

# REMEDIACIÓN *IN SITU* DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EN FASE LÍQUIDA Y ADSORBIDOS

Juan Manuel Lesser. Lesser y Asociados, S.A. de C.V.  
Río Guadalquivir 3 Col. Pathé, Querétaro 76020, Qro. México  
lesserman@infosel.net.mx

Susana Saval\*. Instituto de Ingeniería, UNAM  
Apdo. Postal 70472 Cd. Universitaria 04510, D.F. México  
ssb@pumas.iingen.unam.mx

## RESUMEN

El subsuelo del sitio de estudio, que corresponde a un terreno industrial, está constituido por materiales arcillosos que se encuentran saturados y dan origen a un acuitado cuyo nivel freático se ubica a alrededor de 2 metros de profundidad. Como producto de derrames accidentales que ocurrieron en el pasado, se acumularon hidrocarburos en fase líquida con un espesor entre 10 y 30 cm. La baja permeabilidad de las arcillas, del orden de  $1 \times 10^{-9}$  m/seg, ha impedido que los hidrocarburos circulen grandes distancias, limitando el área de afectación a una zona relativamente reducida. Los hidrocarburos en su mayoría corresponden a diesel y en otros casos a mezclas de diesel con gasolina. Se inició la **remediación física** que consistió en la extracción del producto libre, del que se recuperaron 13,000 litros en 4 meses. Después de realizar varias pruebas en el laboratorio, se aplicó una **remediación química *in situ***, mediante la inyección de agentes tensoactivos en solución y la extracción del licor de tratamiento, es decir, la mezcla de agua subterránea, hidrocarburos disueltos y agentes tensoactivos. El suelo de la zona tratada mostró una reducción importante en la concentración de diesel y gasolina. Finalmente, el licor de tratamiento se sometió a una **biorremediación** en reactores a nivel piloto en superficie, donde se abatió la concentración de gasolina y la concentración de diesel se redujo de más de 17000 mg/l a menos de 350 mg/l.

**Palabras clave:** *agentes tensoactivos, desorción, remediación física, remediación química, biorremediación*

## DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio de estudio es una estación de almacenamiento de combustibles para abastecimiento de una zona industrial, cuya superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas, está pavimentada. En estudios previos se encontró presencia de hidrocarburos en fase libre flotando sobre el nivel freático, que ocasionan lecturas de hidrocarburos volátiles superiores a 10000 ppm (1% v/v) en prácticamente todo el predio. La zona corresponde a una extensa planicie caracterizada por una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de alrededor de 40 metros. Existen horizontes de arena fina con arcilla, así como limos en diferentes proporciones, los cuales se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad, a la cual se detectó la presencia de producto en fase libre en espesores entre 10 y 30 cm de espesor. Las pruebas realizadas en campo indicaron que la permeabilidad en los 2

m superficiales varía entre  $10^{-9}$  y  $10^{-10}$  m/seg, por lo que las arcillas se comportan como un acuitado que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento (Lesser y Saval, 1999). De los resultados de análisis se obtuvo la distribución de hidrocarburos en el subsuelo, se encontró que en su mayoría fue diesel en concentraciones tan altas como 20000 mg/kg, mientras que la gasolina se encontró en concentraciones menores a 1000 mg/kg. Se detectó la presencia de plomo orgánico y de metiliterbutiléter lo cual indicó que se trata de gasolinas antiguas y oxigenadas, algunas de ellas con bajo grado de volatilización por estar confinadas en el subsuelo. Prácticamente no se detectaron benceno, tolueno y etilbenceno, pero si estuvieron presentes los xilenos, así como hidrocarburos poliaromáticos constituyentes típicos del diesel. A pesar de la presencia de producto libre en el subsuelo el riesgo a la salud y el riesgo geohidrológico resultaron ser bajos (Saval y Lesser, 1999).

