

# El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México

JUAN ANTONIO VELASCO  
Y TANIA LORENA VOLKE SEPÚLVEDA



## ¿QUÉ ES LA BIORREMEDIACIÓN?

El concepto de biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, entre otros), para remover (extraer), degradar (biodegradar) o transformar (biotransformar) compuestos orgánicos tóxicos en productos metabólicos menos tóxicos o inocuos (Van Deuren *et al.* 1997: 19). Los procesos

biológicos que involucran enzimas como catalizadores pueden modificar moléculas orgánicas produciendo cambios en su estructura así como en sus propiedades toxicológicas, incluso dar como resultado la completa conversión de dichos compuestos en productos inorgánicos como agua, CO<sub>2</sub> o formas inorgánicas de N, P y S, además de componentes celulares

y productos de las rutas metabólicas (mineralización) (Alexander 1994: 3, Eweis *et al.* 1998: 9).

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio (autóctonos) o ajenos a éste (exógenos), y llevarse a cabo en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno). Al igual que otras tecnologías de remediación, la biorremediación puede realizarse en el mismo sitio sin necesidad de excavar el material contaminado (*in situ*), o bien excavándolo para tratarlo en el sitio (*on site*) o fuera de él (*ex situ*) (Eweis *et al.* 1998: 9). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados por hidrocarburos totales del petróleo (HTP), solventes, explosivos, clorofenoles, pesticidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Van Deuren *et al.* 1997: 19, Semple *et al.* 2001: 18).

#### **LAS TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN**

El uso de tecnologías de biorremediación para el tratamiento de sitios contaminados es relativamente reciente y presenta varias ventajas respecto de los métodos físico-químicos tradicionales (Eweis *et al.* 1998: 9). Algunas de estas ventajas son: (i) bajos costos de instalación y operación; (ii) es una tecnología simple y de fácil aplicación; (iii) es un tratamiento seguro con un mínimo de riesgos a la salud y (iv) es tecnológicamente efectivo.

De acuerdo con estudios realizados en los Estados Unidos de América y el Reino Unido, el mercado de la biorremediación para el tratamiento de suelos contaminados se ha incrementado debido a que los costos pueden reducirse entre 65% y 80%, respecto de los métodos físico-químicos (Zechendorf 1999:21). La aceptación de la biorremediación como una estrategia de limpieza viable depende, en muchos casos, de sus costos. Es decir, cuando el método biológico

propuesto es menos costoso que los tratamientos físicos y químicos viables para el tratamiento de un sitio y de un contaminante en particular. Asimismo, muchas de las estrategias de biorremediación son competitivas en términos de costos y eficiencia sobre una matriz contaminada (Semple *et al.* 2001:18). Entre las tecnologías de biorremediación más comunes, se encuentran las siguientes:

- (i) *Bioestimulación*. Implica la adición de oxígeno y/o nutrientes al suelo contaminado con el fin de estimular la actividad de los microorganismos autóctonos y con ello la biodegradación de los contaminantes (Van Deuren *et al.* 1997:19).
- (ii) *Bioaugmentación*. Consiste en la adición de microorganismos vivos que tienen la capacidad de degradar el contaminante en cuestión y así promover su biodegradación o biotransformación (Riser-Roberts 1998: 14).
- (iii) *Biolabranza*. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve (labra) periódicamente para favorecer su aireación. Durante la biolabranza, el suelo contaminado se mezcla con suelo limpio (Van Deuren *et al.* 1997: 19).
- (iv) *Bioventeo*. Consiste en estimular la biodegradación aerobia de un contaminante por medio del suministro de aire en el sitio contaminado (Van Deuren *et al.* 1997: 19).
- (v) *Fitorremediación*. Es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos o sedimentos (Van Deuren *op. cit.*: 19).
- (vi) *Biorreactores*. Es la tecnología más adecuada para casos en que los peligros potenciales de descargas y emisiones sean serios. Permite la combinación controlada y eficiente de procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoran y aceleran la biodegradación (Riser-Roberts 1998: 14).

(vii) *Biodegradación en fase sólida*. Este tipo de tecnología generalmente se lleva a cabo *ex situ*, e incluye el composteo, las pilas estáticas y las pilas alargadas, proceso que se describe con detalle más adelante.

