

TRATAMIENTO BIOLÓGICO EN TIERRA DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Daniel Ferrari, Edison Neirotti y Carlos Albornoz (*)

RESUMEN

En el presente artículo se efectúa una revisión sobre la aplicación del tratamiento en tierra para la disposición de residuos industriales sólidos o semisólidos, en particular aquellos generados en refinerías de petróleo. Este es un método biológico que aprovecha la microflora autóctona de la capa superficial del suelo. El carbono orgánico es degradado en parte a anhídrido carbónico y en parte es incorporado a la biomasa microbiana que se acumula en el suelo aumentando su contenido de humus.

Los factores que controlan la velocidad y extensión de la biodegradación son: mezclado, aireación, nutrientes, humedad, pH, temperatura, tipo de compuestos presentes en el residuo, concentración de microorganismos degradadores de hidrocarburos presentes en el suelo, velocidad de aplicación del residuo y presencia de sustancias tóxicas.

El diseño del método debe estimular la capacidad de degradación de los microorganismos así como minimizar los procesos de volatilización, percolación a través del subsuelo, lixiviación y erosión superficial que pueden ocurrir y ser perjudiciales para el medio ambiente. Es necesario un adecuado diseño, operación y

monitoreo del sistema de tratamiento para asegurar que el residuo sea degradado, asimilado e inmovilizado dentro de la zona de aplicación.

Los factores de diseño son: cantidad, composición y frecuencia de aplicación del residuo, características del suelo, subsuelo y del predio, limitaciones de clima, métodos de distribución del residuo, métodos de labranza y estrategia de monitoreo.

La única manera de obtener criterios confiables para la aplicación de este tratamiento es la experimentación en escala piloto con el fin de generar datos apropiados al clima, predio y tipo de residuo a tratar.

1. INTRODUCCION

El tratamiento en tierra es un método biológico natural para la disposición de residuos orgánicos contaminantes. El residuo se distribuye sobre un terreno previamente labrado y se mezcla con la capa superior del suelo (15 a 20 cm). El material orgánico es degradado por los microorganismos del suelo. El método debe ser diseñado y operado de modo de aprovechar y

estimular el proceso biológico, así como de garantizar que los residuos sean degradados, asimilados e inmovilizados dentro de la zona de aplicación. La función primordial del sitio de tratamiento es degradar el residuo y no ser un mero recipiente del mismo.

Este método, referido también como cultivo en tierra (landfarming), ha sido utilizado por la industria del petróleo desde comienzos de los años 50 (10,26). También se ha aplicado a los lodos de las plantas de tratamiento biológico de residuos líquidos y a residuos orgánicos generados en industrias farmacéuticas y químicas (10).

En el presente artículo se revisa la aplicación del landfarming para el tratamiento de residuos, en particular para aquellos generados dentro de la industria petrolera.

2. RESIDUOS QUE PUEDEN TRATARSE

El método se aplica generalmente para el tratamiento de residuos sólidos o semisólidos. En el caso de una refinería de petróleo se podrían tratar los siguientes residuos: fondos de tanques de crudos y de destilados, barros de separadores API, residuos de limpieza de desaladores y cloacas, arcillas

(*) Centro de Investigaciones Tecnológicas, División Investigación y Desarrollo, ANCAP, Pando, URUGUAY

filtrantes y lodos de planta de tratamiento biológico (biosólidos) (4,10,13,20). Con excepción de los biosólidos y las arcillas, los residuos de refinería mencionados tienen un tenor de hidrocarburos variable entre el 10 y el 50% (en peso) (13,20). También es posible tratar tierras contaminadas por derrames o residuos de limpieza producidos en las actividades de perforación y en terminales de abastecimiento (20,21,24).

3. VENTAJAS DEL TRATAMIENTO EN TIERRA

Las principales ventajas del landfarming como método de tratamiento y de disposición de residuos (sólidos y barros) de refinería son las siguientes (1,6,18):

- * Menor costo que otros métodos de tratamiento.
- * No perjudicial para el medio ambiente cuando es adecuadamente diseñado, operado y controlado.
- * Usa un proceso natural que recicla el residuo.
- * Proceso relativamente simple.

