

UNA EXPERIENCIA DE CARACTERIZACIÓN Y REMEDIACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS

Susana Saval

Instituto de Ingeniería, UNAM
Apartado Postal 70472, México, 04510, D.F.
Tel. 5622-33-24, Fax 5622-3325
e-mail:ssb@pumas.iingen.unam.mx

Juan Manuel Lesser

Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
Río Guadalquivir No. 3, Querétaro, 76050 Qro.
Tel. (4) 223-1515, Fax (4) 223-3361
e-mail: lesserjuanm@infosel.net.mx

RESUMEN

Sobre la superficie del terreno de una zona industrial, existieron fugas de combustibles cuya magnitud y fechas de derrame se desconocen. El subsuelo del lugar está formado por materiales arcillosos con un espesor de 40 metros, los cuales se encuentran saturados y dan origen a un acuitardo cuyo nivel freático se ubica a alrededor de 2 metros de profundidad. Las arcillas presentan baja permeabilidad, del orden de 1×10^{-9} m/seg, lo cual impide que los hidrocarburos circulen grandes distancias, limitando así la afectación a un área relativamente reducida. Para identificar el tipo y concentración de los hidrocarburos derramados en el subsuelo, se realizaron análisis por cromatografía de gases a muestras de suelo, combustibles en fase libre y aguas freáticas. En la mayoría de las muestras de producto libre se encontró diesel y en algunas más, 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.

INTRODUCCIÓN

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. 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 acuitardo que absorbe y almacena agua, pero presenta poco movimiento.

DELIMITACIÓN DE LA ZONA CONTAMINADA

Con el objeto de localizar la zona contaminada en el subsuelo, se perforaron 274 pozos someros de medición que en su mayoría alcanzaron entre 3.00 y 3.30 metros de profundidad. Se midió en cada pozo la presencia de hidrocarburos volátiles habiendo encontrado valores altos superiores a 10,000 ppm en prácticamente todo el predio

Se midió en cada uno de los pozos la distribución del espesor de producto libre que se encontraba flotando sobre el nivel freático observándose espesores entre 10 y 30 centímetros, principalmente hacia la porción central de la zona de estudio.

La distribución de la mancha se incluye dentro de la figura 1 que corresponde a la identificación de combustibles.

IDENTIFICACIÓN DE COMBUSTIBLES EN FASE LIBRE

Se obtuvo el perfil cromatográfico típico para gasolina y diesel puros, cada perfil se considera como una "huella digital" que permite identificar la presencia de los combustibles (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993). Se incluyeron también mezclas de gasolina y diesel en proporciones de 25:75, 50:50 y 75:25, cuyos perfiles sirvieron como referencia para establecer una proporción aproximada de los combustibles en las muestras de producto libre.

El perfil típico de gasolina presenta picos con tiempos de retención del orden de segundos hasta aproximadamente 15 minutos, mientras que el perfil típico de diesel se aprecia entre los 11 y 23 minutos. Los perfiles de las mezclas de gasolina y diesel presentan un gran número de picos que dan continuidad desde el inicio hasta los 23 minutos, pero se puede apreciar claramente la densidad de los picos que corresponden a la gasolina y al diesel. Por tratarse de una gasolina fresca en todos los casos están presentes los hidrocarburos volátiles de bajo peso molecular, que son los picos que sobresalen a tiempos de retención cortos; la presencia de éstos se detecta a pesar de que la proporción de gasolina en la mezcla sea baja. En la figura 1 se presentan los perfiles de algunos sitios, observándose el predominio de diesel sobre gasolina.