## LAS TECNOLOGÍAS DE BIORREMEDIACIÓN EN MÉXICO

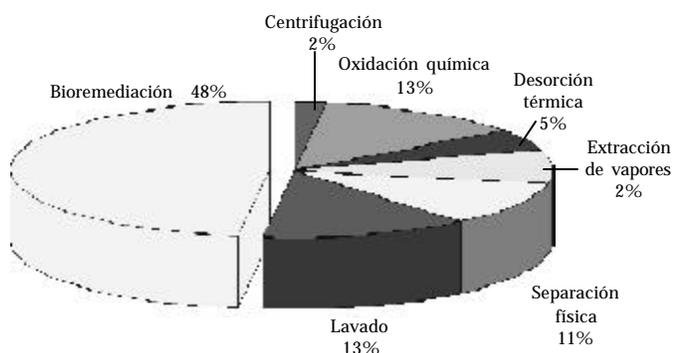
En el mercado ambiental de nuestro país existe actualmente una cantidad considerable de empresas nacionales e internacionales que ofrecen diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Asimismo, con el propósito de establecer un control acerca de las tecnologías que se ofrecen y conocer sus posibilidades reales de éxito, se inició en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México el 18 de agosto de 1997 la aplicación obligatoria de la Licencia Ambiental Única (LAU) para todas aquellas empresas que realizan trabajos de remediación de suelos. Ello de conformidad con el acuerdo sectorial publicado en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) del 11 de abril de 1997. Posteriormente, se publicó el acuerdo delegatorio respectivo en el DOF del 3 de diciembre de 1998, y a partir del 4 de enero de 1999 la LAU es emitida por las delegaciones federales de la otrora SEMARNAP en los estados de Aguascalientes, Baja California, Coahuila, Chihuahua, México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz. Para el resto de los estados, el trámite de la licencia está centralizado.

Todas las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisos para remediar suelos contaminados están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados por compuestos orgánicos. Dentro de los contaminantes tratados con mayor frecuencia se encuentran los HTP y los HAP, lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación. De un total de 57 empresas autorizadas,

ninguna ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados por metales (SEMARNAT 2002).

De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados por diferentes tipos de contaminantes, dentro de las tecnologías más comúnmente empleadas se encuentran las biológicas (biorremediación, con 48%), siendo las más utilizadas el composteo y la biolabranza. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías más empleadas en México (gráfica 1).

GRÁFICA 1. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS UTILIZADAS EN MÉXICO POR EMPRESAS AUTORIZADAS



Fuente: SEMARNAT 2002: 16.

A pesar de que existe información acerca de las tecnologías de biorremediación que se emplean en México, se aprecian ciertas deficiencias en el manejo y conocimiento de estos procesos por algunas de las empresas dedicadas a esta actividad. Este hecho se debe, en parte, a que muchas de ellas no cuentan con profesionales en microbiología y/o biotecnología, debido a que su principal actividad para realizar los trabajos de biorremediación consiste en importar formulaciones (concentrados bacterianos o enzimáticos, agentes tenso activos y mezclas de nutrientes, entre otros) para

venderlas en México. Muchos de estos productos, además, carecen de información acerca del contenido y su eficiencia no se ha demostrado para las condiciones climáticas de nuestro país (Saval 1998: 15).

Algunas empresas venden el servicio de biorremediación completo, en el que se incluye la excavación del suelo contaminado, el suministro de productos y su aplicación. En estos casos, los contratistas siguen las instrucciones del fabricante para la aplicación de los productos, sin entender las bondades y limitaciones de estos procesos a los que llaman «tecnología». Afortunadamente, no todo el panorama es negativo, ya que también existen empresas responsables que cuentan con personal calificado y capacitado para realizar trabajos de biorremediación (Saval 1998: 15).

En este artículo se pretende dar a conocer algunos aspectos generales, así como los beneficios y limitaciones de una de las alternativas tecnológicas de biorremediación que se ha aplicado con gran éxito a nivel mundial para la restauración de suelos contaminados por hidrocarburos: la biodegradación en fase sólida, específicamente el composteo. Se presentan los principales aspectos técnicos, así como sus características generales, destacando el amplio campo de aplicación de esta tecnología en nuestro país, debido a sus condiciones climáticas.

## **EL COMPOSTEO COMO ESTRATEGIA DE BIORREMEDIACIÓN**

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. 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 esca-

la, 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 (Eweis *et al.* 1998: 19, Semple *et al.* 2001: 18).

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: 9). 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: a) asegurar la generación del calor necesario para el proceso; b) mejorar el balance y disponibilidad de nutrientes (C/N) para la actividad microbiana y c) aumentar la porosidad de la composta y con esto la aireación y capacidad de retención de agua (Alexander 1994: 3, Eweis *et al.* 1998: 9, Semple *et al.* 2001: 18).

