

# La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México

OSCAR ORTÍNEZ BRITO, IRINA IZE LEMA Y  
ARTURO GAVILÁN GARCÍA



## INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos ha provocado en el mundo un grave problema de contaminación de los suelos y los cuerpos de agua.

En México, la industria del petróleo en su conjunto ha tenido un impacto negativo en materia ambiental. Debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo, no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la

fase de explotación hasta la obtención de los productos petroquímicos básicos. El problema de los suelos contaminados con hidrocarburos radica en que hasta hace pocos años no existía conciencia del grado de la dificultad y el costo que representa la remediación de los suelos y cuerpos de agua contaminados para la sociedad, por lo que es más caro remediar que prevenir (Saval 1995).

## ANTECEDENTES

El desarrollo económico en México ha favorecido la concentración territorial de la industria. Hasta 1970 no se aplicó ningún criterio ambiental para su desarrollo, aunque ya se tenían indicios de un impacto ambiental creciente sobre la contaminación ambiental y la generación de residuos. Las políticas de bajos precios en Petróleos Mexicanos (PEMEX) provocó un uso más frecuente del petróleo y por lo tanto un crecimiento más acelerado de la demanda energética. A mediados de la década de los 70, hubo una reestructuración masiva de la industria, debido al crecimiento petrolero por lo que la petroquímica básica se convirtió en una de las actividades con mayor contribución a la contaminación, al igual que la producción de fibras sintéticas, resinas, fertilizantes, plásticos, pinturas, pigmentos y gases industriales que pasaron a ser las actividades más relevantes por su impacto potencial al ambiente (Quadri 1994).

La industria petrolera está constituida por las siguientes áreas: prospección, explotación, producción, refinación y procesamiento de gas. Es una de las industrias más importantes por el volumen de producción, generación de empleos y necesidades que satisface, entre ellas la obtención de gasolina y lubricantes para la industria y el transporte.

La infraestructura petrolera está integrada por pozos, baterías de separación, complejos procesadores de gas, centrales de almacenamiento y bombeo, red de ductos y presas para el confinamiento de desechos sólidos y líquidos procedentes de la perforación y mantenimiento de los pozos.

Por las diferentes actividades industriales que efectúa, PEMEX contamina potencialmente el ambiente por emisión de humos, polvos, gases y descargas de aguas residuales generadas durante la perforación de pozos petroleros, en la extracción de líquidos, por la refinación y en la producción de petroquímicos. Las instalaciones poseen riesgos inherentes de fugas

de petróleo, diesel y gasolina por roturas de los ductos, en la filtración de aguas aceitosas desde las presas y los derrames del agua aceitosa de las presas por inundaciones durante el periodo de lluvias. Además, la transportación de petróleo crudo y productos refinados en buques tanque y tuberías tienen implícita la posibilidad de derrames que pueden contaminar suelo, agua y atmósfera.

## PEMEX REFINACIÓN

Esta área lleva a cabo múltiples y variadas acciones para reducir las emisiones de contaminantes, contando con un inventario de emisiones atmosféricas de todas las refinерías, el cual se elaboró mediante un programa que incluyó la instalación de 261 puntos de muestreo en las chimeneas de proceso (Viejo 1995).

Los residuos generados por las actividades de esta industria, como son catalizadores gastados y lodos aceitosos, por citar algunos, son depositados en tambores, patios y fosas rústicas, previo a su tratamiento y disposición final en sitios autorizados. Existe el interés por parte de PEMEX de rehabilitar los suelos contaminados. De acuerdo con la información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinерía «Lázaro Cárdenas» y el Pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México (Veracruz y Tabasco).

