

USO DE LA BIORREMEDIACIÓN PARA EL SANEAMIENTO DE SUSTRATOS CONTAMINADOS POR PETRÓLEO EN EL ORIENTE DE VENEZUELA

USE OF BIOREMEDIATION TECHNIQUES FOR CLEANING UP PETROLIUM CONTAMINATED SUBSTRATES IN EASTERN VENEZUELA

NESTOR ALÍ LÓPEZ¹ y
JOSÉ RAFAEL LOZADA DÁVILA²

RECIBIDO: 01-10-10
ACEPTADO: 05-02-11

¹ Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Estudiante de la Maestría en Manejo de Bosques. E-mail: nestorlopez85@hotmail.com

² Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal, Grupo de Investigación Manejo Múltiple de Ecosistemas Forestales (GIMEFOR), Mérida, Venezuela. E-mail: jolozada@ula.ve

RESUMEN

La biorremediación es un conjunto de técnicas orientadas al aprovechamiento de la fisiología de los seres vivos para degradar sustancias contaminantes. En el caso de contaminación por petróleo, la empresa Petróleos de Venezuela (PDVSA) encontró (para el año 2002) 10.000 fosas inundadas con crudo y agua. Además se producen ripsos de perforación y sustratos afectados por derrames. Para mitigar estos pasivos ambientales, PDVSA ha logrado desarrollar un exitoso sistema denominado INTEBIOS[®] que utiliza pseudomonas para degradar el crudo. El proceso consiste básicamente en la excavación del material contaminado, su colocación en pilas adyacentes al lugar afectado, adición de fertilizantes, aireación y disposición final en la fosa tratada. Este sistema puede degradar un 76% de crudo en 68 días. Al final, el material es depositado de manera similar a las condiciones originales y la sucesión vegetal se encarga de restablecer la cobertura de plantas para evitar la erosión.

Palabras clave: contaminación, medidas mitigantes, impacto ambiental, industria petrolera, PDVSA.

SUMMARY

Bioremediation is a set of techniques designed to take advantages of living organisms for decontaminating polluted substrates. Venezuelan state-owned petroleum company, PDVSA, identified 10,000 pits inundated with crude oil and contaminated water in the year 2002. These waste materials consist of soil from excavation process and substrate affected by crude oil spillage. To reduce such environmental liability, PDVSA has been able to develop a successful decontamination system called INTEBIOS[®] which uses pseudomonas bacteria to degrade the crude oil. The process consists of excavating the polluted material, its placement in piles adjacent to the affected area, adding certain fertilizers, providing aeration and a final arrangement of the treated hole. This system can degrade 76% of petroleum in 68 days. In the end, the treated material is deposited back into the pit leaving the sites similar to the conditions as the original. Ecological succession would then take place in reestablishing the plant cover to avoid erosion.

Key words: pollution, mitigative measures, environmental impact, oil industry, PDVSA.

1. INTRODUCCIÓN

La degradación microbiana constituye el principal proceso de descontaminación natural. Este proceso se puede acelerar y/o mejorar mediante la aplicación de tecnologías de biorremediación (Viñas, 2005). Según Cortón y Viale (2006), la biorremediación se puede definir como la utilización de seres vivos para solucionar un problema ambiental, tales como suelo o agua subterránea contaminados o como la respuesta biológica al abuso ambiental. En un ambiente no contaminado, las bacterias, los hongos, los protistas, y otros microorganismos heterotróficos degradan constantemente la materia orgánica disponible, para obtener energía. Cuando un agente contaminante orgánico, combustible, petróleo u otro, es accidentalmente liberado en un ambiente dado, algunos de los microorganismos autóctonos morirán, mientras que sobrevivirán otros capaces de degradar esos compuestos orgánicos. La biorremediación trabaja proveyendo a esos organismos resistentes de nutrientes, oxígeno, y otras condiciones que favorezcan su rápido crecimiento y reproducción. Dichos organismos entonces podrán degradar el agente contaminante orgánico a una velocidad mayor, proporcionando una técnica para limpiar la contaminación.