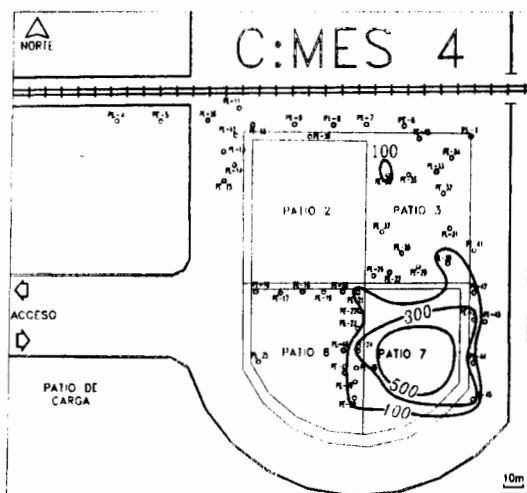
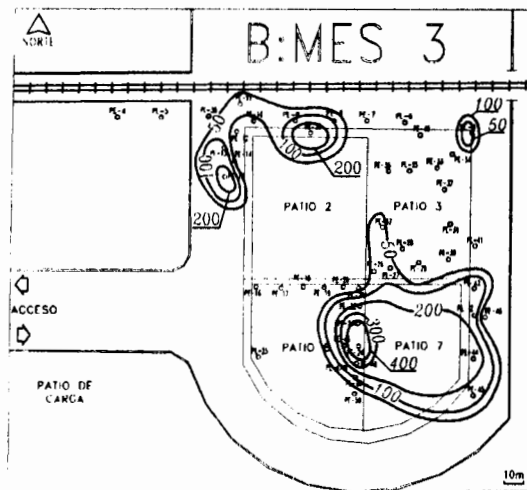
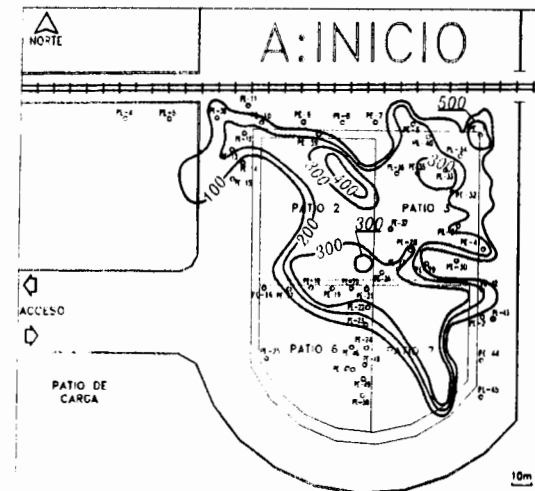


FIGURA 1.-CONFIGURACION Y EVOLUCION DE LA MANCHA DE PRODUCTO LIBRE  
PE=POZO DE EXTRACCION

## REMEDIACIÓN FÍSICA

La mancha de hidrocarburos en el subsuelo se delimitó mediante 274 perforaciones someras en las cuales se midió el espesor de producto libre durante la caracterización del sitio (Lesser y Saval, 1999). La configuración resultante se presenta en la Fig. 1A, en la que se observan espesores promedio entre 10 y 30 cm hacia la porción central del predio. También se presentaron algunas zonas con espesores de hasta 50 cm.

Para la remediación física se tomó como base la técnica de bombeo - tratamiento - inyección (Mackay and Cherry, 1989; Suthersan, 1997). Los componentes del sistema de remediación incluyeron: pozos de extracción, bomba, caja separadora y pozos de inyección. La bomba y la caja separadora se colocaron en un módulo metálico, que tiene ruedas giratorias para facilitar su movimiento aún en zonas de difícil acceso (figura 2).

Se perforaron 50 pozos de extracción con diámetro de 8.9 cm y 4 m de profundidad. En su interior se colocó tubería de PVC hidráulico de 6.35 cm de diámetro, liso de 0 a 1.80 m y con ranurado de 1.80 a 4.00 m. En la boca de los pozos se colocó un tapón de rosca y brocal de concreto. Se calculó el radio de influencia del bombeo en los pozos, considerando una transmisibilidad media de  $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$  y un coeficiente de almacenamiento de 0.05, con ello se obtuvo un radio de 4 metros. Los pozos de extracción se localizaron en puntos donde se permitió el acceso tratando de mantener la equidistancia entre pozos en no más de 8 metros. También se tomó en cuenta la dirección del flujo de las aguas freáticas que previamente se determinó (Lesser y Saval, 1999).