## GESTIÓN AMBIENTAL

En nuestro país, las auditorías ambientales surgen de la necesidad de verificar las emisiones y la contaminación de agua y suelo por la industria ya instalada, destacando que México cuenta con una escasa y reciente experiencia en la aplicación de este instrumento de política ambiental. El único informe disponible al público se elaboró en 1995, en el cual la

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) reporta que en el lapso de 1992 a 1994, se realizaron 179 auditorías ambientales y estuvieron en proceso otras 221. El informe señala que en las instalaciones de PEMEX se practicaron 22 auditorías entre las que destacan: Terminal marítima Pajaritos, Coatzacoalcos; Terminal de almacenamiento y distribución, Nuevo Laredo; Terminal de almacenamiento y distribución, Mexicali; Terminal de almacenamiento y distribución, Nogales; Terminal de almacenamiento y distribución Rosarito; y La Cangrejera, Coatzacoalcos (Bojórquez y García 1995).

Las instalaciones que han recibido certificado de industria limpia son las más importantes de PEMEX, que comprenden 4 refinerías, 10 centros de procesamiento de gas y 7 centros petroquímicos; además se añadieron 53 terminales de almacenamiento y distribución, y diversos ductos e instalaciones de explotación de crudo (PEMEX 2000). Se atendieron más de 9 mil recomendaciones que surgieron de las auditorías a fin de cumplir con la normatividad ambiental y mejorar las prácticas operacionales, minimizar riesgos, evitar emisiones y derrames, así como mejorar la imagen institucional. De los 400 certificados entregados por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) en el país, 92 corresponden a instalaciones de PEMEX de un programa de 289, lo que ubica a esta empresa a la vanguardia de la gestión ambiental e industrial de México.

La PROFEPA entregó certificados de industria limpia a diez instalaciones de PEMEX Exploración y Producción, dos a PEMEX Refinación, uno a PEMEX Gas y Petroquímica Básica y otra más a PEMEX Petroquímica. Asimismo, se otorgaron ocho refrendos, de los cuales seis fueron para PEMEX Gas y Petroquímica Básica y dos para PEMEX Petroquímica (PEMEX 2000).

En el informe anual de PEMEX de 1999 se establece que el derrame de hidrocarburos representó el 0.3% de las emisiones y descargas totales. El 56% de este volumen fue consecuencia de los 93 derra-

mes ocurridos en instalaciones de PEMEX Refinación (PR). El volumen restante se debió a los 763 derrames en instalaciones de PEMEX Exploración y Producción (PEP). En términos de hidrocarburos líquidos transportados por ductos en tierra, PEP derramó 14.3 barriles por cada millón de barriles transportados mientras que PR derramó 17.1.

## **LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN MATERIA DE HIDROCARBUROS**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) menciona las actividades que pueden causar desequilibrio ecológico particularmente para las actividades petroleras debido a obras hidráulicas, vías de comunicación, oleoductos, gasoductos y barbotuctos.

La LGEEPA establece los aspectos para atender la contaminación del suelo con 11 artículos, destacando los criterios de prevención y control de la contaminación, alteración nociva en el proceso biológico de los suelos, los riesgos y problemas de salud, y el control de los residuos. Si existe la presencia de materiales o residuos peligrosos deberán llevarse a cabo acciones necesarias para recuperar o restablecer las condiciones del sitio, evitar su acumulación y se depositen o infiltren en los suelos, así como realizar el manejo y disposición final de los mismos.

En nuestro país no existen normas con respecto a los límites permisibles de hidrocarburos en el ambiente (suelo, agua y aire), por lo que se ha recurrido a referencias de organismos internacionales (Canadá, Países Bajos y Estados Unidos de América) (Saval 1995).

En México, la PROFEPA ha manejado criterios de limpieza desarrollados por el Grupo de trabajo sobre restauración de suelos contaminados conformado por esta dependencia. Estos criterios se encuentran en la norma emergente NOM-EM-138-ECOL-2002 (ver cuadro 1).

