

CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y RECUPERACIÓN ECOLÓGICA EN VENEZUELA

SOIL CONTAMINATION AND ECOLOGICAL RECOVERY IN VENEZUELA

Carmen Infante

Postgrado en Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, y Postgrado en Ingeniería Ambiental, Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela. E-mail: luchoben@cantv.net

RESUMEN

Una de las principales fuentes de contaminación de los suelos lo constituye la disposición temporal de desechos de la industria del petróleo en cavidades denominadas fosas, y eventuales derrames de crudo por ruptura de los oleoductos. Siendo Venezuela un país cuya principal industria es la petrolera, no es sorprendente que haya invertido recursos para el desarrollo de tecnologías o técnicas que permitan la recuperación ecológica de los suelos impactados por las actividades de exploración, producción y refinación del petróleo. Una de las tecnologías que mayor investigación y aplicación ha tenido lugar en el país, es la biorremediación, utilizada amplia y exitosamente. La investigación se inició a finales de la década de los 80 y a mediados de los 90 comenzó su aplicación en campo, dando lugar a su transferencia y aplicación a gran escala para el año 1996. Un resumen de la evolución de esta técnica de recuperación de suelos se presenta en este artículo.

ABSTRACT

One of the main sources of soil contamination is the temporary disposal of oily waste in cavities called pits and the eventual oil spill from the petroleum industry activities. Since Venezuela is a country whose main industry is the oil company, it is not surprising that it has invested resources for the development of technologies that allow the ecological recovery of soil impacted by the exploration, production and refinement activities. One of the technologies with more research and application in Venezuela is land farming, which has been widely and successfully used. The research began at the end of the 80's and by the middle 90's began its application in the field, giving place to massive application for treatment of oily waste. This paper presents a summary of the evolution of this technique applied to the recovery of impacted soils.

Palabras claves: Biorremediación, recuperación de suelos, contaminación de suelos.

Keywords: Landfarming, soil recuperation, soil contamination.

INTRODUCCIÓN

A finales de la década de los 80, se inició la investigación en biorremediación en el país a fin de conocer la factibilidad técnica de recuperar suelos impactados por derrames de crudo. Uno de los primeros trabajos estuvo enmarcado en la

aplicación de la modalidad conocida como *landfarming* o biorremediación en los primeros 30 cm. del suelo, en el Oriente del país (Prado-Jatar y col., 1993). Sin embargo es a partir del año 1990, que se decide abrir una línea de investigación marcada que conllevó a desarrollar una tecnología propia adaptada a los suelos tropicales en los diferentes ambientes de la geografía nacional

Varios años de investigación y desarrollo durante toda la década de los 90, permitieron conocer y entender el proceso de biorremediación, en el que se investigaron aspectos claves, tales como:

a) La dosis adecuada de nitrógeno, fósforo y otros nutrimentos para compensar el desbalance nutricional en el suelo por el exceso de carbono

b) La frecuencia y forma de aireación del suelo, ya que la biodegradación es un proceso fundamentalmente aeróbico.

c) Los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo antes y después de aplicar un proceso de biorremediación.

d) Los criterios o parámetros a evaluar para hacer seguimiento a la efectividad de un proceso de biorremediación.

e) Las características que debe cumplir un desecho o suelo contaminado para poder aplicar la biorremediación y los criterios de limpieza o definición de saber cuándo el suelo está limpio y se ha cumplido la meta de biorremediación.

f) Las modalidades de aplicar la técnica en función del tipo de suelo, ecosistema, condiciones climáticas, disponibilidad de recursos, tipo y características del desecho o grado de peligrosidad, volumen a tratar.

g) El uso de preparaciones biológicas o inóculos comparando los mismos, con la estimulación de los microorganismos autóctonos presentes en el suelo.

h) Los factores abióticos para garantizar el éxito de la aplicación de la biorremediación y la definición de los criterios de recuperación ecológica en el suelo después de aplicada la técnica.