Los costos de los sistemas de landfarming varían según las características del suelo y la infraestructura localmente disponible. Según datos de USA se estima un costo de U\$ 30 a U\$ 70 la tonelada (1,25). Datos de Brasil indican un costo de inversión de U\$ 29/m² (22) y un costo de operación de U\$ 17/ton (20).

Otros métodos que compiten con el landfarming son: la incineración y el relleno sanitario en tierra (landfilling).

La incineración es un método muy efectivo para reducir la cantidad de residuo a manejar y en destruir compuestos orgánicos. Requiere el tratamiento de los residuos de la combustión (ceniza, escoria y gases de chimenea). El costo estimado para la incineración según datos de USA oscila entre U\$ 250 y U\$ 500 la tonelada de residuo (4,25). El relleno en tierra es un método de disposición de residuos y no de tratamiento. El costo para el relleno varía entre U\$ 70 y U\$ 550 la tonelada (1). Debido al alto costo de estos métodos, se utilizan cuando es necesario deshacerse de residuos muy peligrosos.

4. PROCESOS QUE OCURREN EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Cuando se aplica un residuo en un suelo pueden tener lugar los siguientes procesos: degradación biológica, lixiviación y erosión superficial, percolación, incorporación en la matriz del suelo y volatilización. Estos procesos son esquematizados en la Figura 1.

La degradación biológica es efectuada por la microflora del suelo. El carbono de las sustancias orgánicas es convertido en parte a anhídrido carbónico y en parte es incorporado a la masa celular microbiana (biomasa microbiana) que se acumula en el suelo incrementando su contenido de humus. La mayor población microbiana del suelo se encuentra en la capa superior. Por ese motivo el landfarming se lleva a cabo en la zona superficial.

Las sustancias no biodegradables, metales pesados, arena, sales minerales son acumuladas en el suelo o bien son percoladas o lixiviadas.

Los fenómenos de lixiviación, percolación, erosión y



**MEDICION
ANALISIS
CONTROL**

**Av. D.A. Larrañaga 3229
11600 MONTEVIDEO
Tel. 80 97 54 / 80 98 57
Fax: 81 98 64**

INGENIERIA Y SERVICIO

Análítica:

Balanzas, Análisis Térmico, Baños, Centrífugas, Colorímetros, Destiladores, Espectrofotómetros, Estufas, Kjeldahl, Microscopía, RH, T, TLC, Viscosímetros, Tituladores.

Industrial:

Básculas industriales y para camiones, Bombas de todo tipo, Celdas de carga, Medidores de energía, de caudal y de nivel, Equipos de ensayo, PLC, Transductores, Variadores de velocidad.

Procesos Térmicos: Esterilizadores automáticos.

Plásticos de Ingeniería:

Envases multicapa y especiales.

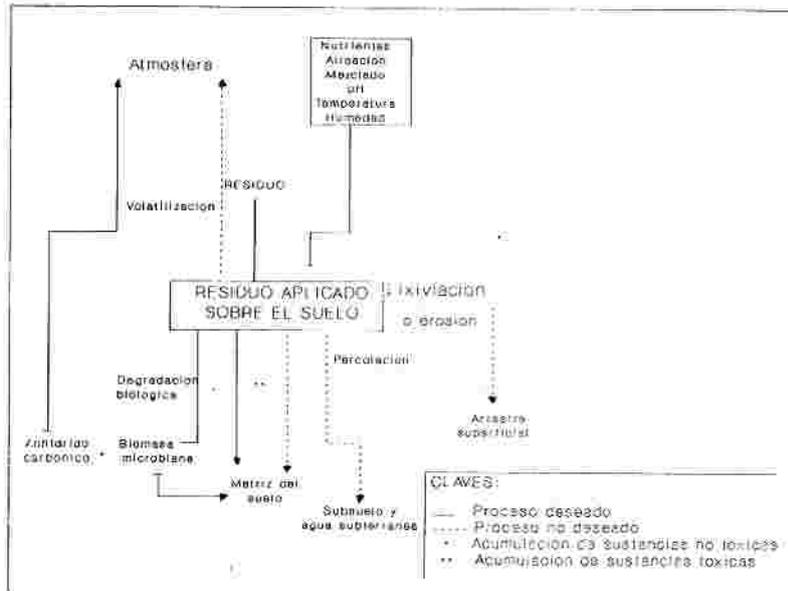
REPRESENTANTES DE:

