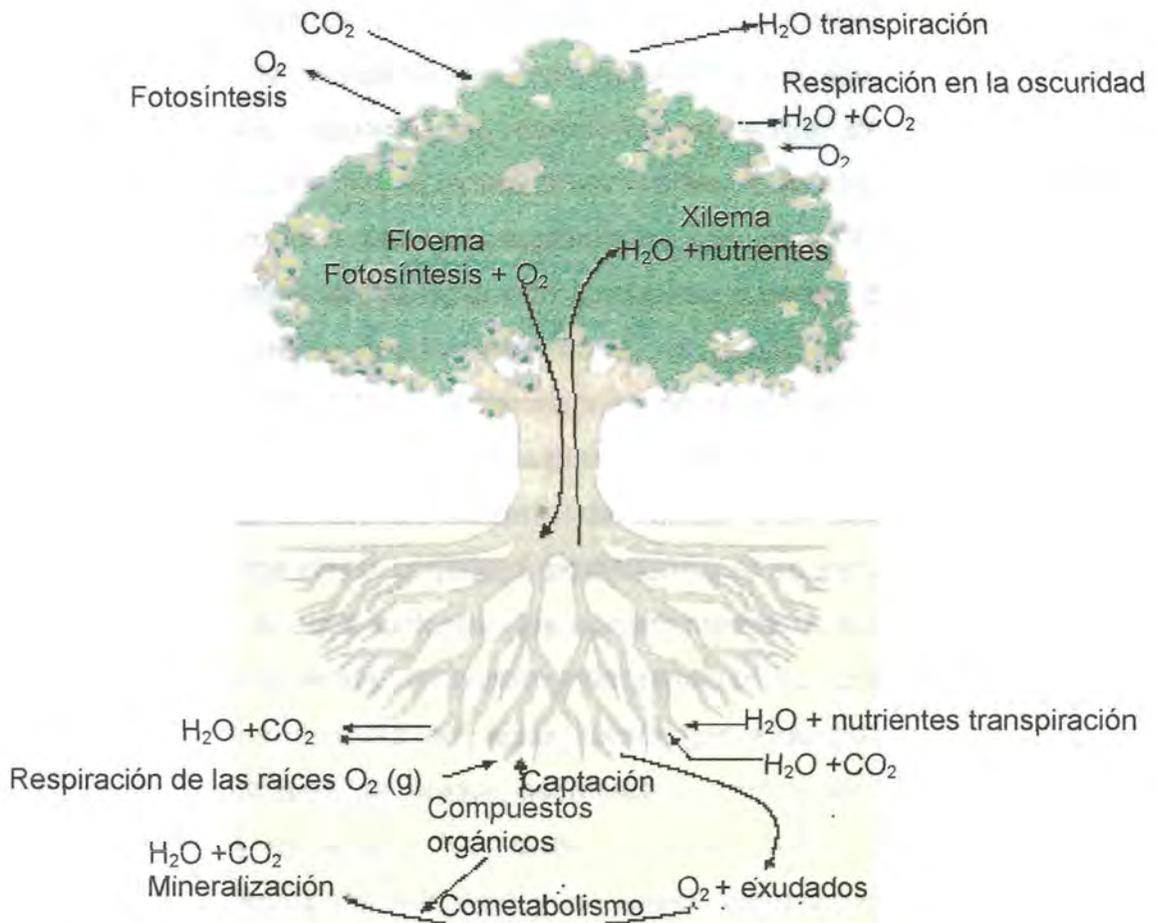


Figura 4 Esquema del flujo de oxígeno, agua y compuestos químicos a través del árbol.³²

En caso de que los contaminantes orgánicos sean degradados a compuestos inofensivos, la eliminación o el tratamiento pueden no ser requeridos. Así, por ejemplo, el proceso comúnmente utilizado para el tratamiento o eliminación de las plantas usadas en la eliminación de metales, es la incineración controlada, obteniéndose como producto final cenizas con altos contenidos de metales, las plantas contaminadas con material radiactivo pueden ser vitrificadas.²⁸

Hoy día las técnicas de fitorremediación están siendo probadas en diferentes escenarios posibles, desde un laboratorio hasta el campo.²⁸

A continuación se describen a detalle cada uno de los procesos de fitorremediación.

4.1.1 Rizofiltración

La rizofiltración también denominada fitofiltración es la remoción a través de las raíces de la planta de los contaminantes presentes en el agua superficial, aguas residuales, o aguas subterráneas, como consecuencia de la adsorción, la precipitación o la absorción que ocurre en las raíces. Los exudados de las raíces pueden producir condiciones biogeoquímicas que son el resultado de la precipitación de contaminantes dentro de las raíces o dentro del cuerpo de agua. Los contaminantes pueden quedarse en las raíces, dentro de las raíces, o pueden ser tomados y traslocados* a otras porciones de la planta, dependiendo de las propiedades, concentración y especie de planta.⁴⁸

Cuando las plantas tienen un sistema de raíces bien desarrollado, el agua contaminada se coloca en un vertedero, posteriormente se introducen las plantas y las raíces absorben el agua junto con los contaminantes. A medida que las raíces se saturan de contaminantes, se cortan y se eliminan. La rizofiltración puede ser utilizada para extraer metales del agua, descargas industriales, escorrentía de tierras agrícolas, drenajes de ácidos de minas y contaminantes radiactivos. Por ejemplo, los brotes de girasol han dado resultado para retirar contaminantes radiactivos (como restos de estroncio y de cesio) de una laguna en Chernobyl (Ucrania).²⁹

Las raíces de las plantas son capaces de absorber grandes cantidades de plomo y cromo del agua del suelo o del agua que pasa a través de la zona de raíces.³²

La rizofiltración del agua superficial puede llevarse a cabo in situ, con plantas que crecen directamente en el cuerpo de agua contaminado o si el agua subterránea se encuentra dentro de la zona de la rizósfera. Alternativamente la rizofiltración puede incluir el bombeo de agua subterránea contaminada hacia un estanque lleno de una gran cantidad de sistemas de raíces de especies apropiadas para el tipo de contaminante a tratar.²⁸

* La definición aparece en el glosario

Los metales también pueden ser removidos del agua subterránea a través de la precipitación causada por los exudados (líquidos liberados de los tejidos de las plantas), estos precipitados son filtrados del agua subterránea y después pasan a través de los tanques que contienen las plantas para eliminar una mayor cantidad del contaminante. Una vez que las raíces son cosechadas y dependiendo de la especie de planta usada, los brotes pueden ser transplantados para el crecimiento de nuevas raíces, otra opción es reemplazar las plantas dentro del sistema para asegurar resultados de operación constantes.²⁸

La rizofiltración y la fitoextracción son parecidas la diferencia radica en que las plantas pueden ser cultivadas en agua (rizofiltración) o en suelo (fitoextracción). La rizofiltración y la fitoextracción son similares en que cada una es el resultado de la acumulación de contaminantes dentro y fuera de la planta, la diferencia radica en que en la rizofiltración esta acumulación puede ocurrir en las raíces o en la porción de la planta que se encuentra en el agua. Para que la fitoextracción sea efectiva la acumulación debe ocurrir dentro de la tierra, y no en las raíces. Por otra parte la rizofiltración difiere de la fitoextracción en que los contaminantes están en mayor proporción en el agua, y no en suelo.⁴⁸

La rizofiltración difiere de la fitoestabilización que ocurre en el suelo, en la cual el contaminante se queda en la zona de las raíces. La rizofiltración es generalmente usada para tratar grandes volúmenes de agua con bajas concentraciones del contaminante (en el rango de ppb (partes por billón) y es ampliamente aplicado en remoción de metales (Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, Zn, Cr⁶⁺) y radionúclidos.^{48, 54, 56, 60}

En la rizofiltración pueden ser usadas plantas acuáticas y terrestres, utilizando una plataforma de soporte para hacer posible el crecimiento en el agua, las plantas terrestres ofrecen la ventaja de tener más biomasa y un rápido crecimiento del sistema de raíces en comparación con las plantas acuáticas.^{48, 54, 46}

La rizofiltración puede ser realizada in situ para remediar cuerpos de agua superficiales, o ex situ, utilizando un sistema mecanizado de tanques para introducir el agua contaminada al estanque de plantas, este sistema requiere una comprensión de la composición del contaminante y las interacciones de este con los nutrientes presentes en el agua. Es necesario monitorear y posiblemente modificar

el pH del agua, o la velocidad del flujo y la concentración del contaminante en el agua que llega. El efluente del flujo mecanizado que pasa a través del sistema de rizofiltración necesitará de conocer los límites del contaminante en este sistema. También se requiere de un apropiado sistema de disposición de la biomasa de la planta.⁴⁸

La rizofiltración ha sido aplicada en la remoción de metales y explosivos, por ejemplo el trinitrotolueno (dinamita) es un contaminante orgánico que es absorbido fuertemente en las raíces pero que no es traslocado* de manera apreciable.³²

Otro ejemplo son los humedales que han sido usados por muchos años con gran éxito en el tratamiento de nutrientes, metales, compuestos orgánicos y ácidos del drenaje de las minas. El uso de plantas de humedales aunado a las condiciones de reducción de sulfato dan como resultado un incremento en el pH y un decremento en la concentración de metales tóxicos. El sistema de raíces y los sedimentos en el humedal son facultativos, es decir se encuentran zonas aeróbicas y anaeróbicas, las cuales facilitan la absorción y la precipitación de metales tóxicos.^{32, 33, 34, 35}

En el anexo 2 se presenta una tabla donde se pueden observar algunas de las aplicaciones de la rizofiltración que se han llevado a cabo con diversas plantas y en distintos lugares del mundo.

4.1.2 Fitotransformación

La fitotransformación también es llamada fitodegradación. Es un proceso mediante el cual las plantas degradan (descomponen) contaminantes orgánicos al absorberlos y metabolizarlos. La fitodegradación es la captación, metabolización y degradación de los contaminantes dentro de la planta, o la degradación del contaminante en el suelo, sedimentos, aguas residuales, aguas subterráneas o agua superficial por enzimas producidas y liberadas por la planta. La fitodegradación no es dependiente de la asociación de los microorganismos con la rizósfera. Para que la fitodegradación ocurra dentro de la planta, ésta debe ser capaz de atrapar el compuesto. La captación del contaminante requiere que las plantas tengan un tronco o un tallo moderado. En algunos casos, los contaminantes degradados en moléculas más simples se usan para acelerar el crecimiento de las

* La definición aparece en el glosario

plantas. Muy frecuentemente los metabolitos que producen tienen actividad de fitohormonas y funcionan como catalizadores para el crecimiento.^{29, 31, 56}

La captación directa de compuestos orgánicos por las plantas es un mecanismo eficiente de remoción a poca profundidad de sitios contaminados con compuestos químicos moderadamente hidrofóbicos, tales como benceno, tolueno, xileno, solventes clorados y pequeñas cantidades de compuestos químicos alifáticos. Los compuestos químicos hidrofóbicos están limitados por sus características químicas, a la superficie de las raíces y del suelo, esto hace que ellos sean fácilmente traslocados* dentro de la planta; los compuestos químicos que son ligeramente solubles en agua no son suficientemente absorbidos en las raíces, además de no ser transportados a través de los tejidos de la planta.^{32, 37}