i) Las dosis y tipos de agentes estructurantes necesarios para garantizar la estructuración y manejabilidad adecuada del desecho a fin de lograr un adecuado contacto microorganismo con el contaminante.

j) El escalamiento o paso de los resultados de laboratorio al campo, permitiendo su transferencia y masificación a todos los sectores, obteniendo estándares de base que pudiesen evolucionar a criterios más estrictos a fin de contribuir a la conservación del recurso suelo y por ende de los ecosistemas sujetos al impacto de la actividad de exploración, producción y refinación de la industria petrolera en el país.

Como producto de esta investigación, aún cuando hoy en día son muchos los países tropicales que aplican exitosamente la tecnología de biorremediación, Venezuela es considerada como uno de los países que mayor nivel de desarrollo y madurez tecnológica alcanzó en la década de 1990.

RECUPERACIÓN DE SUELOS Y BIORREMEDIACIÓN

El biotratamiento de desechos orgánicos, el biosaneamiento o biorremediación de áreas impactadas por derrame de crudo u otros desechos orgánicos, son las terminologías que describen la aplicación del proceso de biodegradación para disminuir o suprimir las fracciones tóxicas, como lo son los saturados y aromáticos que se encuentran en un crudo. El proceso se efectúa mediante la estimulación "in situ" de los microorganismos autóctonos presentes en el sitio de la contaminación con las adecuadas proporciones de nutrientes, materiales orgánicos o mejoradores de la estructuración y porosidad del desecho a tratar, así como con el control adecuado de la humedad y aireación.

La clave para lograr el éxito en la aplicación se fundamenta en el conocimiento de los aspectos ecológicos, químicos, microbiológicos, fisicoquímicos, edafológicos, toxicológicos y de ingeniería, asegurando que no se transfiera el contaminante en el suelo desde las primeras capas a profundidades mayores, impactando subsuelos y aguas subterráneas, entre otros aspectos (Infante, 2001).

Específicamente el término biodegradación se refiere a la transformación y/o mineralización de un compuesto orgánico por acción biológica. Los microorganismos, hongos y bacterias permiten la metabolización de una gran variedad de compuestos del petróleo, lo cual se traduce en una disminución significativa del xenobiótico en el suelo. La biodegradación es un proceso natural que se presenta en los ecosistemas y se conoce como descomposición de materia orgánica, no obstante el término como tal se aplica específicamente a los compuestos orgánicos de la industria petrolera u otros desechos industriales de naturaleza orgánica (Infante, 1997). La aplicación exitosa de un proceso de biodegradación equivale a aplicar una técnica de biorremediación bajo sus diferentes modalidades (reactores, *composting*, *landfarming*, biopilas, fito-

rremediación, entre otras), y permite la recuperación de suelos después de un derrame de crudo, lo cual representa una opción económica y aceptada desde el punto de vista ambiental y técnico a nivel nacional e internacional.

DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CONTAMINACIÓN CON PETRÓLEO EN EL SUELO Y EL DESARROLLO DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD A NIVEL DE LABORATORIO

Uno de los principales pasos para determinar el grado de contaminación es realizar un adecuado muestreo del suelo. El tipo de muestreo depende del objetivo que se persiga. Generalmente si lo que se desea es conocer el grado de contaminación en diferentes subáreas o parches en una gran extensión de terreno contaminada por un derrame de petróleo, se deberán establecer visualmente por la coloración observada, las diferentes áreas y ser muestreadas independientemente. Si por el contrario se requiere tener una concentración promedio del contaminante sin discriminar parches o subáreas, se puede muestrear estableciendo cuadrículas o un transepto y tomando una serie de muestras representativas a fin de obtener muestras compuestas que permitan eliminar la variabilidad espacial. Este último tipo de muestreo es el más ampliamente usado cuando el objetivo del proyecto busca obtener el grado de contaminación para aplicar la tecnología de biorremediación para la recuperación del suelo.

