

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Biorremediación de Suelos Agrícolas en México

Por:

EDITH HERNÁNDEZ RAMÍREZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Mayo 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARÍA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Biorremediación de Suelos Agrícolas en México

Por:

EDITH HERNÁNDEZ RAMÍREZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría

M.C. Sofía Comparán Sánchez
Asesor Principal

Dr. Antonio Juárez Maldonado
Coasesor

Biol. Miguel Agustín Carranza Pérez
Coasesor

Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Mayo 2017

Agradecimiento

Primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta donde estoy ahora, y por bendecirme con una familia maravillosa.

A mis papás el Sr. Longino Julio y la Sra. Modesta por apoyarme para alcanzar mis sueños, porque sin sus consejos seguro no lo hubiera logrado. A todos mis hermanos por alentarme en el camino para no rendirme.

Por último a mis tesoros más preciados, mis hijos Ala Christopher y Efrén porque muchas veces fueron la razón por la cual tenía que luchar para salir adelante. Y a mi amado esposo Rodolfo que siempre me apoyó para terminar con mis estudios.

Todos somos muy ignorantes. Lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas. Albert Einstein.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Introducción	7
Justificación	9
Objetivos	9
Capítulo 1. Marco teórico	10
1.1 El suelo.....	10

1.2	Perfiles de suelos.....	10
1.3	Propiedades del suelo.....	12
1.4	Propiedades físicas del suelo	13
1.4.1	Textura del suelo	13
1.4.2	Porosidad.....	13
1.4.3	Densidad aparente	13
1.4.4	Densidad real	14
1.5	Propiedades químicas del suelo.....	14
1.5.1	pH del suelo.....	14
1.5.2	Capacidad de intercambio catiónico.....	15
1.5.3	Materia orgánica	15
1.6	Propiedades biológicas del suelo.....	15
1.7	Degradación del suelo	16
1.7.1	Degradación química	16
1.7.2	Degradación Física	17
1.8	Contaminación del suelo	17
Capítulo 2.	La agricultura en México.....	19
2.1	Reducción de la diversidad genética por la uniformidad de cultivos.....	20
2.2	La agricultura intensiva en México.....	21
2.3	Principales cultivos en México.....	23
2.4	Degradación de suelos por la agricultura	24
2.5	Plaguicidas.....	25
2.6	Fertilizantes.....	26
2.7	La biodiversidad y la agricultura.....	26
Capítulo 3.	La Biorremediación	30
3.1	Tipos de biorremediación	32
3.1.1	Degradación enzimática	32
3.1.2	Remediación microbiana.....	33
3.1.3	Remediación con plantas (Fitorremediación).....	34
3.2	Técnicas de biorremediación	36
3.2.1	Bioventing o inyección de aire.....	37
3.2.2	Atenuación natural.....	38

3.2.3 Bioestimulación	39
3.2.4 Biopilas	39
Capítulo 4. Casos de Biorremediación de suelos en México	40
4.1 Biorremediación de un suelo contaminado por petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partículas. (Ordas <i>et al.</i> , 2011)	40
.....	41
4.2 Biorremediación de suelo contaminado con pesticida: caso DDT (Betancur <i>et al.</i> , 2013).....	41
4.3 El composteo: una alternativa biotecnológica para la biorremediación de suelos en México (Velasco y Volke, 2003).....	42
4.3.1 Sistema de composteo	44
4.3.2 Biopilas alargadas	44
4.3.3 Biopilas estáticas.....	45
4.4 Potencial de la Biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano (Adams <i>et al.</i> , 1999).	45
4.4.1 Potencial de la Biorremediación.....	46
4.5 Caracterización de suelos contaminados con HAPs en el valle de Metztitlán, Hgo., y aplicación de un proceso de biorremediación con membranas limitantes de oxígeno (Vázquez <i>et al.</i> , 2013).....	47
4.6 Proceso de Biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos (Ferrera <i>et al.</i> , 2006).	48
4.7 Efecto de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación y fitorremediación de suelos con petróleos crudo nuevo e interperizado (Maldonado <i>et al.</i> , 2010).	50
4.8 Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes (Martinez <i>et al.</i> , 2011).	53
4.9 Aislamiento, identificación y evaluación de un cultivo mixto de microorganismos con capacidad de degradar DDT (Carrillo <i>et al.</i> , 2004)	54
5.1 Desarrollo de la agricultura orgánica en México.....	56
Conclusión	58
Glosario.....	60
Abreviaturas	61
Bibliografía.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras 1. Horizonte del suelo (INIA, 2015)-----	11
Figuras 2. Estado actual de uso de suelo en México (SAGARPA, 2013).-----	19
Figuras 3. Parte de la planta que actúa en cada tipo de fitorremeddiación (Reddy y Smith, 1996) -----	36
Figuras 4. Resultados obtenidos (Ordas <i>et al.</i> , 2011)-----	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos negativos de la agricultura intensiva.-----	22
Tabla 2. Biodiversidad y biodiversidad agrícola (CDB, 2008). -----	28
Tabla 3. Tipo de fitorremediación(Reddy y Smith, 1996) -----	35

Introducción

En México existen cerca de 200 productos agrícolas que son cultivados dentro del país, entre los más destacados por su importancia en el consumo se encuentran el maíz, frijol, trigo, arroz, sorgo, caña de azúcar, tomate, chile y las oleaginosas por la alta producción de aceites derivados de sus semillas.

Se puede definir a la agricultura como la actividad en la cual el hombre, en un ambiente dado, maneja los recursos naturales, la calidad y cantidad de energía disponible y los medios de información, para producir y reproducir los vegetales que satisfacen sus necesidades.

La zona dedicada a la producción agrícola en México es muy amplia ya que ocupa poco más del 13% del total del territorio nacional, lo que equivale a 145 millones de hectáreas dedicadas a esta actividad, donde el maíz y el frijol representan más del 80 por ciento de la producción agrícola al ser los productos que más se cultivan en toda la República. Para todas esas actividades agrícolas se necesita uno de los recursos naturales más importante para todos los seres que habitan sobre la tierra; el suelo.

La agricultura ha contribuido a la degradación del suelo de diversas maneras. Esto incluye la pérdida de la fertilidad, la salinización, la contaminación por agroquímicos, la erosión debida a la eliminación de la cubierta vegetal por el sobrepastoreo o el movimiento constante del suelo. Todos estos tipos de degradación causan que la capacidad productiva del suelo disminuya, reduciéndose, por consecuencia, el rendimiento agrícola.

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y

animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo.

Todas las sustancias que forman el suelo son importantes por sí mismas, pero lo fundamental es el equilibrio adecuado entre los diferentes constituyentes. La materia orgánica y los microorganismos aportan y liberan los nutrientes y unen las partículas minerales entre sí. De esta manera, crean las condiciones para que las plantas respiren, absorban agua y nutrientes y desarrollen sus raíces.

Asimismo como hay un equilibrio, también puede haber una alteración en las propiedades del suelo como puede ser físico, químico o biológico por algún agente extraño a él, impidiendo que cumpla con su función. Pero gracias al avance de la tecnología existen técnicas para restaurar suelos contaminados como la biorremediación.

La biorremediación se basa en la utilización de microorganismos (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas o contaminantes a sustancias de carácter menos tóxico (H_2O , CO_2) o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana. Se trata de un proceso relativamente lento que requiere de meses o incluso de años pero muy económico si se efectúa adecuadamente. Por otro lado, su ventaja principal consiste en que los contaminantes son destruidos en una fase del ciclo del carbono.

Por otro lado tenemos a la agricultura orgánica, sustentable o ecológica, son los términos que usa en una agricultura que es ambientalmente amigable. Se puede considerar como una alternativa para combatir la erradicación de la desertificación y contaminación de suelos. Ya que evita la utilización de fertilizantes sintéticos que son los que más dañan la microfauna del suelo.

Justificación

En la actualidad hay un nivel muy alto de demanda de alimentos, por la cual hay que satisfacer. Por esa misma el ser humano ha explotado al máximo los recursos naturales, cada vez hay más extinción de especies ya sea animal o vegetal, más contaminación del agua, suelo, de la atmosfera, etc. Por esas razones hay que tomar conciencia ante esta situación y actuar para poder rescatar y restaurar las riquezas naturales que tenemos.

Uno de los recursos más afectados es el suelos, porque en él se lleva a cabo todos los procesos para el desarrollo de la vida, por esa razón es el más susceptible a sufrir daños irreversibles, ya que es considerado como un recurso natural no renovable.

Ante todo esto, hay buenas noticias, ya que tenemos a nuestro alcance el avance de la tecnología que podría contribuir a la restricción de la destrucción del medio ambiente en especial el suelo. Hoy en día muchas investigaciones sobre técnicas de recuperación de suelos contaminados por diversos químicos.

Ese es el enfoque principal de este trabajo, recabar la información necesaria para poder tomar medidas de mitigación ante este problema, y ver la forma de desarrolla una agricultura orgánica para revertir el daño en el suelo.

Objetivos

Objetivo general

1. Estudiar la biorremediación de los suelos en México.

Objetivos específicos

1. Analizar el impacto que causa la agricultura en los suelos.
2. Conocer los avances de la biotecnología como una forma de solucionar el impacto que se ha provocado en los suelos agrícolas.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 El suelo

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre abarca el primer metro de profundidad, en la cual ocurren cambios físicos y químicos que se pueden identificar a simple vista, tocar, medir y analizar en laboratorios.

Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua (Astier *et al.*, 2002).

El suelo es el sustrato sobre el cual se desarrolla la vida vegetal y animal. Además, el suelo protege el medio ambiente, ya que actúa como filtro y transformador de contaminantes producidos sobre todo por el hombre. El suelo desempeña funciones importantes en este planeta, actúa como medio filtrante amortiguador y transformador; es hábitat de miles de organismos y es donde se llevan a cabo los ciclos biogeoquímicos (Huerta, 2010).

1.2 Perfiles de suelos

En condiciones naturales los suelos correctamente desarrollados presentan tres horizontes principales según la INIA (2015) denominados con letras A, B y C.

El horizonte A es el más importante desde el punto de vista productivo pues en él se alcanza el máximo desarrollo de actividad biológica presencia de microorganismos y pequeños animales; es el que presenta el contenido más elevado en el perfil de materia orgánica, elemento altamente responsable del potencial productivo de un suelo.

El horizonte B es una capa de acumulación generalmente enriquecida de arcillas y sales provenientes de infiltración de agua en el perfil, característica muy relevante para definir el potencial productivo de un suelo.

El horizonte C se compone de material mineral formado por la descomposición de las rocas; incorpora paulatinamente materia orgánica que con el transcurso de muchísimos años permitirá la formación del suelo.



Figuras 1. Horizonte del suelo (INIA, 2015)

Por su uso, puede clasificarse como:

- agrícola
- forestal
- industrial
- habitacional

Existen diferentes tipos de suelo y conocer sus características es importante para aprovecharlos de la mejor manera; por ejemplo, para ubicar los suelos útiles en la agricultura y dependiendo de sus características, identificar cuál es la mejor manera de enriquecerlos con fertilizantes y qué cantidad de agua de riego necesitan para la producción de cultivos, por ejemplo es muy diferente regar un suelo arenoso que uno arcilloso que tiende a inundarse.

Dependiendo de sus características, podríamos localizar suelos arenosos cuyas partículas sirven para elaborar chips de computadoras o tabiques para construir

viviendas o suelos gravosos y pedregosos que proveen al ser humano de material para hacer carreteras, entre otras cosas.

El suelo tiene cuatro componentes:

- Compuestos inorgánicos: grava, arcilla, limo y arena.
- Nutrientes solubles: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.
- Materia orgánica de organismos muertos: lombrices, hongos, bacterias y restos de plantas en cualquier proceso de descomposición.
- Agua y gases, por ejemplo hidrógeno y oxígeno, que ocupan los espacios porosos libres.

Las proporciones de cada uno de ellos son variables: en zonas de clima templado-húmedo, la materia orgánica representa entre 2 y 5 %; en cambio, en el desierto puede ser menor de 1 %. En climas secos, por lo general, los suelos son más arenosos y con mayor presencia de calcio y sodio; por el contrario, en los húmedos tienden a ser más arcillosos en general y con mayor concentración de elementos ácidos, como fierro y aluminio. Se clasifican por su origen geológico y forma, a través de un estudio que se llama perfil de suelo.

1.3 Propiedades del suelo

Una propiedad física, química o biológica del suelo es aquella que caracteriza al suelo; la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado el interperismo (desintegración por agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas a través del tiempo (Volke *et al.*, 2005).

1.4 Propiedades físicas del suelo

1.4.1 Textura del suelo

La textura de un suelo está determinada por las cantidades de partículas minerales inorgánicas (medidas como porcentajes en peso) de diferentes tamaños (arena, limo y arcilla) que contiene. La proporción y magnitud de muchas reacciones físicas, químicas y biológicas en los suelos están gobernadas por la textura, debido a que ésta determina el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren las reacciones, además de la plasticidad, la permeabilidad, la facilidad para trabajar la tierra, la sequedad, la fertilidad y la productividad que varían dependiendo de la región geográfica (Buckman y Brady, 1966).