CUADRO 1. LÍMITES PERMISIBLES PARA HIDROCARBUROS (NOM-EM-138-ECOL-2002)

CONTAMINANTES	USO PREDOMINANTE DEL SUELO			MÉTODO ANALÍTICO (EPA)
	AGRÍCOLA, FORESTAL, RECREATIVO Y DE CONSERVACIÓN	RESIDENCIAL COMERCIAL	INDUSTRIAL	
<i>GASOLINA</i>				
HIP	200.00	200.00	500.00	8015B
Benceno	20.00	20.00	50.00	8240,* 8260*
Tolueno	40.00	40.00	100.00	8240,* 8260*
Xilenos	40.00	40.00	100.00	8240,* 8260*
<i>Diesel</i>				
HIP	1,000.00	1,000.00	2,000.00	8015B
Benzo[a]pireno	0.08	0.08	0.80	8310,* 8270*
Benzo[a]antraceno	0.80	0.80	8.00	8310,* 8270*
Benzo[b]fluoranteno	0.80	0.80	8.00	8310,* 8270*
Benzo[k]fluoranteno	8.00	8.00	80.00	8310,* 8270*
Criseno	80.00	80.00	800.00	8310,* 8270*
<i>Productos aceitosos</i>				
HIP	1,000.00	1,000.00	2,000.00	418.1
Benzo[a]pireno	0.08	0.08	0.75	8310,* 8270*
Benzo[a]antraceno	0.80	0.80	7.50	8310,* 8270*
Benzo[b]fluoranteno	0.80	0.80	7.50	8310,* 8270*
Benzo[k]fluoranteno	8.00	8.00	75.00	8310,* 8270*
Criseno	80.00	80.00	750.00	8310,* 8270*

\* Métodos analíticos alternativos

<sup>1</sup> Para usos de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados.

- El Grupo de trabajo de restauración de suelos contaminados ha definido aspectos relevantes para la elaboración de una guía de evaluación de daños ambientales y propuestas de restauración. Destaca lo siguiente:
1. Acciones de contención, evaluación y restauración de los suelos
  2. Decisión de evaluar propuestas de restauración
  3. Criterios en el muestreo de suelo
  4. Evaluación de técnicas y preparaciones comerciales para destruir o transformar los contaminantes presentes en los suelos.

## PRINCIPALES FUNCIONES DEL SUELO

El suelo y subsuelo constituyen un recurso natural difícilmente renovable que desempeña funciones como medio filtrante durante la recarga de los mantos acuíferos y la protección de los mismos en el lugar donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y las redes tróficas, además de ser el espacio donde se realizan las actividades agrícolas, ganaderas y ser el soporte de la vegetación (Saval 1995).

## CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo (Chappín 1988, PEMEX 1988).

Se consideran como una mezcla compleja de gases, líquidos y sólidos, existiendo cantidades combinadas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de contener compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales (PEMEX 1988, Wood 1974).

El petróleo tiene una proporción de 76 a 86% de carbono y 10 a 14% de hidrógeno. Los hidrocarburos se clasifican de la siguiente forma:

- Hidrocarburos biogénicos: éstos son sintetizados por casi todas las plantas, animales terrestres y marinos, incluyendo a la microbiota, bacterias, plancton marino, diatomeas, algas y plantas superiores (Bedair y Al-Saad 1992).
- Hidrocarburos antrópicos: éstos son introducidos como resultado de la actividad humana. Los procesos de combustión industrial contribuyen con la contaminación debido principalmente al humo generado por la quema del carbón, combustibles fósiles y petróleo refinado, las descargas de aguas municipales, las actividades de transporte y los derrames son algunas de las principales fuentes de estos contaminantes (Bidleman *et al.* 1990).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), producidos por las actividades humanas, están formados por dos o más anillos de benceno fusionados, los cuales difieren en el número y posición del anillo aromático.

Su importancia está relacionada con la movilidad debido a su peso molecular: los HAP de alto peso molecular son relativamente inmóviles y, por ende, de baja volatilidad y solubilidad. Algunos compuestos como naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenentreno, antraceno, fluoranteno y pireno por mencionar algunos, son considerados como contaminantes prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, USEPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Europea (CE) debido a sus efectos carcinogénicos (Menzie *et al.* 1992).