Una vez determinado el grado de contaminación o concentración de hidrocarburo se procede a evaluar si es factible técnicamente la biorremediación del contaminante. Esta evaluación se debe realizar a nivel de laboratorio, particularmente cuando no se tiene ningún conocimiento sobre la técnica. Es necesario conocer las características físicas, químicas y biológicas del desecho o suelo contaminado, como un requisito para evaluar la factibilidad de biorremediación (Infante y Vásquez, 1999).

Es un requisito añadir nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo para que se lleve a cabo el proceso de biorremediación, así como agentes estructurantes, y se deben montar adicionalmente controles, que incluyen el suelo con el contaminante

sin los nutrientes y agentes estructurantes (Fig. 1). Todos los tratamientos deben ser aireados porque la biorremediación de los hidrocarburos del petróleo, es un proceso aeróbico fundamentalmente y se debe mantener un control de la humedad entre el 40-60 % de la capacidad de campo (Atlas y Bartha, 1998).

Los envases para el montaje de las pruebas son variados. Generalmente se usan bandejas de plástico o compostero de capacidad de 2 Kg. de suelo. En estos ensayos se deben contemplar las pérdidas del contaminante por volatilización, utilizando para ello inhibidores de la actividad biológica (Infante y Vásquez, 1999). La concentración del contaminante puede ser como máximo de hasta el 10 % según se indica como valor máximo para efectuar biorremediación acorde con el Decreto 2635 de 1998. Los ensayos se pueden montar con concentraciones iniciales entre 5 y 10 % según el tipo de contaminante y características del suelo entre otras.

Los parámetros a medir para estimar la biodegradación están relacionados con las mediciones del contaminante a diferentes tiempos para cada uno de los tratamientos, incluyendo el control. Del contenido total del petróleo se pueden analizar los contenidos de la fracción de saturados y aromáticos a fin de obtener la cinética de remoción de estos compuestos por biodegradación. Otra de las medidas es la producción de CO₂, como un producto de la mineralización del hidrocarburo (Infante y González, 1996). Dada la variabilidad del contaminante, y a fin de tener confiabilidad estadística, como mínimo deben ser evaluados tres réplicas para los diferentes tratamientos a nivel de laboratorio.

En términos generales las pruebas de laboratorio para evaluar la biodegradabilidad pueden hacerse en reactores o composteros, y no requieren adición de inóculos bacterianos porque los microorganismos presentes en el suelo y el desecho son suficientes y eficientes, cuando se les estimula "*in situ*" mejorando los factores abióticos (Infante, 2001).

BIOAUMENTACIÓN Y BIOESTIMULACIÓN

Hoy en día es conocido que la microflora autóctona, presente en un medio marino o terrestre, resulta más eficiente en los procesos de biodegradación que introducir un inóculo o producto a