Mettler, Metrohm, Jenway, Leica (Reichert), Dr. Lange, Hettich, H.B.M., Landis & Gyr, Haenni, Leybold, ITT Fluid, Polysonics, Neptune, Heel, ITA, etc.

volatilización descriptos en la Figura 1 deben ser minimizados para evitar la migración de materiales fuera de la zona de aplicación, lo cual puede producir

efectos perjudiciales en el medio ambiente. También debe ser controlada la acumulación de sustancias tóxicas.

Condiciones aeróbicas son así necesarias para la oxidación microbiana. La disponibilidad de oxígeno es un factor generalmente limitante en la biodegradación de hidrocarburos (14). Algunos estudios han mostrado que la degradación anaeróbica de hidrocarburos es parcial y muy lenta. Sólo se han reportado datos significativos de degradación anaeróbica en compuestos aromáticos oxidados, halogenados y con sustituyentes alquilo (14,16).



5. FACTORES CONTROLANTES DE LA BIODEGRADACION

Es deseable una alta velocidad de biodegradación para lo cual es

necesario suministrar las condiciones que estimulen la proliferación de los microorganismos responsables. En la Tabla I se da una lista de los factores que controlan la velocidad de degradación.

Tabla I:
Lista de factores que controlan la velocidad de biodegradación

* Mezclado	* Temperatura	* Tipo de compuestos
* Aireación	* Humedad	* Velocidad de carga
* Nutrientes	* pH	* Sustancias tóxicas
* Tipo de microorganismos		

5.1 Mezclado y aireación

La velocidad de degradación es influenciada por el grado de contacto físico entre la microflora y el residuo. Por ese motivo las operaciones de distribución y mezclado son fundamentales. Esto se logra mediante el arado de la tierra antes y después de

la aplicación del residuo y posteriormente durante el proceso (cada 7 a 30 días).

Las primeras etapas del catabolismo microbiano de hidrocarburos involucran la oxidación del substrato por oxigenasas para lo cual se requiere oxígeno molecular.

La degradación completa de la materia orgánica requiere proveer una adecuada aireación. Esto es logrado: a) evitando la sobrecarga de residuo y exceso de humedad que obstruyan el pasaje del aire o alteren la estructura porosa del suelo, b) mezclado periódico, c) evitando la aplicación inmediatamente después de llover y d) preparación de un terreno con declive adecuado y drenajes de modo de reducir la acumulación de agua de lluvia. En procesos intensivos se acomoda la mezcla tierra - residuo en pilas, se cubren para protegerlas de las lluvias y se introducen líneas de aireación. También es posible el agregado de minerales como yeso para mejorar la permeabilidad de la capa superior del suelo (4).

5.2 Nutrientes y tóxicos

La asimilación de carbono orgánico en masa celular sólo es posible si hay suficiente cantidad de otros nutrientes. Los microorganismos requieren, además de carbono, de otros elementos para la biosíntesis de sus componentes celulares. Los elementos más importantes en cantidad, que generalmente deben suministrarse son nitrógeno, fósforo y potasio. Cuando se

adiciona sustancia orgánica en un suelo puede producirse un desbalance entre el carbono suministrado y el nivel natural de nutrientes inorgánicos y oxígeno, siendo necesario la fertilización y la aireación.