1.4.2 Porosidad

Fracción agua/gases. Los espacios o poros que hay entre partículas sólidas (orgánicas e inorgánicas) del suelo, contienen diversas cantidades de dos componentes inorgánicos clave: el agua y el aire. El agua es el principal componente líquido de los suelos y contiene sustancias minerales, oxígeno (O₂) y bióxido de carbono (CO₂) en disolución, mientras que la fase gaseosa en los suelos está constituida por aire. Dependiendo del contenido de humedad del suelo, los poros se encuentran ocupados por agua o por aire (Aguilera, 1989).

1.4.3 Densidad aparente

La densidad aparente es importante para estudios cuantitativos de suelo. Los resultados de las densidades aparentes son fundamentales para calcular los movimientos de humedad, los grados de formación de arcilla y la acumulación de los carbonatos en los perfiles de suelo. Los suelos orgánicos tienen muy baja densidad aparente en comparación con los suelos minerales (Aguilera, 1989). El peso de la unidad de volumen de suelo con espacios intersticiales es lo que da la densidad aparente (Wooding, 1967). Casi todos los suelos minerales tienen una densidad aparente que varía de 0.4 a 2.0 g/cc.

La densidad aparente está relacionada con el peso específico de las partículas minerales y las partículas orgánicas así como por la porosidad de los suelos. Si se

considera cierto volumen de suelo en sus condiciones naturales, es evidente que solo cierta proporción de dicho volumen está ocupada por el material del suelo (Aguilera, 1989).

1.4.4 Densidad real

Se define como la masa (o peso) de una unidad de volumen de sólidos del suelo y es llamada densidad de la partícula; aunque pueden observarse variaciones considerables en la densidad de los suelos minerales, individuales; la mayor parte de los suelos normales varían entre los límites estrechos de 2,60 a 2,7 g/cc. Debido a que la materia orgánica pesa mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales, la cantidad de ese constituyente en un suelo afecta marcadamente a la densidad de partículas.

La densidad más alta en estas condiciones, suele ser de 2,4g/cc. También se le define como el peso de un volumen conocido comparado con el peso de volumen igual de agua (Buckman y Brady, 1966).

1.5 Propiedades químicas del suelo

La química de suelos es la ciencia que estudia las propiedades químicas del suelo y de sus componentes inorgánicos y orgánicos, así como los fenómenos a que da lugar la mezcla de esos componentes. (Bornemisza, 1982).

1.5.1 pH del suelo

Una de las características del suelo más importantes es su reacción, ésta ha sido debidamente reconocida debido a que los microorganismos y plantas superiores responden notablemente tanto a su medio químico, como a la reacción del suelo y los factores asociados con ella. Tres condiciones son posibles: acidez, neutralidad, y alcalinidad (Buckman y Brady, 1966).

La acidez del suelo es común en todas las regiones donde la precipitación es alta, lo que ocasiona la lixiviación de grandes cantidades de bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos; en este caso, la solución del suelo contiene más iones hidrógeno (H^+) que oxidrilos (OH^-).

Los suelos alcalinos son característicos de las regiones áridas y semiáridas; la alcalinidad se presenta cuando existe un alto grado de saturación de bases. La presencia de sales especialmente de calcio, magnesio y sodio en formas de carbonatos da también preponderancia a los iones (OH⁻) sobre los iones (H⁺) en la solución del suelo (Millar *et al.*, 1971).

1.5.2 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de una muestra de suelo o de alguno de sus componentes, expresa: el número de moles de iones de carga positivos adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, bajo unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa-solución dada. Un mol de carga positiva equivale a 6.02×10^{23} cargas de cationes adsorbidos (Porta *et al.*, 2003).

1.5.3 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo constituye la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo así como sustancias producidas por los organismos del suelo. La parte más estable de esta materia orgánica se llama humus, que se obtiene de la descomposición de la mayor parte de las sustancias vegetales o animales añadidas al suelo. La fracción orgánica del suelo regula los procesos químicos que allí ocurren, influye sobre las características físicas y es el centro de casi todas las actividades biológicas en el mismo, incluyendo la microflora y la fauna (Bornemisza, 1982).

1.6 Propiedades biológicas del suelo

La presencia de organismos dentro del suelo es una señal de la calidad que posee dicho ecosistema. Muchas veces basta con observar la presencia de organismos vivos para saber cómo se encuentra el suelo y para qué lo podemos usar. Cómo ha sido explotado o sencillamente saber que problemas podríamos enfrentar al establecer un cultivo determinado (Pereira *et al.*, 2011).

La función principal de los organismos vivos en los suelos es precisamente el enriquecimiento del mismo a través de la transformación de la materia orgánica y modificación de algunas propiedades físicas como la porosidad, aireación, drenaje, etc.

1.7 Degradación del suelo

1.7.1 Degradación química

La degradación química fue el proceso de degradación del suelo más extendido en el país en el año 2002, con alrededor de 34.04 millones de hectáreas (17.8% del territorio) de acuerdo con la SEMARNAT en 2003.

Los tipos de degradación química registrados en el estudio fueron la disminución de la fertilidad, polución, salinización/alcalinización y eutrofización. La disminución de la fertilidad del suelo, entendida como el decremento neto de nutrientes y materia orgánica disponibles en el suelo, se debe a un balance negativo entre las entradas de nutrientes y materia orgánica. La disminución de la fertilidad fue el tipo de degradación química más importante en el país, cubriendo el 92.7% de la superficie afectada por degradación química (Oldeman, 1998).

La polución se debe a la concentración y efecto biológico adverso de algunas sustancias que pueden provenir de tiraderos a cielo abierto, derrames, residuos industriales, deposición de compuestos acidificantes y/o metales pesados.

La salinización o alcalinización se presenta principalmente en las regiones áridas, en las cuencas cerradas y en las zonas costeras que tienen suelos naturalmente salinos. La eutrofización es el exceso de nutrientes en el suelo que perjudica el desarrollo de la vegetación y puede deberse a la aplicación excesiva de fertilizantes químicos.

1.7.2 Degradación Física

La degradación física es el proceso menos extendido en el país, ya que afecta a cerca de 6% de la superficie nacional; sin embargo, tiene un alto impacto debido a que es prácticamente irreversible y conlleva a la pérdida de la función productiva de los terrenos (Middleton y Thomas, 1997)

La degradación física del suelo según Middleton y Thomas (1997) se puede presentar en cinco tipos específicos: compactación, encostramiento, anegamiento, disminución de la disponibilidad de agua y pérdida de la función productiva. La compactación se refiere a la destrucción de la estructura del suelo, y frecuentemente se asocia al pisoteo del ganado o al paso habitual de maquinaria pesada.

En el encostramiento, los poros se rellenan con material fino, lo que impide la infiltración del agua de lluvia, con el consecuente incremento del volumen de las escorrentías superficiales y la erosión hídrica.

El anegamiento se debe a la presencia de una lámina superficial de agua sobre el suelo, frecuentemente asociada a la construcción de represas para riego. El caso contrario al anegamiento es la disminución de la disponibilidad de agua, que se origina por su extracción excesiva con fines agrícolas o de suministro a la población, o por la disminución de la cobertura vegetal y de la materia orgánica del suelo. Finalmente, la pérdida de la función productiva implica que los suelos, al ser usados en actividades no biológicas pierden su función productiva.

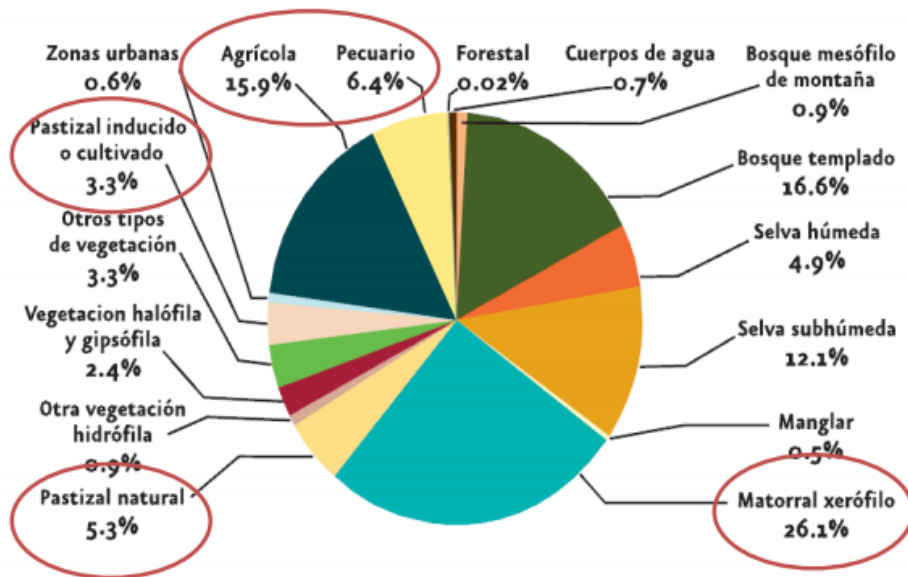
1.8 Contaminación del suelo

La contaminación puede definirse como la concentración de elementos o compuestos químicos a partir de la cual se producen efectos desfavorables, tanto por un efecto desactivador, como por un aumento excesivo de la actividad biológica (López, 2002). El suelo contiene un número elevado de elementos químicos, motivo por el cual es difícil establecer la concentración a partir de la cual un mismo elemento pasa de ser beneficioso a catalogarse como contaminante (Davis, 2005).

El suelo actúa como un sumidero en el que los contaminantes se filtran o se transforman. Es considerado como un depurador natural de residuos, pues que los organismos que lo habitan descomponen, absorben y degradan los contaminantes, es decir, llevan a cabo una depuración biológica (Díaz, 1993). Este proceso se realiza con mayor o menos eficiencia dependiendo de las propiedades del suelo, las características del contaminante y los factores relativos al organismos. Dependiendo del volumen y toxicidad de los contaminantes, puede llegar un momento que por una excesiva acumulación de sustancias tóxicas finalmente se saturan y quede convertido el terreno en una fuente de sustancias químicas (Sánchez y Camazano, 1984). La contaminación es una de los aspectos que más influye en la degradación de los suelos puesto que la capacidad para el desarrollo de sus funciones puede verse afectada negativamente, lo que se traduce en una pérdida de la aptitud para su uso.

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes para la nación, ya que de sus condiciones depende el buen estado de los hábitats naturales, las actividades agrícolas, ganaderas y forestales y hasta urbanas. El deterioro y escasa atención que este recurso presenta en materia de regulaciones de uso, manejo y conservación tiene actualmente importantes implicaciones sociales, económicas y ecológicas adversas, difíciles de cuantificar y valorar cabalmente (Silva y Correa, 2009).

México, en sus 196 millones de hectáreas, cuenta con riquezas naturales extraordinarias que presentan severos daños. Los suelos están degradados en un 64%, principalmente por erosión hídrica y eólica, pero sufren también pérdida de nutrientes, materia orgánica y organismos microscópicos del suelo, así como compactación, acidificación y otros procesos adversos al ser laboreados continuamente (SEMARNAT, 2013).



Figuras 2. Estado actual de uso de suelo en México (SAGARPA, 2013).

Capítulo 2. La agricultura en México

La agricultura se puede definir como la actividad que ejerce el hombre haciendo uso deliberado de la tierra para extraer bienes del suelo gracias al aprovechamiento de la energía solar. Es una actividad estratégica para cualquier sociedad. Destaca el hecho de que las poblaciones han avanzado y han desarrollado conseguido alcanzar en primer lugar una alta eficiencia en la producción de alimentos y fibras (Hernández, 1988).

Se estima que la agricultura surge aproximadamente hace diez mil años. Desde entonces y hasta principios del siglo xx, las repercusiones ambientales de la agricultura al parecer fueron mínimas; sin embargo, a partir de la revolución verde el impacto de la agricultura en el ambiente y en la salud humana se ha recrudecido. Ciertamente, los problemas derivados de las prácticas agrícolas son tan viejos como la agricultura misma, pero la diferencia radica en la magnitud que actualmente alcanzan (Rzedowski, 1978).

El impacto de la revolución verde en la producción mundial de alimentos es innegable. Se entiende por revolución verde a los cambios tecnológicos y al modo de practicar la agricultura como resultado de la transferencia, innovación y difusión de desarrollos agrícolas tecnológicos (Wolf, 1986).

En las últimas cinco décadas, la agricultura mundial se ha orientado hacia el paradigma de la revolución verde, la cual ha implicado un incremento y dependencia de insumos sintéticos, intensificación y búsqueda de una mayor tasa de retorno financiero. Sin embargo, con el afán de elevar productividad y rentabilidad agrícola, se ha contribuido grandemente al deterioro ambiental.

La actividad agrícola y ganadera afecta determinados ecosistemas naturales en mayor o menor grado, siendo algunos de sus defectos negativos los siguientes:

- Disminución de la productividad del suelo: por erosión o compactación, pérdida de materia orgánica, retención hídrica, actividad biológica y salinización.
- Acumulación de contaminantes: sedimentos, fertilizantes, pesticidas, etc.
- Falta de agua: sobreexplotación al no respetar los ciclos naturales que mantienen su disponibilidad.
- Pérdidas de especies polinizadoras y de hábitats salvaje.
- Aparición de resistencia a los pesticidas en las plagas.