Garbisu *et al.* (2002), señalan que 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. Pero Torres (2003) indica que en las prácticas de biorremediación también se pueden usar organismos como plantas, hongos, algas, cianobacterias y actinomicetes. El objetivo de la biorremediación es eliminar, o al menos, disminuir la concentración de sustancias potencialmente tóxicas, dispersadas

accidentalmente o no en suelos y/o cuerpos de agua superficial o subterránea, utilizando como parte fundamental del proceso a los microorganismos.

Velasco y Volke (2003), señalan que los costos de las tecnologías de biorremediación se encuentran entre los 100 y 250 dólares americanos por metro cúbico (US\$ m³). Los costos de tecnologías más convencionales, como la incineración o la construcción y manejo de confinamientos controlados, oscilan entre los 250 y 1000 US\$ m³.

Con este contexto, el presente trabajo analiza las bases conceptuales de la biorremediación y su uso como medida mitigante de los impactos ambientales causados por el derramamiento y almacenamiento de hidrocarburos en la empresa PDVSA, en el Distrito San Tomé, Estado Anzoátegui, Venezuela.

2. TIPOS DE BIORREMEDIACIÓN

2.1 SEGÚN SU LOCALIZACIÓN

De acuerdo a su localización (López *et al.*, 2006), se pueden clasificar en los siguientes:

2.1.1. IN SITU

Corresponde a la biorremediación referente a tratamientos que no requieren excavación del suelo contaminado. Presentan una mayor ventaja sobre las *ex situ* por el menor costo y la disminución de la generación de residuos a eliminar en la superficie, además utiliza microorganismos autóctonos, que pueden degradar un gran número de constituyentes del contaminante, pero su eficacia y su población, son afectados cuando algunos contaminantes tóxicos están presentes en altas concentraciones.

2.1.2. EX SITU

Es un método donde se excava el suelo o el material a tratar y se le maneja en un sistema controlado como una celda de *landfarming* o algún tipo de biorreactor.

2.2 SEGÚN EL ORGANISMO QUE REALIZA LA DEGRADACIÓN

De acuerdo al organismo que efectúa la degradación (Torres, 2003). De ahí que se mencionen los siguientes:

2.2.1 FITORREMEDIACIÓN

El uso de vegetales para operaciones de limpieza ambiental es posible debido a que algunas plantas han desarrollado la capacidad de tomar y acumular metales en sus tallos, en niveles que resultan tóxicos para otras especies. Además, las plantas han desarrollado interacciones y asociaciones en las raíces, con organismos que pueden causar la degradación o transformación acelerada de ciertos contaminantes, a productos que no representan amenazas ambientales (Torres, 2003; López *et al.*, 2006; Ferrera-Cerrato *et al.*, 2006). Si se utilizan árboles, se aprovechan sus sistemas radicales profundos y altas tasas de evapotranspiración, para interceptar y remover contaminantes de ambientes subterráneos (Dzantor, s/f). Como ejemplo de fitorremediación, Lombi *et al.* (2001) reportan que *Thlaspi caurulencens* logró eliminar 8 mg de cadmio y 200 mg de zinc, por kilogramo de suelo contaminado por una fundición. Con base en la actividad fisiológica, la fitorremediación tiene la siguiente clasificación (Ferrera-Cerrato *et al.*, 2006):

2.2.1.1 FITOEXTRACCIÓN, FITOACUMULACIÓN Y FITOMINERÍA

Se usan plantas que son capaces de remover contaminantes inorgánicos y acumularlos en sus tejidos.

2.2.1.2. FITOBOMBEO

Especies que contribuyen a la disminución de la migración de contaminantes en aguas subterráneas; así las plantas son utilizadas como un "sistema de bombeo" de agua contaminada mediante el proceso de transpiración.

2.2.1.3. FITOESTABILIZACIÓN

Uso de plantas cuyos exudados radicales que contribuyen a la precipitación de los metales y por consiguiente reducen su disponibilidad, quedando estabilizados en la matriz del suelo.