Para la fertilización se utilizan fertilizantes agrícolas y la aplicación se hace sobre la base de los análisis químicos del suelo y del residuo. La relación carbono-nitrógeno (C/N) que se aconseja disponer luego de la aplicación del residuo varía ampliamente, según la fuente consultada, desde 20 g/g (17) hasta cifras de 60 g/g (7), 250 g/g (9) y 1000 g/g (10). La cantidad de fósforo a adicionar se estima en un 10-20% de la cantidad de nitrógeno suministrada (7,10,19). El nitrógeno y fósforo deben administrarse bajo la forma de compuestos asimilables (urea, sales de amonio, fosfatos).

La alta concentración de sales metálicas puede ser tóxica para el crecimiento de los microorganismos y debe controlarse tanto en el residuo como en el suelo. También debe controlarse la presencia de otras sustancias como ser los pesticidas.

5.3 Temperatura, humedad y pH

Los microorganismos requieren determinadas

condiciones de temperatura, humedad (actividad de agua) y pH para su proliferación.

La temperatura óptima para el crecimiento de la mayoría de los microorganismos está situada entre los 20 y 40°C. La temperatura del suelo cae por razones prácticas fuera del control del operador, sin embargo no es un factor limitante salvo en zonas de temperaturas extremas. El uso del landfarming puede presentar restricciones durante el invierno por lo que se aconseja efectuar el tratamiento en el período primavera - otoño.

La humedad óptima está situada entre 6 y 22% (en peso) que corresponde aproximadamente al 50 y 80% de la capacidad de retención de agua del suelo. En algunos casos para lograr esta humedad se requiere el uso de riego (10,14,20).

El pH óptimo es cercano a 7 con un rango entre 5 y 8. Generalmente no es deseable un pH inferior a 6.5 para evitar el lixiviado de los metales pesados por solubilización. Por este motivo el landfarming es efectuado en el rango de pH 7 a 9 (10,13,14,20). Es frecuente que el pH del suelo se encuentre por debajo de ese rango y deba ser ajustado usando caliza o cal (20).

5.4 Tipo de hidrocarburos

La velocidad de degradación

depende también de la composición del residuo (4,6,13,14,17,23,24). Los hidrocarburos difieren en su susceptibilidad a la degradación microbiana. La biodegradación de mezclas de hidrocarburos es efectuada secuencialmente. Aunque no se cumple universalmente, el orden decreciente de velocidad de degradación sería el siguiente: n-alcanos, alcanos ramificados, aromáticos de bajo peso molecular, y alcanos cíclicos. Los compuestos polares y aromáticos policíclicos de alto peso molecular son considerados recalcitrantes o bien que exhiben una velocidad de biodegradación extremadamente baja (6,14,23).

5.5 Microorganismos y velocidad de carga del residuo

La composición de la comunidad microbiana autóctona y su capacidad de adaptación a la presencia de hidrocarburos influye sobre la velocidad y extensión de la degradación.

Los hidrocarburos son degradados primariamente por bacterias, levaduras y hongos (14). Experiencias de biodegradación efectuadas con cultivos individuales, aislados de ecosistemas contaminados con hidrocarburos, han tenido poco éxito (14,27). Microorganismos individuales solo pueden metabolizar un rango limitado



TINTAS Y POMADAS PARA CUEROS - CERAS PARA PISOS
CERAS ESPECIALES PARA INDUSTRIA
VENTA DE IMPORTACION
COLORANTES - CERAS - GOMA LACA
PARAFINA - RESINA FUMARICA

Cno. Corrales 2863

Tels. 58 54 68 - 58 02 42

de hidrocarburos. Se requiere capacidades enzimáticas globales amplias para degradar mezclas complejas de hidrocarburos por lo que es necesario acudir a poblaciones mixtas.