La captación directa de los compuestos químicos por la planta a través de las raíces dependerá de la eficiencia de captación, la velocidad de transpiración y la concentración del compuesto químico dentro del agua del suelo. La eficiencia de captación dependerá de las propiedades fisicoquímicas y de la misma planta. La transpiración es la primera variable que determina la velocidad de captación del compuesto químico para un diseño de fitorremediación; esto dependerá del tipo de planta, el área de la hoja, nutrientes, humedad del suelo, temperatura, condiciones del viento y humedad relativa. Una vez que el compuesto químico es traslocado, la planta puede convertir al compuesto químico y a sus fragmentos en nuevas estructuras por medio de la lignificación*, o estos se pueden volatilizar, metabolizar o mineralizar.²⁸

El agua subterránea puede ser remediada usando la fitotransformación in situ si el nivel freático está dentro de la zona de aprovechamiento de las raíces de árboles grandes como los álamos o puede ser ex situ por bombeo del agua hasta estanques o humedales construidos que contienen las plantas adecuadas para tratar los contaminantes presentes en el agua subterránea. Esta técnica ha sido probada para remediar agua contaminada con explosivos como el TNT (Trinitrotolueno) y actualmente está siendo probada para degradar TCE (Tricloroetileno) e Hidracina presente en algunos acuíferos, utilizando árboles con raíces profundas. La nitrorreductasa y la lactasa son enzimas que se encuentran en

* La definición aparece en el glosario

las plantas que pueden destruir residuos* de explosivos como el Trinitrotolueno, estas pueden incorporar las estructuras rotas en material nuevo de la planta o en detritus orgánico* que convierte una parte del sedimento en materia orgánica. Se sabe que compuestos clorados alifáticos como el TCE se mineralizan a CO_2 y metabolitos aeróbicos menos tóxicos (tricloroetanol, ácido tricloroacético, y ácido dicloroacético). Estos productos se han encontrado en el hígado humano debido a la destrucción del TCE por el citocromo P450, que es una enzima abundante en plantas y en humanos. Por lo tanto, las plantas a veces son vistas como "hígados verdes" en términos de su bioquímica enzimática. Los experimentos de laboratorio indican que los compuestos alifáticos halogenados de cadena corta pueden ser captados por las plantas. Aunque una gran cantidad de metabolitos del TCE se han encontrado en tejidos de la planta, el cloruro de vinilo no ha sido detectado.^{28,32,38,56} Esta técnica depende de la captación directa del contaminante en el suelo o el agua y de la acumulación de metabolitos en los tejidos de la planta. Siempre que estos últimos no sean tóxicos o bien sean menos tóxicos que el compuesto original. La fitotransformación ha sido aplicada principalmente en suelos contaminados por plantas petroquímicas en áreas de almacenamiento, residuos de explosivos, derrames de combustibles, solventes clorados, residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales, plaguicidas y fertilizantes.³²



Figura 5 Destrucción de contaminantes orgánicos por fitotransformación.²⁰

Otra forma de fitotransformación es la fitovolatilización, donde los compuestos químicos o sus productos metabólicos son liberados a la atmósfera a través de la

* La definición aparece en el glosario

transpiración de la planta. Muchos compuestos orgánicos que son recalcitrantes en el ambiente reaccionan rápidamente en la atmósfera con radicales hidroxilo, un oxidante formado en el ciclo fotoquímico.³²

La figura 5 esquematiza la destrucción de contaminantes orgánicos por fitotransformación, cómo las enzimas de las plantas descomponen o degradan los contaminantes orgánicos y cómo los fragmentos se incorporan en el tejido nuevo de las plantas. En general, la fitotransformación es un proceso que se da en el interior de los tejidos de la planta, como se muestra en las figuras 5 y 6.⁴⁷

Las plantas también favorecen la degradación microbiológica en la rizósfera. La flora microbiana del suelo es más abundante en las cercanías de las raíces, por lo que los procesos similares a la biodegradación tienen lugar a una velocidad mayor que en el resto del suelo, sin necesidad de estimular artificialmente la actividad microbiana.³¹

En las plantas de trigo y soya se ha encontrado que se realiza un metabolismo parcial de una variedad de compuestos incluyendo el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), el ácido 2,4,5-triclorofenoxiacético (2,4,5-T), el 4-cloroanilina, el 3,4-dicloroanilina, pentaclorofenol (PCP), dietilhexilftalato (DEHP), benzopireno, hexaclorobenceno, diclorodifeniltricloroetano (DDT) y bifenilos Policlorados (BCP). En las aplicaciones de la fitodegradación es indeseable el hecho de que la transformación del contaminante dentro de la planta lo haga probablemente más tóxico, y después éste sea liberado a la atmósfera a través de la transpiración.^{56, 55}

Algunas enzimas que han sido encontradas en sedimentos del suelo provenientes de la planta son: deshalogenasa, nitroreductasa, peroxidasa, lactasa y nitrilasa y están asociadas con las transformaciones de compuestos clorados, explosivos, fenoles, las etapas oxidativas de los explosivos y herbicidas.

En el anexo 2 se muestran algunas aplicaciones que se han realizado en diferentes partes del mundo, de la fitotransformación, con diversos contaminantes, plantas, concentraciones y en distintos medios.

4.1.3 Fitovolatilización

La fitovolatilización es considerada un proceso dentro de la fitotransformación. 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. La figura 6 muestra que la fitovolatilización se da en las hojas, mientras que otros procesos se dan en otras partes de la planta.²⁹

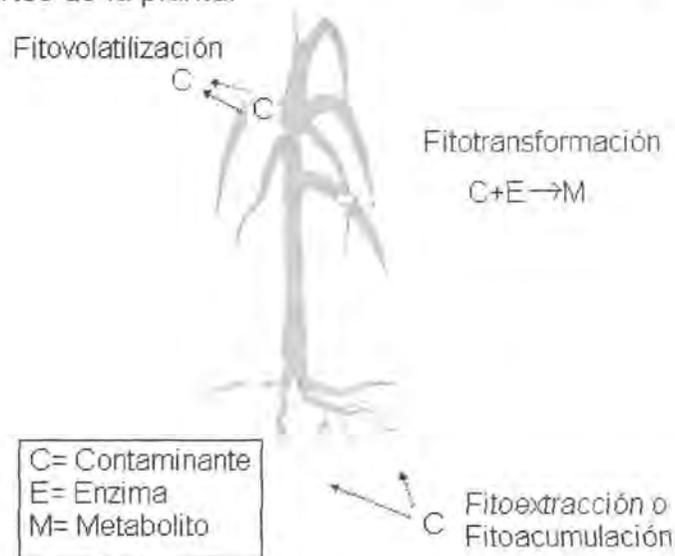


Figura 6 Procesos de la fitovolatilización, la fitotransformación y la fitoextracción que ocurren en diferentes partes de la planta.³¹

Cuando los árboles absorben agua contaminada con compuestos orgánicos volátiles, eliminan la gran mayoría de éstos en la evapotranspiración de las hojas, por ejemplo los álamos transpiran aproximadamente el 90% del TCE que absorben, el resultado neto de este proceso es que los árboles transfieren a la atmósfera el TCE que se encuentra en el acuífero.³¹

La fitovolatilización es la captación del contaminante por la planta, con la subsiguiente liberación del contaminante volátil, la degradación del producto o la transformación de un contaminante volátil o uno no volátil. Para que la fitorremediación sea efectiva, el producto degradado o el contaminante volátil modificado debe ser menos tóxico que el contaminante inicial. En algunos casos, el contaminante transferido a la atmósfera permite una mayor efectividad o un proceso

de degradación natural más rápido debido a otros procesos, como la fotodegradación. Debido a que la fitovolatilización incluye la transferencia de contaminantes a la atmósfera, es necesario un análisis de riesgo del impacto de la transferencia del contaminante al ecosistema y la salud humana. La fitovolatilización se puede dar con contaminantes inorgánicos solubles en agua subterránea, suelo, sedimentos o en aguas residuales.^{48, 49}

En el anexo 2 se presenta una tabla donde se pueden observar algunas de las aplicaciones de la fitovolatilización que se han llevado a cabo con diversas plantas y en distintos lugares del mundo.

4.1.4 Fitoextracción

La fitoextracción, conocida también como fitoacumulación, es la captación de metales contaminantes por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas. Algunas plantas absorben cantidades extraordinarias de metales en comparación con otras. Se selecciona 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 las plantas son incineradas, las cenizas deben colocarse en un confinamiento controlado, 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. En la figura 4.3 se puede observar que la fitoextracción se da en las raíces de la planta cuando éstas se encuentran en suelo a diferencia de la rizofiltración que ocurre en el agua.²⁹

Este proceso involucra la remoción de metales, residuos* radiactivos y algunos compuestos orgánicos (por ejemplo derivados del petróleo) que pueden ser extraídos directamente por los tejidos de la planta. El programa de instrumentación de la fitoextracción incluye el sembrado de una o más especies que actúan como hiperacumuladores del contaminante a remover. Pueden ser usados algunos

* La definición aparece en el glosario

aditivos como fertilizantes y agua, los cuales pueden ser requeridos para garantizar un buen crecimiento de las plantas. Mediante pruebas preliminares se determina la duración del periodo antes de la cosecha de las plantas y después de ese periodo, los tejidos de las plantas son removidos y si es necesario se plantará un nuevo cultivo. Aunque el proceso se concentra en una sola planta, muchas especies pueden ser usadas en el sitio, al mismo tiempo o subsiguientemente, para remover más de un contaminante.²⁸

Las características que debe tener una planta para lograr una fitoextracción exitosa son:¹

- ❖ Habilidad para acumular y tolerar altas concentraciones de metales en tejidos cosechables.
- ❖ Rápida velocidad de crecimiento
- ❖ Alta producción de biomasa (resultante en mayor cantidad de metales removidos por cultivo)

Los contaminantes mayormente removidos por la fitoextracción son el níquel, el zinc y el cobre porque son los preferidos de las 400 plantas, que se sabe que absorben cantidades extraordinarias de metales, como el álamo híbrido, la Mostaza de la India, y especies como: *Salix viminalis* y *Myriophyllum spicatum*, entre otras.²⁹

La fitoextracción ha sido usada para la remediación de suelos con bajas concentraciones de plomo y cromo, también se ha usado para la extracción de residuos radioactivos de sitios con residuos* mixtos.³²

La familia de las Brasicáceas, reúne muchas de las especies nativas conocidas como acumuladoras de metales. La fitoextracción implica una traslocación* hacia zonas más fácilmente cosechables de la planta. La *Brassica juncea* es una especie que ha demostrado un mejor desempeño absorbiendo y traslocando Pb, Cr, Cd, Ni y Zn. Los mecanismos que parecen estar involucrados en la acumulación y tolerancia de estos metales son la quelación* extra e intracelular y la precipitación. Las vacuolas cumplen un papel muy importante en la acumulación de los metales. Se piensa que dentro de éstas, los iones metálicos son quelados por ácidos orgánicos como el cítrico y el málico, y por isopéptidos comúnmente llamados fitoquelatinas. Estos quelatos* pueden estar relacionados con el transporte de los

* La definición aparece en el glosario

metales dentro de la planta. Una vez cosechada la parte aérea de las plantas (o, incluso las raíces, si fuera posible), se puede compostar, secar o incinerar, para disminuir el volumen de los contaminantes y almacenarlos o reciclarlos para recuperar los metales.^{85, 86}

La fitoextracción ofrece ventajas en costos ya sea en excavación, tratamiento y disposición de los residuos*. En la fitoextracción los metales pueden ser recobrados a bajo costo de los tejidos de las plantas o llevados a disposición final si así se requiere.³²

Las consideraciones de diseño incluyen el factor de acumulación (ratio del metal en los tejidos de la planta que se encuentra en el suelo) y la producción de la planta (kilogramos de masa seca que puede ser cosechada en cada estación). Para tener un buen tratamiento se necesita un alto crecimiento de las plantas (más de 3 toneladas de masa seca/ hectárea- año) que puedan ser cosechadas y en las cuáles exista una acumulación de altas concentraciones de metales en la fracción cosechable (más de 100 mg / Kg de metal).³²

En el anexo 2 se muestran algunas de las aplicaciones de la fitoextracción que se han llevado a cabo con diversas plantas, diferentes contaminantes y distintos lugares del mundo.