2.2.1.4. FITOTRANSFORMACIÓN Y FITODEGRADACIÓN

Plantas que poseen la característica de liberar enzimas específicas que propician que un contaminante orgánico recalcitrante sea transformado o degradado.

2.2.2. ZOORREMEDIACIÓN

Consiste en el uso de animales que actúan como agentes descontaminantes, ya que pueden desarrollarse en medios con fuerte toxicidad y poseen en su interior microorganismos capaces de retener los metales pesados. López *et al.* (2006), señalan que este es el caso de la lombriz de tierra (*Lumbricus terrestris*) la cual absorbe los contaminantes a través de los tejidos y los acumula en las vías digestivas.

2.2.3. BIORREMEDIACIÓN MICROBIANA

Consiste en el uso de bacterias con la propiedad de acumular o metabolizar metales pesados. Garbisu *et al.* (2002), resaltan que uno de los tratamientos más habituales que se realizan cuando se aborda la biorremediación de una zona contaminada es la introducción de una cepa o población microbiana que posea las rutas degradativas necesarias para metabolizar el contaminante a eliminar. El éxito de estas inoculaciones depende no solamente de factores abióticos como el pH, temperatura, potencial de reducción y la disponibilidad de agua y nutrientes, sino también de factores bióticos, tales como: la competencia microbiana, amensalismo, parasitismo y depredación que pueden limitar el crecimiento y desarrollo de las poblaciones inoculadas.

3. APLICACIONES DE LA BIORREMEDIACIÓN

3.1 SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Rittmann y McCarty (2001), señalan que los hidrocarburos son biodegradables de forma aerobia. Sin embargo, los hidrocarburos grandes muy ramificados, o que contienen muchos anillos aromáticos son difíciles de degradar. Esto ocurre porque su compleja estructura hace difícil que los organismos encuentren el lugar para realizar el ataque enzimático inicial con oxigenasa.

Jordahl *et al.* (1997), encontraron que las poblaciones microbianas de la rizósfera aumentaron su concentración y capacidad catabólica, en una plantación de 7 años de álamos híbridos *Populus deltoides x nigra DN-34* en suelos contaminados con hidrocarburos. En México, Ferrera-Cerrato *et al.* (2006) también han probado que las siguientes especies son exitosas en labores de fitorremediación: *Zea mays*, *Panicum maximum*, *Paspalum virgatum*, *Echinochloa polystachya*, *Sorghum vulgare*, *Phaseolus vulgaris*, *Phaseolus coccineus*, *Chamaecrista nictitans*, *Brachiaria brizantha*, *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*. Los mismos autores señalan que la inoculación de algunas cepas de actinomicetos ha estimulado el crecimiento de *Dolichos lablab* (Fabaceae) en condiciones de contaminación con petróleo crudo, y la degradación de este contaminante en la rizósfera. Boldu *et al.* (2002) indican que el hongo *Cladophialophora sp.* fue capaz de degradar compuestos presentes en la gasolina como tolueno, etilbenzeno y xileno; dicho proceso fue posible por la acción de la enzima mono-oxigenasa.

Por su parte, Ercoli *et al.* (1999) reportan que se han tratado con cultivos mixtos de bacterias, levaduras y hongos a suelos contaminados en una concentración de 20% (peso/peso), se observó una mineralización de los hidrocarburos y casi su desaparición en 18 meses. Halden *et al.*

(1999) demostraron la eficiencia de algunas bacterias del género *Pseudomonas* en la degradación del ácido 3-Phenoxybenzoico en suelos. Este experimento sirvió también para evaluar el papel biodegradativo de dos *Pseudomonas* que habían sido manipuladas genéticamente. Las bacterias resultaron ser efectivas en todos los casos; sin embargo, las bacterias modificadas genéticamente tuvieron una mayor capacidad para sobrevivir a factores ambientales adversos. Otra bacteria que ha sido usada para la degradación de hidrocarburos es *Sphingomonas wittichii*, la cual en condiciones anaeróbicas es capaz de transformar el 2,7 diclorobenzeno, produciendo el metabolito 4 clorocatenol y el 1, 2, 3, 4 tetraclorodibenzeno (Hong *et al.*, 2002).