Una bomba a prueba de explosión para la extracción de producto libre, se conectó a una tubería plástica de 2.54 cm de diámetro con 5 derivaciones de 0.64 cm de diámetro interior, con lo cual se realizó el bombeo simultáneo de 5 pozos. Al reducir el caudal se evitó el agotamiento de los pozos y se logró extraer preferentemente el producto líquido localizado en la parte superficial. La mezcla agua / combustible extraída del subsuelo se envió a una caja separadora, diseñada y construida *ad hoc* donde, después de un tiempo de reposo, se permitió la separación de fases por la diferencia de densidades con lo cual se recuperaron agua y combustibles por salidas independientes. El

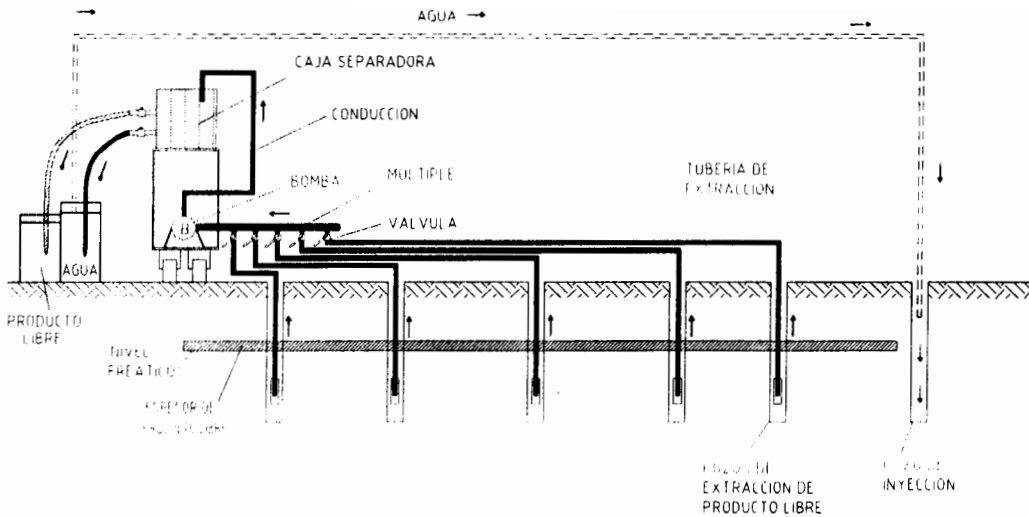


FIGURA 2.-SISTEMA DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE

agua libre de combustibles se devolvió al subsuelo inyectándola por gravedad en pozos localizados topográficamente más arriba.

Durante los trabajos de extracción se notó una mayor acumulación de producto libre hacia el patio 6, donde se localizaron un importante número de pozos, esto se tradujo en un mayor volumen de extracción en esa zona. La acumulación de producto se vió favorecida por el movimiento natural de las aguas freáticas que se dió en esa dirección. Después de 3 meses de extracción constante, la mancha de producto libre se redujo de manera importante, de tal forma que en el patio 3 prácticamente desapareció y solo se detectaban trazas, como se presenta en la figura 1B. En los patios 2 y 7, no fue posible perforar pozos de extracción debido a las actividades que ahí se realizaban, por lo que el patio 7 se convirtió en el centro de la mancha de producto libre. Esto último se confirmó en la configuración obtenida a los 4 meses (figura 1C).

El espesor de producto libre mostró una notable disminución, como ejemplo se presentan los valores obtenidos para los pozos PE-27 y PE-50. Cabe hacer notar que para estas mediciones

los pozos se dejaron reposar 3 días, con el fin de asegurar la confiabilidad de las lecturas.

Los dos primeros meses de operación fueron realmente de prueba y perforación de nuevos pozos de extracción en el patio 6, por lo que el volumen de producto libre extraído fue bajo. Entre los meses 3 y 4 la extracción aumentó notablemente. El volumen total de agua subterránea extraída, libre de combustible, fue de 332000 litros, los cuales se inyectaron al subsuelo por gravedad. En la figura 4A se presentan las cifras diarias de agua y producto libre que se extrajeron del subsuelo, aquí se puede apreciar que el ritmo de extracción se mantuvo prácticamente constante. Este comportamiento se reflejó también en la figura 4B, donde se graficaron los volúmenes acumulados y se observa una tendencia al aumento. En las dos gráficas se utilizó una escala logarítmica para facilitar la presentación de los resultados. La elevación del nivel freático, que fue también monitoreada periódicamente, mostró fluctuaciones de hasta 50 cm entre la época de lluvias y de estiaje (fig. 5). Esta situación es importante, ya que al bajar el nivel, los espacios porosos son ocupados por el producto libre y al subir nuevamente el nivel una