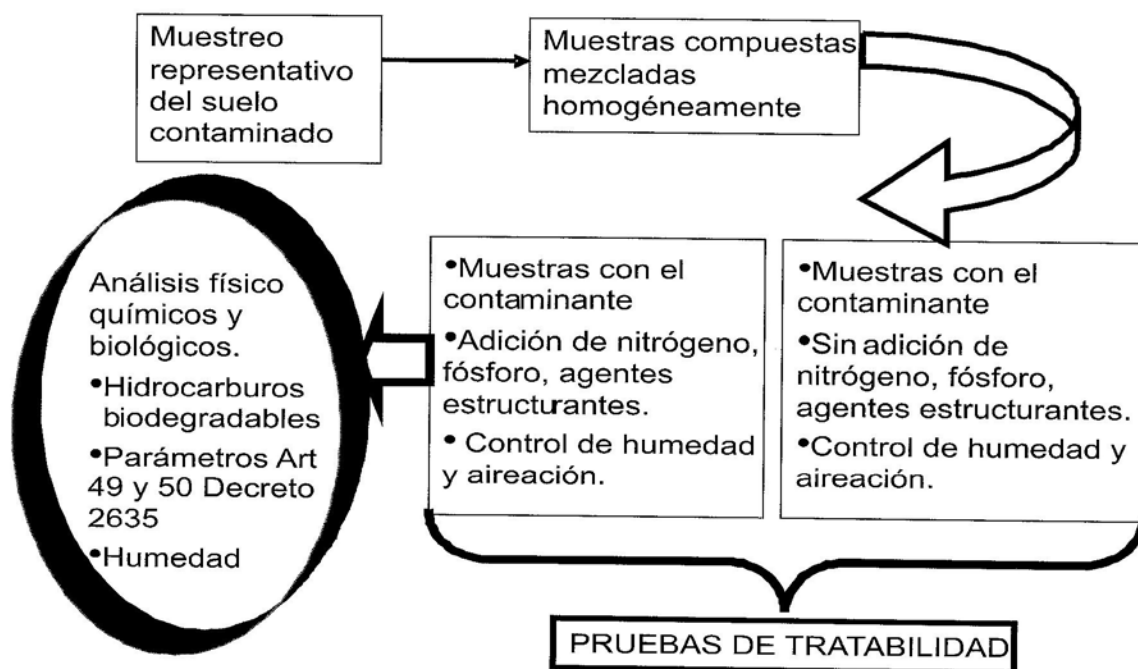


Figura 1. Representación esquemática de los ensayos de laboratorio.

base de microorganismos. Han sido numerosos los productos formulados a nivel mundial, sin embargo, son escasas las evaluaciones en campo que demuestren su efectividad (Leavitt y Brow, 1994; Venosa y Haines, 1991).

El término Bioestimulación se refiere a la aplicación del proceso de biodegradación, sin adición de productos con microorganismos. En este caso se estimula la microflora autóctona, por adición de nutrientes, oxigenación, humedad, surfactantes entre otros. Por el contrario el término Bioaumentación se conoce como la aplicación de productos o inóculos para que se lleve a cabo el proceso de biodegradación. Estas preparaciones pueden ser microorganismos autóctonos o no, añadidos bajo cualquier modalidad, liofilizados reactivados en forma líquida, preparados en el laboratorio a partir de microorganismos aislados de suelos u otros ambientes contaminados.

Experiencias en Venezuela con tres tipos de inóculos, aislados de suelos contaminados con lodos

petrolizados en una fosa, de lodos de tratamiento de aguas servidas y suelos no contaminados con petróleo demostraron que a nivel de laboratorio el proceso de biodegradación era mejorado con el inóculo proveniente del lodo de tratamiento de aguas servidas, sin embargo a nivel de campo en condiciones controladas no se reproducen estos resultados (Infante, 1997; Infante y col., 2001). Las evaluaciones a nivel de campo se realizaron en parcelas de 4 m² por triplicado, donde se añadió lodo petrolizado a una concentración de 10%. A los fines de ensayar la bioaumentación, el inóculo encontrado como más efectivo a nivel de laboratorio se aplicó a una dosis tal que la población de bacterias alcanzara 10⁸ unidades formadoras de colonia por gramo de suelo contaminado y para comparar con la bioestimulación, se le añadió a las parcelas fertilizantes para estimular la población autóctona. En ambos tratamientos, se realizaron 5 muestreos por seis meses. Los resultados no mostraron diferencias significativas en los tratamientos con y sin inóculos bacterianos, siendo el porcentaje de biorremediación o remoción de hidrocarburo

similar (Infante y col., 2001). En la Tabla 1 se muestran los resultados. Estos resultados coinciden con los de otros autores que demuestran la efectividad de la bioestimulación en comparación con la bio-aumentación. Los estudios bien documentados a nivel de campo o escala industrial que demuestran la efectividad de un proceso de biodegradación en un suelo abierto, bajo la modalidad de *land-farming*, *composting* entre otras, aplicando inóculos o preparaciones comerciales a base de microorganismos, en comparación a la bioestimulación (sin adición de inóculos) son escasos por no decir inexistentes. La mayoría de los estudios son a nivel de laboratorio y cuando son llevados a campo no resultan exitosos o no tienen la comprobación estadística con controles sin inóculos.