Conceptualmente sería posible estimular la biodegradación inoculando (sembrando) el terreno con microorganismos especialmente seleccionados y adaptados para metabolizar hidrocarburos (8,9,14,21). Se dispone de productos comerciales consistentes en mezclas de microorganismos que si bien fueron desarrollados para la limpieza de derrames en ambientes marinos y costeros, potencialmente podrían emplearse para estimular la biodegradación en un sistema de landfarming. La referencia 3 da una lista de diez productos comercialmente disponibles y la 21 da cuenta del desempeño promisorio de un producto (IMPLEBAC) desarrollado por el Instituto Mexicano del Petróleo.

La velocidad de aplicación del residuo influye sobre la actividad microbiana. La velocidad de degradación es razonablemente alta en el rango de concentración de hidrocarburos de 1 a 10% (en peso), observándose un rápido incremento en dicho parámetro entre el 1 y el 5%. Por encima del 15% se observa una declinación de la actividad microbiana (14). Una sobrecarga en la aplicación decrece la velocidad de degradación debido a la presencia de componentes del residuo que en alta concentración son tóxicos, a las limitaciones en oxígeno y nutrientes y a la dificultad de labrar la tierra resintiéndolo y la aireación. Un exceso de residuo puede no ser retenido por el suelo y por lo tanto puede provocar contaminación por movilización

de sus componentes hacia fuera de la zona de aplicación. (13,17,18,20,22,26).

Cuando un residuo se aplica por primera vez, los microorganismos presentan una fase de adaptación a las nuevas condiciones que insume un tiempo de quince a treinta días y recién a partir de ese lapso se observa desaparición del residuo. Se dispone de muy pocos datos de velocidad de degradación de hidrocarburos en suelos y son muy dependientes de las características locales y del tipo de residuo tratado.

Tentativamente se podría establecer que sería posible degradar el 90% del residuo aplicado en un período de cuatro a cinco meses (11).

Generalmente se efectúan cargas de manera que no superen el 10%. Es mejor hacer agregados pequeños que efectuar toda la carga a la vez (7). La recarga de residuo permite mantener los microorganismos en actividad, siempre y cuando los períodos entre aplicaciones no sean muy separados de modo de evitar el agotamiento del substrato. Esta modalidad de aplicación reduce también los problemas por sobrecarga mencionados. Una estrategia adecuada sería aplicar el residuo sobre la base del análisis químico de modo de mantener una concentración de hidrocarburos de 5-6%. Mediante sucesivas aplicaciones es posible alcanzar, en situaciones favorables, un nivel de carga equivalente a una concentración de hidrocarburos en el suelo del 15-25% (10,11).

Datos recogidos para distintas refinerías indican un nivel de carga del 5-10% y una tasa de aplicación anual comprendida entre 5 y 27 kg de hidrocarburos por metro cuadrado

6. FACTORES DE DISEÑO

Un conjunto de factores necesitan ser considerados en el diseño de una unidad de landfarming. Los mismos están relacionados con las características del o de los residuos a tratar, con las características del sitio y con la velocidad de degradación. Una lista de estos factores se da en la Tabla II. El diseño comprende también la estrategia de seguimiento del proceso.

Los datos requeridos sobre los residuos a tratar se incluyen en la Tabla II. La adquisición de los mismos implica el desarrollo de una estrategia de muestreo así como la ejecución de un conjunto grande de análisis químicos, muchos de los cuales son muy laboriosos.

El predio debe ser seleccionado y acondicionado de modo de proveer un buen soporte para los procesos de biodegradación minimizando la fuga de material a zonas aledañas (aguas superficiales, tierras vecinas, aguas subterráneas y atmósfera). En la Tabla II se resume la información requerida sobre el predio y el suelo. La adquisición de esta información exige también tareas de muestreo, ejecución de análisis, ensayos físicos, estudios geológicos y topográficos. El sitio utilizado debe estar alejado de zonas residenciales y tener el acceso restringido. Debe tener adecuado declive y canalizaciones que permitan el drenaje y la recolección del agua superficial. Las aguas recogidas deben ser analizadas para evaluar si requiere tratamiento antes de su disposición final.