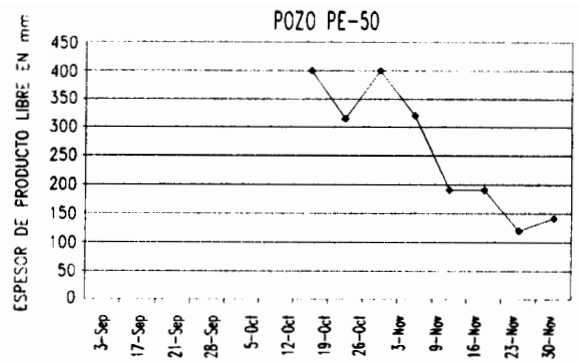
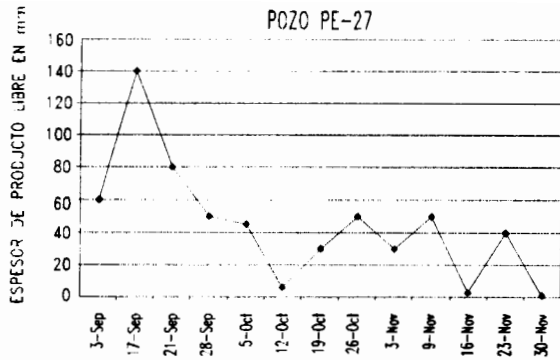
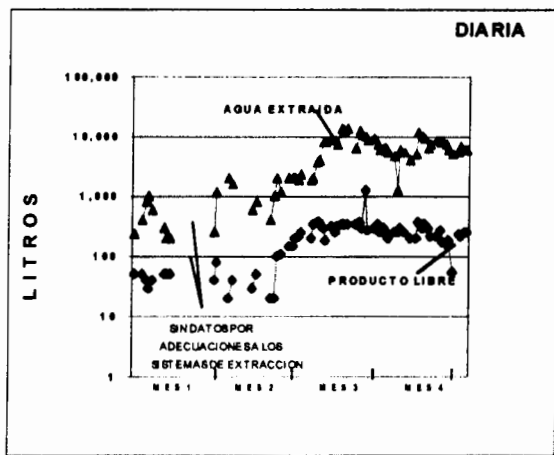


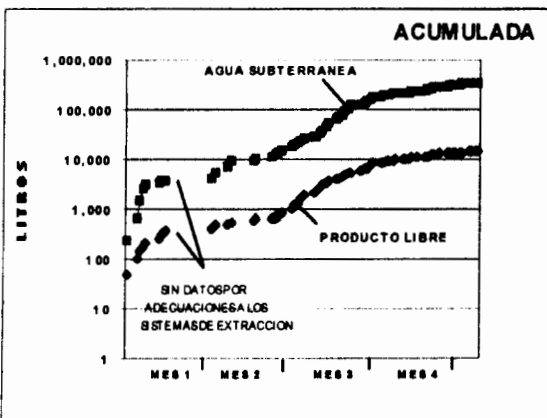
FIGURA 3.-EVOLUCION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN POZOS DE EXTRACCION



parte del combustible queda adsorbido por la estructura del suelo y otra queda libre flotando sobre el nivel.

#### REMEDIACIÓN QUÍMICA *IN SITU*

La remediación química que se aplicó fue un lavado con agentes tensoactivos, que comúnmente se conoce como "flushing". Consiste en desorber los hidrocarburos que están adheridos al material geológico y combinarlos con en el agua para facilitar su extracción (Abdul *et al.*, 1990; Fortin and Anderson, 1997; Liu *et al.*, 1991; Wilson and Wyatt, 1989).