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: 18).

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: 11). 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 coleccionar lixiviados y alguna forma de aireación (Eweis *et al.* 1998: 9).

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 *ibid.*).

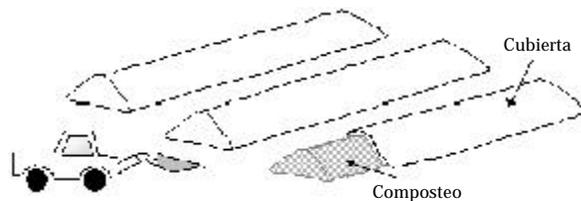
Dos de los sistemas de biopilas más empleados son las biopilas alargadas (figura 1) y las biopilas estáticas (figura 2). La diferencia entre ambas tecnologías radica en el método de aireación que se emplea para proveer de oxígeno al proceso de composteo (Eweis *ibid.*).

#### *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 bio-

degradación 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 (gráfica 2), que puede realizarse una vez al día (EPA 1995) o bien una vez al mes (Sellers *et al.* 1993:17).

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN SISTEMA DE BIOPILAS ALARGADAS

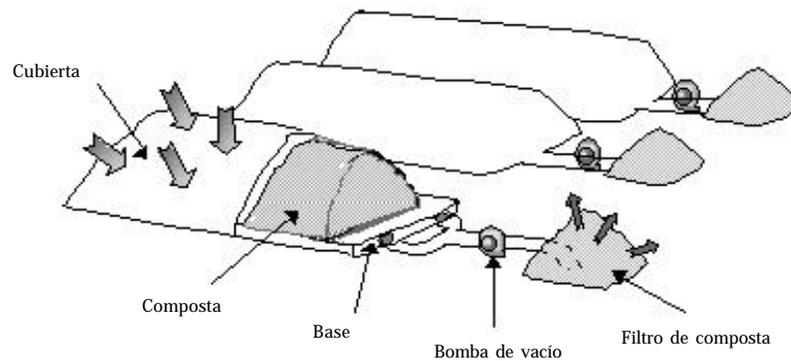


#### *Biopilas estáticas*

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 (figura 2). 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 *op. cit.*).

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

FIGURA 2. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN SISTEMA DE BIOPILAS ESTÁTICAS



de oxígeno al proceso de composteo, permitiendo así establecer una relación entre el flujo de aire y la actividad microbiana a través del tiempo (Eweis *op. cit.*).

#### *Las etapas del proceso*

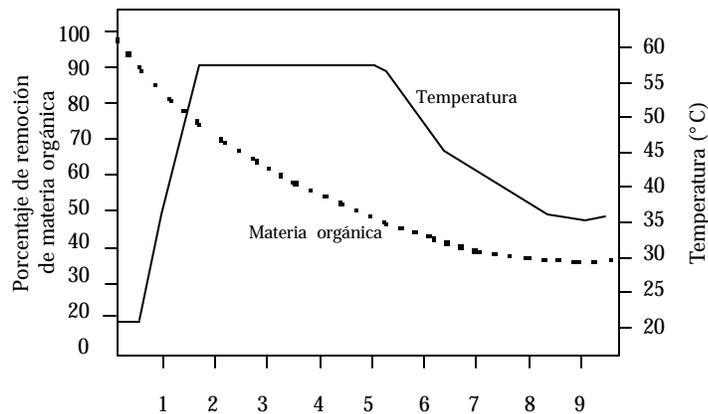
De acuerdo con las características del proceso de composteo, en la etapa inicial es necesaria una aireación eficiente (alto flujo de aire), debido a que en esta etapa existe una acelerada actividad microbiana. Este aumento en la actividad microbiana provoca un aumento en la demanda de oxígeno y un rápido aumento en la generación de calor metabólico, produciéndose temperaturas que se elevan hasta un rango termófilico (50 a 60 °C) (EPA 1998: 8). Sin embargo, generalmente durante el composteo de suelos contaminados adicionados con agentes de volumen, el estado termofílico no se logra, por lo tanto, la temperatura no excede a los 45 °C (Semple *et al.* 2001: 18).