4.1.5 Fitoestabilización

La fitoestabilización es el uso de algunas especies de plantas para absorber, inmovilizar y precipitar contaminantes, generalmente metales, reduciendo su biodisponibilidad y el potencial de exposición a esos contaminantes.²⁸

Esta técnica puede ser usada para reestablecer una cubierta vegetal en sitios donde la vegetación natural es pobre debido a las altas concentraciones de metales presentes en la superficie del suelo o por perturbaciones físicas del material del suelo. Las especies tolerantes a los metales pueden ser usadas para restaurar la vegetación de estos lugares, debido a que disminuye el potencial de migración de la contaminación a través de la erosión producida por el viento, el transporte del suelo superficial expuesto y la lixiviación del suelo y agua subterránea contaminada.²⁸

* La definición aparece en el glosario

Las características de las plantas para la fitoestabilización en un sitio en particular son:

- ❖ Tolerancia a altas concentraciones de un contaminante específico;²⁸
- ❖ Elevada producción de biomasa de las raíces para inmovilizar y absorber esos contaminantes a través de la captación, precipitación o reducción;²⁸
- ❖ Retención de los contaminantes en las raíces o en los brotes.²⁸

La fitoestabilización esta siendo estudiada en pruebas que incluyen la reforestación de minas que tienen elevados niveles de cadmio, plomo y zinc y para reducir la erosión causada por el viento y por el agua.²⁸

La fitoestabilización también es conocida en algunos lugares como inactivación o fitoinmovilización. Las investigaciones de fitoestabilización que se han generado a la fecha se han centrado generalmente en la contaminación con metales, como el plomo, cromo y mercurio, los cuales han sido identificados como los candidatos potenciales para la fitoestabilización.^{48, 53, 55}

Las ventajas de la fitoestabilización radican en que el suelo no tiene que ser removido, tampoco es necesaria la disposición del material peligroso o de la biomasa. El costo y el grado de interrupción de las actividades que se realizan en el sitio, puede ser más barato que otros procesos de remediación de suelos y la restauración del ecosistema se logran a través de la vegetación. Las desventajas de la fitoestabilización incluyen la necesidad de un largo periodo de mantenimiento de la vegetación o la verificación de que la vegetación será suficiente para mantenerse por si sola. Es necesario prevenir desde el contaminante, los futuros contaminantes liberados, así como los lixiviados liberados en el lugar. Se prefiere un sistema de plantas que produzcan una estabilización irreversible, sin embargo estas deben ser puestas bajo vigilancia, de no ser así la fitoestabilización debe ser considerada como una medida de contención interna. Debe ser evitada la captación de metales y la traslocación* de los mismos hacia la parte aérea de la planta para prevenir la transferencia de metales a la cadena alimenticia.⁴⁸

La fitoestabilización requiere de una planta que sea capaz de crecer en el suelo contaminado (por ejemplo plantas que sean tolerantes a altas concentraciones de metales pesados presentes en el suelo), con raíces que crezcan dentro de la zona

* La definición aparece en el glosario

contaminada, y que sean capaces de modificar las condiciones biológicas, físicas y químicas del suelo.⁴⁸

El restablecimiento de la vegetación puede ser difícil debido a la fitotoxicidad del contaminante, a las condiciones físicas del suelo, al pH, al clima o a la escasez de materia orgánica. Las plantas más apropiadas son la que son tolerantes a los metales más no acumuladoras de altos niveles de ellos. Las plantas hiperacumuladoras generalmente no deberían ser usadas debido a su lenta velocidad de crecimiento y a que son propensas a acumular metales.⁴⁸

La fitoestabilización se da a través de la modificación de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. El transporte del contaminante en el suelo, sedimentos o aguas residuales, puede ser reducido a través de la absorción y acumulación en las raíces; la absorción dentro de las raíces; la precipitación, el complejamiento*, o la reducción en el balance de metales en el suelo dentro de la zona de las raíces; o debido a la materia húmica a través de procesos de humificación. Además la vegetación puede reducir la erosión del suelo debida a la acción del aire o el agua, también previene la dispersión del contaminante a través de emisiones fugitivas y puede prevenir o reducir la generación de lixiviados.⁴⁸

La fitoestabilización también tiene un gran potencial para contaminantes orgánicos, incluyendo productos metabólicos producto de estos contaminantes que pueden ser agregados o incorporados en algunas partes de la planta como la lignina*. Esta forma de fitoestabilización ha sido también llamada fitolignificación*. Sin embargo la diferencia es que la fitoestabilización de metales en general ocurre en el suelo, mientras que la fitoestabilización de contaminantes orgánicos a través de la fitolignificación* puede ocurrir en el tallo y en las hojas.^{48, 53, 55}

Los metales presentes dentro de la zona de las raíces pueden ser estabilizados pasando de un estado soluble a un estado oxidativo insoluble a través de la intervención de las raíces. Por ejemplo las raíces pueden intervenir en la precipitación del plomo como fosfato de plomo insoluble. La estabilización de metales también incluye procesos no biológicos de sorción superficial, debido a la quelación*, intercambio iónico, y a la adsorción específica. El plomo que generalmente es tóxico para las plantas, usualmente no es acumulado en ellas bajo

* La definición aparece en el glosario

condiciones naturales, posiblemente debido a la precipitación del plomo como sulfato en las raíces de la planta. El pH del suelo puede cambiar por la producción de CO₂ debido a la degradación producida por los microbios de los exudados del suelo, también puede ser por el cambio de la solubilidad del metal y la movilidad o el impacto de la disociación de los compuestos orgánicos. Para que la fitoestabilización sea efectiva se requiere de una comprensión del comportamiento químico de la zona de las raíces, de los exudados de las raíces, de los contaminantes y los fertilizantes o nutrientes agregados al suelo, para prevenir efectos indeseados que puedan incrementar la solubilidad del contaminante y la lixiviación del mismo. Algunas fuentes bibliográficas indican que la fitoestabilización es más apropiada para suelos con texturas altas y suelos con altas concentraciones de materia orgánica.^{48, 53, 55, 58, 60}

En el anexo 2 se pueden observar algunas de las aplicaciones de la fitoestabilización que se han llevado a cabo en distintos lugares del mundo, en los cuáles se ha aplicado para diversos contaminantes.

4.1.6 Rizodegradación

La rizodegradación también conocida como degradación de la rizósfera es la biodegradación en el suelo a través de la influencia de las raíces de las plantas y la posible destrucción de un contaminante orgánico.^{48, 38}

Los contaminantes orgánicos en el suelo pueden ser destruidos y obtener productos o ser completamente mineralizados a compuestos inorgánicos como dióxido de carbono y agua a través de la acción de bacterias, hongos y actinomicetos*. La presencia de las raíces puede incrementar el tamaño y la variedad de la población microbiana presente en la rizósfera o en los micorrizas* (asociación entre hongos y raíces).²¹

El incremento en las poblaciones microbianas puede ser estimulado por los exudados, ya que estos contienen azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroides, nucleótidos, flavanones, enzimas y otros compuestos. El incremento en la población microbiana y la actividad en la rizósfera pueden dar como resultado un incremento en la biodegradación de los contaminantes del suelo

* La definición aparece en el glosario

y de la degradación de los exudados puede obtenerse como resultado la estimulación del cometabolismo de los contaminantes presentes en la rizósfera. La rizodegradación ocurre principalmente en el suelo, aunque en plantas acuáticas tiene mayor potencial la estimulación de la actividad microbiana. La estimulación de los microorganismos del suelo por los exudados de la planta puede dar como resultado la alteración de las condiciones geoquímicas del suelo, como el pH, el cual puede sufrir cambios durante el transporte de contaminantes inorgánicos. Las plantas y las raíces pueden afectar el contenido de agua, el transporte de agua y nutrientes, la aireación, la estructura, la temperatura, el pH y otros parámetros del suelo que crean el ambiente favorable para los microorganismos del suelo, sin tomar en cuenta la producción de los exudados. Esta afectación no ha sido evaluada en la mayoría de las investigaciones de fitorremediación.²¹

Las características más atractivas de la rizodegradación incluyen la destrucción del contaminante in situ, el potencial de la mineralización* completa de compuestos orgánicos, además de que la traslocación* de los contaminantes a la planta o a la atmósfera es menos probable que en otros procesos de fitorremediación dado que ocurre la degradación en la fuente de contaminación. La cosecha de la vegetación no es necesaria puesto que ocurre la degradación del contaminante en el suelo con una ligera acumulación del contaminante dentro de la planta. La penetración de las raíces a través del suelo permite un porcentaje significativo de este último con las raíces.²¹

Se necesita mucho tiempo para que las raíces mueran y crezcan en nuevas áreas de contacto. También es probable que las condiciones inhóspitas del suelo o las áreas con altas concentraciones del contaminante nunca lleguen a estar en contacto con las raíces, ya que el mayor impedimento para una rizodegradación exitosa es la profundidad de la zona de las raíces.^{48, 38}

Muchas plantas tienen poca profundidad relativa de la zona de raíces y la profundidad de penetración de las raíces puede estar también limitada por las condiciones específicas del suelo o por la estructura del suelo como lodos o arcillas que son impenetrables por las raíces. La rizósfera se extiende cerca de 1 mm de la raíz y en algunos casos estas pueden extenderse a una profundidad relativa (por

* La definición aparece en el glosario

ejemplo, 110 cm) dentro del suelo con altas concentraciones de contaminantes. La liberación del contaminante por la planta es una característica indeseable en la rizodegradación y debe tenerse cuidado en la selección de las plantas para evitar la liberación. La estimulación de los organismos rizosféricos no siempre inicia el incremento en la degradación del contaminante, la población de los microorganismos que no son degradadores deberían incrementarse dependiendo de los degradadores. La competencia entre la planta y los microorganismos también puede impactar en la cantidad de biodegradación. La efectividad de la rizodegradación puede ser específica para algunos sitios y no ser universal. El éxito de la rizodegradación se logra de diferentes maneras. Un paso preliminar en el uso, es el seguimiento de los exudados de las raíces para determinar experimentalmente su efectividad en la estimulación del cometabolismo del contaminante y en algunos casos las semillas pueden ser inoculadas con bacterias que son capaces de degradar el contaminante.^{48,64,67,68, 69}

Un pequeño número de contaminantes orgánicos son los candidatos para la rizodegradación algunos como los hidrocarburos derivados del petróleo, fitosanitarios, solventes clorados, pentaclorofenol (PCP), bifenilos policlorados (BPC), y surfactantes. Para hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) se ha encontrado una mayor disminución de este compuesto en suelo cultivados que en suelos no cultivados.^{40, 48}

En el anexo 2 se pueden observar algunas de las aplicaciones de la rizodegradación que se han llevado a cabo.