Previamente se realizaron pruebas de tratabilidad química en el laboratorio utilizando columnas de vidrio de 3 cm de diámetro y 40 cm de longitud, empacadas con suelo contaminado extraído del lugar. Las pruebas consistieron en aplicar 4 diferentes formulaciones de agentes tensoactivos, las cuales se eligieron de acuerdo a su facilidad de disolución en grandes volúmenes de agua, su biodegradabilidad, su disponibilidad en el mercado, su seguridad en el manejo y su costo. La efectividad del tratamiento en las columnas se pudo observar a simple vista, ya que la solución de tensoactivos al 5% en agua que generalmente fue incolora, cambió a un color oscuro a la salida de la columna. Esto se interpretó como una desorción de los hidrocarburos, mientras el agente tensoactivo fluye a través del suelo contaminado. Este fluido de color oscuro, que se denominó licor de tratamiento, es una sola fase que toma la coloración de los combustibles presentes. La efectividad de cada formulación se verificó al cuantificar la concentración de hidrocarburos en

FIGURA 4.- VOLUMEN DE EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE Y AGUA SUBTERRANEA

el licor de tratamiento. El producto que dió los mejores resultados en columnas se utilizó para la prueba de demostración en campo.

Esta técnica de remediación química es efectiva únicamente si se mantiene una constante dinámica en el subsuelo, la cual se logró a través de la extracción e inyección de acuerdo al sentido del flujo subterráneo, con ello se promovió la movilización de los hidrocarburos que están adsorbidos en el material geológico.

Durante la remediación química se inyectaron agentes tensoactivos en pozos localizados en el patio 3, en los que ya no se detectó la presencia de producto en fase libre. Cada volumen de aplicación fue de 500 litros, se dejó fluir por gravedad y enseguida se inyectaron por lo menos 3000 litros de agua proveniente del sistema de separación, antes de una nueva inyección de tensoactivos. Se dió seguimiento al movimiento de los tensoactivos en el subsuelo, los cuales incluso sirvieron como trazadores por el color y apariencia del licor de tratamiento.

Después de un mes de haber aplicado los agentes tensoactivos se realizó un muestreo

continuo en el punto identificado como 356, el cual se localizó dentro del patio 3 muy cerca del pozo donde se inyectaron tensoactivos y en dirección a donde corre el agua subterránea (figura 6). Los resultados se presentan en forma de perfil en la misma figura, el cual se comparó con el del sondeo 187, localizado dentro del patio 2 que meses atrás se localizaba dentro de la mancha central de producto libre y contenía diesel en concentración superior a 12000 mg/kg. Como consecuencia de las acciones de remediación, la concentración de diesel se redujo a menos de 3000 mg/kg.

### BIORREMEDIACIÓN

El licor de tratamiento fue sometido a pruebas piloto de biorremediación, utilizando cultivos de bacterias degradadoras de diesel y gasolina que se desarrollaron en el laboratorio. La biorremediación consistió en promover la actividad de las bacterias degradadoras por adición de sales minerales en forma de fertilizantes y suministro de oxígeno. Se llevó un registro del pH como una medida indirecta de la actividad microbiana y al final de cada lote que