Estos compuestos se encuentran distribuidos en el suelo, mar, sistemas pluviales y sedimentos y su presencia se ha atribuido principalmente a los derrames de petróleo y descargas de plantas petroquímicas, aun cuando se puede deber al transporte atmosférico por los aportes de la combustión (Padilla 1989).

## HIDROCARBUROS EN EL AMBIENTE

Las características determinantes de los hidrocarburos en el ambiente son las siguientes: densidad, presión de vapor, coeficiente de partición de suelo, polaridad (McBride 1994), electronegatividad, hidrofobicidad (característica química más importante usada para asegurar lo siguiente: (a) movilidad química, (b) estabilidad química, (c) acumulación química, (d) bioacumulación química y (e) sorción química en el ambiente), y solubilidad en agua. La alta solubilidad de un compuesto químico promueve su mayor movilidad, y tiene menor probabilidad de ser acumulativo, bioacumulativo, volátil y persistente. Como compuesto químico altamente soluble es propenso a

ser biodegradado y metabolizado por los microorganismos (Ney 1990), el contenido de materia orgánica del suelo o sedimento es importante en la adsorción de los contaminantes orgánicos (Ney 1990).

El coeficiente de distribución agua-suelo/sedimento (Kd) de contaminantes no polares es fuertemente dependiente del contenido de materia orgánica del suelo o sedimento (fom) o alternativamente del contenido de carbón orgánico del suelo/ sedimento (foc) (Chiou *et al.* 1998). Se expresa la siguiente relación:

$$K_{oc} = K_d / f_{oc}$$

El cuadro 2 muestra el destino de los contaminantes orgánicos en el ambiente en función de su coeficiente de distribución en suelo y solubilidad en el agua.

## HIDROCARBUROS EN EL SUELO

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas antes mencionadas. Además, las características

del medio, como son la unidad del suelo, permeabilidad, estructura, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del manto freático, factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto definen el tamaño y la distribución tridimensional del frente de contaminación en una zona específica.

En el cuadro 3 se indican algunos parámetros del compuesto químico, suelo y ambiente que influyen en el transporte a través del suelo.

Los compuestos orgánicos ligeros como gasolinas, aceites y petróleo crudo tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea. Los compuestos orgánicos densos, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden moverse en dirección del flujo del agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad.

La presencia de contaminantes en el suelo se ha conceptualizado a través de observaciones indirectas

CUADRO 2. RELACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS Y SU DESTINO EN EL AMBIENTE

SUELO	Koc > 10,000 SA < 10 PPM	Koc DE 1, 000 A 10,000 SA 10 - 10,000 PPM	Koc < 1,000 SA > 1,000 PPM
Adsorción	Sí	Otra vía	N*
Movilidad	N	Otra vía	Sí
Acumulación	Sí	Otra vía	N
Bioacumulación	Sí	Otra vía	N
Contaminación a la cadena alimenticia	Sí	Otra vía	N
Solubilidad	N	Otra vía	Sí
Persistencia	Sí	Otra vía	N
Disipación	Sí	Otra vía	Sí

N\*: denota insignificante. Koc: coeficiente de partición en suelo. SA: solubilidad al agua.

CUADRO 3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN SUELO

PARÁMETROS DEL CONTAMINANTE	PARÁMETROS DEL SUELO	PARÁMETROS AMBIENTALES
Solubilidad	Contenido y retención de agua	Temperatura
Presión de vapor	Porosidad, densidad y permeabilidad	Precipitación
Número y tipo de grupos funcionales	Contenido de arcilla	Evapotranspiración
Polaridad	Contenido de materia orgánica	
	Profundidad de agua subterránea	

que indican la acumulación de los contaminantes orgánicos en asociación con adsorbentes naturales (Luthy *et al.* 1997), estableciéndose los siguientes procesos: absorción a la materia orgánica en forma, amorfa o natural o en líquidos de la fase no Acuosa (LFNA), condensada o en polímeros o residuos de combustión, adsorción a superficies orgánicas húmedas (hollín, adsorción en superficies minerales (cuarzo) y adsorción dentro de los micro poros o en minerales (zeolitas).