2.1 Reducción de la diversidad genética por la uniformidad de cultivos.

La agricultura en México es una actividad que impacta el ambiente, de una manera proporcional a la energía externa que consume el sistema. Los sistemas agrícolas destinados a generar una alta cantidad de recursos económicos, orientados a la exportación con alto uso de energía e insumos es la que más impacto tiene sobre el suelo, el agua, los organismos vivos y la atmósfera. Desde la revolución verde, en los años cincuenta, grandes áreas de México se

destinaron a la producción especializada, la cual se caracterizó por las altas cantidades de insumos externos y alta inversión energética. El uso de paquetes tecnológicos que incluían el uso de semillas mejoradas, fertilizantes y pesticidas efectivamente aumentaron sustancialmente los rendimientos, pero el daño efectuado al ambiente ha sido, en algunos casos irreversible (Pérez y Landeros, 2009).

Las principales consecuencias de la agricultura comercial sobre la base de recursos naturales se pueden apreciar en la salinización, acidificación, erosión, compactación y desertificación del suelo; la erosión genética, disminución de la diversidad y el aumento de los monocultivos; la deforestación y disminución de los bosques; la contaminación y sedimentación de las aguas; el efecto invernadero y la ruptura de la capa de ozono; y los efectos en la salud humana.

Los principales retos que tienen que enfrentar la agricultura mundial, los gobiernos y la sociedad en su conjunto, son los de satisfacer la demanda de alimentos y mantener niveles sustentables de los recursos naturales suelo, agua, vegetación, fauna. Actualmente los plaguicidas en su mayoría organoclorados y órganofosforados, han sido los productos mayormente utilizados para el control de plagas y enfermedades (Altieri, 1998).

2.2 La agricultura intensiva en México

Hasta mediados del siglo pasado, la producción agrícola se practicaba de una forma natural, se utilizaban productos y técnicas que prácticamente no se había modificado en muchos siglos. Con la evolución de la agricultura que tuvo lugar a mediados del siglo XX se pudo incrementar de forma muy significativa la producción de alimentos (Pérez y Landeros, 2009). Una gran innovación fue la aparición de los primeros fertilizantes químicos en los años cuarenta.

Los agricultores fueron testigos de que al aplicarlos en el campo los resultados de producción que se obtenían eran espectaculares, pues que las plantas respondían intensamente al estímulo químico. Si se aplicaban fertilizantes con nitratos, los rendimientos de las explotaciones se veían notablemente incrementados.

La adición sistemática de abonos químicos con el consiguiente aumento de la producción, ha derivado en que hoy en día, para obtener los mismos resultados que las conseguidas décadas atrás sea necesario incrementar la dosis de abono de 20 unidades de fertilizantes a 240 unidades. Con la aplicación de los abonos, no solo aumento la cosecha en los cultivos, las malas hierbas comenzaron a desarrollarse al mismo tiempo y fue entonces cuando se introdujeron los herbicidas en el mercado. Posteriormente comenzaron a fabricarse los diferentes tipos de fitosanitarios necesarios para paliar los ataques de hongos e insectos.

Antiguamente no se contemplaba la existencia de plagas ya que los mismos enemigos naturales de determinados insectos controlaban la población al actuar como sus depredadores. Quedaba establecido de este modo un equilibrio en el microecosistema de la explotación, y por lo tanto los microorganismos que habitaban en el cultivo no influían negativamente en el mismo.

Al pasar de una agricultura extensiva a una intensiva, los enemigos naturales perdieron esa capacidad de control sobre las plagas y fue entonces cuando surgieron las plagas con capacidad de atacar a los cultivos. Gracias a los productos químicos fitosanitarios que se fabricaron, se consiguieron controlar las plagas y enfermedades surgidas. Estos productos que fueron inicialmente muy bien acogidos en un principio por las ventajas que ofrecían a los agricultores frente al control de los agentes patógenos, generaron a su vez notables inconvenientes.

Tabla 1. Efectos negativos de la agricultura intensiva.

Efectos negativos de la agricultura intensiva.
<ul style="list-style-type: none">• Se aniquilaron indistintamente plagas e insectos benéficos• Se crearon resistencia en las plagas a los químicos empleados• Se contaminaron suelos y ríos• Se propició la desaparición de fauna y flora por el uso de herbicidas residuales• Se localizaron niveles de polución química y salinización

2.3 Principales cultivos en México

Los múltiples climas y suelos en México permiten el desarrollo de una gran variedad de cultivos. La importancia de cada uno de ellos va dependiendo de uso que se les da. A continuación se enlistan los cultivos más destacados de acuerdo con SAGARPA (2014).

Fresa. Este fruto, que se utiliza ampliamente en la industria alimenticia, y que tiene algunas propiedades curativas. El mayor productor es el estado de Michoacán.

Tabaco. El segundo mayor cultivo en México, con más de 120 millones de toneladas anuales, casi todas de Nayarit.

Pasto. Es uno de los principales productos agrícolas nacionales, ya que es muy importante para la ganadería extensiva. Las entidades que lo producen más son Oaxaca, Jalisco, Chiapas y Yucatán.

Caña de azúcar. Al ser fuente de etanol, usado en medicina y como combustibles, es el segundo cultivo más valioso para el país. Los ingenios azucareros más importantes se localizan en Veracruz.

Flores y plantas de ornato. Esta categoría incluye diversas plantas y flores; los estados con mayor extensión de cultivos son CDMX, Morelos, Puebla, Querétaro y el Estado de México.

Maíz. Actualmente es la más valiosa para el país. La mayor parte de producción proviene de Jalisco y Sinaloa.

Alfalfa. Este cultivo se utiliza principalmente para alimentar ganado y aves de corral. La mayor producción procede de Chihuahua, Hidalgo y Guanajuato.

Plantas endémicas. Además de ser símbolo de nuestra cultura, tres cultivos originarios de México destacan en el plano económico: flores de noche buena y cempasúchil, sembradas en Morelos y Puebla; el agave de Jalisco y Oaxaca.

Sorgo. Se cultiva en Coahuila, Durango y Tamaulipas es el tercer cultivo más valioso, gracias a sus variados usos: como forraje, repostería, así para producción de almidón, glucosa, alcohol y acetona.

Avena. Se producen principalmente en los estados de Chihuahua, Durango y Estado de México.

2.4 Degradación de suelos por la agricultura

La degradación de los suelos es causada por usos y prácticas de ordenación de la tierra insostenibles y por fenómenos climáticos extremos resultantes de diferentes factores sociales, económicos y gobernanza (FAO, 2015).

La agricultura ha contribuido a la degradación del suelo de diversas maneras. Esto incluye la pérdida de la fertilidad, la salinización, la contaminación por agroquímicos, la erosión debida a la eliminación de la cubierta vegetal por el sobrepastoreo o el movimiento constante del suelo (Mass y García, 1990). Todos estos tipos de degradación causan que la capacidad productiva del suelo disminuya, reduciéndose, por consecuencia, el rendimiento agrícola. Bajo estas condiciones, el productor requiere emplear cada vez más fertilizante para mantener los mismos rendimientos (Pérez y Landeros, 2009).

La degradación del suelo se produce también debido a la compactación por maquinaria agrícola y a la reducción del contenido de materia orgánica, lo cual afecta a la estructura y a la composición del suelo (Mass y García, 1990). El uso de plaguicidas altera indirectamente la estructura del suelo a través de su impacto en la edafofauna (Olguín y Casa, 1987).

Los plaguicidas, herbicidas y funguicidas tienen un efecto directo en la biodiversidad, tanto de vertebrados como de invertebrados. Finalmente todo esto contribuye a incrementar la tasa de erosión del suelo.

En México son graves los problemas de salinización en el noreste del país, de deforestación en el sureste y de erosión acelerada en un 80% del territorio (Pérez y Landeros, 2009). Las altas tasas de erosión en el país se deben al cultivo

intensivo de maíz y a la ganadería extensiva en zonas montañosas (López, 2002). Las adiciones de materia orgánica, de abonos verdes o los sistemas pecuarios con leguminosas han demostrado ser procedimientos eficientes para la conservación del suelo (Mass y García, 1990).

2.5 Plaguicidas

Los plaguicidas son productos químicos utilizados para combatir plagas, enfermedades o malezas que afectan a los cultivos agrícolas y algunos de ellos son empleados en la sanidad pública (Pérez y Landeros, 2009). A pesar de existir varios métodos de control de plagas biológico, autocida y cultural, el control químico es el más extensamente empleado debido a su rapidez de acción; hecho que redundo en un mayor aseguramiento de la producción de alimentos, pero a un alto costo ambiental y de salud pública (White, 1998).

Investigaciones del impacto de los plaguicidas en la vida silvestre señalan que éstos tienen efecto en la reproducción, crecimiento, desarrollo neurológico, comportamiento y en el funcionamiento del sistema endocrino e inmunológico de seres vivos. La exposición a plaguicidas puede ocasionar efectos en la salud humana, tanto crónicos como de intoxicación aguda (White, 1998). Los problemas crónicos incluyen cáncer, interferencia con el desarrollo del feto, disrupción del sistema reproductivo, endocrino, inmunológico y nervioso (efecto neurotóxico).

Actualmente los plaguicidas en su mayoría organoclorados y órganofosforados han sido los productos mayormente utilizados para el control de plagas y enfermedades (Alpuche, 1991). El mal manejo de los plaguicidas ha dado como resultado que diversas plagas se vuelvan resistentes a uno o varios insecticidas y que la población de enemigos naturales se haya reducido de manera drástica. Éste es otro problema grave del mal uso de plaguicidas, particularmente por la aparición de nuevas plagas y plagas resistentes (Pimentel, 1992).

Los plaguicidas y herbicidas afectan adversamente a la fauna edafológica, al ciclo de nutrientes en el suelo, a las poblaciones de insectos benéficos, a los procesos naturales de reproducción y a los problemas relacionados con

bioacumulación en la cadena trófica (Alpuche, 1991). Los plaguicidas pueden acumularse en la cadena trófica y alcanzar hasta el último eslabón de la cadena en concentraciones verdaderamente tóxicas y con manifestaciones patológicas severas en muchos casos.

2.6 Fertilizantes

Se estima que las plantas sólo utilizan del 25 al 85% del nitrógeno aplicado según cultivo, prácticas agrícolas, y condiciones edafológicas específicas. Esto provoca que muchas de las veces la aplicación de fertilizantes sea inadecuada o excesiva, dando como resultado el arrastre de los mismos por el agua o lixiviación (Pacheco, 1997). El uso de fertilizantes con nitrato soluble se traduce directamente en un incremento de nitrato (NO_3^-) en mantos freáticos, lo cual tiene implicaciones negativas en la salud humana y la calidad ambiental (Landeros *et al.*, 2002).

La ingestión de nitratos puede causar metahemoglobinemia o el síndrome de niño azul y se le relaciona también con el desarrollo de cáncer estomacal (Pretty, 1998). Existe una correlación estrecha entre el empleo excesivo de fertilizantes nitrogenados y la concentración de nitratos en el agua por encima de los límites permisibles, de 50 mg/l, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de 22 mg/l para la norma mexicana.

Nitratos y fosfato provenientes de fertilizantes solubles son causa de eutroficación de ríos y lagos, un proceso de enriquecimiento del agua con nutrientes provenientes de fertilizantes minerales u orgánicos, que produce un crecimiento explosivo de algas y una posterior desoxigenación del agua cuando las algas perecen, efecto que provoca que los organismos acuáticos como los peces mueran (Landeros *et al.*, 2002).

2.7 La biodiversidad y la agricultura

La agricultura contribuye a la conservación y al uso sostenible de la biodiversidad pero es también uno de los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad. Los agricultores y productores agrícolas son custodios de la biodiversidad agrícola y poseen el conocimiento necesario para gestionar y preservarla (CDB, 2008).

La biodiversidad es la fuente de las plantas y animales que forman la base de la agricultura y de la inmensa variedad dentro de cada uno de los cultivos y especies de ganado. Otras especies innumerables contribuyen a las funciones ecológicas esenciales sobre las que depende la agricultura, incluyendo los servicios de los suelos y el reciclado del agua (Toledo, 2007).

La biodiversidad agrícola es un término que incluye todos los componentes de la biodiversidad en genética, especies y niveles de ecosistemas que son de importancia para la alimentación y la agricultura y que apoyan los ecosistemas donde se produce la agricultura ecosistemas agrarios (CDB, 2008). Esto incluye las especies de cultivo y de ganado y las variedades y las razas entre ellos, y también incluye los componentes que apoyan la producción agrícola. Componentes a nivel de especies que apoyan los servicios de los ecosistemas incluyendo lombrices y hongos que contribuyen a la disponibilidad y al ciclo de los nutrientes de las plantas a través de la desintegración y descomposición de los materiales orgánicos (Losey y Vaughan, 2006).

Tabla 2. Biodiversidad y biodiversidad agrícola (CDB, 2008).

