

# CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS EN UN SUELO ARCILLOSO

JUAN MANUEL LESSER\* Y SUSANA SAVAL\*\*

Lesser y Asociados, S. A. de C. V. \*\*Instituto de Ingeniería, UNAM

## 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 unos 2 metros de profundidad. Las arcillas presentan baja permeabilidad, del orden de  $1 \times 10^{-8}$  m/seg, lo cual impide que los hidrocarburos circulen grandes distancias, y se limita la afectación a un área relativamente reducida. La zona de estudio tiene una superficie de aproximadamente 6.5 hectáreas, y sobre ellas se realizaron 274 perforaciones someras, en las cuales se tomaron lecturas de hidrocarburos volátiles, explosividad, profundidad al nivel freático y espesor de producto libre que flotaba sobre el manto freático. Prácticamente toda la zona se encontró afectada por la presencia de hidrocarburos volátiles, con más de 10000 ppm (1% v/v) medidos por arriba del nivel freático. Se delimitó la mancha de combustibles en fase libre, la cual presentó espesores de entre 10 y 30 centímetros, que en su mayoría correspondió a diesel y en menor proporción a mezclas de diesel con gasolina. Los análisis cromatográficos efectuados a las muestras del producto libre indicaron que en el sitio ocurrieron varios eventos de derrame, seguramente desde que las instalaciones entraron en operación.*

**Palabras clave:** contaminación, hidrocarburos, acuitardo, permeabilidad, compuestos orgánicos volátiles, diesel, cromatografía

## INTRODUCCIÓN

El importante manejo de combustibles que se da durante actividades industriales y comerciales ha traído como consecuencia afectaciones al ambiente, entre las cuales aquellas que impactan directamente al suelo y al subsuelo han adquirido gran interés en los últimos años en México.

Cuando ocurre un derrame de combustibles en el suelo, inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio lo permite. Las características propias de los combustibles como su densidad, viscosidad y solubilidad en el agua, así como las propias del subsuelo, entre las que destaca el tamaño de partícula, su capacidad de adsorción, permeabilidad y profundidad al nivel freático determinan la acumulación, migración y distribución de éstos en cada sitio en particular.

Los problemas de contaminación de suelo y subsuelo no reconocen fronteras, ni límites de predios, por lo que cobra fundamental importancia dedicar esfuerzos a la realización de estudios de caracterización detallados que permitan conocer el comportamiento de la contaminación del subsuelo, tanto para

incisar responsabilidad jurídica durante la evaluación de daños ambientales, como para tomar las acciones de remediación que sean necesarias y adecuadas para cada sitio en particular (Saval, 1998). En este trabajo se presentan los resultados de caracterización y comportamiento de un caso particular de contaminación del subsuelo, dentro de una zona industrial del valle de México.

## DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio ha servido durante varios años como una estación de almacenamiento y distribución de combustibles. El terreno ocupa un área aproximada de 6.5 hectáreas; cerca de la puerta de acceso existe un patio de carga y un almacén que también sirve como taller de mantenimiento. Casi en el centro se localizan cuatro tanques elevados que ocupan los patios 2, 3, 6 y 7. Prácticamente toda la superficie está pavimentada y no existen evidencias de fugas recientes, aunque la información que fue proporcionada al inicio del estudio establece que se registraron derrames cuya magnitud y fechas se

**FIGURA 1A CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN PPM A 0.90 DE PROFUNDIDAD**

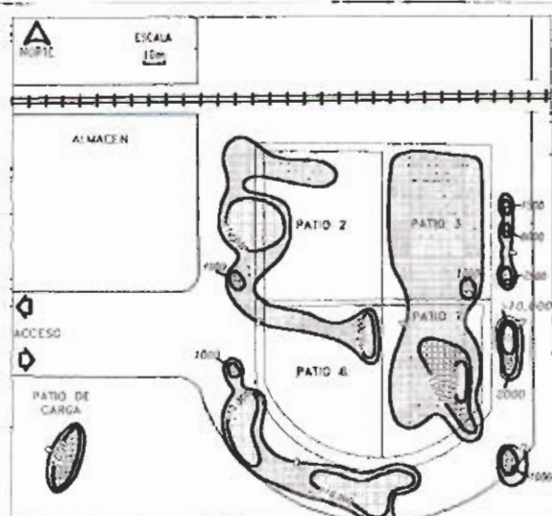


FIGURA 1A.—CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN ppm A 0.90m DE PROFUNDIDAD