Por su parte Viñas (2005), también indica que las cepas bacterianas son eficientes para la degradación de alcanos. Zhang *et al.* (2010) encontraron que 22 estirpes bacterianas pueden utilizar el diesel como la única fuente de carbono y energía y 11 estirpes pueden degradar los hidrocarburos del diesel en más de 70% en 7 días.

Las cianobacterias son igualmente efectivas. Abed *et al.* (2002) demostraron que *Phormidium* y *Oscillatoria* degradaron en 7 días el n-octadecano y el ristano hasta un 25 y 34%, respectivamente.

3.2 SUELOS CONTAMINADOS CON HERBICIDAS

Vásquez y Reyes (2002) indican que las bacterias *Pseudomonas* lograron degradar Aroclor en más de un 90%. En otro experimento se mostró que *Rhodococcus sp.* pudo transformar atrazina a nitritos, óxido nitroso, amonio y formaldehído (Fournier *et al.*, 2002).

Ouahiba *et al.* (2009) reportan que especies de hongos como *Sordaria superba* y *Absidia fusca* remueven más de 50% de metribuzin después de 5 días. *Rhizopus oryzae* y *A. fusca* tienen la capacidad para remover 40 - 47% de metobromuron.

3.3 AGUAS CONTAMINADAS CON HIDROCARBUROS Y METALES PESADOS

Una de las técnicas más utilizadas hoy en día para la biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos es el uso de los *tapetes microbianos*. Estos son ecosistemas microbiológicos que agrupan, en pequeñas unidades superficiales, complejas poblaciones de microorganismos aerobios y anaerobios capaces de colonizar zonas altamente contaminadas (Martínez-Alonso y Gaju, 2005).

Pérez *et al.* (2010), señalan que las aguas contaminadas pueden ser tratadas en un tanque reactor de agitación. Con la aplicación de *Pseudomonas aeruginosa* lograron la degradación de 60% de hidrocarburos y la remoción de 99% de cromo, 93% de cobre, 46% de zinc y 88% de manganeso, a través del fenómeno de bio-absorción.

3.4 AGUAS CONTAMINADAS CON RESIDUOS URBANOS

Rittmann y McCarty (2001), califican al *lodo activo* como el proceso biológico más utilizado para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Estos sistemas provocan la disminución de la carga orgánica (contenida en los efluentes) mediante la degradación microbiana. Estos procesos además reducen la carga tóxica de efluentes. A escala domiciliar los pozos ciegos y cámaras sépticas cumplen una tarea similar, aunque generalmente en ambiente anaeróbico por lo cual son menos eficientes que los métodos anteriormente mencionados (Henry y Heinke, 1999; Cortón y Viale, 2006).

3.5 AGUAS CONTAMINADAS CON DESECHOS ANIMALES

Ferrera-Cerrato *et al.* (2006), informan que estas aguas pueden ser tratadas mediante: (i) la disposición de los efluentes en lagunas de alta tasa de degradación, controlando las especies de algas dominantes y (ii) cultivar las algas en estanques fertilizados con desechos animales, ya sean frescos o después de haber sido digeridos de manera aerobia o anaerobia.

4. PROCESO INTEBIOS®

Este es el sistema de biorremediación utilizado por PDVSA en el oriente de Venezuela, en el marco territorial de la Faja Petrolífera del Orinoco. Está dirigido a la degradación de hidrocarburos en fosas, rios de perforación y suelos afectados por derrames petroleros. La magnitud del problema ambiental se evidencia con la cifra de 10.000 fosas inventariadas, hasta Diciembre de 2002, solamente en el Distrito San Tomé del Estado Anzoátegui (información suministrada por el Ing. Pedro Guerra, Gerente Ambiental del Distrito San Tomé, PDVSA). Algunas de estas fosas llegan a tener una superficie cercana a 1 ha.