Tabla II: Lista de factores requeridos para el diseño de una unidad de Landfarming

A - Cantidad prevista de residuos.		
B - Composición de los residuos:		
		* pH
		* Agua
		* Aceite y grasa
		* Carbono orgánico total
		* Sólidos totales, fijos y volátiles
		* Hidrocarburos: Alifáticos, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos
		* Fenoles
		* Hidrocarburos poliaromáticos
		* Metales: As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, V, Zn
C - Frecuencia de generación de los residuos		
D - Limitaciones de clima para las operaciones		
E - Características del suelo y subsuelo:		
	Suelo	Subsuelo
* Microorganismos totales: bacterias, hongos	✓	
* Microorganismos degradadores de hidrocarburos	✓	
* Nutrientes: N, P, K, Na, Mg, Al, Ca	✓	
* Metales: As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, V, Zn		✓
* pH	✓	
* Capacidad de intercambio catiónico	✓	
* Hidrocarburos	✓	✓
* Aceite y grasa	✓	✓
* Carbono orgánico total	✓	✓
* Agua	✓	
* Tipo de suelo (textura)	✓	✓
* Permeabilidad	✓	✓
* Densidad aparente	✓	
* Porosidad	✓	
* Distancia del acuífero	✓	
F - Características del predio:		
* Area		
* Ubicación		
* Declive (pendiente)		
G - Características del agua subterránea:		
* pH		
* Demanda química de oxígeno		
* Carbono orgánico total		
* Aceite y grasa		
* Sólidos disueltos totales		
* Iones principales: Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁼		
* Metales: As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, V, Zn		
H - Método de distribución del residuo y de labrado del terreno		
I - Seguimiento del proceso (Monitoreo)		

El suelo (capa superior de aproximadamente 20 cm de profundidad) debe tener moderadas cantidades de las fracciones arena y arcilla. Excesiva cantidad de arena favorece la percolación de material. Por otra parte un exceso de arcilla aumenta la retención de agua, dificultando las tareas de aireación y mezclado.

El subsuelo (capa por debajo de los 20 cm de profundidad) debe tener baja permeabilidad de modo de evitar la contaminación de aguas subterráneas. Si dicho parámetro es alto, puede ser atenuado incluyendo una capa de material arcilloso o de material de construcción impermeabilizante.

La permeabilidad admitida está determinada por la distancia a que se encuentra el agua subterránea.

En la Tabla III se dan valores para algunos factores. Algunos de ellos son parámetros de operación. Aquellos que están relacionados directamente con la velocidad de degradación fueron discutidos en la sección precedente. Estos valores se dan como referencia. La obtención de criterios seguros para el diseño de una unidad de landfarming requiere la experimentación en escala piloto como única forma de disponer de datos apropiados para el clima, el suelo y los tipos de residuos a tratar.

Tabla III:
Valores de referencia para algunos factores de diseño de una unidad de landfarming.

* Carga de residuo: 5-10% (en peso, base seca)
* Velocidad de aplicación de hidrocarburos: 10-20 kg/m ² /año
* pH del suelo: 7-9
* Frecuencia de arado: 7 a 30 días
* Humedad del suelo: 10-20% (base húmeda)
* Profundidad promedio de la capa de suelo reactiva: 20 cm
* Permeabilidad del subsuelo: menor de 1×10^{-6} cm/s
* Distancia mín. del acuífero: 1m de capa de baja permeabilidad
* Pendiente del terreno: Mínima 1%, Máxima 9%
* Capacidad de intercambio catiónico: mínimo 0.2 eq/kg

7. SEGUIMIENTO DEL PROCESO

Algunas fallas detectadas en el funcionamiento de una unidad de landfarmig son atribuidas más a un pobre diseño y/o mala operación, que a carencias conceptuales. El buen funcionamiento de la unidad es asegurado mediante el diseño de una adecuada estrategia de seguimiento de los procesos que tienen lugar.