**FIGURA 1B. CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN PPM MEDIDOS POR ARRIBA DEL NIVEL FREÁTICO**

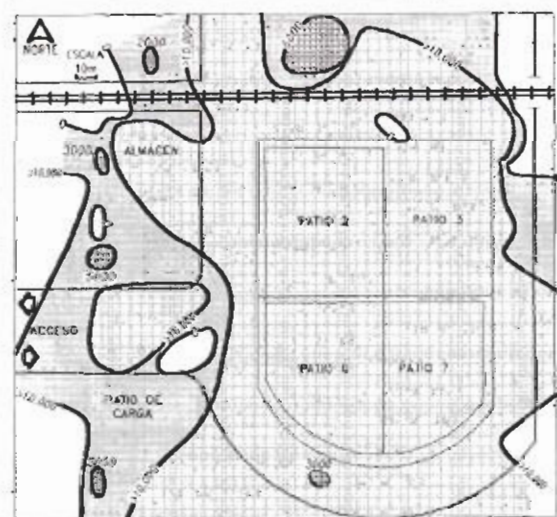


FIGURA 1B.—CONFIGURACIÓN DE HIDROCARBUROS VOLÁTILES EN ppm MEDIDOS POR ARRIBA DEL NIVEL FREÁTICO

desconocen. En el lugar existe una vía de ferrocarril que atraviesa todo el predio de poniente a oriente, aunque actualmente no se utiliza.

### MARCO HIDROGEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en el valle de México, corresponde a una extensa planicie caracterizada por incluir una cubierta de materiales arcillosos con un espesor de aproximadamente 40 metros. Incluye algunos horizontes de arena fina con

arcilla, así como limos en diferentes proporciones. Los materiales finos que constituyen la planicie se encuentran saturados a partir de los 2 metros de profundidad. Debido a la baja permeabilidad de las arcillas, éstas se comportan como un acuitado, ya que absorben y almacenan agua, la cual presenta poco movimiento por la retención molecular que ejercen las partículas de la arcilla.

El nivel freático presenta fluctuaciones de la temporada de lluvias a la temporada de estaje, cuando llega a abatirse hasta cerca de 3 metros de profundidad. Al abatirse el nivel, los combustibles se mueven para ocupar el espacio liberado por las aguas freáticas, y posteriormente, en la época de lluvias, el nivel sube y deja una parte de los combustibles en fase libre, y la otra parte adsorbidos en la estructura del suelo.

Por la característica eminentemente arcillosa y de muy baja permeabilidad de la capa de suelo de 40 m de espesor, el acuífero subterráneo que está aproximadamente a 50 m de profundidad se podría clasificar geohidrológicamente como poco vulnerable y de bajo riesgo de contaminación.