	Biodiversidad	Biodiversidad agrícola
Ecosistema	Un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales, microorganismos y su medio ambiente no viviente interactuando como una unidad funcional. Diferentes tipos de ecosistemas incluyen bosques, praderas, pantanos, montañas, zonas costeras, lagos y desiertos.	La diversidad de los ecosistemas agrícolas es en parte el resultado de ambas tierras agrícolas como no agrícolas y los usos del agua. Ejemplos de los agroecosistemas incluyen los arrozales, los sistemas de pastoreo, los sistemas de acuicultura, y de los sistemas de cultivo y de los ecosistemas más amplios en el que estos se basan. Los elementos de estos sistemas pueden combinarse para formar sistemas mixtos.
Especie	Una especie es un grupo de organismos morfológicamente similares que pueden entrecruzarse y producir descendencia fértil. Un cierto número de especies existe para las plantas, los animales y los microorganismos.	La diversidad de las plantas y de los animales utilizados en la agricultura se debió a la gestión humana de la biodiversidad para la alimentación, la nutrición y la medicina. Por ejemplo, del ganado domesticado se incluyen ganado bovino, ovino, gallinas y cabras. Ejemplos de especies de cultivo incluyen trigo, plátano, col, la patata dulce, los frutos secos y la tierra.
Genética	La diversidad genética es la variación de los genes de todos los individuos dentro de una especie, que determina el carácter único de cada persona, o de la población, dentro de una especie. La expresión de ADN en los rasgos, como la capacidad de tolerar la sequía o las heladas, facilita la adaptación a las condiciones cambiantes.	La diversidad dentro de las especies es en parte el resultado de la selección por parte de los agricultores en función de ciertos rasgos específicos para satisfacer las condiciones ambientales y de otro tipo. Por ejemplo, muchas variedades de maíz, se han desarrollado sobre la base de características como el sabor, el tamaño, el color y la productividad. Muchos de ellos se mantienen ahora como poblaciones completamente distintas dentro de la agricultura.

El acelerado deterioro de los ambientes naturales lagunas, selvas, bosques, pantanos y otros, a nivel mundial, está provocando una reducción de las poblaciones de fauna y flora (Fischer *et al.*, 2001). En sólo 400 años han desaparecido poco más de 117 especies de mamíferos y otras 510 están amenazadas o en peligro de extinción. Si bien es cierto que de manera natural sucede la extinción de especies y la modificación de ecosistemas naturales, lo alarmante en este sentido son los niveles que se han alcanzado en las últimas cinco décadas (FAO, 2007).

La Food and Agriculture Organization (FAO) estimó para 1980 una tasa de destrucción de las selvas de 114,000 km²/año; para 1990 esta cifra se incrementó a 160, 200,000 km². Es decir, 20 millones de hectáreas de selva desaparecieron al año a nivel mundial.

Las selvas son uno de los ecosistemas terrestres más diversos y complejos, ocupan tan sólo el 10% de la superficie terrestre y alojan entre el 50 y 80% de todas las especies existentes en el mundo. Su deforestación repercute, además, en la recarga de los mantos acuíferos, la pérdida de suelo, el régimen de lluvias y los aportes de CO₂ a la atmósfera (Toledo, 2006).

La flora de México es considerada como una de las más ricas y variadas del mundo, esto se debe a su situación geográfica, su fisiografía y a la diversidad de sus climas (Bezaury, 2002). El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) señala que de las 152 ecoregiones terrestres identificadas en América Latina, 52 se encuentran en México, por lo cual nuestro país contribuye de manera importante a la biodiversidad. De tal modo que en los bosques templados mexicanos crece el mayor número de especies de pino (52) y de encino (138), la mayoría de ellas endémicas. En tanto que los desiertos de México albergan el mayor número de cactáceas del mundo y el 52% de ellas son endémicas.

Capítulo 3. La Biorremediación

En las últimas décadas, la liberación de contaminantes al ambiente, producida principalmente como consecuencia del desarrollo industrial, ha superado los mecanismos naturales de reciclaje y autodepuración de los ecosistemas receptores (Garbisu *et al.*, 2002). Este hecho ha conducido a una evidente acumulación de contaminantes en los distintos ecosistemas hasta niveles preocupantes. Por ello, hoy en día existe la necesidad de indagar en la búsqueda de procesos que aceleren la degradación de los contaminantes presentes en el ambiente. Así, se reducirían de forma progresiva los efectos perniciosos que producen sobre los ecosistemas y la salud humana.

La biotecnología utiliza organismos vivos o partes de organismos para hacer o modificar productos, mejorar plantas o animales o desarrollar microorganismos para usos específicos. La biodegradación ocurre en la naturaleza, y la actuación humana transformo esos procesos naturales en biotecnologías para acelerar la tendencia natural (Alegría, 2013).

La biorremediación, es un proceso que utiliza las habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos, presenta un enorme potencial en la mitigación de la contaminación ambiental (Garbisu *et al.*, 2002). La biorremediación se ha centrado en la explotación de la diversidad genética y versatilidad metabólica que caracteriza a las bacterias para transformar contaminantes en productos inocuos o, en su defecto, menos tóxicos, que pueden entonces integrarse en los ciclos biogeoquímicos naturales. No obstante, existen casos aislados de utilización de otros tipos de organismos como, por ejemplo, los hongos y más recientemente, las plantas llamada fitorremediación (Volke, 2002).

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras según Van Deure *et al.*, (1997), con base en los siguientes principios: estrategia de remediación; lugar en que se realiza el proceso de remediación y tipo de

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

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

Destrucción o modificación de los contaminantes. Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.

Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas volatilización, solubilidad, carga eléctrica.

Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

El lugar de realización del proceso de remediación, de acuerdo con Velasco y Volke (2002) se distinguen dos tipos de tecnología:

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

Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio o fuera de él.

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

Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

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

Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización, quemar, descomponer o fundir los contaminantes en un suelo.

3.1 Tipos de biorremediación

La contaminación de suelos generalmente se ha tratado de solucionar con el uso de procesos físicos y químicos. Sin embargo, la aplicación de muchas de estas tecnologías ha sido limitada, porque son excesivamente caras o solo parcialmente efectiva (Saval, 1998).

El uso de la biorremediación para el tratamiento de sitios contaminados es una tecnología relativamente nueva, aún en desarrollo, y presenta varias ventajas con respecto a los métodos físicos y químicos (Garbisu *et al.*, 2002).

En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos derivados de petróleo o sintéticos (Rodríguez, 2003). Básicamente, los procesos de biorremediación pueden ser de tres tipos:

3.1.1 Degradación enzimática

Este tipo de degradación consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas (Van Deuren *et al.*, 1997). Estas enzimas se obtienen en cantidades industriales por bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas. En estos casos, se aplican grupos de enzimas que hidrolizan (rompen) polímeros complejos para luego terminar de degradarlos con el uso de microorganismos. Por ejemplo las celulosas, proteinasas y amilasas, que degradan celulosa, proteínas y almidón, respectivamente. Además de hidrolizar estos polímeros, existen enzimas capaces de degradar compuestos altamente tóxicos. Estas enzimas son utilizadas en

tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales de muchas industrias.

3.1.2 Remediación microbiana

En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados (Semple *et al.*, 2001).

En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados. La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas (Eweis *et al.*, 1998).

El hombre ha aprendido a aprovechar estos procesos metabólicos de los microorganismos. De esta forma, los microorganismos que pueden degradar compuestos tóxicos para el ambiente y convertirlos en compuestos inocuos o menos tóxicos, se aprovechan en el proceso de biorremediación. De esta forma, reducen la polución de los sistemas acuáticos y terrestres. La gran diversidad de microorganismos existente ofrece muchos recursos para limpiar el medio ambiente y, en la actualidad, esta área está siendo objeto de intensa investigación (Reddy, 1995). Existen, por ejemplo, bacterias y hongos que pueden degradar con relativa facilidad petróleo y sus derivados, benceno, tolueno, acetona, pesticidas, herbicidas, éteres, alcoholes simples, entre otros. Los metales pesados como uranio, cadmio y mercurio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera de aislarlos para que sean eliminados más fácilmente (Alexander, 1999).

3.1.3 Remediación con plantas (Fitorremediación)

La fitorremediación es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados (Nuñez *et al.*, 2004). Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos. La fitorremediación ofrece algunas ventajas y desventajas frente a los otros tipos de biorremediación según Ensley (2000):

Ventajas:

Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas.

Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.

Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

Desventajas:

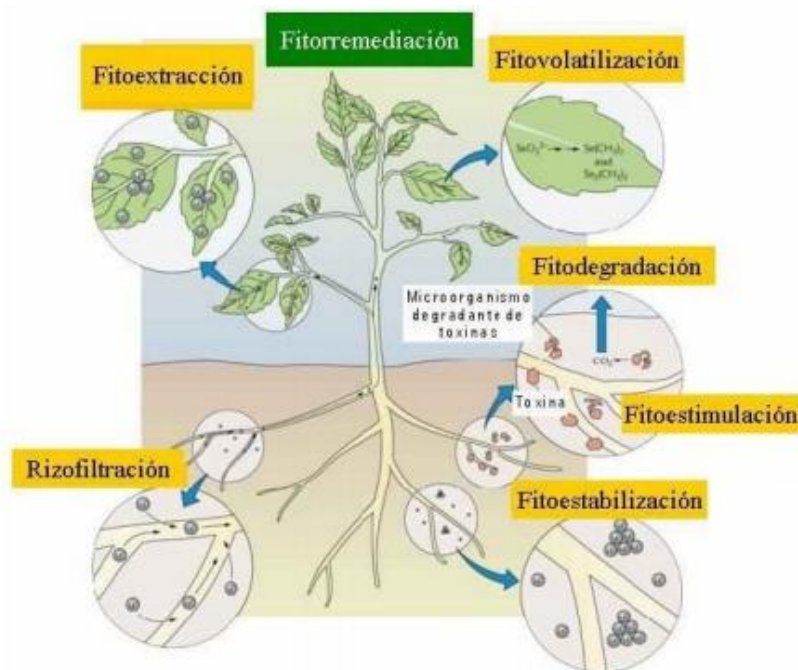
El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.

Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.

La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.

Tabla 3. Tipo de fitorremediación (Reddy y Smith, 1996)

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



Figuras 3. Parte de la planta que actúa en cada tipo de fitorremediación (Reddy y Smith, 1996)

3.2 Técnicas de biorremediación

Las técnicas biológicas utilizadas pueden ser de tipo aerobio (medio oxidante) o anaerobio (medio reductor) y pueden ser aplicadas *in situ* (en el lugar donde se encuentra el suelo contaminado) o *ex situ* (el suelo se traslada a una instalación para su tratamiento) dependiendo del tipo de contaminante (Eweis *et al.*, 1998).

Las técnicas de biorremediación *in situ* se están convirtiendo en las más populares ya que tratan de acelerar los procesos degradadores naturales mediante el suministro de oxígeno y nutrientes a la zona contaminada durante un largo periodo. El problema más complicado suele ser la falta de oxígeno especialmente en las capas más profundas de suelos contaminados por hidrocarburos (EPA, 2001).

La transformación de los contaminantes mediante las diversas técnicas está influenciada por los siguientes factores:

Necesidad de nutrientes: El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los elementos químicos se

encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principales son el fósforo y el nitrógeno. Por lo general suele haber en el suelo una concentración de nutrientes suficiente, sin embargo, si estos no se encontrasen en proporción suficiente se puede adicionar mayor cantidad (Eweis *et al.*, 2001).

pH del suelo: afecta significativamente a la actividad microbiana ya que el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8. Así mismo el pH también afecta a la solubilidad del fósforo y al transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos de azufre.

Temperatura: generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos (entre 15 y 45 °C), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C.

Humedad: los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del plasma bacteriano y sirve como medio de transporte de los compuestos orgánicos y de los nutrientes hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo.

Estructura química del hidrocarburo: la biodegradabilidad de un hidrocarburo depende de su estructura molecular. Los parámetros que más van a afectar son la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica.

Las técnicas de biorremediación más usadas son:

3.2.1 Bioventing o inyección de aire

Es una técnica de biorremediación *in situ* que consiste en la aireación forzada del suelo mediante la inyección a presión de oxígeno. Debido a la aireación del suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por

volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes, y por biodegradación, ya que al incrementar la oxigenación del suelo se va a estimular la actividad bacteriana (Van Deuren *et al.*, 1997).

Factores que se deben de tomar en cuenta:

Se degradarán más fácilmente las moléculas pequeñas hasta 20 °C y de cadena lineal, siendo más difíciles de degradar los compuestos aromáticos. Son favorables los compuestos de alta volatilidad.

Los suelos deben tener bajo contenido en arcillas, ser lo más homogéneos posible y tener un valor de permeabilidad adecuado.

Cuanto menor sea la solubilidad de los contaminantes, menor será la disponibilidad de bacterias.

Los aportes de oxígeno, las fuentes de carbono, los aceptores de electrones y la energía deben de ser suficientes.

Tiempo de actuación corto meses y coste medio-alto.

3.2.2 Atenuación natural

Técnica de biorremediación *in situ* que consiste en la utilización de los procesos físico-químicos de interacción contaminante-suelo y los procesos de biodegradación que tienen lugar de forma natural en el medio. Estos procesos se conocen como procesos de biotransformación natural que van a reducir la concentración de aquellos contaminantes y entre los que se encuentran la dilución, dispersión, volatilización, adsorción, biodegradación y aquellas reacciones químicas que se producen en el suelo y que contribuyen de alguna forma a la disminución de la contaminación (EPA, 1996).