Después de un cierto tiempo la actividad microbiana disminuye, debido a que los componentes fácilmente biodegradables son consumidos. En esta etapa el requerimiento de oxígeno y la temperatura disminuyen gradualmente, por lo que la composta requiere una menor aireación (menor flujo de aire). En

la gráfica 2, se muestra la relación entre la degradación de compuestos orgánicos (función de la actividad microbiana) y los perfiles de temperatura dentro de la composta en el tiempo. De acuerdo con esta relación se puede emplear un programa analógico que regule automáticamente la velocidad de flujo del aire en función de la temperatura que se registra en la composta (EPA *op. cit.*).

El aumento y la caída en el perfil de la temperatura pueden usarse, a menudo, para monitorear el desempeño de una pila de composteo. Una vez que la pila se enfría y la temperatura dentro de ésta se aproximan a la temperatura ambiente, el periodo de composteo activo puede considerarse completo. Otras características que indican el éxito de un proceso de composteo son el cambio en la textura y el olor de la pila en la etapa final. Al inicio del proceso se generan olores fuertes y desagradables, mientras que en la etapa final desaparecen y el olor es parecido al de tierra de jardín. Por su parte, la textura de la mezcla es mucho más homogénea que al inicio. Estos cambios en el olor y textura son el resultado de la biodegradación de la materia orgánica, que al pasar de forma sólida a gaseosa, da como resultado una reducción en el tamaño de la biopila. Dependiendo de

GRÁFICA 2. REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y PERFILES DE TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTEO



la cantidad de material orgánico mezclado con el suelo, puede esperarse que la masa de la biopila se reduzca hasta en 40% (Eweis *et al.* 1998: 9).

#### FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UNA BIOPILA

Las condiciones óptimas y el éxito de un proceso de composteo dependen de diversos parámetros, los cuales pueden resumirse en tres categorías: las características del suelo, las condiciones climáticas y las características de los contaminantes. Una de las ventajas que ofrece la tecnología *ex situ* como es el caso de las biopilas, el poder controlar dichas condiciones. Los parámetros que deben considerarse y controlarse para aumentar la eficiencia de un proceso de composteo se resumen en el cuadro 1.

Un factor clave en el diseño de un proceso exitoso de composteo radica en la selección de su composición y contenido de aditivos y/o agentes de volumen, lo cual conlleva a un aumento en la velocidad de biodegradación de los contaminantes. Sin embargo, si se emplea una gran cantidad de aditivos, el área necesaria para el tratamiento se incrementa (Eweis *idem.*).

Una de las condiciones recomendadas para el empleo de este tipo de tecnología de biorremediación para suelos es el clima cálido, donde el rango de la temperatura oscile entre 20 y 40 °C, debido a que estos sistemas requieren temperaturas de operación entre 5 y 40°C (Eweis *idem.*). La temperatura de operación de una biopila normalmente debe encontrarse entre los 30 y 40 °C (etapa mesofílica) o entre 50 y 60 °C (etapa termofílica) y depende principalmente del calor generado por la actividad metabólica de los microorganismos en la composta y por las condiciones climáticas del lugar (Eweis *idem.*).

No obstante, en países con climas fríos (con temperaturas medias anuales menores a 10 °C), que actualmente emplean biopilas como sistema de biorremediación de suelos, el clima no representa problema alguno debido a que utilizan equipos de calentamiento auxiliares (inyección de aire caliente), para poder mantener una temperatura adecuada en la biopila. Sin embargo, este procedimiento genera un incremento considerable en los costos de operación (Eweis *et al.* 1998).

De acuerdo con lo anterior, México es una región idónea para aplicar este tipo de tecnologías ya que aunque cuenta con gran diversidad de climas, el 50.9% del territorio nacional presenta climas cálidos

CUADRO 1. PARÁMETROS A CONSIDERAR Y SUS RANGOS ÓPTIMOS DURANTE UN PROCESO DE COMPOSTEO PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR COMPUESTOS ORGÁNICOS

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO
Humedad	40 -85%; 50 - 80% de la capacidad de campo pH 6 - 8; con un óptimo de 7
Relación de nutrientes (C:N:P:K) <sup>*</sup>	100: (3.3-10):(0.5-1):(0.1-1)
Relación C/N; C/P; C/K <sup>**</sup>	10-30; 100-200; 100-1000
Relación suelo-aditivos (peso seco)	1.5:1 a 3:1
Temperatura	25-35 °C
Contaminante(s)	< 50,000 mg/kg
Metales tóxicos	< 2,500 mg/kg
Cuenta bacteriana	> 1,000 UFC <sup>***</sup> /g suelo seco

<sup>\*</sup> C:N:P:K se refiere al contenido (en peso) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en relación a 100 partes (en peso) de carbono (C). <sup>\*\*</sup> C/N, C/P y C/K se refiere a las relaciones (en peso) de cada elemento relativas al carbono. <sup>\*\*\*</sup> UFC: unidades formadoras de colonias.