De acuerdo a Infante (2001), las principales operaciones de este proceso son las siguientes:

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL PASIVO AMBIENTAL

Consiste en el análisis físico-químico de los efluentes y de los sedimentos encontrados. Este procedimiento es realizado por laboratorios certificados en el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA), y cumpliendo lo establecido en el Decreto No. 883 sobre las Normas para la Clasificación y Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos y el Decreto No. 2635 sobre las Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos.

4.2 EXTRACCIÓN DE FLUIDOS

4.2.1 EXTRACCIÓN DE CRUDO

Las fosas que están llenas de agua e hidrocarburos (Figura 1) deben ser vaciadas con equipos de succión como el Vacume, Camiones de Fluidos o Jumbos (retroexcavadoras). El crudo es llevado a macrofosas o plantas de tratamiento acondicionadas para su disposición y procesamiento. Estas actividades son llevadas a cabo por empresas que poseen el Registro de Actividades Suscepti-



FIGURA 1. Aspecto de una fosa inundada con agua y petróleo.

bles de Degradar el Ambiente (RASDA) otorgado por el MPPA.

4.2.2 EXTRACCIÓN Y DISPOSICIÓN DE AGUA SALADA

Si el agua posee concentraciones de cloruros superiores a 1000 ppm deberá ser transportada y procesada en una planta de tratamiento. El agua tratada o que esté por debajo del límite de cloruros antes señalado, es asperjada a lugares aledaños al sitio de remediación.

4.3 REMOCIÓN

El terreno impactado es excavado hasta unos 3 m de profundidad (Figura 2). Luego, utilizando tractores y cargadores frontales, el material contaminado (suelo) es colocado en pilas en lugares aledaños al sitio de remediación (Figura 3).

4.4 FASE DE TRATAMIENTO

4.4.1 APLICACIÓN DE ENMIENDAS

En las pilas, se aplican fertilizantes químicos y orgánicos en dosis que varían según el contenido de grasas y aceites del suelo. En este proceso

se utiliza urea, fosfato, NPK, estiércol y cascarilla de arroz.

4.4.2 AIREACIÓN Y MEZCLADO

El material es removido con la maquinaria para proveer oxígeno a la mezcla, extraer los aromáticos (componentes de los hidrocarburos), activar la actividad microbiana y lograr un material homogéneo.

4.5 FASE DE DISPOSICIÓN FINAL

El material es sometido a análisis de laboratorio y, cuando cumple las especificaciones establecidas en las normas ambientales, es confinado en el mismo lugar de donde se extrajo, con una compactación similar a las condiciones originales. Allí se produce una sucesión natural que restablece la vegetación con especies autóctonas (Figura 4). En algunos casos se distribuyen semillas de gramíneas (*Urochloa* sp.) para acelerar el establecimiento de cobertura vegetal y frenar la erosión.

La tecnología INTEBIOS® se fundamenta en la actividad de *Pseudomonas*. La mayor eficiencia de estas bacterias se logra en las siguientes



FIGURA 2. Excavación de la fosa para extraer el sustrato contaminado por petróleo.



FIGURA 3. Arreglo del sustrato contaminado en pilas adyacentes al área afectada.

condiciones: pH entre 6 y 8; humedad entre 30 y 60%; temperatura entre 20 y 40°C; buena disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio; suelos franco arcillosos o franco arenosos con porosidad y permeabilidad adecuadas para el flujo de los nutrientes, aire y microorganismos.

La aplicación de INTEBIOS® no requiere del uso de preparaciones biológicas a base de microorganismos, práctica conocida como bioaumentación, en la que se elabora un cultivo bacteriano y luego se agrega en campo. Las experiencias señalan que la bioestimulación es

FIGURA 4.