Se aplica en aquellos casos en los que exista contaminación producida por hidrocarburos halogenados o no halogenados. La atenuación natural puede darse en presencia o ausencia de oxígeno condiciones aeróbicas o anaeróbicas. En presencia de oxígeno, los microorganismos convierten los contaminantes en CO₂,

H₂O o minerales. En los casos de escasez de oxígeno, los microorganismos dependen de otros aceptores de electrones como nitrato, sulfato entre otros (Atlas, 1998).

3.2.3 Bioestimulación

Es un sistema de biorremediación *in situ* en la que el agua subterránea es conducida a la superficie por medio de pozos de extracción, se acondiciona en un reactor para posteriormente volverla a inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo y los acuíferos (Cruz y Guzman, 2007). En el reactor se agregan al agua, nutrientes, oxígeno y microorganismo previamente seleccionados y adaptados. Posteriormente, el efluente se retorna al subsuelo por medio de pozos de inyección, aspersores superficiales o galerías de infiltración distribuidos a lo largo del lugar que se quiere reparar (Alexander, 1994).

3.2.4 Biopilas

Se trata de una técnica de biorremediación *ex-situ* que consiste en la reducción de la concentración de contaminantes derivados del petróleo en suelos excavados mediante el uso de la biodegradación (Iturbide, 2010). La técnica consiste en la formación de pilas de material biodegradable de dimensiones variables, formadas por suelo contaminado y materia orgánica (compost), en condiciones favorables para el desarrollo de los procesos de biodegradación de los contaminantes. En el fondo de la pila el sistema cuenta con un aislante que generalmente son geomembranas o canales plásticos para el control de lixiviados (Volke *et al.*, 2005).

Estas pilas de compost pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación (Castillo, 2005). En principio, las biopilas se pueden aplicar a la mayoría de los compuestos orgánicos, siendo más eficaz en los compuestos de carácter más ligero. Entre los factores que influyen en la aplicación de las biopilas destacan:

Los hidrocarburos deben ser no halogenados y deben encontrarse en el suelo en concentraciones menores a 50.000 ppm.

Dada la necesidad de excavación y posterior depósito del suelo contaminado, se requiere una superficie de trabajo relativamente grande cuyas dimensiones dependen del volumen de suelo a tratar.

Necesidad de poblaciones microbianas, condiciones adecuadas de humedad, temperatura de entre 10 y 45 °C, baja proporción de arcillas, pH del adecuado (6 y 8) y baja presencia de metales pesados.

El tiempo de actuación puede ser alto (meses a años) y el coste bajo.

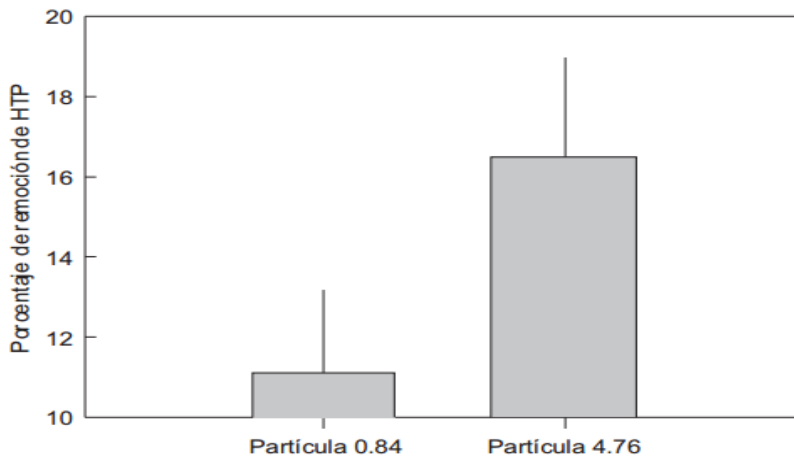
Capítulo 4. Casos de Biorremediación de suelos en México

4.1 Biorremediación de un suelo contaminado por petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partículas. (Ordas *et al.*, 2011)

Se realizaron pruebas de biorremediación a nivel microcosmos a un suelo arcilloso, contaminado con petróleo crudo, del sureste de México con una concentración inicial de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) de 16000 ppm.

Se utilizó como texturizante y enmienda al bagazo de caña. Se utilizó suelo con 2% de bagazo, con un ajuste de nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo) a una relación de 100/10/1. Se empleó un diseño experimental factorial fraccionado en cultivo sólido, los factores fueron a dos niveles, más o menos: bagazo tamaño de partícula de 0,84 mm y 4,76 mm, el contenido de humedad (60% y 90%) y la temperatura de incubación (28 °C y 33 °C).

La máxima remoción de HTP (30%), después de 20 días, se logró con un tamaño de partícula de 4,76 mm, con una humedad de 60% y 28°C. Con esas condiciones se realizó una cinética de remoción de HTP en cultivo sólido durante 20 días, la toma de muestras se realizó cada cinco días, finalmente la máxima remoción de HTP (28%) se obtuvo al día 20. En este estudio se observó que a mayor tamaño de partícula se mejora la remoción de HTP del suelo.



Figuras 4. Resultados obtenidos (Ordas *et al.*, 2011)

4.2 Biorremediación de suelo contaminado con pesticida: caso DDT (Betancur *et al.*, 2013)

En suelo los compuestos bifenilos clorados como el DDT, pueden ser parcialmente biodegradados por un grupo de bacterias aerobias que cometabolizan el contaminante. La biodisponibilidad de los contaminantes puede ser mejorada, tratando los suelos en presencia de agentes movilizadores del contaminante como los surfactantes. En esta revisión se discuten las diferentes estrategias de biorremediación de suelo contaminado con DDT, incluyendo mecanismos y rutas de degradación (Di Toro *et al.*, 2006).

Una consecuencia del prolongado uso de DDT durante muchos años fue la contaminación de los suelos y el ambiente. Los residuos de este compuesto químico aún persisten en el suelo, convirtiéndose en una amenaza a la salud humana y animal (Ganey y Boyd, 2004). Para eliminar éste contaminante y sus productos de degradación del suelo, en el presente trabajo se discutió sobre habilidad degradativa de bacterias, estrategias de adición de nutrientes y surfactante, lo que permite aumentar la biodisponibilidad del contaminante. Estudios han demostrado que la adición de nitrógeno y fósforo al suelo

contaminado con compuestos orgánicos, estimula la biodegradación de estos compuestos e incrementa la abundancia de especies microbianas (Kantachote *et al.*, 2003). La cantidad de nitrógeno y fósforo requerido para la biodegradación, debe reflejar la cantidad que debe ser incorporada en la biomasa que es formada a medida que los microorganismos utilizan la fuente de carbono contaminante para crecimiento.

Es importante considerar en este tipo de estudios, la presencia de metabolitos tóxicos o móviles del DDT presentes en el suelo, posterior a la aplicación. En los últimos diez años se ha aumentado el número de investigaciones realizadas sobre biorremediación de suelos y sedimentos contaminados con DDT, desde la perspectiva de ciencias ambientales, sobre estimulación de microorganismos nativos con cosustratos, sistemas de oxidación, microextracción en fase sólida para aumentar la biodisponibilidad y aplicación de enzimas ligninolíticas de hongos (Bento *et al.*, 2005). Las perspectivas futuras sobre estudios de degradación de DDT, deben enfocarse en mineralización de este contaminante, lo cual es importante en biorremediación ya que indica que el proceso de degradación del contaminado, ha producido un compuesto no tóxico (CO₂), y ha sido completa. Debe realizarse entonces más investigación *in situ* y *ex situ* para promover la biorremediación como una opción viable de tratamiento (Betancur *et al.*, 2013).

4.3 El composteo: una alternativa biotecnológica para la biorremediación de suelos en México (Velasco y Volke, 2003).

El composteo es un proceso biológico mediante el cual es posible convertir residuos orgánicos en materia orgánica estable (composta madura), gracias a la acción de diversos microorganismos (Saval, 1998). Las aplicaciones más comunes del composteo incluyen el tratamiento de residuos agrícolas, de desechos de jardinería y cocina, de residuos sólidos municipales y de lodos. Sin embargo, desde hace unos cinco años, investigaciones en laboratorio, piloto y a

gran escala, han demostrado que el proceso de composteo así como el uso de composta madura, es una solución de bajo costo y tecnológicamente efectiva para remediar suelos contaminados por residuos orgánicos peligrosos como los HTP, solventes, explosivos, pesticidas e HAP (Semple *et al.*, 2001).

Los principios básicos del composteo de residuos peligrosos o contaminantes orgánicos son los mismos que para el composteo de desechos no peligrosos. En ambos casos, es necesario optimizar cinco parámetros: la aireación, la temperatura, el contenido de humedad, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el pH (Eweis *et al.*, 1998). Debido a que los contaminantes orgánicos comúnmente no se encuentran en concentraciones suficientes para soportar un proceso de composteo, el material contaminado debe mezclarse con sustancias orgánicas sólidas biodegradables como aserrín, paja, bagazo, estiércol, composta madura y desechos agrícolas. Estos materiales son conocidos como agentes de volumen y se utilizan en el proceso de composteo con tres finalidades básicas según Semple *et al.*, (2001):

1. asegurar la generación del calor necesario para el proceso
2. mejorar el balance y disponibilidad de nutrientes (C/N) para la actividad microbiana
3. aumentar la porosidad de la composta y con esto la aireación y capacidad de retención de agua.

Las estrategias de biorremediación por composteo se basan en la adición y mezclado de los componentes primarios de una composta (agentes de volumen) con el suelo contaminado, de manera que conforme la composta madura, los contaminantes son degradados por la microflora activa dentro de la mezcla. Los sistemas de composteo incluyen fosas en el suelo, reactores cerrados (tambores rotatorios, tanques circulares), recipientes abiertos, silos, biopilas alargadas y biopilas estáticas (Semple *et al.*, 2001).

4.3.1 Sistema de composteo

En la práctica, y en general, una de las tecnologías de composteo más utilizada para el tratamiento de extensas áreas de suelos contaminados, principalmente por HTP, se lleva a cabo en condiciones aerobias y se conoce como biopilas, bioceldas o pilas de composteo (Iturbe-Argüelles *et al.*, 2002). Las biopilas son un composteo en el cual se forman pilas con el suelo contaminado y agentes de volumen. El sistema, que puede ser abierto o cerrado, se adiciona con nutrientes y agua y se coloca en áreas de tratamiento, que incluyen sistemas para colectar lixiviados y alguna forma de aireación (Eweis *et al.*, 1998).

La elección del tipo de sistema de biopilas depende, principalmente, de las condiciones climáticas y de la estructura de los compuestos orgánicos volátiles presentes en el suelo contaminado. Generalmente las biopilas se diseñan como sistemas cerrados, lo que permite mantener la temperatura y evitar la saturación de agua debido a lluvias, además de disminuir la evaporación de agua y de compuestos orgánicos volátiles (Eweis *et al.*, 1998). Dos de los sistemas de biopilas más empleados son las biopilas alargadas y las biopilas estáticas. La diferencia entre ambas tecnologías radica en el método de aireación que se emplea para proveer de oxígeno al proceso de composteo.

4.3.2 Biopilas alargadas

El sistema de biopilas alargadas es el proceso de composteo más económico y sencillo. En éste, el material a compostear se apila sobre una plataforma en montones alargados. En este tipo de biopila, la aireación se realiza mediante el mezclado manual o mecánico de la composta, proceso que a su vez permite homogeneizar la temperatura. El mezclado de la composta proporciona una mayor distribución y facilita la biodegradación de los contaminantes, ya que facilita la homogeneización de los nutrientes, agua, aire, contaminantes y microorganismos. La frecuencia del mezclado de la pila depende de la actividad microbiana, que generalmente puede determinarse por el perfil de la temperatura en la composta, que puede realizarse una vez al día o bien una vez al mes (Sellers *et al.*, 1993)

4.3.3 Biopilas estáticas

A diferencia del caso anterior, las biopilas estáticas no necesitan mezclarse mecánicamente, ya que la aireación y homogeneización del calor en la composta se lleva a cabo por medio de un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire, mediante tubos colocados en la base alineados paralelamente a lo largo de la pila (Velasco y Volke, 2003). En las biopilas estáticas, normalmente se emplea un sistema de extracción de aire, lo que permite la captura de los vapores de cierta fracción de compuestos orgánicos volátiles que llegan a ser removidos del suelo contaminado durante el proceso de aireación. Estos vapores son enviados a un sistema de biofiltración u oxidación catalítica para su tratamiento (Eweis *et al.*, 1998).

El uso de un sistema de inyección o extracción de aire en este tipo de biopila, permite el control manual o automático de la velocidad del flujo de aire que provee de oxígeno al proceso de composteo, permitiendo así establecer una relación entre el flujo de aire y la actividad microbiana a través del tiempo (Velasco y Volke, 2003).

4.4 Potencial de la Biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano (Adams *et al.*, 1999).

La misma industria petrolera ha empezado investigaciones en esta área en los últimos años. Petróleos Mexicanos (PEMEX), con ayuda del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), ha empezado a buscar medidas efectivas en términos de costo-beneficio para recuperar algunos de los sitios contaminados más problemáticos en el sureste mexicano, especialmente en los estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche. La biorremediación es una de las tecnologías que se están investigando y está resultando una de las más prometedoras y menos costosas. Debido a los datos obtenidos en una evaluación reciente realizada por PEMEX y el IMP en Tabasco occidental (Ledesma *et al.*, 1994), actualmente se considera a la biorremediación como uno de los medios más apropiados para la restauración de muchos sitios contaminados.