Fuentes: EPA 1997:7, Ewis *et al.* 1998: 9, Iturbe-Aregüelles *et al.* 2002: 1, Von Fahnestock *et al.* 1998:20.

y templados con temperaturas que oscilan entre los 20 a 26 °C y 18 a 22 °C, respectivamente.<sup>1</sup>

Además, es en las costas y en las regiones bajas del país (Chiapas, Oaxaca, Tampico, Veracruz, Hidalgo, entre otras) con temperaturas medias anuales entre 25 y 28 °C (máxima de 41 °C), es donde se localiza la mayoría de los sitios contaminados por hidrocarburos del petróleo, como consecuencia de las actividades de la industria petrolera (PEMEX 2001: 12).

#### PRINCIPIOS BÁSICOS

La construcción de una biopila de composteo (alargada o estática) requiere que se realicen básicamente los siguientes pasos (Von Fahnestock *et al.* 1998: 20).

1) Acondicionamiento de un área que sirva de base para la biopila, cuya dimensión dependerá de la cantidad de suelo a tratar. La base puede ser un

suelo arcilloso compactado, concreto o polietileno de alta densidad. Se recomienda la instalación de un sistema de recolección de lixiviados mediante canales o tubos. Los lixiviados pueden ser almacenados en un tanque e incorporados a la biopila mediante un sistema de irrigación.

- 2) Excavación del suelo contaminado. Se recomienda que antes de realizar esta actividad se lleve a cabo un estudio del sitio para conocer las características del suelo y del contaminante a tratar.
- 3) Transportación del suelo al sitio de tratamiento. Es recomendable que éste se encuentre lo más cercano posible al sitio en donde se localiza el suelo contaminado.
- 4) Acondicionamiento de la biopila. En esta fase deben adicionarse los agentes de volumen así como los nutrientes y agua necesarios. En algunos casos se recomienda la adición de microorganismos con capacidades metabólicas para de-

gradar a los contaminantes. Para el caso de suelos intemperizados se recomienda la adición de surfactantes para facilitar la desorción de los contaminantes.

- 5) Instalación del sistema de aireación. En el caso particular de las biopilas estáticas es necesario que antes de formar la biopila se instale el sistema de aireación sobre la base (figura 2).
- 6) Mezclado del suelo y colocación del material sobre la base. No existe una medida ideal establecida para el largo y ancho de las pilas, lo que generalmente depende del volumen de suelo a tratar y del área disponible. En el caso de biopilas estáticas se recomienda que no excedan los 2.5 m de altura, con el fin de evitar problemas de difusión del aire a través de la composta.
- 7) Finalmente la biopila debe cubrirse con un material inerte (grava, aserrín, polietileno de baja densidad, entre otros). En el caso de las biopilas estáticas, se requiere de la instalación de tubos de respiración.



no o por la producción de bióxido de carbono en el vapor de salida de la biopila. Es recomendable realizar esta medición al menos en los primeros tres meses del tratamiento.

El resultado de estos análisis es de gran importancia para determinar el estado en el que se encuentra la biopila, lo que permite ajustar cada parámetro hasta obtener las condiciones óptimas de operación. De esta manera, es posible ajustar el pH, las velocidades del flujo de inyección o extracción de aire, el mezclado de la composta, la adición de agua, de nutrientes y, en algunos casos, de microorganismos exógenos adaptados para degradar cierto tipo de contaminantes.

#### OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

Con la finalidad de optimizar la operación de la biopila, es recomendable realizar el monitoreo y análisis rutinario del suelo contaminado durante el periodo de tratamiento. Las pruebas que generalmente se realizan son de dos tipos: a) fisicoquímicas que incluyen determinaciones de pH, temperatura, contenido de humedad y de nutrientes, concentración de oxígeno en el interior de la composta y concentración del (los) contaminante (s) y b) biológicas que sirven para cuantificar la población y actividad microbiana, así como la capacidad de biodegradación de los contaminantes presentes en el suelo (Von Fahnestock *idem*).