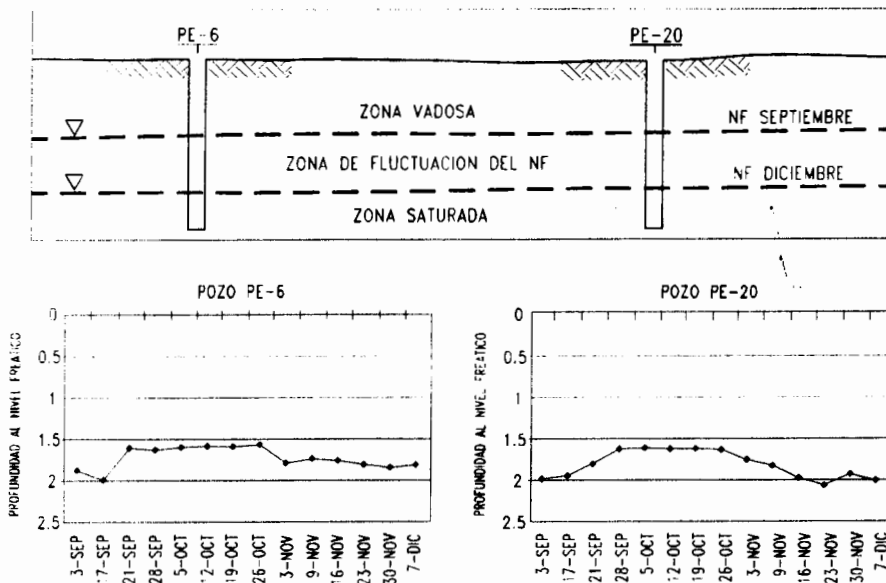


FIGURA 5.-VARIACION DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL FREATICO (NF) EN POZOS DE EXTRACCION

POZOS DE  
EXTRACCIÓN  
DEL LICOR DE TRATAMIENTO

POZOS DE  
INYECCIÓN

PI-28

PI-29

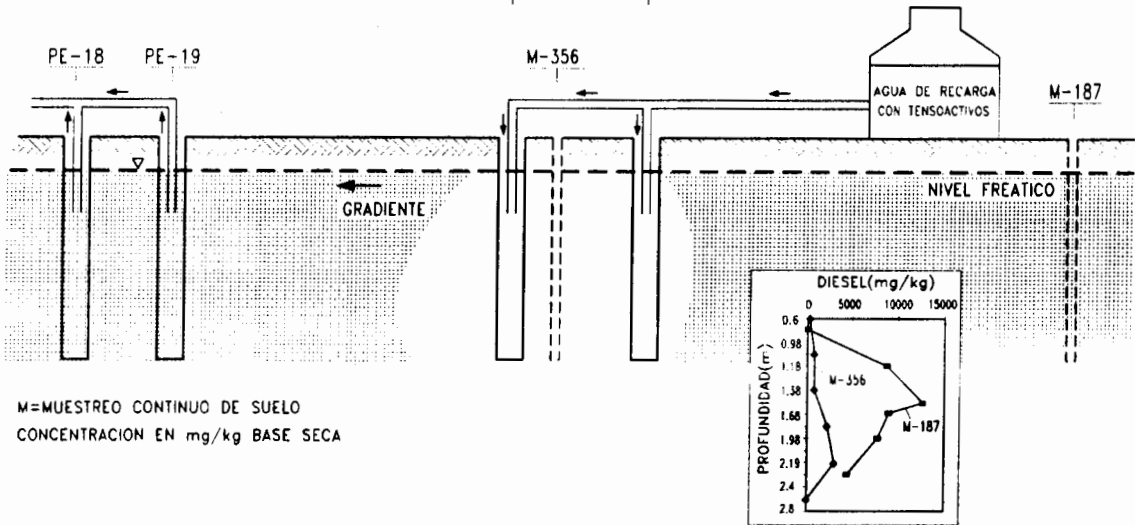


FIGURA 6.-REMIEDIACION QUIMICA IN-SITU: DESORCION DE HIDROCARBUROS CON AGENTES TENSOACTIVOS

duró en promedio 8 días se cuantificó la concentración de combustibles residuales y se confirmó la presencia de bacterias degradadoras. En todas las pruebas se redujo notablemente el contenido de combustibles de 20000 mg/l a menos de 300 mg/l para diesel y el contenido de gasolina fue no detectable. Sin embargo, se hicieron evidentes el largo tiempo requerido para reducir la concentración de combustibles por esta vía, así como los altos requerimientos de oxígeno.

Los resultados de las pruebas son una evidencia de que la biorremediación del agua subterránea puede realizarse con éxito, siempre y cuando esté acoplada a la remediación química con agentes tensoactivos y a la extracción/inyección de agua subterránea.

## DISCUSION

La remediación de suelos contaminados es un tema de actualidad a nivel mundial, pero pocos estudios de casos específicos en México han sido publicados. Lo presentado aquí constituye una experiencia en campo donde se acoplaron tres técnicas de remediación cuya base de funcionamiento es diferente, que visto de otra forma constituyen un tren de tratamiento en el siguiente orden: una remediación física, seguida

de una remediación química y finalmente una biorremediación.

De hecho, la remediación de suelos debe enfocarse de esa manera, dado que una sola técnica no es suficiente para remover los contaminantes de un suelo afectado.