Elías Munguía y Martínez (SEMARNAP 1996), concluyeron que las propiedades físicas del suelo más afectadas por derrames de hidrocarburos son:

- La estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados
- Aumento de la retención del agua en la capa superficial
- El potencial hídrico

Probablemente el componente más importante del suelo en relación con la persistencia de sustancias tóxicas es la arcilla. La persistencia aumenta cuanto más pequeñas son las partículas debido a que aportan una área superficial mayor para la adsorción de los productos químicos.

Las propiedades químicas del suelo más afectadas por un derrame de hidrocarburos son:

- Aumento de carbono orgánico, ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable
- Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos
- Aumento del manganeso y hierro intercambiable
- Aumento del fósforo disponible (SEMARNAP 1996). Los efectos tóxicos de los hidrocarburos en el ambiente dependerán de:
  - La cantidad y composición del petróleo
  - La frecuencia y tiempo de exposición
  - El estado físico del derrame
  - Las características del sitio donde sucedió el derrame
  - Variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno
  - El uso de dispersantes químicos (está restringido su uso)
  - La sensibilidad de la biota específica del ecosistema impactado (SEMARNAP 1996)

#### **TÉCNICAS DE BIOREMEDIACIÓN USADAS EN LA RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN MÉXICO**

Una de las prácticas que más se usó en el pasado fue la utilización de microencapsuladores para estabilizar presas de crudo. Estos productos actúan por

adsorción de hidrocarburos y los retienen en su estructura interna, pero la mayoría de estas cápsulas no contienen componentes químicos capaces de llevar a cabo la biodegradación para descomponer el petróleo encapsulado.

Existen algunos compuestos contaminantes no polares (aceites y grasas, hidrocarburos aromáticos halogenados), así como algunos compuestos orgánicos polares (alcoholes, ácidos orgánicos) que pueden retardar o inhibir la hidratación adecuada de los encapsulados evitando así su correcta cementación o endurecimiento. Por esto, los sitios quedan vulnerables a la contaminación del agua freática en caso de que se rompa la estructura de retención. Otra desventaja de esta técnica es el manejo del volumen de material tratado.

En algunos sitios contaminados con hidrocarburos se han aplicado productos a base de detergentes, con el fin de hacer un lavado del suelo y separar la matriz (suelo, sedimento o agua) del hidrocarburo a un costo considerable.

Los surfactantes que se usan en el lavado del suelo, debido a su alta solubilidad, movilizan contaminantes orgánicos adsorbidos o no absorbidos al suelo. Además, éstos tienden a inhibir la actividad microbiana sobre las moléculas del contaminante.

En nuestro país se utilizó esta tecnología para la limpieza de 45,000 toneladas de sedimentos contaminados con hidrocarburos en diversas zonas del país. Al principio el proyecto se ejecutó con gran éxito debido a las características de los sitios contaminados, sin embargo ciertas propiedades del sedimento como la textura (alto contenido de arcillas) y el contenido de materia orgánica resultó una limitante para esta tecnología.

En diferentes sitios contaminados por la industria petrolera mexicana se aplica el concepto de la bioremediación con regulares resultados debido a problemas en la estimulación de las bacterias y del monitoreo continuo de los sitios. Sin embargo, estas experiencias son promisorias y deben continuarse en el futuro.

Las otras alternativas de tecnología como el proceso de incineración, la desorción térmica, la extracción con vapor o la vitrificación resultan demasiado costosas o ecológicamente incompatibles para considerarse como soluciones viables.