Recuperación de la vegetación en el área afectada, después de la disposición final del sustrato tratado. En primer plano se observa un individuo de *Curatella americana*, producto de la regeneración natural y especie típica de los chaparrales que se observan al fondo bordeando la fosa recuperada.



más eficiente en la disminución de las fracciones de saturados y aromáticos de un crudo en suelo que la bioaumentación (Dott *et al.*, 1999, citados por Infante, 2001).

Por su parte Infante (2001), reporta que el uso de INTEBIOS®, en el oriente de Venezuela, permitió degradar crudo en un 76% y compuestos saturados y aromáticos en un 68%, ambos en 68 días. En suelos no tratados (en el mismo período) las tasas de degradación fueron 2% para crudo y 0% para saturados y aromáticos.

5. CONCLUSIONES

En un mundo cada vez más afectado por la contaminación del suelo y del agua, las técnicas de biorremediación constituyen una alternativa más económica y eficiente para el tratamiento de residuos y efluentes. La descomposición de sustancias contaminantes mediante plantas de tratamiento es costosa y, a menudo, genera otros impactos ambientales. La biorremediación utiliza la capacidad de algunos organismos para sobrevivir en condiciones de altas concentraciones de sustancias nocivas. Por medio de sus

procesos fisiológicos, estos organismos degradan estas sustancias y las transforman en otras materias inertes.

En el caso de la industria petrolera venezolana, un equivocado concepto de desarrollo dejó pasivos ambientales considerables. En estas áreas se ha logrado sanear el terreno con el uso de *Pseudomonas*, llevando las concentraciones de hidrocarburos a niveles aceptables de acuerdo a las leyes que rigen esta actividad. Esta medida mitigante confiere un carácter un poco más ecológico y más sostenible a los proyectos petroleros.

6. AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, por aportar los recursos necesarios para realizar las visitas de campo. A los Ingenieros Pedro Guerra, Annie Trocert y todo el equipo técnico de PDVSA - San Tomé, Estado Anzoátegui por el apoyo logístico y atención técnica durante los recorridos de campo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABED, R., SAFI, N., KOSTER, J., DE BEER, D., EL-NAHHAL, Y., RULLKOTTER, J. & GARCIA-PICHEL, F. 2002. Microbial diversity of a heavily polluted microbial mat and its community changes following degradation of petroleum compounds. *Applied and Environmental Microbiology* 68(4): 1674-1683.
- BOLDU, F., VERVOORT, J., GRONTEHUIS, J. & VAN GROENESTIJN, J. 2002. Substrate interactions during the biodegradation of Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene (BTEX) Hidrocarburos by the fungus *Cladophialophora* sp. strains T1. *Applied and Environmental Microbiology* 68(6): 2660-2665.
- CORTÓN, E., y A. VIALE. 2006. Solucionando grandes problemas ambientales con la ayuda de pequeños amigos: las técnicas de biorremediación. *Ecosistemas* 15(3): 148-157.
- DZANTOR, K. s/f. Bioremediation of contaminated soils: What it is and how to do it. University of Maryland. Fact Sheet 757. En línea: <http://www.uhu.es/masteria/master/material/406.pdf> [Consultado: 13/09/2010].
- ERCOLI, E., J. GÁVEZ, M. DI PAOLA, J. CANTERO, S. VIDELA y C. MEDAURA. 1999. Biorremediación de suelos altamente contaminados. Seminario Internacional Exploración y Explotación de Hidrocarburos - III INGEPET 1999. Lima, Perú. 27-29 de Octubre. En línea: http://xsei.centrogeo.org.mx/vedet/biblioteca/deg_tie/DT_BiorremedSoilAltaContami.pdf [Consultado: 21/09/2010].
- FERRERA-CERRATO, R., N. ROJAS-AVELIZAPA, H. POGGI-VARALDO, A. ALARCÓN y R. CAÑIZARES-VILLANUEVA. 2006. Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados con hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 48(2): 179-187.
- FOURNIER, D., A. HALASZ, J. SPAIN, P. FIURASEK y J. HAWARI. 2002. Determination of key metabolites during biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine with *Rhodococcus* sp strain DN22. *Applied and Environmental Microbiology* 68(1): 166-172.
- GARBISU, C., I. AMÉZAGA e I. ALKORTA. 2002. Biorremediación y ecología. *Ecosistemas* 11(3): 1-2.
- HALDEN, R., S. TEPP, B. HALDEN y D. DWYER. 1999. Degradation of 3-Phenoxybenzoic Acid in soil by *Pseudomonas pseudoalcaligenes* POB310(pPOB) and two modified *Pseudomonas* strains. *Applied and Environmental Microbiology* 65(8): 3354-3359.
- HENRY, J. y G. HEINKE. 1999. *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall. México. 778 p.
- HONG, H., Y. CHANG, I. NAM, P. FORTNAGEL y S. SCHMIDT. 2002. Biotransformation of 2,7-dichloro- and 1,2,3,4-tetrachlorodibenzo-p-dioxin by *Sphingomonas wittichii* RW1. *Applied and Environmental Microbiology* 68(5): 2584-2588.
- INFANTE, C. 2001. Biorrestauración de áreas impactadas por crudo por medio de intebios® y biorize®. *Interciencia* 26(10): 504-507.
- JORDAHL, J., L. FOSTER, J. SCHNOOR y P. ALVAREZ, P. 1997. Effect of hybrid poplar trees on microbial populations important to hazardous waste bioremediation. *Environmental toxicology and chemistry* 16(6): 1318-1321.
- LOMBI, E., F. ZHAO, S. DUNHAM y S. McGRATH. 2001. Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils. *Journal of Environmental Quality* 30(6): 1919-1926.
- LÓPEZ, J., G. QUINTERO, A. GUEVARA, D. JAIMES, S. GUTIÉRREZ y J. MIRANDA. 2006. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova* 4(5): 82-90.
- MARTÍNEZ-ALONSO, M. y N. GAJU. 2005. El papel de los tapetes microbianos en la biorrecuperación de zonas litorales sometidas a la contaminación por vertidos de petróleo. *Ecosistemas* 14(2): 79-91.
- OUAHIBA, B., B. FATIHA y R. STEIMAN. 2009. Biodegradation capability of some species