En las biopilas estáticas con sistema de inyección o extracción de aire, se puede determinar la actividad microbiana durante el tiempo real del proceso de composteo, mediante la medición del consumo de oxígeno

#### APLICACIONES Y VENTAJAS DEL COMPOSTEO

La técnica del composteo puede aplicarse para tratar suelos y sedimentos contaminados por compuestos orgánicos biodegradables. Y se ha usado con éxito para la remediación de suelos contaminados por pentaclorofenol (PCP), gasolinas, HTP e HAP. Se ha demostrado también, que es posible reducir la concentración y toxicidad de algunos explosivos (TNT) hasta niveles aceptables (Van Deuren *idem*, Semple *idem*). En el cuadro 2 se resumen algunos estudios de aplicaciones de sistemas de composteo para la remediación de suelos contaminados por HTP.

CUADRO 2. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ALGUNOS ESTUDIOS REALIZADOS A ESCALA PILOTO Y GRAN ESCALA DONDE SE HAN APLICADO PROCESOS DE COMPOSTEO PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HTP.

TIPO DE BIOPILA	SUELO (M <sup>3</sup> ) Y CONCENTRACIÓN	CONTAMINANTE (DÍAS) INICIAL	TIEMPO (%)	REMOCIÓN	FUENTES
Alargada Estática	100	HTP: 20,000 ppm	104	43 50	Abiola <i>et al.</i> 1997
Alargada Estática	500 250	HTP: 40,000 ppm HTP: 20,000 ppm	450	70	Hiroyuki <i>et al.</i> 1999
Alargada Estática	0.4	Diesel: 50,000 ppm	45	94	Cunningham y Philip 2000
Estática	27	HTP: 30,000 ppm	154	80	Iturbe <i>et al.</i> 2002

Algunas de las principales ventajas que presentan los sistemas de composteo, y en general las tecnologías de biorremediación, se resumen a continuación (Alexander 1981:2, Eweis *idem*, Semple *idem*, Iturbe-Argüelles *et al.* 2002: 11).

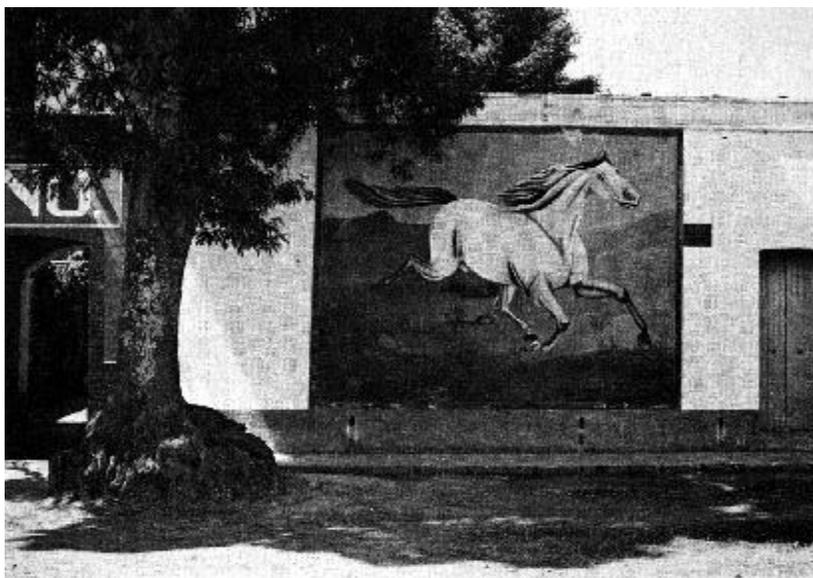
- Son sistemas económicamente factibles, comparados con las tecnologías térmicas y fisicoquímicas tradicionales.
- Son tecnologías relativamente simples, comparadas con la mayoría de las tecnologías tradicionales. El diseño y la construcción de las biopilas son relativamente sencillos.
- Pueden considerarse estrategias efectivas y ambientalmente «amigables», ya que biotransforman parcial o totalmente los contaminantes en biomasa y productos estables e inoocuos.
- El objetivo del composteo es la biodegradación (destrucción) y detoxificación de contaminantes, mientras que otras tecnologías, como la adsorción en carbón activado, el lavado, el confinamiento y solidificación/estabilización, únicamente

transfieren los contaminantes de un medio a otro. Una consecuencia común de la actividad microbiana es la detoxificación de químicos tóxicos. El suelo biorremediado con el uso de sistemas de composteo no necesita ser confinado posteriormente.