#### **UN ESTUDIO DE CASO DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ECUADOR**

La tecnología antes aplicada y usada mundialmente como una alternativa ecológica compatible y de bajo costo fue financiada por las empresas Petroecuador, City/Alberta Energy y la Unión Europea, las cuales cofinanciaron el proyecto.

Anteriormente, centenares de presas de crudo alrededor de las plataformas de perforación en el oriente ecuatoriano fueron utilizadas como vertederos de desechos tóxicos. Estas presas abiertas habían sido cubiertas con una simple capa de tierra, por lo cual el suelo llegó a mezclarse con los contaminantes debido a la fuerza de gravedad, y el crudo se derramó por rebosamiento en los sistemas pluviales adyacentes. El programa de muestreo en el sitio arrojó valores iniciales del contenido total de hidrocarburos (TPH) de entre 50,000 y 120,000 ppm en las presas cerradas.

Se procedió a preparar áreas de tratamiento alrededor de las plataformas en cuya base se colocó un revestimiento impermeable y se estableció una red de drenaje para recuperar el agua superficial de escorrentía, que sirvió como agua de riego en el proceso de remediación. El siguiente paso fue la excavación de las presas, el contenido de las cuales se distribuyó en una biopila con una profundidad máxima de 30 centímetros.

#### **A) EL PODER DESCONTAMINANTE**

El ecosistema natural está trabajando sin descanso en respuesta a la contaminación con hidrocarburos.

Se sabe perfectamente que algunas bacterias del suelo aumentan el proceso microbiológico el cual puede, a su vez, degradar y descomponer el aceite mineral y restituirlo al ciclo natural en una forma no tóxica. La naturaleza puede subsanar incluso los peores daños ambientales ocasionados por hidrocarburos del petróleo empleando para ello su capacidad de regeneración, siempre y cuando tenga tiempo para hacerlo.

Para lo anterior, podrían ser necesarias varias decenas de años hasta que el crudo se haya descompuesto totalmente, a menos que el hombre promueva el proceso apoyando a los microorganismos en este trabajo.

#### B) LA LIMPIEZA

Se aplicaron varias cepas de bacterias nativas condicionadas por especialistas. Las plataformas de tratamiento en tierra fueron aireadas periódicamente con una herramienta de labranza y regadas cuando era necesario. El principio básico del proceso de bioremediación consiste en la destrucción de la estructura de los hidrocarburos para convertirlos en los componentes no tóxicos del bióxido de carbono, agua y biomasa. Esto se logra mediante el cultivo de bacterias endémicas con capacidad de adaptación a las condiciones ambientales y a las características del suelo en el sitio de tratamiento.

Las muestras microbiológicas originales (blancos) fueron tomadas de los perfiles del suelo alrededor de los sitios contaminados. El proceso en cuestión consistió en la inoculación del material contaminado por petróleo con varias cepas de microorganismos combinadas con aminoácidos, enzimas, vitaminas, minerales y nutrientes. Con esto, se mejora la bioreceptividad y la capacidad metabólica de las bacterias, aumentando así su capacidad de oxigenación y mineralización de los hidrocarburos.

#### C) LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se utilizó un sistema de monitoreo independiente, contratando dos laboratorios distintos. Los servicios de análisis y control se hicieron cada 21 a 30 días, en los sitios de tratamiento de suelos. En esta fase se trataron con éxito aproximadamente 140,000 toneladas de suelos en plataformas; se recuperaron en su totalidad 35 sitios contaminados, y se aplicó una tecnología de bajo costo y ecológicamente compatible. Se obtuvieron niveles de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) muy inferiores a las 5,000 ppm, valor que había determinado el gobierno ecuatoriano en casos anteriores. Las plataformas en las que se aplicó el tratamiento por más de 90 días alcanzaron valores de TPH por debajo de 3,000 ppm.