4.4.1 Potencial de la Biorremediación

La biorremediación es un método especialmente atractivo de restauración por varias razones:

- 1) Porque usualmente es mucho menos costosa que las tecnologías alternativas
- 2) Porque es natural y normalmente no requiere el uso de agentes químicos como solventes o detergentes
- 3) Porque transforma los contaminantes a productos no peligrosos, o los destruye completamente, en lugar de simplemente transferirlos a una fase diferente o a otra localidad tal como se hace con volatilización y rellenos industriales.

Esta tecnología también tiene un gran potencial para restauración en el trópico mexicano, debido a su aspecto biológico, que se favorece fuertemente en condiciones calurosas y húmedas (Brock *et al.*, 1994).

Actualmente, existen varios indicadores de que la biorremediación será una tecnología de restauración importante para la región:

Estudios preliminares de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) indican que la biodegradación pasiva es probablemente responsable de la destoxificación de los desechos del petróleo en varias localidades en el estado de Tabasco (Ferrer, 1997).

Áreas de producción similares en Tamaulipas (cerca de Tampico) demuestran destoxificación de desechos aceitosos, con incorporación del aceite en el humus del suelo y el inicio de revegetación dentro de un período de dos años, todo lo anterior debido a los procesos pasivos (Torres *et al.*, 1993).

Estudios preliminares de laboratorio en desechos similares de áreas de producción petrolera en Argentina, mostraron que se pueden reducir concentraciones de hidrocarburos hasta en 75 % en 20 días, y se puede reducir la toxicidad aguda hasta cinco veces (Adams y Marczewski, 1993).

4.5 Caracterización de suelos contaminados con HAPs en el valle de Metztitlán, Hgo., y aplicación de un proceso de biorremediación con membranas limitantes de oxígeno (Vázquez *et al.*, 2013).

En el estado de Hidalgo, la zona del Valle de Metztitlán presenta la mayor concentración de estos HAPs. Éstos son aquellos compuestos que están formados por dos o más anillos aromáticos unidos, su grado de toxicidad depende del estado físico en el que se encuentren ya sea en estado gaseoso o partículas sólidas. Esto es motivo de preocupación para diversos grupos ambientalistas y para la secretaría de salubridad del estado (Ahumada, 2009). El sector más afectado es de los agricultores, vendedores, consumidores, pobladores y las grandes hectáreas de tierra cultivable. De acuerdo a estudios previos, se ha demostrado que los suelos de la zona están contaminados por estos compuestos tóxicos que superan los límites máximos permisibles de acuerdo con la norma: NOM-138-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003).

En este trabajo se propone aplicar un proceso de biorremediación en condiciones anaerobias utilizando membranas limitantes de oxígeno (MLO) (Poggi *et al.*, 2007). Esta técnica ha demostrado ser útil en estas condiciones. Esta tecnología puede utilizar dos estrategias distintas: la bioestimulación, basada en la actividad de las poblaciones microbianas autóctonas, y el bioaumentación, basado en la inoculación de cepas o consorcio microbiano de laboratorio.

La biorremediación aerobia se considera más eficaz en cuanto a tiempo que la biorremediación anaerobia. La diferencia entre estas dos técnicas ésta en que la anaerobia degrada compuestos pesados que en la aerobia es a veces muy poco probables poder eliminar (Vázquez *et al.*, 2013)

La importancia de una membrana limitante es que se puede aplicar directamente al suelo en una biorremediación *in-situ*. La presencia de la membrana limitante de oxígeno es que permite que los microorganismos anaerobios degraden al contaminante, con lo que se desarrollan colonias anaerobias de microorganismos con afinidad al hidrocarburo (Vázquez *et al.*, 2013). Esta investigación se realizó

porque en la zona del valle de Metztitlán se han encontrado tóxicos como metales pesados presentes en el agua e hidrocarburos en suelos.

4.6 Proceso de Biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos (Ferrera *et al.*, 2006).

La contaminación del suelo y agua ha venido en aumento como resultado de la explotación, refinación, distribución y almacenamiento de petróleo crudo y sus derivados. Hasta el año 2004, el volumen de derrames accidentales de petróleo y sus derivados fue calculado en 1.5 millones de toneladas por año, afectando suelo, agua y atmósfera (SEMARNAT, 2004).

Como alternativa de limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo se ha acudido a la utilización de elementos biológicos que contribuyen a la oxidación, degradación, transformación y completa mineralización de estos contaminantes. Los métodos de tratamiento biológico dependen de la capacidad de los organismos para degradar los contaminantes orgánicos a productos inocuos como dióxido de carbono, agua y biomasa (Ferrera *et al.*, 2006). Para asegurar el éxito en el uso de la biorremediación de suelos se debe poner especial atención a las limitantes que pueden dificultar su aplicabilidad como lo es la disponibilidad de nutrientes, contenido de arcilla, oxigenación, así como la disponibilidad del contaminante para los organismos.

Uno de los grandes problemas que enfrentan las actividades de Petróleos Mexicanos (PEMEX) es la generación de residuos peligrosos, los cuales representan el 22% de las emisiones y descargas totales de esta industria. De este porcentaje, el 86% se compone de tres tipos de residuos; 72% corresponde a lodos y recortes de perforación (residuos de perforación), 8% a lodos aceitosos provenientes de refinerías y 6% a aceites gastados de refinerías y complejos petroquímicos (PEMEX, 2000).

El uso de procesos biológicos ha sido propuesto para la destoxificación de residuos y remediación de sitios afectados debido a que han demostrado ser más

prácticos y económicamente factibles para el manejo y tratamiento de diferentes tipos de residuos de las actividades de exploración y producción de petróleo (Perenteau y Lyon, 2004). Los métodos de tratamiento biológico dependen de la capacidad de los microorganismos para degradar residuos aceitosos a productos inocuos (dióxido de carbono, agua y biomasa) a través de reacciones bioquímicas. Sin embargo, existen algunas limitantes que dificultan su aplicabilidad como son la disponibilidad de nutrientes, el alto contenido de arcillas, aireación y la disponibilidad del contaminante, sin mencionar la edad de la contaminación (Ferrera *et al.*, 2006).

Como resultado Ferrera *et al.* (2006) concluye que durante la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, los microorganismos asociados a la rizósfera y aquéllos denominados como simbióticos obligados, representan una alternativa biológica para incrementar el potencial de remediación de los compuestos contaminantes. El aislamiento y selección, y posterior inoculación de los ecotipos microbianos mejor adaptados (bioaumentación) a contaminantes orgánicos es una excelente alternativa con bajo costo y nulos efectos ambientales. El entendimiento de la aplicación de fuentes inorgánicas u orgánicas de nutrimentos en la fitorremediación (bioestimulación), requiere de mayor estudio para poder crear protocolos de manejo que sean compatibles con aquellos protocolos de inoculación en plantas, con la finalidad de incrementar la eficiencia de la degradación de hidrocarburos del petróleo en el suelo.

4.7 Efecto de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación y fitorremediación de suelos con petróleos crudo nuevo e interperizado (Maldonado *et al.*, 2010).

Las actividades de perforación, extracción, conducción y transformación del petróleo en zonas petroleras, han originado la contaminación del suelo y el agua ocasionada por derrames, fugas, filtraciones, lodos y recortes de perforación desde hace más de 40 años (Trujillo *et al.*, 1995).

Las tecnologías de remediación más utilizadas son el lavado de suelos, la oxidación química, la separación física y los métodos biológicos como el composteo y la biolabranza. La mayor parte de los tratamientos de remediación se realizan *in situ* y en menor medida *ex situ* (Volke y Velasco, 2002).

Las tecnologías de biorremediación ofrecen la ventaja de usar procesos naturales que se basan en la capacidad de los microorganismos para la biodegradación del petróleo mediante procesos metabólicos o cometabólicos. Estos procesos pueden transformar los compuestos tóxicos en productos secundarios de menor toxicidad, o incluso promueven la mineralización completa de los hidrocarburos totales del petróleo a dióxido de carbono y agua (Maier *et al.*, 2000).

La fitorremediación se sustenta en el uso de plantas superiores y de microorganismos que viven en la zona radical de las plantas, lugar donde se desarrolla una actividad microbiológica intensa entre la microflora de la rizosfera y las plantas verdes. Se asocia con enmiendas y prácticas agronómicas del suelo para eliminar, contener o disminuir la toxicidad de los contaminantes ambientales.

La aplicación de la biorremediación y fitorremediación está limitada entre otros factores por las características físicas y químicas del suelo, la toxicidad ocasionada por la concentración y grado de intemperismo del petróleo. Otros factores son la disponibilidad de nutrimentos, la presencia y permanencia en el tiempo de poblaciones de microorganismos degradantes de hidrocarburos (Hutchinson *et al.*, 2001).

Las dos principales estrategias biológicas que se utilizan para aumentar la eficacia microbiológica de la biorremediación en experimentos de campo son la bioestimulación y la bioaumentación. La primera se sustenta en la estimulación de la población autóctona, por lo común con la adición de nutrientes limitantes (nitrógeno y fósforo), esta práctica se ha aplicado con éxito en derrames de petróleo en ambiente marino y en suelos contaminados con hidrocarburos policíclicos aromático (Riser, 1998). La bioestimulación se basa en la adición controlada de microorganismos específicos al ambiente, los microorganismos introducidos aumentan pero no substituyen a las poblaciones residentes. En algunos casos se lleva a cabo la combinación de la bioaumentación y la bioestimulación en suelos contaminados con petróleo (Bennett *et al.*, 2001).

La presencia de la planta en suelo con petróleo promovió la degradación de los HTP en el suelo. Resultados de Anderson *et al.* (1993), demostraron que las plantas de trigo, caña de azúcar, trébol, arroz, maíz, chícharo, pastos, algodón, tabaco, lino y soya pueden ser utilizados en la fitorremediación de suelos contaminados por compuestos orgánicos como el petróleo y sus derivados. La mayor degradación de los HTP por efecto de la bioaumentación (inóculo microbiano) puede estar relacionado con las poblaciones grandes de bacterias y hongos.

El efecto positivo de la bioestimulación en la biodegradación del petróleo es atribuible a la presencia de N y P soluble, identificaron que la incorporación en el suelo de macronutrientes limitativos en forma soluble incrementó la velocidad de crecimiento de las poblaciones microbianas y la biodegradación del petróleo crudo en el suelo.

La mayor biodegradación de los HTP por la presencia del pasto egipcio y del consorcio microbiano se relaciona con el potencial que tienen los pastos en la degradación del petróleo en suelos contaminados debido al incremento de la actividad microbiana en la rizosfera de las plantas (Siciliano *et al.*, 2003).

En la relación petróleo-consorcio se observó que la inoculación del consorcio microbiano bacterias-hongos en el suelo contaminado favoreció la biodegradación del petróleo en comparación con el suelo sin inoculación microbiana.

Los resultados de la combinación planta-consorcio muestran que la bioaumentación favoreció la biodegradación del petróleo, tanto en suelo rizosférico (con pasto egipcio o el guaje) como en suelo no rizosférico (sin planta), comparado con la biodegradación en suelo rizosférico y no rizosférico sin inoculación del consorcio microbiano. Según Anderson *et al.*, (1993) se ha encontrado que el efecto general de la interacción planta-microorganismos causa incremento en la biomasa microbiana en la rizosfera, este efecto positivo puede estar relacionado con el aumento de la tasa metabólica de la degradación.

En las interacciones petróleo-plantafertilización y petróleo-consorcio-fertilización los resultados obtenidos de Maldonado *et al.*, (2010) indican efectos positivos en la aplicación y asociación de estos factores y sus niveles, que en forma conjunta promovieron la degradación del petróleo.

Los resultados obtenidos en la interacción planta-consorcio-fertilización y petróleo-planta-consorcio-fertilizante permiten inferir que en suelo con 50 000 mg kg⁻¹ HTP, la aplicación conjunta del consorcio microbiano y la fertilización estimularon la degradación del petróleo. La fitorremediación con pasto egipcio o la planta de la leguminosa guaje, con inóculo y con fertilización originó hasta 81% de la disipación del petróleo, 9% mayor respecto al pasto egipcio; en cambio la biorremediación sólo promovió el 23% de la disipación del petróleo.

La fitorremediación en el sistema rizosférico del pasto egipcio o con la leguminosa guaje, la inoculación del consorcio de bacterias-hongos y la fertilización inorgánica tuvieron sinergia positiva y significativa que promovió mayor biodegradación del petróleo. Asimismo hubo respuesta positiva en los tamaños de las poblaciones de bacterias y hongos en suelo contaminado, con diferentes concentraciones de petróleo crudo nuevo e intemperizado, respecto al sistema de biorremediación en suelo sin planta, sin inóculo y sin fertilización. La bioaumentación mediante el

inóculo del consorcio de bacterias-hongos y la bioestimulación con fertilizantes nitrogenados y fosfatados, incrementaron la biodegradación del petróleo en la fitorremediación y biorremediación en suelo contaminado con 50 000 y 78 000 mg kg⁻¹ HTP de petróleo crudo nuevo y en 79 457 mg kg⁻¹ HTP de petróleo crudo intemperizado.