#### DESVENTAJAS Y LIMITACIONES DEL COMPOSTEO

Algunas de las limitaciones que presenta el uso del sistema de composteo (Van Deuren *idem*, Eweis *idem*) son:

- Está limitado a contaminantes orgánicos.
- Concentraciones muy altas de contaminantes pueden resultar tóxicas e inhibir la biodegradación. En el caso de hidrocarburos (HTP) es recomendable que la concentración no exceda de 50,000 ppm. Por otra parte, concentraciones de metales pesados mayores a 2,500 ppm pueden inhibir el crecimiento microbiano.
- Una disminución en la actividad microbiana provoca una disminución en la degradación y



aumenta el periodo del tratamiento. Por ello, el éxito del proceso depende de la capacidad para poder crear y mantener las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento microbiano.

- . Existe el riesgo de que ciertos compuestos originalmente inocuos puedan ser convertidos en productos tóxicos para una u otra especie.
- . Es necesario contar con un espacio adecuado para montar los sistemas.
- . El suelo contaminado debe excavarse, lo que puede provocar la liberación de compuestos orgánicos volátiles.
- . El arrastre de vapores durante el proceso de aireación requiere de tratamiento antes de descargar a la atmósfera.
- . Existe un incremento volumétrico del material a tratar por la adición de los agentes de volumen. Sin embargo, este problema queda solucionado con el tiempo de tratamiento.
- . En general, los procesos de biorremediación requieren mayor tiempo de tratamiento que los físicos y químicos.

#### **COSTOS Y TIEMPOS DE BIORREMEDIACIÓN**

Generalmente, los costos de las tecnologías de biorremediación se encuentran entre los \$ 100 y \$ 250 USD/m<sup>3</sup>, a diferencia de los costos de tecnologías más convencionales, como la incineración o la construcción y manejo de confinamientos controlados, que oscilan entre los \$ 250 y \$ 1,000 USD/m<sup>3</sup> (Van Deuren *idem*). Para el caso particular de las biopilas, los costos estimados se encuentran entre los \$ 25 y \$ 150 USD/m<sup>3</sup> (Semple *idem*, Potter 2000: 13). Estos costos varían principalmente por los siguientes factores: (i) cantidad y tipo de suelo a tratar; (ii) disponibilidad de agentes de volumen; (iii) tipo de contaminantes, (iv) tipo de proceso a emplear; (iv) necesidad de tratamientos previos y posteriores; (v) necesidad de equipos para el control de compuestos orgánicos volátiles y (vi) condiciones climáticas.

Los tiempos de tratamiento (cuadro 2) pueden oscilar desde algunos meses hasta uno o dos años, dependiendo del tipo y condiciones del suelo, de la biodisponibilidad del contaminante y de las condiciones climáticas del sitio.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El sistema de composteo es actualmente una de las tecnologías de biorremediación más utilizada a nivel mundial para la remediación de suelos contaminados principalmente por hidrocarburos. El incremento en su aplicación se debe a que sus procesos son sencillos, tecnológicamente efectivos y sus costos son bajos en comparación con la mayoría de las tecnologías fisicoquímicas.

Sin embargo, aunque las tecnologías de composteo para la remediación de suelos contaminados son procesos relativamente sencillos de implementar y desarrollar, requieren del conocimiento de los factores (biológicos, físicos y químicos) involucrados. Para esto, es necesaria la incorporación de equipos multidisciplinarios de trabajo integrados por microbiólogos, biotecnólogos, químicos, edafólogos, ingenieros, entre otros.

En el marco del desarrollo sustentable, el proceso de composteo presenta importantes perspectivas para resolver muchos de los problemas de contaminación por hidrocarburos en México. Por ello, es necesario llevar a cabo con seriedad, responsabilidad y con un amplio conocimiento, la aplicación de esta tecnología como alternativa para la biorremediación de estos sitios contaminados.

Antes de aplicar algún proceso de composteo para la remediación de un sitio en particular, es indispensable contar con información completa del mismo (origen de la contaminación, caracterización del suelo y del contaminante a tratar) y establecer pruebas de biodegradación del contaminante por microorganismos autóctonos o exógenos para, posteriormente, seleccionar el tipo de tecnología con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento.

Las tecnologías de composteo en particular y de biorremediación en general, son procesos viables de aplicación para la remediación de suelos contamina-

dos por compuestos orgánicos en México ya que usualmente, la mayor parte de su territorio, cuenta con las condiciones climáticas adecuadas, con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 18 y 26 °C, propicias para emplear estos tipos de procesos.