ALGUNOS EJEMPLOS DE LA APLICACIÓN DE BIO-RREMEDIACIÓN PARA RECUPERACIÓN DE SUELOS EN VENEZUELA.

Diversos tipos de desechos orgánicos de origen petrolero, incluyendo los suelos contaminados han sido tratados exitosamente con la tecnología de biorremediación.

A nivel de refinación, en Puerto La Cruz, los sedimentos o el fondo de diversas fosas o cavidades donde se disponen temporalmente desechos con hidrocarburos y derrames de crudo en suelo propiamente dicho, han sido recuperados con la

técnica de biorremediación. Para ello primero se llevaron a cabo pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para obtener la factibilidad técnica y obtener los parámetros de diseño para hacer el escalamiento y recuperar 52.000 m² de suelos contaminados (Infante y col., 1997; Infante y col., 1999). Previamente a la aplicación de la técnica de biorremediación *in situ*, a las fosas, el crudo presente en las capas superiores fue removido y trasladado a un centro de recuperación. En algunos casos, el crudo es tan meteorizado que es imposible su recuperación por lo que se incorpora al suelo y se mezcla con éste para aplicar la técnica de Biorremediación. La efectividad de la técnica se estableció evaluando: disminución de las fracciones biodegradables del crudo; análisis de lixiviado acorde a la normativa ambiental, conocido como TCLP (*toxicity characteristic leaching procedure*) antes y después de aplicada la biorremediación; actividad microbiana a partir de medidas de respirometría o producción de CO₂; y número de bacterias expresada como unidades formadoras de colonia por gramo de suelo.

Los resultados mostraron entre 79-82% de reducción de las fracciones biodegradables y 67-79 % de remoción de crudo total en 90-120 días, cumpliendo con la normativa ambiental vigente. Entre las conclusiones más importantes de este trabajo se encontraron: eliminación de pasivos ambientales, eliminación de riesgos para la salud y el ambiente, restauración ecológica de 10 ha con un alto valor

Tabla 1. Tasa de biodegradación de saturados y aromáticos de un suelo contaminado con lodo petrolizado, comparando la Bioaumentación con Bioestimulación, tomado de Infante y col. (2001).

Tratamiento	Tiempo de muestreo				
	Día 0	Día 60	Día 90	Día 150	Día 180
Lodo petrolizado + Aireación + Fertilizante Bioestimulación	0	60	72	81	80
Lodo petrolizado + Aireación + Fertilizante + Inóculo Bioaumentación	0	68	71	75	78

Tomado de Infante y col. 2001

económico, lo cual permitió a la refinería disponer de áreas para su expansión, y la planificación para el desarrollo de un centro de biotratamiento para tratar los derrames de crudo en suelo de la generación futura (Infante y col., 1999). Cabe señalar que para el año 2000, la refinería ya contaba con la ingeniería conceptual y básica de dicho centro de biotratamiento con *composting* y biopilas, pionero en Latinoamérica, y para el 2003 estaba planificada la ingeniería de construcción y detalle.

Uno de los aspectos claves en la recuperación de suelos es la evaluación o cuantificación del grado de toxicidad, para ello se conducen bioensayos con lombrices de tierra. Este bioensayo aplicado por especialistas del área es usado antes y después de la aplicación de la biorremediación en suelos y fosas contaminadas con hidrocarburos, donde se demuestra la eliminación de las fracciones tóxicas (Infante y Vásquez, 1999).

OTRAS INVESTIGACIONES EN RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS.