4.2 Suelos contaminados en México

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos*. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias

* La definición aparece en el glosario

ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros como se muestra en la tabla 1.¹³ Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAP). De éstos, compuestos como los BPC se han almacenado en tambores que, en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente contaminando los sitios de disposición, y los HAP se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP).¹³

Tabla 1 Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999.¹³

Sustancia	Porcentaje
Petróleo crudo	40%
Gasolina	9%
Diesel	7%
Otros	28%
Gas natural	3%
Ácidos	3%
Amoniaco	3%
Combustóleo	7%

A continuación se numeran algunas de las principales fuentes de contaminación de suelos en México.¹³

1. Con respecto a los derrames y fugas de hidrocarburos, PEMEX reporta que durante el año 2001 hubo un total de 8,031 toneladas de hidrocarburos (crudo, diesel y gasolina) derramados en su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país. Esta última cifra es importante, ya que de esta manera puede estimarse la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames. Uno de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por actividades petroleras es Veracruz. De acuerdo con información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por

hidrocarburos a nivel nacional son la refinería Lázaro Cárdenas y el pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México.^{13, 81}

2. La industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país. Esta industria, se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco.
3. El uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México. Los compuestos fitosanitarios son el nombre genérico que recibe cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se utiliza para controlar plagas que atacan los cultivos o insectos que son vectores de enfermedades. Según su composición química se clasifican en: insecticidas (organoclorados, organofosforados, piretroides y carbamatos), herbicidas (dinitrofenoles y triazinas) y fungicidas (fenoles y compuestos de cobre y azufre). Muchos de ellos son empleados en el país hasta la fecha, a pesar de que se han prohibido en otros países por su toxicidad. El número de insecticidas se incrementa a razón de 10% al año. Esto ha permitido que el número de productos que entran en contacto con la población, se incremente en más de seis veces. Prácticamente todas las sustancias mencionadas en este punto son compuestos químicos tóxicos y por su aplicación en tierras de cultivo, evidentemente son compuestos que se encuentran como contaminantes de grandes extensiones de suelos en todo el país. En México aún continúan en el mercado agroquímicos organoclorados como el ácido 2,4 dicloro-fenoxiacético (2,4-D), el pentaclorofenol (PCP) y dicofol, además de plaguicidas a base de carbamatos y los organofosforados como el malatión.^{13, 82, 83}
4. Otra de las empresas paraestatales que contribuyó a la contaminación de aguas y suelos, fue Ferrocarriles Nacionales, que se caracterizó por la generación de aceites gastados. La principal razón por la que esta empresa

provocó la contaminación de suelos fue por el almacenamiento inadecuado de residuos y combustibles como creosota y aceites gastados.

Esta problemática generalizada en el país para un diverso número de contaminantes presenta un amplio campo para la aplicación de diferentes procesos de fitorremediación, que aún no han sido probados del todo en suelos mexicanos.^{13,78}

A pesar que los procesos de la fitorremediación no han sido aplicados del todo en suelos mexicanos, se han hecho estudios de estos procesos para contaminantes como metales, e hidrocarburos.

Se ha probado que la especie de *Pelargonium citronellum* presenta mayor capacidad de fitoextracción de Cromo, Plomo y Zinc, con respecto a otras plantas del genero *Pelargonium sp.* El estudio se realizó en suelo y con concentraciones de 1,000 y 2,500 ppm.

En la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos también se han realizado estudios en México, por ejemplo se han realizado pruebas en gramíneas para degradar el queroseno en suelos con una concentración de 5,000 ppm.

En el anexo 1 se describen brevemente algunas de las aplicaciones de la fitorremediación, el contaminante, los procesos, la especie o el genero de la planta usada en cada proceso, el medio (suelo o agua subterránea) y la concentración del contaminante usada.

4.3 Ventajas y desventajas de la fitorremediación.

Ventajas^{2,3}

- ❖ La fitorremediación es una técnica de limpieza pasiva, estéticamente agradable, que aprovecha la energía solar.
- ❖ Es muy útil en lugares donde la contaminación es poco profunda y no es muy alta.
- ❖ Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo.
- ❖ Son útiles para tratar una gran variedad de contaminantes del ambiente.
- ❖ Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.

- ❖ La fitorremediación es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.
- ❖ Generalmente sólo origina cambios físicos menores sobre el ambiente
- ❖ Cuando se usa correctamente no produce efectos adversos significativos
- ❖ Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas
- ❖ Es menos costosa que otras tecnologías, como se aprecia en la tabla 1.

Desventajas.³

- ❖ La Fitorremediación requiere periodos largos de tiempo para remediar (usualmente más de una estación);
- ❖ El tratamiento está comúnmente limitado por la profundidad de las raíces;
- ❖ El clima o las condiciones hidrológicas pueden limitar la velocidad de crecimiento de la especie de planta a utilizar;
- ❖ Los contaminantes pueden, en un momento dado, entrar a la cadena alimenticia a través de animales o insectos que se alimentan de los tejidos de las plantas que contengan los contaminantes;
- ❖ La fitotoxicidad es una limitante en áreas fuertemente contaminadas.³
- ❖ Pueden ser usados agentes quelantes como aditivos para facilitar la captación de contaminantes de las partículas del suelo.
- ❖ Es muy difícil su aplicación en el mar
- ❖ Su instrumentación es específica para cada lugar contaminado
- ❖ Su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y las características del contaminante.

CAPITULO V CONCLUSIONES

La fitorremediación es una técnica eficiente para remediar suelos y agua subterránea en sitios contaminados con metales, no metales, radionúclidos, hidrocarburos y compuestos orgánicos, entre otros. Se han realizado estudios tanto ex situ como in situ y a diferentes escalas, obteniéndose los mejores resultados a nivel piloto y con el uso de árboles, como el álamo, debido a que el volumen de la rizósfera es mayor y por consecuencia la superficie y el volumen de contacto con el contaminante aumentan.

Al sembrar la cubierta vegetal se prevé la contaminación visual provocada por la maquinaria que normalmente se emplearía para la aplicación de cualquier otro método de remediación de suelo y agua subterránea, además se evita que la contaminación sea cada vez más profunda, puesto que inmoviliza los contaminantes.

La fitorremediación es doblemente eficiente cuando ésta se da en la rizósfera, puesto que la remediación se da gracias a la planta y a los microorganismos que habitan en la rizósfera, debido a que en la mayoría de los casos son estos quienes a través de su actividad metabólica absorben el contaminante y lo transforman de tal manera que la planta, es capaz de absorber y degradar el contaminante.

Los contaminantes presentes en aguas subterráneas pueden ser eliminados usando fitotransformación y fitovolatilización. El agua subterránea que no esta al alcance de las raíces puede ser bombeada del subsuelo usando pozos de extracción para luego aplicar el sistema de fitorremediación, como la rizofiltración, y en algunos casos se puede usar la irrigación con el objetivo de propiciar procesos como la rizodegradación y la fitotransformación.

El suelo contaminado puede ser tratado usando fitoextracción, fitoestabilización, rizodegradación, fitotransformación y fitovolatilización o a través de la aplicación de una cubierta vegetal.

La fitorremediación es más apropiada para grandes áreas con una capa superficial relativamente delgada de suelo contaminado, que se encuentre dentro de la profundidad de las raíces de la planta seleccionada.

Las características del suelo, como la textura y el contenido de agua (grado de saturación), pueden ser propicios para el crecimiento de la planta.

El costo de la aplicación de esta técnica es mucho menor que otras, ya que al plantar la capa vegetal se eliminan los gastos en uso de bombas para extraer el agua subterránea o el equipo para remover el suelo. Se ha mencionado que los costos de la fitorremediación varían de acuerdo a las condiciones del lugar contaminado. Se estima, por ejemplo, que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb, puede costar entre \$4.8 y \$8 dólares/m³, mientras que otras técnicas de biorremediación, como el bioventeo, cuestan entre \$10 y \$70 dólares/m³.

En los procesos de fitoextracción y rizofiltración se genera material vegetal que debe disponerse adecuadamente lo que provoca un aumento en los costos.

México en conjunto es un buen candidato para realizar estudios de fitorremediación ya que existen numerosos sitios contaminados con compuestos orgánicos, metales y no metales, además cuenta con una gran biodiversidad de especies vegetales.

En sitios contaminados con hidrocarburos como Veracruz, Tabasco y Campeche puede ser utilizada la rizodegradación que es el proceso de la fitorremediación ideal y el más estudiado para degradar compuestos derivados de los hidrocarburos, aunque en algunas ocasiones también puede darse la fitovolatilización debido a las propiedades del mismo compuesto.

En lugares contaminados con metales como los estados de Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco se pueden aplicar procesos como la rizofiltración, la fitovolatilización y la fitoextracción, puesto que han sido los que han tenido más éxito en los estudios realizados con metales tanto en suelo como en agua subterránea.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Doménech, Xavier. QUÍMICA DEL SUELO. EL IMPACTO DE LOS CONTAMINANTES. Departamento de Química. Universidad de Barcelona. Ediciones Miraguano. Madrid, España.1995. pag. 11-14.
2. H.D. Foth y otros. FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA DEL SUELO. Centro Regional de Ayuda Técnica. México, Buenos Aires, 1975.
3. <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema02/indice.htm>, consultada el día 8 de noviembre del año 2003, a las 7:32 de la mañana.
4. APUNTES DE QUÍMICA DE SUELOS.
5. Glynn, Henry J. y Heinke, Gary W. INGENIERÍA AMBIENTAL. Editorial Prentice Hall, 1999. Páginas 652-653.
6. Espinoza, C Carlos. HIDRÁULICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU APROVECHAMIENTO. Universidad de Chile. Semestre Otoño 2003.
7. Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. Tomo II, Segunda Edición. Ediciones OMEGA, S.A. Barcelona 1983
8. <http://www.corpmisti.com.pe/Curso%20de%20Salinidad%20Per%C3%BA/3-%20Tipos%20de%20suelos%20salinos.pdf> Página consultada el día 1 de Febrero del año 2004, a las 10.00 horas.
9. <http://www.qroo.gob.mx/qroo/Municipios/Othon.php> Página consultada el día 1 de Febrero del año 2004, a las 10.30 horas.
10. Glynn, Henry J. y Heinke, Gary W. INGENIERÍA AMBIENTAL. Editorial Prentice Hall, 1999. Páginas 652-653.
11. <http://www.eco2site.com>. Estudio realizado por Ercoli, E.; Gálvez, J.; Di Paola, M.; Cantero, J.; Videla, S.; Medaura, M.; Bauzá, J. Laboratorio de Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza. Página consultada el 31 de Agosto del año 2003 a las 9:05 de la mañana.
12. Sepúlveda, Tania Volke y Velasco, Juan Antonio. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS. México: INE-SEMARNAT, 2002, 64 pp.

13. Atlas, Ronald M. y otros. ECOLOGIA MICROBIANA Y MICROBIOLOGIA AMBIENTAL. Editorial Addison Wesley. Madrid 2002.
14. ANALISIS Y EVALUACION DE PARAMETROS CRITICOS EN BIODEGRADACION DE HIDROCARBUROS EN SUELO <http://www.eco2site.com/informes/biorremediacion.asp> Página consultada el día 19 de Septiembre del año 2003 a las 17.00 horas.
15. Guía del Ciudadano: Medidas Biocorrectivas (EPA 542/F-96/023). <http://www.epa.gov/swertio1/download/remed/spanbio.pdf> Página consultada el día 19 de Enero del año 2004 a las 10.30 horas.
16. Van Cauwenberghe, Liesbet y Roote, Diane S. In situ Bioremediation. Ground – Water Technologies Analysis Center (GWRTAC). Octubre, 1998. www.gwrtac.org
17. Baker, Katherine H. y Herson, Diane S. BIOREMEDIATION. Mc Graw- Hill. United States of America, 1994.
18. Kerr, Robert S. Handbook of BIOREMEDIATION. Environmental Research Laboratory. LEWIS PUBLISHERS. United States of America, 1993. pp. 3-4
19. Fertilidad y contaminación de suelos agrícolas. www.haro.org/pdf/resumen_bernal.pdf 16 de febrero del año 2004 19.30 horas
20. Alexander, M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. Academic Press, San Diego. 302 pp. 1991. *Introduction to Soil Microbiology*. Wiley, New York.
21. Van Deuren, J., Z. Wang, Z. y J. Ledbetter 1997. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.
22. Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P. Chang y E.D. Schroeder 1998. Bioremediation Principles. McGraw-Hill International Editions. 296 pp.
23. Semple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants.
24. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2001. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report. 10th Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response. <http://www.epa.gov/TIOclu-in.org/asr>.

25. Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers. 542 pp.
26. Hutchinson, S.L., M.K. Banks y A.P. Schwab 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer.
27. Sellers, K. 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers. 326 pp.
28. Miller, P.G. Ralinda R. PHYTOREMEDIATION .Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC). Octubre,1996. Página WEB: http://www.clu-in.org/download/toolkit/phyto_o.pdf
29. Guía del ciudadano: Medidas fitocorrectivas www.clu-in.org/download/remed/spanphyt.pdf 16 de febrero del año 2004 19.30 horas.
30. Biorremediación beta.arcrilde.edu.ar/wwwisis/publica/biorremediacion.htm 16 de febrero del año 2004 18.45 horas.
31. Fitorestauracion <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/c4-3-1-2.html> 16 de febrero del año 2004 19:40 horas
32. Schnoor, Jerald L. PHYTOREMEDIATION The University of Iowa Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research Iowa City, Iowa. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. October 1997. http://www.qwrtac.org/pdf/phyto_e.pdf
33. Young, P. (1996) The New Science of Wetland Restoration. Environ. Sci. Technol.
34. Wieder, R.K. (1993) Ion Input-Output Budgets for Five Wetlands Constructed for Acid Coal Mine Drainage Treatment. Water, Air, and Soil Pollution.
35. Walski, T.M. (1993) Long-Term Effects of Wetland Treatment of Mine Drainage. J. Environmental Engineering, ASCE.
36. Shimp, J.F.; Tracy, J.C.; Davis, L.C.; Lee, E.; Huang, W.; Erickson, L.E.; Schnoor, J.L. (1993) Beneficial Effects of Plants in the Remediation of Soil and Groundwater Contaminated with Organic Materials. Crit Rev in Env Sci & Tech.

37. Briggs, G.G., Bromilow, R.H. y Evans, A.A. (1982) Relationships Between Lipophicity and Root Uptake and Translocation of Non-Ionized Chemicals by Barley. Pestic. Sci.
38. Burken, J.G. y Schnoor, J.L. (1996) Phytoremediation: Plant Uptake of Atrazine and Role of Root Exudates. J. Environ. Engrg., ASCE.
39. Frick, R.E. Farrell y J.J. Germida. Assessment of Phytoremediation as an In-Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites. C.M. Department of Soil Science University of Saskatchewan. Saskatoon, SK Canada. Diciembre 29, 1999
40. Aprill, W. y Sims, R. C. 1990. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. *Chemosphere*.
41. Gunther, T., Dornberger, U. y Fritsche, W. 1996. Effects of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil.
42. Qiu, X., Leland, T. W., Shah, S. I., Sorensen, D. L. y Kendall, E. W. 1997. Chapter 14 Field study: grass remediation for clay soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. Phytoremediation of soil and water contaminants. E. L. Kruger, T. A. Anderson and J. R. Coats. American Chemical Society: Washington, D.C. ACS Symposium Series.
43. Reilley, K. A., Banks, M. K. y Schwab, A. P. 1996. Organic chemicals in the environment: dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Journal of Environmental Quality*.
44. Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.
45. Vassil, A. D., Kapulnik, Y., Raskin, I., & Salt, D. E. (1998). Plant. Physiol.
46. Huang, J. W., Blaylock, M. J., Kapulnik, Y., y Ensley, B. D. (1998). Environmental Science Technology.
47. Fitocorrección página consultada el día 23 de Septiembre de 2003 a las 10:30horas.
<http://www.miliarium.com/Proyectos/Suelos/DescontaminacionSuelos/TecnicasInSitu/TecnicasBiologicas/Fitorremediacion.asp>

48. Bruce E. Pivetz. Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. Ground Water Issue. EPA/540/S-01/500 February 2001 United States Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste and Emergency Response Office of Research and Development. National Risk Management Research Laboratory Subsurface Protection and Remediation Division. Robert S. Kerr. Environmental Research Center Ada, Oklahoma Superfund Technology Support Center for Ground Water ManTech Environmental Research Services Corporation, P. http://clu-in.org/download/remed/epa_540_s01_500.pdf
49. Adler, T. 1996. Botanical cleanup crews. Sci. News.
50. Bañuelos, G.S., H.A. Ajwa, B. Mackey, L.L. Wu, C. Cook, S. Akohoue, y S. Zambrzuski. 1997. Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium. J. Environ. Qual.
51. Burken, J.G., y J.L. Schnoor. 1998. Predictive relationships for uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees. Environ. Sci. Technol.
52. Burken, J.G., y J.L. Schnoor. 1999. Distribution and volatilization of organic compounds following uptake by hybrid poplars. Int. J. Phytoremediation.
53. Cunningham, S.D., W.R. Berti, y J.W. Huang. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. Trends Biotechnol.
54. Dushenkov, V., P.B.A. Nanda Kumar, H. Motto, y I. Raskin. 1995. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. Environ. Sci. Technol.
55. Harms, H., y C. Langebartels. 1986. Standardized plant cell suspension test systems for an ecotoxicologic evaluation of the metabolic fate of xenobiotics. Plant Sci.
56. Newman, L.A., X. Wang, I.A. Muiznieks, G. Ekuan, M. Ruszaj, R. Cortellucci, D. Domroes, G. Karscig, T. Newman, R.S. Crampton, R.A. Hashmonay, M.G. Yost, P.E. Heilman, J. Duffy, M.P. Gordon, y S.E. Strand. 1999. Remediation of trichloroethylene in an artificial aquifer with trees: A controlled field study. Environ. Sci. Technol.

57. Pierzynski, G.M., J.L. Schnoor, M.K. Banks, J.C. Tracy, L.A. Licht, y L.E. Erickson. 1994. Vegetative remediation at Superfund Sites. Mining and Its Environ. Impact (Royal Soc. Chem. Issues in Environ. Sci. Technol. 1).
58. Reeves, R.D., y R.R. Brooks. 1983. Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from mining areas of central Europe. Environ. Pollut. Ser. A.
59. Rugh, C.L., J.F. Senecoff, R.B. Meagher, y S.A. Merkle. 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. Nat. Biotechnol.
60. Salt, D.E., M. Blaylock, P.B.A. Nanda Kumar, V. Dushenkov, B.D. Ensley, I. Chet, y I. Raskin. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Biotechnol.
61. Smith, R.A.H., y A.D. Bradshaw. 1979. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes. J. Appl. Ecol.
62. U.S. EPA. 1997. Status of in situ phytoremediation technology. pp. 31-42. In Recent developments for in situ treatment of metal contaminated soils. March.
63. Jordahl, J.L., L. Foster, J.L. Schnoor, y P.J.J. Alvarez. 1997. Effect of hybrid poplar trees on microbial populations important to hazardous waste bioremediation.
64. Olson, P.E., y J.S. Fletcher. 2000. Ecological recovery of vegetation at a former industrial sludge basin and its implications to phytoremediation.
65. Narayanan, M., L.C. Davis, y L.E. Erickson. 1995. Fate of volatile chlorinated organic compounds in a laboratory chamber with alfalfa plants
66. Lin, Q., y I.A. Mendelsohn. 1998. The combined effects of phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands.
67. Olson, P.E., y J.S. Fletcher. 1999. Field evaluation of mulberry root structure with regard to phytoremediation.
68. Fletcher, J.S., y R.S. Hegde. 1995. Release of phenols by perennial plant roots and their potential importance in bioremediation.

69. Pfender, W.F. 1996. Bioremediation bacteria to protect plants in pentachlorophenol-contaminated soil.
70. Schwab, A.P., y M.K. Banks. 1999. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils. Chapter 28. In D.C. Adriano, J.-M. Bollag, W.T. Frankenburger, Jr., and R.C. Sims (eds.), *Bioremediation of Contaminated Soils*. Agronomy Monograph 37, American Society of Agronomy.
71. Anderson, T.A., y B.T. Walton. 1995. Comparative fate of [14C]trichloroethylene in the root zone of plants from a former solvent disposal site.
72. Anderson, T.A., E.L. Kruger, and J.R. Coats. 1994. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant.
73. Hoagland, R.E., R.M. Zablotowicz, and M.A. Locke. 1994. Propanil metabolism by rhizosphere microflora. pp. 160-183. In T.A. Anderson and J.R. Coats (eds.), *Bioremediation Through Rhizosphere Technology*, ACS Symposium Series, Volume 563. American Chemical Society, Washington, DC.
74. Hsu, T.S., y R. Bartha. 1979. Accelerated mineralization of two organophosphate insecticides in the rhizosphere.
75. Boyle, J.J., y J.R. Shann. 1995. Biodegradation of phenol, 2,4-DCP, 2,4-D, and 2,4,5-T in field-collected rhizosphere and nonrhizosphere soils.
76. Sandmann, E.R.I.C., y M.A. Loos. 1984. Enumeration of 2,4-D degrading microorganisms in soils and crop plant rhizospheres using indicator media: High populations associated with sugarcane (*Saccharum officinarum*).
77. <http://www.gtz.org.mx/sitios-contam/> Página consultada el día 21 de Abril de 2004 a las 10.00 horas del día. Desarrollo Institucional para la Gestión de Sitios Contaminados.
78. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2002. Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México. <http://www.profepa.gob.mx/> 1998. Informe Trienal 1995-1997. PROFEPA, SEMARNAP. México.

79. Quadri, G. 1994. Industria y política ambiental. El Nacional, sábado 18 de junio, México.
80. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. Secretaría de Gobernación, México.
81. Petróleos Mexicanos (PEMEX) 2001. Informe 2001: Seguridad, salud y medio ambiente. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, PEMEX, México.
82. CICLOPLAFEST 2000. Informe sexenal de la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICLOPLAFEST)1994-2000. <http://www.stps.gob.mx/312/publicaciones/cicloplafest.htm>
83. CICLOPLAFEST 1996. Catálogo Oficial de Plaguicidas. Comisión Intersecretarial para el Control y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas.
84. E. J. Olguín¹, L. Gonzalez², Sánchez y Peña Cabriales³. Bioremediation potencial in México. 1 Institute de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz. 2 Instituto Mexicano de Teconología del Agua, Cuernavaca, Morelos. 3 Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del I. P. N. Irapuato Guanajuato.
85. Bonetto Juan Pablo; López Silvia C. POSIBILIDADES DE APLICACION DE LA FITORREMEDIACION EN LA MINERIA DE URANIO Grupo Agronómico, U.A. Aplicaciones Tecnológicas y Agropecuarias, Centro Atómico Ezeiza, CNEA.
86. Kumar N., Dushenkov V., Motto H. y Raskin I. (1995). Phytoextraction: The use of Plants to Remove Heavy Metals from Soils. Environmental Science and Technology
87. Greger, M., y T. Landberg. 1999. Use of willow in phytoremediation. Int. J. Phytoremediation.