4.8 Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes (Martinez *et al.*, 2011).

En la presente investigación se evaluó el proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo empleando lodos residuales (biosólidos), provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas de la localidad, como fuente alterna de macro y micronutrientes. La contaminación del suelo fue resultado de derrames accidentales de diesel, aceite y grasas en la unidad minera San Antonio perteneciente al grupo Goldcorp México, ubicada en el municipio de San Dimas, en Tayoltita, Durango. Se realizaron experimentos a escala laboratorio y piloto, ajustados a capacidad de campo y a una relación carbono-nitrógeno (C:N) 10:1, en los cuales se evaluaron el efecto de la adición de nutrientes, la densidad del material a remediar y la influencia del tamaño de la partícula en el proceso de degradación. De los resultados obtenidos Martinez *et al.*, (2011) concluyeron que se demostró que los lodos residuales propiciaron la estimulación de los microorganismos nativos del suelo y estos últimos a su vez fueron los responsables de degradar los hidrocarburos. Los hidrocarburos fueron empleados como fuente de carbono y de donador de electrones, acoplado la reacción de óxido-reducción con el oxígeno que fungió como aceptor de electrones. El suelo sometido a remediación aeróbica alcanzó el límite máximo permisible (LMP) establecido en la normatividad mexicana vigente (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003).

4.9 Aislamiento, identificación y evaluación de un cultivo mixto de microorganismos con capacidad de degradar DDT (Carrillo et al., 2004)

Se aisló un cultivo mixto de bacterias con capacidad para degradar DDT a partir de una mezcla de muestras de agua, suelo y sedimento contaminados de la región del Valle del Yaqui en Sonora, México. El cultivo fue propagado en forma intermitente, en un medio de sales minerales con 133 ppm de DDT comercial centrifugado e incubado a 28 °C y 150 rpm. El crecimiento fue evaluado midiendo el incremento de proteína por el método de Lowry correlacionado con el aumento en peso seco de biomasa. El cultivo tuvo una velocidad específica de crecimiento de 0.072/h y un tiempo de generación de 9.62 h. El DDT residual se determinó por cromatografía de gases. El crecimiento fue sustentado por el DDT disponible como única fuente de carbono y fue completamente asimilado en las primeras 40 h. Los metabolitos DDD y DDE presentes en el DDT comercial fueron completamente degradados sin observarse elevación de su concentración durante el cultivo. La identificación de microorganismos sugirió un cultivo conformado principalmente por bacilos Gram negativos pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Neisseria*, *Moraxella* y *Acinetobacter*.

Aun cuando el DDT es difícil de degradar, la exposición prolongada de microorganismos a éste provoca que se genere una presión selectiva que permite la selección de organismos degradadores, o bien el tiempo en que los microorganismos presentes en el hábitat muestreado estuvieron expuestos posiblemente les permitió evolucionar hacia el desarrollo de enzimas en su metabolismo capaces de actuar sobre él (Carrillo et al., 2004). Algunas de las cepas que se lograron aislar e identificar ya han sido reportadas como degradadoras de plaguicidas (Shimazu et al., 2001).

Capítulo 5. Agricultura sustentable en México

La agricultura sostenible tiene como objetivo permitir el uso de la naturaleza de los bienes y servicios que producen al mismo tiempo en un buen rendimiento económico, ambiental y social y preservación de los recursos para los próximos años y las generaciones futuras (FAO, 2010).

La fuerte presión ejercida por la creciente población humana sobre los recursos naturales en los últimos 200 años, está provocando la desertificación de millones de hectáreas en el mundo, lo que se manifiesta principalmente por la erosión del suelo (Gomez *et al.*, 2003). Para hacer frente a este deterioro, la mejor alternativa es utilizar tales recursos bajo el enfoque del desarrollo sustentable, el cual, además de la satisfacción de las necesidades humanas, implica la sustentabilidad ambiental; para lograr esta última, son básicas las estrategias y medidas de conservación de suelos. Sin embargo, en el caso de México existen serios problemas para aplicar estas técnicas y enfoques, porque además de la susceptibilidad ambiental al deterioro, hay severas limitantes sociales, económicas y políticas para eliminar las causas socioeconómicas de la desertificación, entre ellas eliminar la pobreza, impulsar el desarrollo del sector rural y fortalecer una ética de la tierra. Hay varias formas en que las prácticas agrícolas sostenibles mantienen la biodiversidad y por lo tanto ayuda a sostener los servicios de los ecosistemas, incluyendo el mantenimiento de la calidad del agua, la infiltración de agua, la retención de la humedad del suelo, la reducción de la escorrentía, la fijación de carbono, y el refugio para las especies, especialmente durante las sequías (CIP-UPWARD, 2003).

El punto de partida para el desarrollo sustentable es la productividad de la naturaleza, con sus limitados recursos y capacidad para absorber los impactos negativos. Para que una tierra sea productiva, se requiere, entre otros aspectos, de dos recursos básicos: agua y suelo, los cuales constituyen la interfase entre la litosfera y la atmósfera en la cual se desarrolla la vida sobre el planeta; ambos son básicos para la vegetación, la que a su vez sustenta a las demás formas de vida.

Para enfatizar sobre la importancia del suelo y de su conservación productiva, cabe mencionar que sus funciones principales son (Blum, 1995):

- Producción agrícola y forestal.
- Reserva genética, componente básico para la estabilidad de los ecosistemas.
- Filtración, amortiguación y transformación de diversas sustancias, lo que confiere al suelo un papel primordial en la lucha contra la contaminación ambiental.

5.1 Desarrollo de la agricultura orgánica en México

La agricultura orgánica, que se caracteriza por excluir el uso de productos de síntesis química (fertilizantes y plaguicidas en general), organismos modificados genéticamente, aguas negras y radiaciones en los alimentos, es una de las pocas alternativas productivas que se están vislumbrando en el campo mexicano.

A nivel mundial, México ocupa el 18º lugar por superficie orgánica y el primero en la producción de café orgánico. Al interior del país, este sector es el subsector agrícola más dinámico, pues ha aumentado su superficie de 23,000 ha en 1996 a 103,000 ha en el 2000, estimándose que alcanzó las 216 mil hectáreas para el año 2002. Los pequeños productores conforman el 98% del total de productores orgánicos, cultivan el 84% de la superficie y generan el 69% de las divisas orgánicas del país (Gómez *et al.*, 2003).

En el año 2000, en México existían 262 zonas de producción orgánica, ubicadas en 28 estados de la República, entre los cuales destacan los de Chiapas, Oaxaca, Michoacán, Chihuahua y Guerrero, que concentran el 82.8% de la superficie orgánica total. Los estados de Chiapas y Oaxaca cubren el 70% del total (Gómez y Gómez, 2003).

La agricultura orgánica ha llamado la atención no sólo de los pequeños productores, sino también de productores medianos y grandes, quienes también buscan opciones que les permitan obtener mejores ingresos. En el año 2000, los productores orgánicos estaban principalmente representados por los pequeños

productores (98% del total) de tipo campesino e indígenas, organizados (con promedio de 2 ha por productor), quienes cultivaban 84% de la superficie (Gómez y Gómez, 2003).

Una de las ventajas agronómicas en el contexto de la Agricultura Orgánica de mayor importancia es la posibilidad cierta de elevar el potencial productivo de los suelos, generando condiciones para una mayor actividad biológica, mejorando su estructura y perfil químico, además de contribuir a la disminución que conlleva a su erosión (Gómez y Gómez, 2004). Además, existe un enriquecimiento genético donde interactúan distintas especies animales y vegetales, lo que logra un equilibrio ecológico que permite disminuir el ataque de plagas y enfermedades. Por otra parte, los productos agrícolas presentan mejor post cosecha y algunos estudios demuestran que tienen mejor calidad nutricional.

En general la Agricultura Orgánica favorece el desarrollo de los agroecosistemas, lo cual implica una serie de ventajas medioambientales, tales como, el aumento de la biodiversidad que le da estabilidad al sistema, el equilibrio de los distintos elementos que los componen, el uso eficiente de los recursos, la mantención de la fauna y flora, el estímulo al reciclaje, la protección de las aguas subterráneas, dentro de los más importantes (García *et al.*, 2010). Finalmente, cabe mencionar que la Agricultura Orgánica también puede aportar al fortalecimiento de la cultura del mundo rural, ya que recupera el conocimiento ancestral, rescata y genera identidad a los habitantes del mundo rural, mejora la autoestima y estimula el ingenio. También significa un mejoramiento de la belleza escénica (Gómez *et al.*, 2010).

Conclusión

Desde que el hombre descubrió la agricultura se ha sostenido de ella para su alimentación, con el paso del tiempo y el crecimiento rápido de la población se ha visto obligado a descubrir nuevas técnicas para cultivar, de tal manera que se obtenga el resultado deseado en menos tiempo.

La agricultura ha tenido un impacto decisivo en el desarrollo de la sociedad, pero también en el deterioro de la salud humana, de la vida silvestre y del ambiente. Desde la revolución verde, las técnicas que solían utilizar en la agricultura se vinieron abajo debido a que descubrieron fertilizantes sintéticos que al aplicarlo daban como resultado mayor rendimiento de los que se obtenían anteriormente.

Unos de los impulsos más fuertes para utilizar los fertilizantes sintéticos fue el crecimiento demográfico. Por esa razón se debía obtener mayor rendimiento en menor tiempo. Desde entonces los grandes agricultores les interesaba más obtener mayor producción, sin darse cuenta que deterioraban el único y más importante recurso que tenía para producir, el suelo. Y fue apenas en el siglo pasado se los investigadores empezaron a buscar técnicas para revertir o mitigar el impacto de la agricultura en el ambiente, ya que se requieren estrategias integrales o enfoques agroecológicos que permitan desarrollar una agricultura más amigable ambientalmente hablando.

En general, la contaminación de suelos por productos, compuestos o desechos orgánicos de la agricultura o industria petrolera pueden ser tratados y recuperados ecológicamente con la biorremediación, basada en la estimulación de los microorganismos para adecuación de los factores abióticos.

Gracias al avance de la tecnología dentro de ella la biotecnología, hoy en día se puede revertir el daño que el hombre ocasiona en su entorno en especial en los suelos, y una de la técnica más estudiada en la biorremediación del suelo, la razón es que contribuye con los aspectos más importantes que son: de bajo costo, es ambientalmente amigable y puede ser en muy corto tiempo de lo que normalmente se requiere cuando el suelo se restaura de forma natural.

Tanto los tratamientos *ex situ* como *in situ* son una buena alternativa para conseguir degradar el contaminante, siendo los tratamiento *ex situ* los que mejores resultados presentan, ya que las variables pueden ser mejor controladas, es un tratamiento costoso a causa del transporte del terreno contaminado a la zona de tratamiento. El tratamiento *in situ* es el más recomendado para suelos permeables cuando la contaminación afecta a los horizontes subsuperficiales.

En cualquier tratamiento de biorremediación la velocidad de descomposición por los organismos va a depender de su concentración, de determinadas características del suelo, disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura y de la estabilidad del contaminante. Para definir el tratamiento más apropiado es necesario un estudio previo de las características edáficas del suelo y el nivel de contaminación que presenta, con el fin recuperar sus características biológicas y morfológicas.

Aunque por otro lado, existe otra técnica de prevención del daño en los suelos que es la agricultura orgánica que se basa en un sistema de producción de alimentos de forma sustentable con el medio ambiente, respetando su equilibrio ecológico, biodiversidad y ciclos naturales. El producto que se obtiene mediante este sistema es un alimento sano y natural que no contiene contaminantes. Esto es muy importante para la salud y bienestar de las personas.

Por esa sencilla razón puede considerarse un método para evitar la degradación de suelos, ya que este tipo de agricultura forma agroecosistemas complejos capaz de controlar por si misma plagas y enfermedades, de esa forma se evitaría la utilización de productos químicos para combatirlos.

Durante el desarrollo del tema se pudo apreciar que el suelo agrícola Mexicano está muy abandonado desde este punto de vista, son muy escasos los estudios que se hacen ante este problema.

Glosario

Agricultura orgánica: es un sistema de producción que mediante el manejo racional de los recursos naturales, sin la utilización de productos de síntesis química, brinde alimentos sanos y abundantes, mantenga o incremente la fertilidad del suelo y la diversidad biológica.

Autocida: es el empleo de insectos estériles para combatir a su propia especie, aprovechando las cópulas de las moscas del Mediterráneo para evitar la reproducción de las poblaciones de moscas silvestres en el campo, logrando el control y erradicación de la plaga.

Biodegradación: es la disolución química de los materiales por bacterias u otros medios biológicos.

Biopilas: constituyen una tecnología de biorremediación ex situ en la cual el suelo contaminado con hidrocarburos es extraído y dispuesto en un área de tratamiento o piscina previamente excavada para su descontaminación con microorganismos.

Biorremdiación: Se define como biorremediación a cualquier proceso que utilice microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar a un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural.