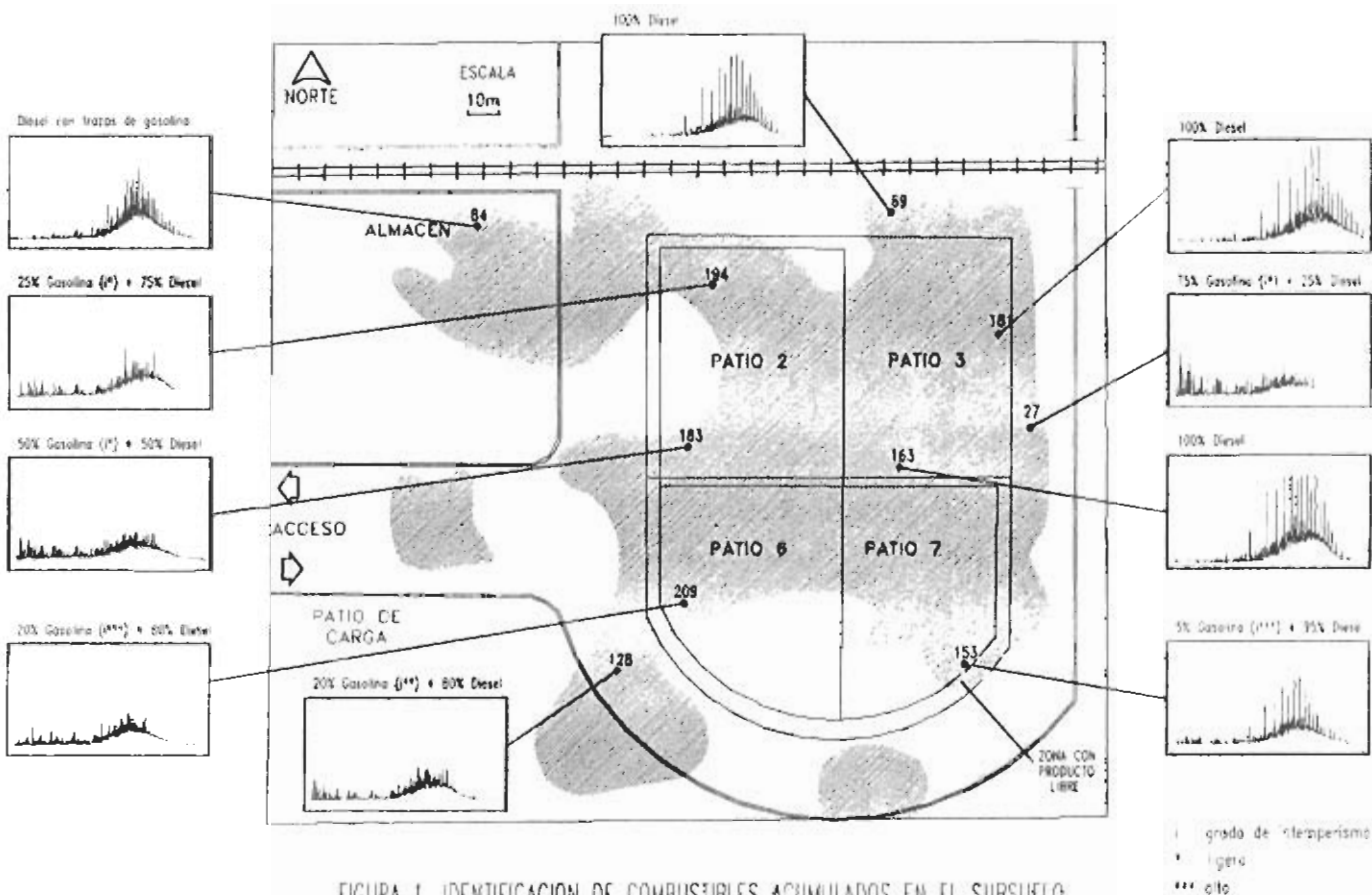


FIGURA 1. IDENTIFICACION DE COMBUSTIBLES ACUMULADOS EN EL SUBSUELO.