La concentración de hidrocarburos totales de petróleo está disminuyendo rápidamente con el tiempo, incluso en un entorno adverso y con alta pluviosidad que no suele ser una condición favorable para este tipo de tratamiento de suelos. Los sitios siguen siendo analizados sistemáticamente, después de nueve meses de iniciado el proceso, y los suelos satisfacen las normas internacionales aplicables a la concentración total de hidrocarburos. Cabe señalar que la bioremediación no es aplicable en aquellos casos en que los suelos han sido contaminados por metales pesados y otros compuestos recalcitrantes.

En comparación con las tecnologías disponibles, la bioremediación, aun de larga duración (más de 90 días) y de extensa labor, alcanza costos de limpieza por tonelada de suelo tratado considerablemente más bajos que cualquier otra tecnología disponible en el mercado.

#### BIBLIOGRAFÍA

Bedair, H. M. y H. T. Al-Saad 1992. Dissolved and Particulate Adsorbed Hydrocarbons in Water of Shatt Al-

- Arab River, Iraq. *Water, Air, Soil Pollution* 61: 397-408.
- Bidleman, T. F., A. A. Castleberry, W. T. Foreman, M. T. Zarank y D. W. Wall 1990. Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Studies in the Southeastern United States. *Est. Coast Shelf Science* 30: 91-109.
- Bojorquez, T. L. A. y O. García 1995. Aspectos metodológicos de la auditoría ambiental. En: *PEMEX: ambiente y Energía. Los retos del futuro*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM-PEMEX, pp 59-72.
- Chappin, R. G. y L. R. Summerlin 1988. *Química*. Publicaciones Cultural, México.
- Chiou, C.T., S.E. McGroddy y D.E. Kile 1998. Partition Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Soils and Sediments. *Environmental Science Technology* 32(2): 264-269.
- Luthy, R. G., G. R. Aiken, M. L. Brusseau, S. D. Cunningham, P. M. Gschwend, J. J. Pignatello, M. Reinhard, S. J. Traina, W.J. Weber Jr. y J. C. Westall 1997. Sequestration of Hydrophobic Organic Contaminants by Geosorbents. *Environmental Science & Technology* 31: 3341-3347.
- McBride, M.B. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford, New York.
- Menzie, C.A., B. B. Potocki y J. Santodonato 1992. Exposure to Carcinogenic Polycyclic Hydrocarbons in the Environment. *Environmental Science & Technology* 26: 1278-1284.
- Ney, R. 1990. *Fate and Transport of Organic Chemicals in the Environment*. Abs Group Inc., EE.UU.
- Padilla, R. M. Y. 1989. Determinación de los niveles de hidrocarburos en sedimentos recientes del río Calzadas en la región del Bajo río Coatzacoalcos, Veracruz. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- PEMEX 2000. Boletín No. 75/2000. PEMEX, México.
- 1999. *Informe 1999: Seguridad, salud y medio ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, PEMEX, México.
- 1988. *El petróleo*. Gerencia de Información y Relaciones Públicas, PEMEX, México.
- PROFEPA 1999. Restauración de suelos contaminados. Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados. México.
- Quadri, G. 1994. Industria y política ambiental. *El Nacional*. Sábado 18 de junio, México.
- Saval, B.S. 1995. *Acciones para la remediación de suelos en México*. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM, México.
- SEMARNAP 1996. *Los suelos de Tabasco. Restauración, conservación y uso*. Gobierno Constitucional del Estado de Tabasco, México.
- Viejo, Z. M. 1995. *El paquete ecológico de PEMEX. Internacionalización de costos ambientales*. Programa Universitario de Energía, México.

---

**Irina Ize Lema.** Subdirectora de investigaciones para la evaluación de riesgos ambientales del Instituto Nacional de Ecología.

Correo-e: arize@ine.gob.mx.

**Arturo Gavilán.** Jefe de departamento de Estudios de análisis comparativos de riesgo ambiental. Instituto Nacional de Ecología.

Correo-e: agavilan@ine.gob.mx.