Los objetivos del monitoreo

son:

- 1) Evaluar el desempeño de la unidad de landfarming.
- 2) Cuantificar el impacto sobre el medio ambiente.
- 3) Determinar la velocidad de aplicación del residuo compatible con la velocidad de asimilación del sistema.

Para alcanzar esos objetivos es necesario:

- 1) Evaluar la degradación de los hidrocarburos en la capa superior (capa reactiva).
- 2) Evaluar la acumulación en

el suelo de metales y sustancias no biodegradables.

3) Evaluar la presencia de contaminantes en el subsuelo.

4) Controlar la presencia de contaminantes en aguas naturales superficiales.

5) Controlar la migración de contaminantes hacia el subsuelo y aguas subterráneas.

Para el seguimiento es necesario efectuar periódicamente una serie de análisis los cuales han sido indicados en la Tabla II.

Para poder evaluar el impacto ambiental de la operación de la unidad de landfarming es necesario disponer antes de su puesta en funcionamiento, de los datos analíticos estadísticos que reflejen las condiciones iniciales del medio ambiente. Por ese motivo dicha información se incluyó entre los factores de diseño.

Para el monitoreo de la degradación se requiere analizar la población microbiana y el nivel de hidrocarburos en la capa superior del suelo así como disponer de la composición del residuo a aplicar. Se recomienda efectuar los muestreos antes de cada aplicación del residuo y posteriormente con una frecuencia mensual (20,22).

La acumulación de contaminantes en la capa reactiva y en aguas superficiales se controlan cada dos meses (20).

Los análisis del subsuelo requieren la extracción de un cilindro de tierra con maquinaria de perforación cubriendo una profundidad superior a los 30 cm. Se aconseja efectuar los muestreos cada seis meses (20,22).

Para el análisis de aguas subterráneas es necesario construir pozos profundos de monitoreo para acceder al acuífero. Los muestreos generalmente se efectúan semestralmente (2,20,22).

8. CONCLUSIONES

La biodegradación en tierra es un método seguro para el tratamiento y disposición de residuos orgánicos sólidos o semisólidos, siempre y cuando sea adecuadamente diseñado, operado y monitoreado. Presenta además ventajas comparativas frente a otros métodos alternativos. Poca información documentada hay disponible sobre el funcionamiento de unidades industriales de tratamiento en tierra. También son escasos los datos informados sobre velocidad de biodegradación.

Por otra parte los mismos tienen un valor relativo para su aplicación fuera de las condiciones locales en que fueron obtenidos. El diseño confiable de una unidad de landfarmig exige la experimentación previa para obtener datos de biodegradación apropiados para el residuo particular a tratar y para las condiciones locales de suelo y clima.

La aplicación de este método resulta en la destrucción de los componentes orgánicos del residuo por lo que es necesario analizar previamente la factibilidad técnico-económica de su recuperación, reuso o reciclado.

Los mayores esfuerzos de investigación debieran aplicarse sobre el desarrollo y uso de microorganismos especializados y adaptados para la biodegradación de los componentes más recalcitrantes o persistentes y sobre el metabolismo anaeróbico de hidrocarburos y compuestos relacionados.

9. REFERENCIAS

1. ALCONSULT International LTD.

Guideline for the Management of Petroleum Refinery Solid Wastes. Under contract to Petro-Canada/CIDA

2. Alberta Environment, 1988. Guidelines for land treatment of industrial waste. Environmental Protection Services, Government of Alberta, Canada, June.

3. Brown, L.R. 1987. Oil-degrading microorganisms. Chem. Eng. Prog., Oct: 35-40.

4. Brown, R.A. y R.T. Cartwright, 1990. Biotreat sludges and soils. Hydrocarbon Processing, Oct/90: 93-96.

5. Casarini, D.C.P.; R.M. de Macedo, R.G. de A. Cunha y J.C.O. Mauger, 1988. The development of assessment techniques to evaluate the biodegradation of oily sludge in a landfarming system. Wat. Sci. Tech., 20(10): 231-236.