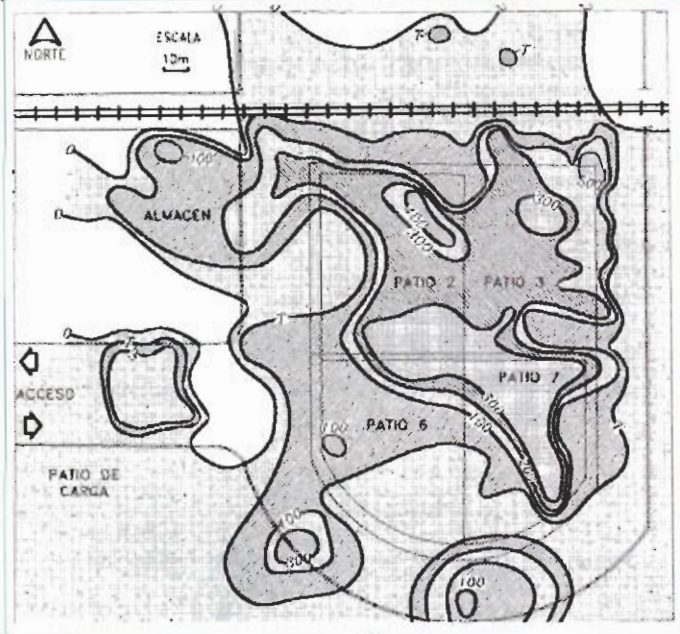
### DELIMITACIÓN DE LA ZONA CONTAMINADA

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. La perforación de los pozos se llevó a cabo mediante el hincado de barras de acero con un diámetro de  $\frac{1}{2}$  de pulgada; en ellos se tomaron lecturas *in-situ* de hidrocarburos volátiles, explosividad, profundidad al nivel freático y espesor del producto libre que se encontraba flotando sobre el manto freático (Lesser, 1995). Para la medición de hidrocarburos volátiles se utilizó un fotoionizador portátil marca Gastech modelo GT202 calibrado para hexano. La explosividad se midió con un explosímetro marca MSA, la profundidad al nivel freático con una sonda eléctrica y el espesor de producto libre con ayuda de una pipeta de vidrio que se llevó hasta el nivel freático. Se perforaron otros seis pozos a 10 metros de profundidad, de los cuales se obtuvieron muestras continuas de suelo para identificar la litología del material geológico. Durante las perforaciones se obtuvieron muestras de producto libre, a las cuales se les realizaron análisis por cromatografía de gases para identificar los combustibles presentes.

La medición de hidrocarburos volátiles se realizó en dos profundidades. La primera a 0.90 m, y la segunda por arriba del nivel freático. Con los resultados de la medición a 0.90 m se trazó la configuración que se muestra en la figura 1A, donde se observan varias zonas bien localizadas con concentraciones altas de hidrocarburos volátiles, hasta más de 10 000 ppm (1% v/v). Por lo que se respecta a la medición de hidrocarburos volátiles por arriba del nivel freático, se encontraron valores altos en prácticamente todo el predio (figura 1B).

La distribución del espesor de producto libre que se encontraba flotando sobre el nivel freático se muestra en la figura 2A, donde se observan espesores entre 10 y 30 centímetros, principalmente hacia la porción central de la zona de estudio.

Las muestras de producto libre presentaron diferentes coloraciones, desde el amarillo claro hasta un café verdoso muy oscuro. Inicialmente se consideró que el color tenía una

**FIGURA 2A. CONFIGURACIÓN DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE EN MM; T= TRAZAS**

relación directa con el tipo de combustible, pero después de los análisis se asumió que era una consecuencia del tiempo que los combustibles habían permanecido en el subsuelo y de los pigmentos naturales que se liberan por la presencia de los combustibles. De esta forma, los combustibles más frescos corresponden a las muestras de color más claro, mientras que los más antiguos al color más oscuro. Sin embargo, hubo casos en los que se encontraron gasolinas de color oscuro, con un alto contenido de los hidrocarburos más volátiles, seguramente debido a que la baja permeabilidad del suelo evitó su volatilización.

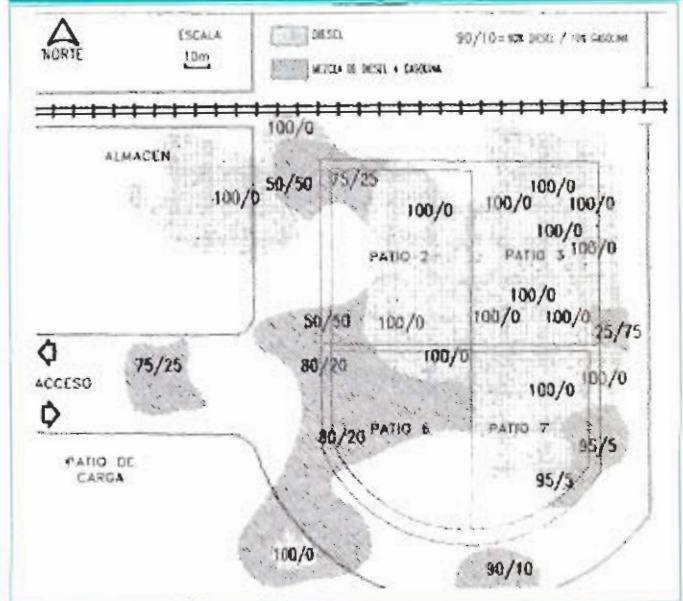
### IDENTIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES CONTAMINANTES

Mediante análisis por cromatografía de gases de acuerdo con el método EPA 8015-B (USEPA, 1996), se identificó el tipo de combustibles presentes en el subsuelo, que en su mayoría fue diesel y en otros casos mezclas de diesel con gasolina. Por comparación de los perfiles cromatográficos obtenidos con mezclas de gasolina y diesel, los cuales fueron usados como estándar, se estimó la proporción de los combustibles presentes en las muestras extraídas del subsuelo (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993). Los resultados se pueden observar en la figura 2B.