-
88. Brooks, R.R. 1998b. Phytochemistry of hyperaccumulators. In R.R. Brooks (ed.), Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. CAB International, New York, NY, pp. 15-53.
 89. McGrath, S.P. 1998. Phytoextraction for soil remediation. In R.R. Brooks (ed.), Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. CAB International, New York, NY,
 90. Blaylock, M.J., M.P. Elless, J.W. Huang, y S.M. Dushenkov. 1999. Phytoremediation of lead-contaminated soil at a New Jersey brownfield site.
 91. Meagher, R.B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants.
 92. Robinson, B.H., R.R. Brooks, A.W. Howes, J.H. Kirkman, y P.E.H. Gregg. 1997. The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator Berkheya coddii for phytoremediation and phytomining.
 93. Brooks, R.R. 1998a. General introduction. In R.R. Brooks (ed.), Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. CAB International, New York, NY.
 94. Tremel, A., P. Masson, H. Garraud, O.F.X. Donard, D. Baize, y M. Mench. 1997. Thallium in French agrosystems--II. Concentration of thallium in field-grown rape and some other plant species.
 95. McGrath, S.P., S.J. Dunham, y R.L. Correll. 2000. Potential for Phytoextraction of Zinc and Cadmium from Soils Using Hyperaccumulator Plants. En N. Terry y G. Bañuelos (eds.). Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
 96. Jonnalagadda, S.B., y G. Nenzou. 1997. Studies on arsenic rich mine dumps. II. The heavy element uptake by vegetation. J. Environ. Sci. Health.
 97. Bañuelos, G.S., M.C. Shannon, H. Ajwa, J.H. Draper, J. Jordahl, y L. Licht. 1999. Phytoextraction and accumulation of boron and selenium by poplar (Populus) hybrid clones. Int. J. Phytoremediation.
 98. Nzungu, V.A., C. Wang, y G. Harvey. 1999. Plant mediated transformation of perchlorate into chloride. Environ. Sci. Technol.
-

-
99. Dushenkov, S., A. Mikheev, A. Prokhnevsky, M. Ruchko, y B. Sorochinsky. 1999. Phytoremediation of radiocesiumcontaminated soil in the vicinity of Chernobyl, Ukraine. Environ. Sci. Technol.
100. Rogers, R.D., y S.E. Williams. 1986. Vesicular-arbuscular mycorrhiza: influence on plant uptake of cesium and cobalt. Soil Biol. Biochem.
101. Lewis, B.G., y M.M. MacDonell. 1990. Release of radon-222 by vascular plants: Effect of transpiration and leaf area. J. Environ. Qual.
102. Entry, J.A., L.S. Watrud, y M. Reeves. 1999. Accumulation of 137Cs and 90Sr from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi. Environ. Pollut.
103. AATDF. 1998. AATDF Technology Evaluation Report, Phytoremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil. Advanced Applied Technology Demonstration Facility, Report.
104. Carman, E.P., T.L. Crossman, y E.G. Gatliff. 1998. Phytoremediation of No. 2 fuel oil-contaminated soil. J. Soil Contam.
105. Ferro, A.M., S.A. Rock, J. Kennedy, J.J. Herrick, y D.L. Turner. 1999. Phytoremediation of soils contaminated with wood preservatives: greenhouse and field evaluations. Int. J. Phytoremediation.
106. Pradhan, S.P., J.R. Conrad, J.R. Paterek, y V.J. Srivastava. 1998. Potential of phytoremediation for treatment of PAHs in soils at MGP sites. J. Soil Contam.
107. Newman, L.A., S.L. Doty, K.L. Gery, P.E. Heilman, I. Muiznieks, T.Q. Shang, S.T. Siemieniec, S.E. Strand, X. Wang, A.M. Wilson, y M.P. Gordon. 1998. Phytoremediation of organic contaminants: A review of phytoremediation research at the University of Washington. J. Soil Contam.
108. Siciliano, S.D., y C.W. Greer. 2000. Plant-bacterial combinations to phytoremediate soil contaminated with high concentrations of 2,4,6-trinitrotoluene. J. Environ. Qual.
109. Larson, S.L., R.P. Jones, L. Escalon, y D. Parker. 1999. Classification of explosives transformation products in plant tissue. Environ. Toxicol. Chem.
-

110. Burken, J.G., y J.L. Schnoor. 1997. Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees. Environ. Sci. Technol.
111. Buyanovsky, G.A., R.J. Kremer, A.M. Gajda, y H.V. Kazemi. 1995. Effect of corn plants and rhizosphere populations on pesticide degradation. Bull. Environ. Contam. Toxicol.
112. Rice, P.J., T.A. Anderson, y J.R. Coats. 1997b. Evaluation of the use of vegetation for reducing the environmental impact of deicing agents. En E.L. Kruger, T.A. Anderson, y J.R. Coats (eds.), Phytoremediation of Soil and Water Contaminants, ACS Symposium Series No. 664. American Chemical Society, Washington, DC.

GLOSARIO

Absorción: Fenómeno de retención de un gas o un vapor por un líquido, o de un líquido por un sólido.

Actinomicetos: Se parecen a los mohos (que son hongos) por el hecho de que sus células se mantienen juntas para integrar filamentos ramificados. Producen peptidoglucanos para la pared celular, carecen de membrana nuclear y presentan otras características procarióticas. Son la causa de la mayor parte de la actividad de degradación de la materia orgánica del suelo.

Adsorción: Fenómeno de naturaleza física o química por el que las moléculas de un fluido que inciden sobre una superficie sólida quedan retenidas sobre la misma un determinado tiempo, produciendo un aumento de su concentración relativa en ella.

Biotransformación: Es la descomposición de un compuesto orgánico en otro similar no contaminante o menos tóxico.

Coloide: Sistema formado por partículas dispersas en un medio, cuyo tamaño, al menos en una dirección, tienen una dimensión comprendida entre 1 nm y 1 μm (partículas esféricas, fibras y películas).

Complejamiento: Son las reacciones de intercambio de ligandos

Cultivos puros: Son los cultivos que contienen una especie única.

Cultivos mixtos: Son los cultivos que contienen varias especies que mantienen una relación simbiótica.

Detritus: Residuo resultante de la disgregación de una masa sólida, particularmente una roca o de materiales orgánicos.

Diálisis: Proceso de difusión selectiva a través de una membrana. Se utiliza para separar solutos de bajo peso molecular, capaces de difundirse a través de los poros de la membrana, de otras macromoléculas que por su mayor tamaño no pueden hacerlo.

Disolución del suelo: Es el agua presente en el suelo.

Electrodiálisis: Si entre el Ánodo y el Cátodo colocamos un par de membranas semipermeables, una de las cuales es permeable a los cationes y la otra lo es a los aniones, se ira paulatinamente formando una zona de baja salinidad entre las dos membranas.

Floema: Es un tejido complejo en el cual se lleva a cabo la conducción de alimento a través de una planta.

Lignificación: Es la síntesis de la lignina y de los tejidos de la planta en la cual se pueden incorporar contaminantes químicos e inmovilizarlos.

Lignina: Sustancia polimérica constituyente de la madera, que actúa como aglomerante de las fibras de celulosa.

Litosfera: Capa más externa entre las envolventes sólidas del globo terráqueo, de material rígido y consistente, pero susceptible de deformación limitada en las circunstancias físicas de la escala geológica de tiempos.

Meteorización: La meteorización o intemperización química, es la alteración de las rocas a causa de modificaciones mineralógicas o químicas, inducidas por agentes superficiales.

Micorrizas: Es la asociación entre hongos y raíces.

Mineralización: Es la descomposición total de las moléculas orgánicas a dióxido de carbono, agua, sales minerales y compuestos celulares.

Osmosis inversas: Técnica utilizada en procesos de desalación del agua de mar y purificación de aguas residuales, consistente en la aplicación de una presión superior a la osmótica a la disolución salina (o residual), lo que determina un flujo de agua inverso al de la ósmosis, razón por la cual aquella se separa de las sustancias disueltas.

Peds: Son agregados estructurales formados por las partículas del suelo que no se encuentran aisladas.

Presión hidrostática: La presión dentro de un fluido.

Presión osmótica: Presión necesaria para evitar la difusión de un disolvente a través de una membrana semipermeable en un proceso de ósmosis. Corresponde a la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana cuando el sistema alcanza el equilibrio.

Quelación: Formación o presencia de enlaces (o de otras fuerzas de atracción) entre un átomo central único y dos o más sitios de enlaces distintos de un mismo ligando llamado agente quelante.

Quelato: Compuesto de coordinación en el que el átomo central, en general un metal, está unido por enlaces covalentes a dos o más átomos de una o más moléculas o iones.

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

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

Soluto: Cada uno de los componentes minoritarios de una disolución respecto al disolvente.

Suelo franco: Es un suelo formado por una mezcla determinada de arcilla, arena y limo, que presenta unas propiedades óptimas para el cultivo.

Traslación: Movimiento de materiales (agua, minerales o alimentos disueltos) a través de los tejidos vasculares de las plantas.

Xilema: Tejido vascular complejo compuesto por cuatro tipos distintos de células en las plantas con flor. Su principal función es la conducción de agua y materiales disueltos de las raíces a tallos y hojas. Una de sus funciones secundarias es proporcionar soporte estructural.

ANEXO 1

TABLA Ventajas, limitaciones, costos y tipo de contaminante a tratar.

METODO	CONTAMINANTE A TRATAR	VENTAJAS Y LIMITACIONES	COSTO
<u>BIOVENTEO</u>	Compuestos orgánicos biodegradables semivolátiles y no volátiles. Hidrocarburos, solventes no clorados, fitosanitarios y conservadores de la madera.	Favorece la degradación de contaminantes adsorbidos. Degrada compuestos orgánicos volátiles, por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo. ²³ Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo. ^{13, 23} Limitantes: (i) Tipo y concentración del contaminante, (ii) falta de nutrientes; (iii) bajo contenido de humedad y (iv) dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario. ^{13, 23}	Varían entre \$10 y \$70 dólares/m ³ .
<u>BIOESTIMULACIÓN</u>	Gasolinas, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles, fitosanitarios y residuos de explosivos	La naturaleza y profundidad de los contaminantes y el uso de bioaumentación puede aumentar sus costos. ^{13, 23} Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O ₂ . Otros factores que pueden limitar su aplicación, incluyen: (i) que el tipo del suelo no favorezca el crecimiento microbiano; (ii) incremento en la movilidad de los contaminantes; (iii) obstrucción en los pozos de inyección provocada por el crecimiento microbiano. ¹³	Oscila entre \$30 y \$100 dólares/m ³ .