of fungi isolated from contaminated soils towards herbicides. *Toxicology Letters* 189, Supplement 1, Page S189. Abstracts of the 46th Congress of the European Societies of Toxicology.

- PÉREZ, R., G. CABRERA, J. GÓMEZ, A. ÁBALOS y D. CANTERO. 2010. Combined strategy for the precipitation of heavy metals and biodegradation of petroleum in industrial wastewaters. *Journal of Hazardous Materials* 182(1-3): 896-902.
- RITTMANN, B., y P. McCARTY. 2001. *Biotecnología del medio ambiente: principios y aplicaciones*. Madrid, España. McGraw-Hill. 745 pp.
- TORRES, D. 2003. El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Ecosistemas* 12(2): 1-5.
- VÁSQUEZ-VALLES, M. y W. REYES. 2002. Degradación de Aroclor 1242 por *Pseudomonas* sp. *Revista de la Sociedad Peruana de Gestion Ambiental*, Número 2, s/p En línea: http://www.linros-interinsumos.com/Tempo/revista1/degradacion_aroclor_1242.htm [Consultado: 21/09/2010]..
- VELASCO, J., y T. VOLKE. 2003. El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta Ecológica* 66: 41-53.
- VIÑAS, M. 2005. *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Tesis PhD. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona. España. 352 p. En línea: <http://www.tdr.cesca.es/> [Consultado: 25/09/2010].
- ZHANG, Z., L. GAI, Z. HOU, C. YANG, C. MA, Z. WANG, B. SUN, X. HE, H. TANG y P. XU. 2010. Characterization and biotechnological potential of petroleum-degrading bacteria isolated from oil-contaminated soils. *Bioresource Technology* 101(21): 8452-8456.