HIDROCARBUROS Y PLOMO ORGÁNICO EN SUELO

Se obtuvieron muestras de suelo en 6 pozos perforados hasta 10 metros de profundidad. Fueron analizados y los resultados de 3 de ellos se presentan en la figura 2, que indican que los estratos más contaminados se encontraron entre los 6 y 10 m de profundidad, donde las concentraciones de diesel fueron superiores a los 6,000 mg/kg.

REMEDIACIÓN FÍSICA

Para la remediación física se tomo como base la técnica de bombeo-tratamiento-inyección.

Se perforaron 50 pozos de extracción con diámetro de 8.9 cm y 4 m de profundidad. 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.

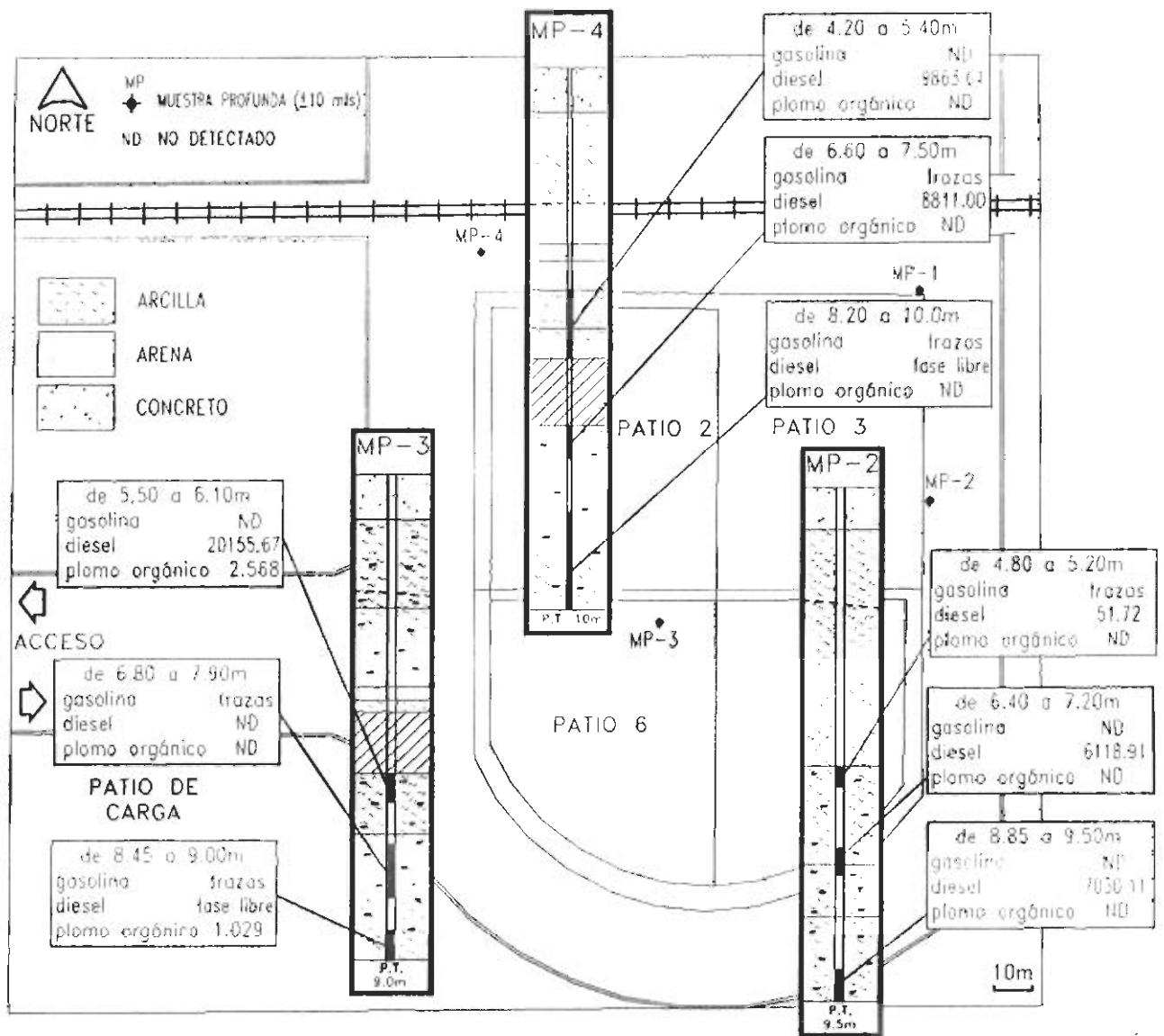


FIGURA 2.- GASOLINA, DIESEL Y PLOMO ORGANICO EN MUESTRAS PROFUNDAS DE SUELO mg/kg, BASE SECA

Se realizó el bombeo simultáneo de 5 pozos. La mezcla agua / combustible extraída del subsuelo se envió a una caja separadora, donde, se permitió la separación de fases por la diferencia de densidades con lo cual se recuperaron agua y combustibles por salidas independientes. El agua libre de combustibles se devolvió al subsuelo inyectándola por gravedad en pozos localizados topográficamente más arriba. Se extrajeron un total de 14,000 litros de producto.

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 3B. 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 3C). El volumen total de agua subterránea extraída, libre de combustible, fue de 332,000 litros, los cuales se inyectaron al subsuelo por gravedad.