## NOTAS

1 Las regiones con clima cálido se subdividen en regiones cálido-húmedas (4.7% del territorio) y cálido-subhúmedas (23% del territorio). La temperatura media anual para ambos tipos de clima oscila entre 22 y 26 °C, con regiones en donde se superan los 26 °C. Por su parte, el clima templado también está subdividido en húmedo (2.7% del territorio) y subhúmedo (20.5% del territorio), en los que se registran temperaturas anuales entre los 18 y 22 °C (INEGI 2002: 10).

## BIBLIOGRAFÍA

- Abiola A. y Olenyk, M. 1997. Effects of amendment surfactants on bioremediation of hydrocarbon contaminated soil by composting. *34th. Annual Soil Science Workshop*. Alberta, Canadá.
- Alexander, M. 1994. *Biodegradation and bioremediation*. Academic Press, San Diego. 302 pp.
- . 1981. Biodegradation of chemicals of environmental concern. *Science* 211: 132-138.
- Cunningham, C. y J. Philip 2000. Comparison of bioaugmentation and biostimulation in *ex situ* treatment of diesel contaminated soil. *Land Contamination and Reclamation* 8(4): 261-269.
- Chino, H. H. Tsuji, Y. Ishikawa, T. Matsubara, M. Al-awadhi, R. Tala at Balba y R. Al-daher 1999. Bioremediation of oil-contaminated soil in Kuwait (Part 2): *ex situ* biological treatment technologies. *The Fifth International in situ and on site Bioremediation Symposium*, pp. 249-256.
- EPA 1998. An analysis of composting as an environmental remediation technology. EPA530-R-98-008.

- . 1997. Innovative uses of compost: Bioremediation and pollution prevention. EPA530-F-97-042.
- . 1995. Remediation Case Studies: Bioremediation. EPA-542-R-95-002.
- Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P. Chang y E.D. Schroeder 1998. *Bioremediation principles*. McGraw-Hill International Editions. 296 pp.
- INEGI 2002. <http://www.inegi.gob.mx>.
- Iturbe-Argüelles, R., C. Flores-Torres, C. Chávez-López, C. y A. Roldán-Martín 2002. Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología III* (1): 25-35.
- Petróleos Mexicanos 2001. *Informe 2001: Seguridad, salud y medio ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental. PEMEX, México.
- Potter, C.L. 2000. Biopile treatment of soils contaminated with hazardous waste. *Seminar Series on Bioremediation of Hazardous Waste Sites*. Vol. 10, pp. 1-5.
- Riser-Roberts, E. 1998. *Remediation of petroleum contaminated soils*. Lewis Publishers. 542 pp.
- Saval, S. 1998. Biorremediación de suelos y acuíferos. Situación actual y perspectivas en México. *Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C.* Vol.3, pp. 71-76.
- SEMARNAT 2002. Comunicación personal con personal de la Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes.
- Sellers, K., T.A. Pedersen y C. Fan 1993. Review of soil mound technologies for the bioremediation of hydrocarbon contaminate soil. En: E. Calabrese y C. Bell (eds.). *Hydrocarbon contaminated soil*, vol. III. Lewis Publishers.
- Simple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environ. Pollution*, 112: 269-283.
- Van Deuren, J., Z. Wang y J. Ledbetter 1997. *Remediation technologies screening matrix and reference guide*. Tercera edición. Technology Innovation Office, EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.
- Von Fahnestock, F., B. Wickramanayake Godage, W.R. Michael Major y R.J. Dratzke 1998. *Biopile design, operation, and maintenance handbook for treating hydrocarbon-contaminated soils*. Battelle Press Editions. 163 pp.
- Zechendorf, B. 1999. Sustainable development : How can biotechnology contribute? *Tibtech* 17: 219-225.




---

**Juan Antonio Velasco Trejo** es Jefe del Departamento de Investigación Aplicada en Residuos del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) del Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). Correo e: [jvelasco@ine.gob.mx](mailto:jvelasco@ine.gob.mx).

**Tania Lorena Volke** Sepúlveda es Subdirectora de Proyectos Regionales y Evaluación de Sitios Contaminados de la misma Dependencia. Correo e. [tvolke@ine.gob.mx](mailto:tvolke@ine.gob.mx).

Ambos autores publicaron a finales de 2002 el libro *Tecnologías de remediación para suelos contaminados* (INE).

**Fotografías:** Colchón, 1927 (página 41). Odres, 1932 (página 49). Paisaje y galope, 1932 (página 51). Trabajadores en un parque de Chicago, 1936 (página 53).