6. Connan, J. y A. Restlé, 1984. La biodegradación de los hidrocarburos en los reservorios. Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine, 8(2): 291-302.

7. Dibble, J.T. y R. Bartha 1979. Effect of Environmental Parameters on the Biodegradation of Oil Sludge. Appl. Environ. Microbiol. 37: 729-739.

8. Didyk, B.M. y M.L. Costa, 1978. Biodegradación de derrames de petróleo. Bol. Téc. de Arpel, 7(2-3): 25-30.

9. Goldstein, R.M.; L.M. Mallory y M. Alexander, 1985. Reasons for possible failure of inoculation to enhance biodegradation. Appl. Environ. Microbiol., 50(4): 977-983.

10. Huddleston, R.L., 1979. Solid-waste disposal: Landfarming. Chem. Eng., 26: 119-124.

11. Instituto Colombiano del Petróleo, 1991. Biodegradación de lodos aceitosos. Escala laboratorio, planta piloto. Informe final. Centro de Investigación Promoción y Desarrollo, ICP, Piedracueva, Santander, Setiembre.

12. Jobson, A.; M. McLaughlin; F.D. Cook y D.W. Westlake, 1974. Effect of amendments on the microbial utilization of oil applied to soil. Appl. Microbiol., 27: 166-171.

13. Knowlton, H.E. y J.E. Rucker, 1979. Landfarming shows promise for refinery waste disposal. The Oil and Gas Journal, May 14: 108-116.

14. Leahy, J.G. y R.R. Colwell, 1990. Microbial degradation of hydrocarbon in the environment. Microbiol. Rev., 54(3): 305-315.

15. Marshall, T.R. y J.S. Devinny, 1988. The microbial ecosystem in petroleum waste land treatment. Wat. Sci. Tech., 20(11/12): 285-291.

16. Mihelcic, J.R. y R.G. Luthy 1988. Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Compounds under Various Redox Conditions in Soil-Water Systems. Appl. Environ. Microbiol. 54: 1182-1187.

17. Paineira, M.T.; M.T. Molo; G. Vecchioli; M.T. Del Panno, M. Carry; S. Succar y A.G. Sangiovanni, 1986. Degradación microbiológica de hidrocarburos contenidos en barros residuales. En: Conexpo Arpel'86, Buenos Aires, Argentina.

18. Petro-Canada Inc. 1988. Guidelines for land treatment of oily wastes, Canada, Dec 1988.

19. Petro-Canada Inc. Operational Manual for land treatment of oily wastes (Provinces of Alberta and British Columbia), Canada.

20. Pinto, S., 1986. "Landfarming" de residuos oleosos projeto e operação. En: 3º Congresso brasileiro de petróleo, 5-10 de outubro, Rio de Janeiro, Brasil.

21. Ramos, F.; J.A. Zermeño y S. Villa, 1989. Biodegradación de petróleo en suelo por un producto biológico. Rev. Inst. Mexicano del Petróleo, XXI(4): 17-22.

22. Rangel, C.M.P.; J.H. Frantz y M. Bastiani, 1988. Landfarming for treatment and disposal of oily wastes originating in the South Petrochemical Complex. Wat. Sci. Tech., 20(10): 221-230.

23. Raymond, R.L.; J.O. Hudson y V.W. Jamison, 1976. Oil degradation in soil. Appl. Environ. Microbiol., 31(4): 522-535.

24. Song, H.G. y R. Bartha, 1990. Effects of jet fuel spills on the microbial community of soil. Appl. Environ. Microbiol., 56(3): 646-651.

25. Vervalin, C.H. 1989. Bioremediation on the move. Hydrocarbon Processing, Aug/89: 50-52.

26. Wimberley, W.F., 1989. To dispose of waste wisely... Hydrocarbon Processing, Aug/89: 45-49.

27. Wyatt, J.M. 1988. Biotechnological Treatment of Industrial Waste Water. Microbiol. Sci. 5: 186-190.