METODO	CONTAMINANTE A TRATAR	VENTAJAS Y LIMITACIONES	COSTO
<u>BIOAUMENTACIÓN</u>	Herbicidas (2,4-D, clorofam), insecticidas (lindano, clordano, paratión), clorofenoles (PCP) y nitrofenoles, hidrocarburos policíclicos y aromáticos, metales.	Antes de llevar a cabo la bioaumentación en un sitio, deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de cometabolizar o utilizar el contaminante como fuente de carbono, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa. ^{13,21}	Meses o años, y su utilización no implica mucho capital ni costos de operación. ¹³
<u>BIOLABRANZA</u>	Diesel, gasolinas, lodos aceitosos, creosota, además de algunos fitosanitarios e hidrocarburos	Es una tecnología aplicada a gran escala, en los Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Dinamarca, Francia y Nueva Zelanda. ^{13, 26} El mayor problema es la posibilidad de lixiviados de los contaminantes hacia el suelo y el agua. Otra limitante para su utilización, es que por la incorporación de suelo contaminado en suelo limpio, se genera un gran volumen de material contaminado. No es recomendable su uso para contaminantes diluidos, ni tampoco cuando no todos los contaminantes son biodegradables. ^{13,22} La biolabranza debe manejarse con cuidado para prevenir la contaminación de acuíferos, superficies de agua, aire o en la cadena alimenticia.	Es una tecnología de mediano a largo plazo. \$30 y \$70 dólares/ m ³ . ^{13, 22, 26}

METODO	CONTAMINANTE A TRATAR	VENTAJAS Y LIMITACIONES	COSTO
<u>FITORREMEDIACIÓN</u>	Compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAP; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr ⁶⁺ , Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn, así como metales radioactivos y tóxicos	Se ha demostrado su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua. ¹³ Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación: (i) el tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar; (ii) altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas; (iii) puede depender de la estación del año; (iv) no es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos; (v) la toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden mobilizarse o bioacumularse en animales. ¹³	En general puede durar Meses o años. Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb (50 cm de profundidad) puede costar entre \$24,000 y \$40,000 dólares/ha. ^{13, 22}
<u>ASPERSIÓN DE AIRE</u> <u>/ BIOASPERSIÓN</u>	Compuestos orgánicos	Distribuye el oxígeno a través del sitio más rápidamente y tiene menos problemas operacionales que otros métodos como la bioestimulación.	La aspersión de aire es barata en comparación con otros métodos.

METODO	CONTAMINANTE A TRATAR	VENTAJAS Y LIMITACIONES	COSTO
<u>BIORREMEDIACIÓN EN FASE SÓLIDA (COMPOSTEO)</u>	Gasolinas, hidrocarburos policíclicos y aromáticos y explosivos	El uso de estrategias de composteo, se ha adoptado seriamente hasta los últimos tres a cinco años. ^{13, 22, 24} Limitantes: (i) necesidad de espacio; (ii) necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar la liberación de compuestos orgánicos volátiles; (iii) incremento volumétrico del material a tratar y (iv) no pueden tratarse metales pesados. ^{13,10}	El costo del composteo está en función de: (i) la cantidad y fracción de suelo a tratar; (ii) disponibilidad de agentes de volumen; (iii) tipo de contaminantes y proceso; (iv) necesidad de tratamientos previos y/o posteriores y (v) necesidad de equipos para el control de compuestos orgánicos volátiles. \$130 y \$260 dólares/m ³ . ^{13, 14}
<u>BIORREMEDIACIÓN EN FASE DE LODOS (BIORREACTORES)</u>	Hidrocarburos, compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados y compuestos orgánicos volátiles, fitosanitarios, desechos de explosivos.	Limitantes: (i) el suelo debe tamizarse; (ii) suelos heterogéneos y arcillosos pueden generar problemas de manipulación; (iii) los productos intermedios pueden ser más tóxicos que el contaminante original (en caso de explosivos o solventes clorados); (iv) los residuos pueden requerir de tratamiento o disposición final. ^{13,22, 26}	Los biorreactores de lodos pueden clasificarse como una tecnología de corto a mediano plazo. El uso de biorreactores de lodos oscila entre \$130 y \$200 dólares/m ³ . ¹³

ANEXO 2

TABLA Medio, tipo de proceso, concentración, planta y resultados obtenidos para cada contaminante estudiado.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Cadmio	Suelo	Fitoextracción	7.9mg/Kg	Sauce mimbre (<i>Salix viminalis</i>)	La velocidad de remoción calculada de Cd del suelo fue de 216.7 g/ha por año. ⁸⁷
		Fitoestabilización	9.4 mg/kg Cd total (en residuos de minas)	Álamo híbrido	Las hojas del Álamo no acumularon cantidades significantes de Cd cuando crecieron en terrenos con residuos de minas. ⁵⁷
Cromo	Suelo	Fitoextracción	No especificado.	ninguno	No hay evidencia de Cromo hiperacumulado por alguna planta vascular. ⁸⁸
		Fitoestabilización	No especificado	Mostaza de la India	Algunas evidencias de laboratorio indican que el Cr ⁶⁺ puede ser reducido a Cr ³⁺ a través de las raíces de <i>B. juncea</i> . ⁶⁰
Cobalto	Suelo	Fitoextracción	No especificado.	No especificado.	A pesar de existir hiperacumulación de Co (y Cu) se indica que no se demostró la fitoextracción del Cobalto y el Cobre. ⁸⁹
Cobre	Suelo	Fitoextracción	No especificado.	No especificado.	A pesar de existir hiperacumulación de Cu (y Co) se indica que no se demostró la fitoextracción del Cobre y el Cobalto. ⁸⁹

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Cobre	Suelo	Fitoestabilización	25 a 15400 ppm en residuos de minas	Pastos perennes como el <i>Agrostis tenuis</i> (castillitos) y <i>festuca rubra</i> (festuca roja).	La tolerancia a los metales ocurre de manera natural en las poblaciones de pastos perfectamente cultivados, proporcionando la fertilización suficiente. ⁶¹
Plomo	Suelo	Fitoextracción	Desde 0 hasta 15 cm de profundidad: 40% del sitio tuvo más de 400 mg/Kg; 7% del sitio tuvo más de 1000 mg/Kg	Mostaza de la India (<i>Brassica juncea</i>)	Después de 3 cultivos, el 28% del área tuvo más de 400 mg/Kg, 0% del área tuvo más de 1000 mg/Kg. Las profundidades de 15-30cm y 30-45cm no tuvieron cambios significativos. Los retoños de las plantas tuvieron menos de 100 mg/Kg a más de 3000 mg/Kg de Plomo. ⁹⁰
			625 µg/g (peso seco) en suelo	Cultivos de Mostaza de la India (<i>Brassica juncea</i>)	
		Fitoestabilización	625 mg/Kg	Sembradíos de Mostaza de la India (<i>Brassica juncea</i>)	La concentración de lixiviación fue de 740 mg/l sin plantas y de 22mg/l con plantas. ⁶⁰
Mercurio	Suelo y Agua subterránea	Fitovolatilización	5 µM Hg ²⁺ (1 mg/L) en solución acuosa	Oruga (<i>Arabidopsis thaliana</i>) genéticamente alterada y tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Después de 7 días, las plantas de tabaco han reducido el Hg ²⁺ en solución de 5 a 1.25 µM a través de la reducción del mercurio metálico menos tóxico, el cual fue volatilizado. ⁹¹

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Níquel	Suelo	Fitoextracción	14 a 3.333 mg/kg	<i>Berkheya coddii</i>	Esta estimado que las plantas pueden lograr un contenido de Níquel de 5000 µg/g y remover 110 kg de Ni por Hectárea. Las plantas no crecen en suelo con 10,000 mg/kg Ni. ⁹²
Talio	Suelo	Fitoextracción	0.321 a 18 mg/kg	Colza de Invierno (<i>Brassica napus</i> L.) pastos de invierno, maíz, calabaza, puerro.	La concentración promedio de Ta extraído fue de 20 mg/kg en las raíces de Colza, a la máxima concentración de talio en el suelo. En una base de peso seco, la máxima velocidad de acumulación fue de 2.5 veces la concentración de talio en el suelo. ⁹⁴
Zinc	Suelo	Fitoextracción	124 a 444 mg/kg Zn (Otros metales estuvieron presentes a menores concentraciones)	Siete especies hiperacumuladoras de metales	<i>Thlaspi caerulescens</i> y <i>Cardaminopsis halleri</i> acumularon altos niveles de Zn, con un promedio de 1,232 a 3,472 mg/kg. Estas especies removieron de 4.6 a 17.6 kg de Zn/ha por año. ⁹⁵
Zinc	Suelo	Fitoestabilización	Arriba de 43,750 mg/kg en material residual rocoso de minas	Pastos nativos, pastos domados, leguminosas	Los micorrizos y los aditivos orgánicos mejoran el crecimiento de la planta. Puede ocurrir liberación del Zn a través de las plantas. ⁵⁷

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Metaloides/no metales					
Arsénico	Suelo	Fitoextracción Fitoestabilización	No especificado	Pasto bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>), pasto paja (<i>Panicum sativum</i>) amaranto (<i>Amaranthus hybridus</i>)	El pasto bermuda creció en los residuos de minas con metales y acumuló 10880mg/kg de arsénico en las raíces y 1660 mg/kg en los estomas de las hojas (peso seco). ⁹⁶
Arsénico	Suelo	Fitoextracción Fitoestabilización	1,250 mg/kg (en residuos de minas)	Álamos, Quínoa Blanca (<i>Chenopodium sp.</i>)	Las hojas de Quínoa blanca tuvieron una concentración relativamente alta (14 mg/kg As) en comparación con otras plantas nativas o con las hojas de álamo (8 mg/kg As) en residuos de minas. ⁵⁷
Selenio	Agua subterránea (en drenes de irrigación)	Fitoextracción	100, 300, 500 µg/l	Clones de álamo híbrido (<i>Populus</i>)	El máximo contenido de Se encontrado fue de 9.1 mg/kg de materia seca en el tratamiento con 500µg/L, pero el contenido de Se no excedió 1 mg/kg de materia seca en los tratamientos con 100 y 300µg/l. Los álamos acumularon más Se que otras especies de árboles estudiados; la acumulación neta de Se fue mínima. ⁹⁷

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Selenio	Suelo	Fitoextracción Fitovolatilización	40 mg/kg	Canela (<i>Brassica napus</i> cv. Westar), Cáñamo de la India (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.), cañuela alta (<i>Festuca arundinacea</i>)	Las plantas acumularon Se. La canela redujo de 47% del suelo, el cáñamo de la India redujo 23% y el árbol de cañuela redujo un 21%. ⁵⁰
Perclorato	Agua (solución acuosa)	Fitoextracción Fitotransformación Rizodegradación	10, 22, 100 mg/l	Sauce negro (<i>Salix nigra</i>), Chopo de Virginia (<i>Populus deltoides</i> y <i>populus</i> híbrido) y eucalipto (<i>Eucalyptus cineria</i>)	La planta Sauce negro (<i>Salix nigra</i>) ha mostrado un mejor crecimiento bajo condiciones acuosas y degradó perclorato de 10 mg/l en cantidades menores al nivel de detección (2 µg/L) en 20 días con una biodegradación de 22 mg/l y una biodegradación de 100 mg/l en 53 días. En los tejidos de la planta, especialmente en las hojas y en las ramas, fueron encontrados 1.3% de la masa de perclorato inicial. Las hojas tuvieron 813.1 mg/kg de perclorato. La velocidad de degradación del perclorato disminuyó a medida que la concentración del nitrato aumentó, la fuente de nitrógeno afecta la velocidad de degradación del perclorato. ⁹⁸