Además de la capacidad de los microorganismos presentes en suelos contaminados de transformar fracciones del petróleo en compuestos inocuos, se ha demostrado que ciertas especies vegetales pueden incrementar esta capacidad por los microorganismos asociados a la rizósfera o por una incorporación, metabolización en la biomasa aérea o radicular. Este proceso es conocido como fitorremediación (Bossert y Bartha, 1984).

La fitorremediación también aplica para la recuperación de suelos contaminados con metales, ya que determinadas especies vegetales pueden actuar como hiperacumuladoras, extrayendo el metal del suelo y acumulándolo en la biomasa. En este caso debe ser evaluada donde se acumula el metal y tomar en consideración que se debe hacer con el compartimiento. Por ejemplo si es en la biomasa aérea debe ser cosechada, incinerada y/ o recuperado el metal.

Con base en esta capacidad fisiológica de ciertas especies fitorremediadoras, se inició en Venezuela una intensa investigación a partir del año

1999. Se evaluó el efecto del crudo sobre el crecimiento de diversas especies vegetales, cambios en la morfología de las raíces, área superficial, y diámetro entre otras variables de un número significativo de especies recolectadas de suelos contaminados y no con petróleo. Asimismo se llevó a cabo una preselección de las especies presentes en las sabanas venezolanas donde la actividad petrolera es intensa, evaluándose 57 especies, de las cuales 18 pertenecen a las leguminosas, 19 son de la familia de las gramíneas y las restantes pertenecen a las familias de las Rubiáceas, Malváceas y Ciperáceas entre otras. La preselección de especies con capacidad fitorremediadora, estuvo basada en una serie de criterios que incluyen desde el mecanismo de propagación, sistema radicular que alcance el nivel de contaminación explorando el mayor volumen de suelo contaminado, el porcentaje de germinación, la tasa de crecimiento y producción de biomasa aérea y radicular, así como la efectividad en disminuir las concentraciones del hidrocarburo a nivel del suelo (Merkl y col., 2004a; 2004b).

En otro estudio, se evaluó el potencial de la técnica sobre suelos contaminados con crudo pesado donde la biorremediación convencional no es viable, registrándose que al 5 % de crudo presente en el suelo es viable la recuperación de suelos con determinadas especies de gramíneas. Para que la técnica sea efectiva es necesario acondicionar previamente el suelo con agentes estructurantes de naturaleza orgánica, y adicionar nutrientes para llevar el suelo a una relación C/N y C/P que permita el desarrollo de los microorganismos degradadores a nivel de la rizósfera y un adecuado crecimiento de las plantas fitorremediadoras. (Infante y col., 2003). Estos niveles de fertilización son diferentes a los requerimientos por sí solos de las plantas o a los requerimientos de los microorganismos sin las plantas, y por ello es necesario evaluar los niveles adecuados.

Los estudios conducidos en fitorremediación indican la potencialidad de esta modalidad de la biorremediación para restaurar suelo. Sin embargo aún falta mucho por investigar en el país y en general en áreas tropicales, antes de aplicar los resultados a escala comercial.

CONCLUSIONES

El trabajo en equipo de los ecólogos con los estudios de las diferentes disciplinas en el campo de la biología, así como con químicos, agrónomos, geoquímicos, e ingenieros civiles, químicos y de procesos, han hecho posible el desarrollo de tecnologías propias en el país desde el laboratorio al campo, aportando soluciones ambientalmente seguras, de bajo costo y con capital nacional, adaptado a las condiciones tropicales y necesidades del

principal sector industrial contaminante de Venezuela.

El principal desarrollo en materia de recuperación de suelos ha sido enfocado hacia la tecnología de biorremediación, estimulando los microorganismos autóctonos, y mejorando los factores abióticos. Hoy Venezuela cuenta con importantes logros en la materia que inclusive le han llevado a obtener marcas registradas de productos o tecnologías propias y de aplicación masiva y transferencia a todo el sector nacional.