### MOVIMIENTO DE LAS AGUAS FREÁTICAS

Se realizó una nivelación diferencial de la superficie del terreno, a la cual se le restó la profundidad al nivel del agua subterránea, se obtuvo de esta manera la elevación del nivel freático respecto del nivel del mar.

Con los datos que se generaron se construyó la configuración que puede apreciarse en la figura 3, donde se observan valores máximos en el patio 3, a partir de donde se forma una distribución radial, la cual permite inferir la dirección de circulación de las aguas freáticas.

**FIGURA 2B. DISTRIBUCIÓN DE GASOLINA Y DIESEL EN EL SUBSUELO**

### LITOLOGÍA DEL SUBSUELO

Para conocer la litología del subsuelo, se obtuvieron muestras continuas en 43 puntos distribuidos en todo el predio; el muestreo se realizó con cartuchos de acetato de 46.5 centímetros de longitud y 2.5 centímetros de diámetro, lo que permite la obtención de muestras de suelo inalteradas. En cada uno de los sondeos se obtuvieron de tres a cuatro núcleos, con los cuales se interpretó la litología. La profundidad de los pozos varió de 2.50 a 3.30 metros. Con los datos obtenidos se formó la sección geológica que se muestra en la figura 4A, donde se observa en la porción superficial, por debajo de la losa de concreto, una capa de arcilla y arena con espesor de aproximadamente 30 centímetros. A mayor profundidad se encontraron horizontes de materiales predominantemente arcillosos.

En la figura 4B se marcó la profundidad al nivel freático, que presenta ondulaciones que fluctúan alrededor de los 2 metros. En la misma figura 4B se marcó el espesor de producto libre flotando sobre el nivel freático, así como la zona donde fue evidente la presencia de hidrocarburos adsorbidos por las arcillas. Lo anterior demuestra que la heterogeneidad del subsuelo y su baja permeabilidad da como resultado la existencia de zonas de mayor acumulación, las cuales pueden estar muy cercanas a otras donde no existen rastros de contaminación. Un comportamiento similar se observó en un estudio previo realizado en otro sitio con un suelo arcilloso también localizado dentro del valle de México (Saval y Lesser, 1998).

La permeabilidad del subsuelo se determinó mediante pruebas de tipo Lefranc de carga constante, de 0 a 1 metro y de 1 a 2 metros de profundidad. De estas pruebas se obtuvo una permeabilidad del orden de  $10^{-9}$  y  $10^{-10}$  m/seg, lo cual confirmó la existencia de un material arcilloso, donde difícilmente puede circular un fluido. La propiedad que tienen estos materiales de adsorber agua y no cederla también ocurre con los combustibles, de aquí que las arcillas impiden que los contaminantes migren grandes distancias.



### DISCUSIÓN

La baja permeabilidad de las arcillas podría considerarse una ventaja, ya que impide que los hidrocarburos en el subsuelo circulen grandes distancias; sin embargo, esta misma baja permeabilidad es una limitante que ofrece grandes dificultades para la remediación del subsuelo (Suthersan, 1996; Nyer, 1998).

En casos de contaminación como el presentado aquí, el saneamiento debe iniciar con una remediación física enfocada básicamente a la extracción de los combustibles en fase libre mediante pozos sornados con caudales reducidos (Dragun,

1989). Posteriormente, se podría continuar con un lavado de suelo conocido como *flushing*, para desorber los hidrocarburos. Éste podría aplicarse de manera simultánea o previa a una biorremediación, para lo cual se podría analizar la capacidad degradadora de las bacterias nativas. Para este último caso, será también importante considerar las limitaciones que ofrece un suelo arcilloso, durante el suministro del oxígeno necesario para satisfacer los requerimientos metabólicos de las bacterias encargadas de la degradación de los hidrocarburos (Fiser-Roberts, 1992).

Experiencias bien documentadas, pero pocas de ellas publicadas, indican que para sitios de características similares al que se estudió serán necesarios de cinco a 10 años para demostrar evidencias firmes que aseguren el saneamiento del sitio (NGWA, 1998).