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACIÓN	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Radionúclido					
Cesio o ^{137}Cs	Suelo	Fitoextracción	2600 Bq/kg alimentado	Especies de Amaranto	La extracción de ^{137}Cs depende del tipo de suelo; la adición de nutrientes no incrementa la bioacumulación. ⁹⁹
^{60}Co	Suelo	Fitoextracción	$C_o = 1.59 \text{ Bq } ^{60}\text{Co/g}$ de suelo	Trebol de olor (<i>Melilotus officinalis</i> L.) y Pasto del Sudán (<i>Sorghum sudanese</i> .)	El 2.6% del total de ^{60}Co en el suelo se han removido por dos plantaciones de trébol, de 65 a 93 días. El 1.2% del total de ^{60}Co presente en el suelo fue removido por dos plantaciones de pasto en un periodo de 85 a 119 días. ¹⁰⁰
^{226}Ra , ^{222}Rn	Suelo	Fitoextracción	$C_o = 4.4 \times 10^3 \text{ Bq } ^{226}\text{Ra/kg}$ de suelo	Maíz (<i>Zea mays</i> L.), girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.), cañuela alta (<i>Festuca arundinacea</i>)	^{226}Ra y ^{222}Rn fueron extraídos por las plantas, a pesar de ello el porcentaje de remoción por año de ^{226}Ra del suelo es relativamente bajo. Un impacto negativo es que el ^{222}Rn extraído es liberado por la planta, en su mayoría en las hojas. ¹⁰¹

C_o : Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACIÓN	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Estroncio o ⁹⁰ Sr	Suelo	Fitoextracción	100 Bq de ¹³⁷ Cs/g de suelo 112 Bq ⁹⁰ Sr/g de suelo	Pasto miel (<i>Paspalum notatum</i>), Pasto Johnson (<i>Sorghum halpense</i>), Pasto varilla (<i>Panicum virgatum</i>)	En tres plantaciones en 24 semanas la biomasa presente bajo el suelo de Pasto miel acumuló del 26.3 al 46.7% del ¹³⁷ Cs aplicado y del 23.8 al 50.1% del ⁹⁰ Sr aplicado; El pasto Johnson acumuló del 45.5 al 71.7% del ¹³⁷ Cs aplicado y del 52.6 al 88.7% del ⁹⁰ Sr aplicado; y el pasto varilla acumuló del 31.8 al 55.4% del ¹³⁷ Cs aplicado y del 36.8 al 63.4% del ⁹⁰ Sr aplicado. La infección por micorrizas (hongos) en toda la planta aumentó la extracción de ¹³⁷ Cs y ⁹⁰ Sr. Condiciones experimentales favorables pueden incrementar la extracción. ¹⁰²
Hidrocarburos derivados del petróleo / HAPs					
Petróleo crudo	Suelo	Rizodegradación	8,200 a 16,000 mg/kg HTP	Pasto de San Agustín (<i>Stenotaphrum secundatum</i> L.), centeno (<i>Secale cereale</i> L.)- pasto del Sudán (<i>Sorghum sudanese</i> L.)	En la costa del Golfo, la disipación del HTP en 21 meses estuvo entre 35 y 50% en los lugares plantados, comparado con el 21% de los lugares sin plantar. ⁷⁰

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Diesel	Suelo	Rizodegradación	3,000 mg/kg HTP	Cañuela alta, pasto miel, pasto de centeno, trébol blanco	En 24 meses, el HTP decreció 50% en los campos con trébol, 45% en los campos con cañuela, cerca de 40% en los campos con el pasto miel, y cerca de 30% en los campos sin cultivar. El HTP y el HAP decrecieron con mayor eficacia en los campos cultivados que en los campos sin cultivar. ¹⁰³
Combustible No. 2. Mezcla de compuestos Alquil-monoaromáticos, naftalenos y compuestos aromáticos polinucleares.	Suelo	Rizodegradación	40 a 5000 mg/kg DRO (Rango de combustibles orgánicos)	Híbrido de Sauce mimbre	Las raíces de Sauce fueron plantadas en el suelo contaminado. La Rizósfera contribuyó a la biodegradación no asistida. ¹⁰⁴
HAPs	Suelo	Rizodegradación	10 mg/kg de criseno, benzoantraceno, benzopireno y dibenzoantraceno	8 tipos de pastos de pradera	La desaparición de HAPs era mayor en suelos cultivados que en suelos no cultivados. ⁴⁰

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel); unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACIÓN	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
HAPs	Suelo	Rizodegradación	298 + 169 mg/kg del total de HAPs para 15 HAPs	Centeno perenne (<i>Lolium perenne</i>)	El fluoranteno, pireno y criseno fueron mayormente degradados en suelos cultivados que en suelos no cultivados. ¹⁰⁵
			100 mg/kg antraceno y pireno	Cañuela alta (<i>Festuca arundinacea</i>), pasto del sudan (<i>Sorghum vulgare</i> L.), Pasto varilla (<i>Panicum virgatum</i> L.), y alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.)	La desaparición del PAH fue mayor en los sitios cultivados que en los sitios sin cultivar. ⁴³
Benceno, tolueno y xileno (BTX)	Suelo	Rizodegradación	El suelo no contaminado fue utilizado para los cultivos aerobios del NMP (número más probable) que contenían 5 mg/l de benceno, tolueno, y xileno en cada uno.	Árboles de álamo híbrido	La proporción de degradadores de BTX en el suelo de la rizósfera en comparación con el suelo circundante fue de 5:1. ⁶³

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACIÓN	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Suelo de las plantas de manufactura de gas (HAPs)	Suelo	Rizodegradación	100 a 200 mg/Kg del total de HAPs	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>), Pasto varilla (<i>Panicum virgatum</i>), popotillo azul (<i>Schizachyrium scoparium</i>)	Los suelos plantados tuvieron una mayor reducción de los HAP totales y carcinogénicos que los suelos sin plantar. ¹⁰⁶
Solventes clorados					
Tricloroetileno (TCE)	Suelo	Rizodegradación Fitotransformación	No especificado.	<i>Lespedeza cuneata</i> ; vara de oro (<i>Solidago</i> sp.) Pino (<i>Pinus taeda</i> L.); soya (<i>Glycine max</i>)	Ocurrió una mineralización significativa en el suelo cultivado con <i>L. cuneata</i> , los pinos y la soya, aún mayor que en el suelo sin vegetación y que en el suelo cultivado con el pasto vara de oro. ⁷¹
	Agua subterránea	Fitotransformación Fitovolatilización	Alimentación de 50 mg/l durante la primera estación y 14.5 mg/l durante la segunda estación.	Álamo híbrido	Los árboles removieron cerca de 99% del TCE añadido. La transpiración del TCE fue detectada con análisis del gas que se obtuvo de las hojas. Durante el segundo y tercer año, menos del 9% fue transpirado. El TCE fue encontrado en las hojas, ramas, tronco y raíces. También fueron encontrados en los tejidos de la planta metabolitos y productos de la reducción de la descloración. ⁵⁶

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
1,1,1-tricloroetano (TCA)	Agua subterránea	Fitotransformación Rizodegradación	No dada.	Álamo híbrido	En pruebas de laboratorio los Álamos híbridos pueden tomar el TCA. En la aplicación en campo tuvo que ser instalado un sistema de irrigación. ¹⁰⁷
Municiones					
Trinitrotolueno (TNT)	Suelo	Rizodegradación	41 mg/kg	Pasto de pradera (<i>Bromus erectus</i>), centeno perenne (<i>Lolium perenne</i> L.), pasto dulce vernal (<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.)	El centeno perenne y pasto dulce vernal no sobrevivió en el suelo contaminado con TNT el cual se inoculó con bacterias degradadoras. Sin embargo el pasto de pradera redujo el TNT del suelo cerca de 70% de los niveles del suelo sin vegetación. ¹⁰⁸
Hexahidro 1,3,5-trinitro-1,3,5 triazina (RDX)	Suelo irrigado con agua contaminada	Fitoextracción Fitotransformación	1.0 µg/mL	Maíz (<i>Zea mays</i>), tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Las hojas de maíz contienen 22 µg RDX/g y 16 µg RDX/g de peso seco. Del fruto de tomate se obtuvo 10 µg RDX/g del peso fresco. ¹⁰⁹
Fitosanitarios					
Antracina	Suelo	Fitotransformación	60.4 µg/kg	Álamo híbrido	Los árboles metabolizaron la antracina a compuestos menos tóxicos. La degradación de la antracina fue similar en los suelos plantados. ¹¹⁰

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACION	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Antracina	Suelo	Rizodegradación	0.5 $\mu\text{g/g}$ antracina en suelos contaminados, inoculados con una cantidad adicional de antracina de >10 ppm.	Falso ciprés (<i>Kochia sp.</i>)	La biodegradación de la antracina puede mejorarse utilizando suelo colectado de la rizósfera. ⁷²
Antracina	Agua subterránea con agua del suelo (solución acuosa)	Fitotransformación	Se usaron 48.3 μg de antracina en menos de 270 ml en el reactor acuoso.	Álamo híbrido	No hubo volatilización de la antracina a través de los álamos. El 53.3% de la antracina aplicada fue extraída dentro de la planta. El mayor porcentaje de antracina fue encontrado en las hojas. ⁵²
Carbofurano	Suelo	Rizodegradación Fitotransformación	3 kg/ha de ingredientes activos en campo experimental	Maíz (<i>Zea mays L.</i>)	En los 30 primeros días del experimento en el invernadero, la mineralización fue mayor en el suelo con raíces que en el suelo sin estas. Se observó la obtención y la degradación del producto de carbofurano. En experimento de campo, la concentración en los primeros 10 cm de suelo plantado tuvo la mitad de la concentración en el suelo no plantado. ¹¹¹

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACIÓN	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
EDB	Agua subterránea	Fitotransformación	25 ppm	<i>Leucaena leucocephala</i>	Se investigó la obtención de EDB. ¹⁰⁷
Ácido 2,4 diclorofenoxiacético (2,4-D)	Suelo	Rizodegradación	Suelo no contaminado	Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	El conteo del número más probable de los degradadoras del 2,4-D fue mayor en el suelo con rizósfera de la caña de azúcar que en el suelo sin rizósfera. ⁷⁶
Otros					
Pentaclorofenol (PCP)	Suelo	Rizodegradación	100 mg/kg	<i>Agropyron desertorum</i>	Después de 155 días, el 22% del PCP fue mineralizado en el suelo plantado. ¹⁰⁵
Bifenilos policlorados (BPC)	Suelo	Rizodegradación	No especificado	Maclura y mora	La maclura y la mora con compuestos fenólicos en lixiviación pueden soportar crecer con la presencia de bacterias degradadoras de BPC. ⁶⁸
Metil Terbutil Eter (MTBE)	Agua subterránea	Fitotransformación Fitovolatilización	No especificado	Celdas de cultivos con álamo, álamo híbrido y eucalipto	El eucalipto transpiró el 16.5% del MTBE aplicado y el álamo híbrido transpiró 5.1% en aplicaciones de laboratorio. La detección de la transpiración de MTBE no fue medida en el eucalipto maduro en la aplicación de campo. ^{56, 107}

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.

CONTAMINANTE	MEDIO	PROCESO	CONCENTRACIÓN	PLANTA	RESULTADOS / NOTAS
Etilen glicol	Suelo	Rizodegradación	1000 µg/g	Cañuela alta (<i>Festuca arundinacea</i>), Centeno perenne (<i>Lolium perenne</i> L.), Zacate azul (<i>Poa pratensis</i> L.), alfalfa (<i>Medicago sativa</i>), trébol pata de pájaro (<i>Lotus corniculatus</i>), y una mezcla de todas excepto pie de pájaro tres hojas.	A los 30 días, en el suelo estudiado a 0°C, hubo una significativa producción de CO ₂ en el suelo plantado con árbol de cañuela, centeno perenne, pasto Kentucky, alfalfa, y una mezcla de todos ellos que en suelo sin plantar. A los 20°C, hubo una producción significativa de CO ₂ en el suelo plantado con todas esas plantas. ¹¹²

Co: Concentración inicial

Bq (Becquerel): unidad de actividad reconocida por el Sistema Internacional 1Bq= una desintegración por segundo.