Compuestos inorgánicos: es un compuesto químico, más conocido como micro-molécula o estitula, que contiene carbono, formando enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno.

Fitoextracción: Es la captación de iones metálicos por las raíces de la planta y su acumulación en tallos y hojas. Hay plantas que absorben selectivamente grandes cantidades de metales acumulando en los tejidos concentraciones mucho más altas que las presentes en el suelo o en el agua.

Hidrocarburos: son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.

Halógeno: elemento químico no metal que forma sales minerales al unirse directamente con un metal.

Microflora: Está constituida por organismos microscópicos que actúan en el suelo, dentro ellos tenemos hongos, bacterias, algas entre otros, su principal función o característica es, descomponer la materia orgánica que llega al suelo.

Patógenos: es aquel elemento o medio capaz de producir algún tipo de enfermedad o daño en el cuerpo de un animal, un ser humano o un vegetal.

SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Suelo: es la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación. Es una estructura de vital importancia para el desarrollo de la vida.

Abreviaturas

CIC: capacidad de intercambio catiónico

CO₂: dióxido de carbono

DDT: diclorodifeniltricloroetano

Ex situ: fuera del sitio

FAO: organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación

HAP: hidrocarburos aromáticos policíclicos

HMA: hongos micorrízicos arbusculares

HTP: hidrocarburos totales de petróleo

H₂O: formula química del agua

H⁺: iones hidrogeno

In situ: en el sitio

IPM: instituto mexicano de petróleo

LMP: límite máximo permisible

NO₃⁻: nitrato

OH⁻: oxidrilo

OMS: organización mundial de la salud

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales

Bibliografía

1. Aguilar, T. A., Hernández Rodríguez, C. H., & Mendoza Pérez, J. A. (2013). Caracterización de suelos contaminados con HAPs en el valle de Metztlán, Hgo., y aplicación de un proceso de biorremediación con membranas limitantes de oxígeno. *Química Hoy*, 3(1), 18-25.
2. Aguilera N. 1989 Tratado de Edafología de México, Tomo I, Facultad de Ciencias Universidad Nacional Autónoma de México.
3. AMBIENTAL, I. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Revista QupimicaViva*.
4. Alexander M (1999) Biodegradation and Bioremediation. 2nd ed Academic Press San Diego CA, USA. 453 pp.
5. Alpuche G. L. 1991. Plaguicidas organoclorados y medio ambiente. *Ciencia y Desarrollo XVI*. 45-55.
6. Alegria Coto, J. R. 2013. Biotecnología y Biorremediación. CONACYT.
7. Anderson TA, Guthrie EA, Walton BT (1993) Bioremediation in the Rhizosphere. Plant roots and associated microbes clean contaminated soil. *Environ. Sci. Technol.* 27: 2630-2636.
8. Arroyo, M., Quesada, J., Quesada, R., & Geocisa, J. (2002). Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y Aguas contaminadas por hidrocarburos. MMWR URL disponible [En línea] En: <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib15/028>.
9. Astier Calderón, M., Maass Moreno y J. Etchevers Barra. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620. 2002.
10. Atlas, R. M. y Bartha, R. 1998. *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications*. 4a Edición. California: Benjamin Cummings.
11. Bento, F., Camargo, F., Okekeb B. y Frankenberger, W. 2005. Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Bioresource technology* 96 (9): 1049-1055.

12. Bennett JW, Connick WJJr, Daigle D, Wunch K (2001) Formulation for in situ bioremediation. In: Gadd GM (ed) Fungi in Bioremediation. British Mycological Society. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. 481 pp.
13. Bornemisza E., 1982. Introducción a la Química de Suelos, Universidad de Costa Rica, San José , Costa Rica, Secretaría General de la Organización de los Estados Unidos Americanos Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Monografía no. 25 p. 21-47.
14. Buckman Harry and N.C. Brady, 1966. The Nature and Properties of Soils. The Macmillan company. 590 pp.
15. Davis, Mackenzie L. 2005, "Ingeniería y Ciencias Ambientales", 1ra Edición, Editorial MacGraw-Hill, Pág. 77.
16. Díaz Dorado, M. D. (1993): "Ordenamiento Ambiental. Urbanismo Sanitario. Ecología - Contaminación - Infraestructura". Copyright by M.D. Díaz Dorado. Buenos Aires.
17. Di Toro, S., Zanolli G. y Fava, F. 2006. Intensification of the aerobic bioremediation of an actual site soil historically contaminated by polychlorinated biphenyls (PCBs) through bioaugmentation with a non acclimated, complex source of microorganisms. Microbial cell factories 5 (11). 1-10.
18. Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. y Schroeder, E. D. 1998. Bioremediation principios. McGraw-Hill international Editions. Pp 296
19. Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N. G., Poggi-Varaldo, H. M., Alarcón, A., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. Rev Latinoam Microbiol, 48(2), 179-187.
20. Garbisu, C., Amézaga, I., y Alkorta, I. (2002). Biorremediación y ecología. Ecosistemas, 3, 1-2.
21. García Hernández, J. L., Salazar Sosa, E., Orona Castillo, I., Fortis Hernández, M. y Trejo Escareño, H. I. 2010. Agricultura Organica. 1º edición.

22. García Torres, R., Rios Leal, E., Martínez Toledo, Á., Ramos Morales, F. R., Cruz Sánchez, J. S., & Cuevas Díaz, M. D. C. 2011. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(1), 31-39.
23. Garcés Molina, M., A., Betancur, L. M. A., Mazo, K. I. M., & Alzate, N. A. S. 2006. Aislamiento de consorcio de microorganismos degradadores de cianuro. *Revista Lasallista de investigación*.
24. Ganey, P. y Boyd, S. 2004. An Approach to evaluation of the effect of bioremediation on biological activity of environmental contaminants: dechlorination of polychlorinated biphenyls. *Environmental Health Perspectives* 113 (2): 180-185.
25. Gómez Cruz, M. A., Gómez Tovar, L y Schwentesius Rindermann R. 2003. La Agricultura Orgánica en México. En: *Producción, comercialización y certificación de la agricultura orgánica en América Latina*. CIESTAAM-AUNA, Edo. de México, pp. 91-108.
26. Gómez Tovar, L. y Gómez Cruz, M. A. 2004. La agricultura orgánica en México y en el mundo. *CONABIO. Biodiversitas* 55:13-15.
27. Gómez Tovar, L. y Gómez Cruz, M. A. 2003. *La Agricultura Orgánica en México: Un ejemplo de incorporación y resistencia a la globalización*.
28. Hernández Xolocotzi, E. 1988. *La agricultura tradicional en México. Comercio exterior*. Vol. 38. Pp. 73-78.
29. Huerta Cantera, H. E. 2010. *Determinación de propiedades físicas y químicas de suelos con mercurio en la región de San Joaquín, Qro., y su relación con el crecimiento bacteriano*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro. Campus Juriquilla, Querétaro, Qro.
30. Hutchinson SL, Schwab AP, Banks MK (2001a) Phytoremediation of aged petroleum sludge. Effect of irrigation techniques and scheduling. *J. Environ. Qual.* 30: 1516-1522.
31. INEGI. Aspectos generales del territorio mexicano. Recursos naturales. Edafología. Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx>.

32. Kantachote, D., Singleton, I., Naidu, R., McClure, N. y Megharaj, M. 2003. Sodium application enhances DDT transformation in a long-term contaminated soil. *Water, Air and Soil Pollution* 154: 115-125.
33. Landeros S. C., Hernández S. L., López M. C. y Ortega L. A. 2002. Pérdidas de nitrógeno (N-NO₃) proveniente de fertilizantes en los ingenios La Gloria y El Modelo del estado de Veracruz. *Avances de investigación del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz*. Tepetates, Veracruz, México.
34. López Falcon, R. 2002. Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación. CIDIAT. Segunda edición. Pp 43-59.
35. Maass, M. M. y García Oliva F. 1990. La conservación de los suelos en zonas tropicales: el caso de México. *Ciencia y Desarrollo* xv, 21-36.
36. Maier RM, Pepper IL, Gerba CP (2000) *Environmental Microbiology*. Academic Press. San Diego CA. USA. 585 pp.
37. Millar, C.E., Turk, L.M., Foth, H.D., 1971. *Fundamentos de la Ciencia del Suelo*.
38. Maldonado Chávez, E., Rivera Cruz, M. C., Izquierdo Reyes, F., y Palma López, D. J. (2010). Efectos de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación y fitorremediación de suelos con petróleo crudo nuevo e intemperizado. *Universidad y ciencia*, 26(2), 121-136.
39. Martínez Prado, A., Pérez López, M., Pinto Espinoza, J., Gurrola Nevárez, B. A., y Osorio Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252.
40. Middleton, N. y Thomas, D. PNUMA. *Atlas Mundial de la Desertificación*. Oxford University Press. 1997.
41. Nuñez Lopez, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R. y Olguín, E. J. 2004. *Fitorremediación: Fundamentos y aplicaciones*. Ciencia.
42. Oldeman, L. R. 1998. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen.

43. Olgún P. C. y Casas D. E. 1987. Impacto ecológico de los proyectos de desarrollo agropecuario del trópico húmedo. *Desarrollo y Medio Ambiente* 2, 17-2.
44. Ordaz, J. A., Toledo, Á. M., Morales, F. R. R., Díaz, L. F. S., Martínez, A. J., López, J. A. T., & Díaz, M. D. C. C. (2011). Biorremediación de un suelo contaminado con petróleo mediante el empleo de bagazo de caña con diferentes tamaños de partícula. *Multiciencias*, 11(2).
45. Pacheco J. G. 1997. Nitratos en agua subterránea: un caso de estudio. *Ciencia y Desarrollo* xvii. 98-104.
46. Pimentel D. 1992. "Energy inputs in production agriculture", in Fluck RC (Ed.), *Energy in Farm Production*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 13-52.
47. Pretty J. N. y Conway G. R. 1998 *The blue baby syndrome and nitrogen fertilisers: A high risk in the tropics? IIED. Gatekeeper series 5.*
48. Reddy, C. A. 1995. The potential for White-rot fungi in the treatment of pollutants. *Current opinion biotechnol.* 6: 320-328.
49. Reddy K. R. y W. H. Smith. 1987. *Aquatic plants for water treatment and resource recovery*, Orlando, Magnolia Publishing.
50. Riser-Roberts E (1998) *Remediation of petroleum contaminated soils. Biological, physical, and chemical processes.* Lewis Publisher, Boca Ratón, FL, USA. 542 pp.
51. Romero, S. E. G. (2008). Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. *Nova*, 6(9).
52. Royal Society Study Group. *The nitrogen cycle of the United Kingdom.* Quoted in: Goudie A, *The Human Impact on the Natural Environment*, Basil Blackwell Ltd, Oxford, uk (1983) 177.
53. Rzedowski J. *La vegetación de México*, Limusa, México (1978).
54. Sanchez Martin, M. J. y Camazano Sanchez, M. 1984. *Los plaguicidas, adsorción y evolución en el suelo.* 1° Edición. Ceresnet.

55. Semple, K. T., Reid, B. J. y Fermor, T. R. 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants, *Environ. Pollution*, 112: 269-283.
56. Siciliano SD, Germida JJ, Banks K, Greer CW (2003) Changes in microbial community composition and function during a polyaromatic hydrocarbon phytoremediation field trial. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 483-489.
57. Shimazu M., Mulchandani A. y Chen W. (2001). Simultaneous degradation of organophosphorus pesticides and p-nitrophenol by a genetically engineered *Moraxella* sp. with surface-expressed organophosphorus hydrolase. *Biotech. Bioengin.* 76, 3183-24.
58. Silva Arroyave, S. M. y Correa Restrepo, F. J. 2009. Análisis de la contaminación del suelo; revisión de la normatividad y posibilidades de la regulación. Vol. 2.
59. Toledo, A. y Burlingame, B. 2006. "Biodiversity and nutrition: A common path toward global food security and sustainable development." *Journal of Food Composition and Analysis.* 477-483.
60. Trujillo NA, Zavala CJ Lagunes ELC (1995) Contaminación de suelos por metales pesados e hidrocarburos aromáticos en Tabasco. In: Memoria Octava Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria. INIFAP Tabasco. Villahermosa, Tab. pp. 45-52.
61. Vázquez Larios, E., Ramírez Hernández, B., Badillo Lagunes, P. I., Fregoso Contreras, P., & Soledad, D. (2014). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
62. Van Deuren, J., Wang, Z. y Ledbetter, J. 1997. Remediation technologies screening matrix and reference guide. 3° Ed. Technology innovation office, EPA.
63. Volke Sepúlveda T., Velasco Trejo J. A. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México, D.F. 64 pp.
64. Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J.A., de la Rosa Pérez, D.A., 2005. Suelos Contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas

para su remediación, Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Impreso en México. Pp 19-31.

65. White A. 1998. Children, pesticides and cancer. *The Ecologist* 28, 100-105.
66. Wooding G., 1967. *Los Suelos, Su Origen, Constitución y Clasificación*, Ediciones Omega S.A. Barcelona. McGraw-Hill Interamericana quinta edición 2005. pág 731-739.
67. Wolf E. C. 1986. *Beyond the Green Revolution: new approaches for third world agriculture*. Worldwatch Paper 73. Worldwatch Institute, Washinton.