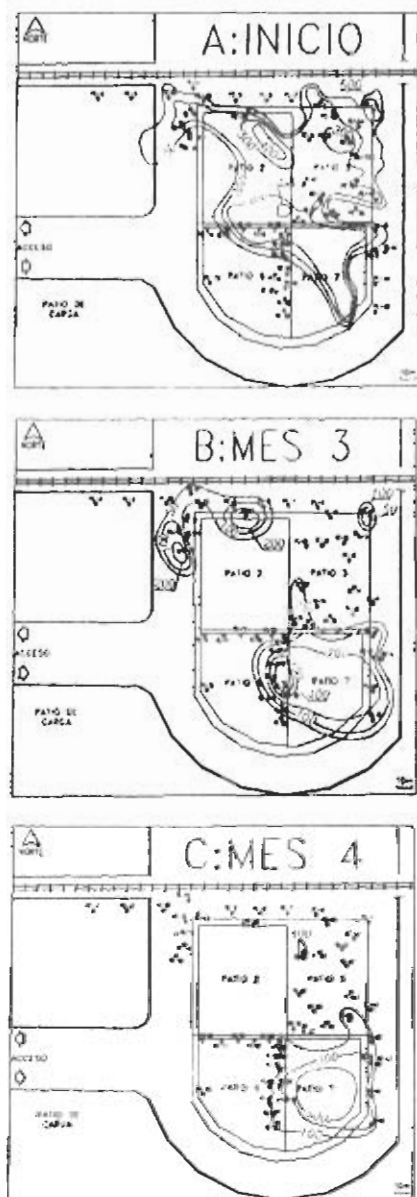


FIGURA 3.-CONFIGURACION Y EVOLUCION DE LA MANCHA DE PRODUCTO LIBRE
PE=POZO DE EXTRACCION

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

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.

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 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.

CONCLUSIONES

A través de la estrategia de prospección utilizada fue posible delimitar la zona de afectación en el subsuelo del sitio de estudio, debida a la presencia de hidrocarburos en fase libre.

El principal combustible contaminante en el subsuelo resultó ser diesel, aunque también se encontraron mezclas de diesel con gasolina.

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

- 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., (1995a). *Prospección de Contaminación por Hidrocarburos*. Revista del Colegio de Ingenieros Geólogos de México. Vol. 1, Núm. 6: pp 5-8.
- Lesser J. M., (1995b). *Saneamiento de Acuíferos Contaminados por Hidrocarburos*. Calidad Ambiental, Vol. II, Núm.5: pp 6-8.
- 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.
- Potter T.L., 1993. Analysis of Petroleum Contaminated Soil and Water. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 1-14.
- 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. Aceptado 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.