LITERATURA CITADA

- ATLAS, R. M. y R. BARTHA
1998. *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications*. San Francisco, Benjamin Cummings.
- BOSSERT, I. y R. BARTHA
1984. The fate of petroleum in soil ecosystems. En: R. Atlas (Ed.) *Petroleum Microbiology*. New York, Macmillan, pp. 435-474.
- INFANTE, C. y O. GONZÁLEZ
1996. Comparación del proceso de biodegradación de lodos petrolizados en biorreactores y en suelos. *Visión Tecnológica*, 3: 29-34
- INFANTE, C.
1997. Biorremediación de derrames de Hidrocarburo en ambientes naturales. En *Proceedings IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente*, Vol. II, Sección II, Conferencias, pp. 325-328.
- INFANTE, C., M. VIALE-RIGO, M. SALCEDO, J. RODRÍGUEZ, A. MELCHOR, E. BILBAO y R. ARIAS
1997. In situ bioremediation of oil sludges. *Fourth International In Situ and on Site Bioremediation Symposium*, 4: 409-411.
- INFANTE, C. y P. VÁSQUEZ
1999. Explotación Petrolera y Ambiente. *Acta Científica Venezolana*, 50:71-74
- INFANTE, C., M. ROMERO, A. AROCHA, D. GILBERT y F. BRITO
1999. In situ bioremediation of pits from Puerto La Cruz Refinery. *Fifth International in situ and on site bioremediation*, 5:215-219
- INFANTE, C.
2001. Biorrestauración de áreas impactadas por crudo por medio de INTEBIOSâ y BIORIZEâ. *Interciencia*, 26: 503-507
- INFANTE, C., M. ARIAS, G. SANCHEZ, N. LEON y L. SANCHEZ
2001. In situ biostimulation. A key factor in bioremediation. *Sixth International in situ and on site bioremediation symposium. Battelle*, 6: 257-261
- INFANTE, C., L. SÁNCHEZ, N. LEÓN, C. ALARCON y D. M. SALCEDO
2003. Phytoremediation Studies Using a Heavy Crude Oil in Soil. Disponible en: <http://www.battelle.org/environment/er/conferences/biosymp/titles/d1.pdf>
- MERKL, N., R. SCHULTZE-KRAFT y C. INFANTE
2004a. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in the tropics – Pre-selection of plant species from eastern Venezuela. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 7: 185-192
- MERKL, N., R. SCHULTZE-KRAFT y C. INFANTE
2004b. Phytoremediation in the tropics – The effect of crude oil on the growth of tropical plants. *Bioremediation Journal*, 8: 177-184.
- LEAVITT, M.E. y K.L BROW
1994. Biostimulation versus bioaugmentation: Three case studies. En: R.E. Hinchee, R.N. Miller & R.E. Hoepfel (Eds.) *Hydrocarbon Bioremediation*. Boca Raton, CRC Press, pp. 72-70.
- PRADO-JATAR, M., M. CORREA, J. RODRIGUEZ-GRAU y M. CARNEIRO
1993. Oil sludge farming biodegradation experiment conducted at a tropical site in eastern Venezuela. *Waste Management & Research*, 11: 97-106.
- REPÚBLICA DE VENEZUELA, N° 5.245 EXTRAORDINARIO. CARACAS
1998. DECRETO N° 2.635. Reforma Parcial del Decreto N° 2.289 de Fecha 18 de Diciembre de 1998, Publicado en la Gaceta Oficial N° 5.212 Extraordinario de Fecha 12 de Febrero de 1998, contenido de las Normas para el Control de la Recuperación de Materiales Peligrosos y el Manejo de los Desechos Peligrosos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, N° 5.245.
- VENOSA, A. y J. R. HAINES
1991. Screening of commercial inocula for efficacy in stimulating oil biodegradation in closed laboratory system. *Journal of hazardous Materials*, 28: 131-144.