El aspecto más importante del estudio realizado, es que se trata de un suelo arcilloso, cuya característica impermeable hace más difícil la aplicación de cualquier técnica de remediación. Por ejemplo, en la etapa inicial de extracción del producto libre, se probaron diferentes estrategias de bombeo, que no funcionaron adecuadamente debido a que el propio suelo impone un caudal de extracción bajo. Esto último se traduce en tiempos muy largos y costos muy elevados para la remediación, que se deben reducir. En el caso específico de este estudio se decidió perforar un importante número de pozos cuyo radio de influencia pudiera cubrir el área de mayor afectación, además de atender la extracción de manera simultánea en cinco pozos diferentes con cada unidad de bombeo y la inyección de agua libre de hidrocarburos en pozos aguas arriba. Con estas tres acciones se aumentó el volumen de extracción y se logró mantener a un ritmo constante.

Por lo que respecta a la remediación química, su aplicación en las zonas donde se abatió el producto en fase libre, logró desorber los hidrocarburos que se habían quedado en el material geológico. Aunque los resultados fueron evidentes a simple vista, los análisis realizados a muestras de suelo a 3 m de profundidad, comprobaron la eficiencia del tratamiento. Dos elementos fueron importantes en este caso, la elección de los agentes tensoactivos a partir de las pruebas de tratabilidad en el laboratorio y la constante inyección de agua al subsuelo después de cada aplicación. Aquí conviene mencionar, que el hecho de devolver al subsuelo el agua extraída con la finalidad de acelerar el flujo subterráneo trae una ventaja adicional, ya que si se dejara en superficie sería necesario darle algún tratamiento antes de su disposición final.

En lo que toca a la biorremediación del agua subterránea, técnicamente funcionó bastante bien, ya que se redujo de manera importante la concentración de combustibles. Sin embargo, los altos requerimientos de oxígeno hacen muy costoso el tratamiento, por lo que todavía se requiere de más trabajo para facilitar su aplicación en mayor escala.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló una estrategia adecuada para la extracción de hidrocarburos en fase libre acumulados en el subsuelo de tipo arcilloso, con lo cual se avanzó de manera importante en la remediación física.

Se demostró la efectividad de la remediación química *in-situ* mediante la inyección al subsuelo de agentes tensoactivos disueltos en agua, los cuales lograron remover los hidrocarburos adsorbidos al material geológico.

La biorremediación en superficie del agua subterránea fue una técnica efectiva para la degradación de los combustibles presentes, sin embargo, aún no representa una alternativa económica para su aplicación en escala real.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Salud Ocupacional de Pemex Refinación. Los autores agradecen la participación de Florentino Montiel, Roberto Martínez, Francisco Ordoñez, Héctor Zegarra,

Norma Pérez y Alma Guzmán durante la ejecución de los trabajos en campo y en el laboratorio.

## REFERENCIAS

Abdul A.S., Gibson T.L., and Rai D.N., 1990. Selection of surfactants for the removal of petroleum products from shallow sandy aquifers. *Ground Water* 28: 920-926.

Fortin W.A. and Anderson M.A., 1997. Enhanced removal of trapped non-aqueous phase liquids from saturated soil using surfactant solutions. *J. Contam. Hydrol.* 24: 247-268.

Lesser J.M. y Saval S., 1999. Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. Sometido para su publicación a la *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Liu Z., Laha S. and Luthy R.G., 1991. Surfactant solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in soil - water suspensions. *Wat. Sci. Tech.* 23: 475-485.

Mackay D.M. and Cherry J.A., 1989. Groundwater contamination: pump - and - treat remediation. *Environ. Sci. Technol.* 23(6): 630-636.

Saval S., 1998. Biorremediación: alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10 No. 34, enero-febrero: 6-9.

Saval S. y Lesser J.M., 1999. Identificación de hidrocarburos derramados al subsuelo y estudio de riesgo en una instalación industrial. Sometido para su publicación a *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Revista de la Federación Mexicana de Ingeniería y Ciencias Ambientales, A.C.

Suthersan S.S., 1997. Remediation Engineering Design Concepts. Ed. CRC Lewis Publishers. Boca Raton.

Wilson D.J. and Wyatt J.H., 1989. Soil clean-up by *in situ* surfactant flushing. Theory of micellar solubilization separation. *Sci. Technol.* 24: 905.