### CONCLUSIONES

A través de la estrategia de prospección fue posible delimitar la zona de afectación en el subsuelo del sitio de estudio, debido a la presencia de hidrocarburos en fase libre, así como su influencia hacia los alrededores en forma de hidrocarburos volátiles y de explosividad. A pesar de que algunos de los derrames parecen haber ocurrido hace varios años, dicha afectación permanece "confinada" dentro de los límites del predio gracias al reducido movimiento de las aguas freáticas, que es una consecuencia de la baja permeabilidad del material arcilloso.

El principal combustible contaminante en el subsuelo resultó ser diesel, aunque también se encontraron mezclas de diesel con gasolina. Su distribución es una función directa del tipo de producto derramado, aunque también tiene una importante influencia el movimiento vertical del nivel freático que se da entre las temporadas de lluvia y estiaje, así como la litología del subsuelo ■

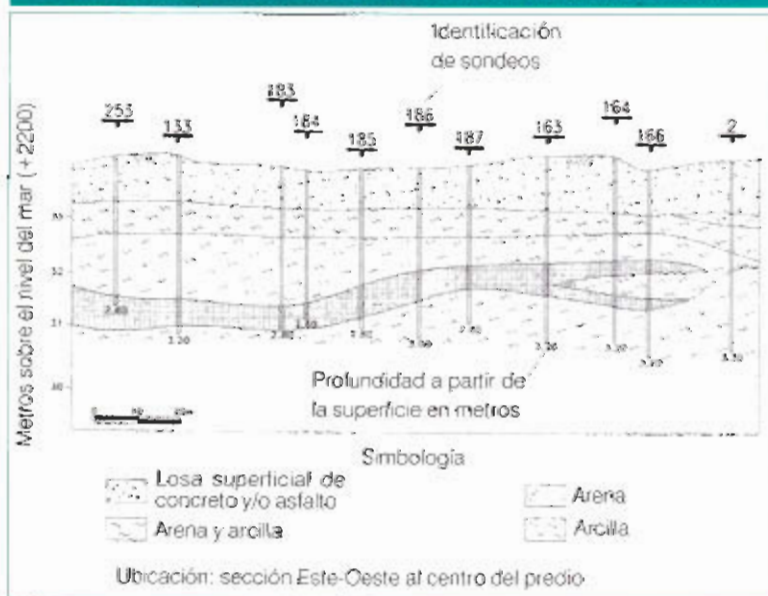
### AGRADECIMIENTOS

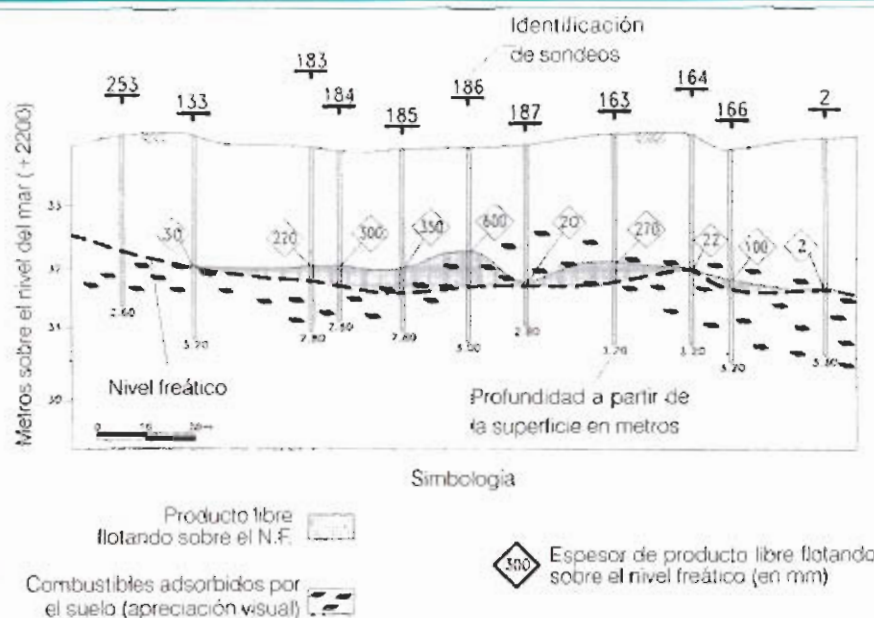
Este estudio fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial de Pemex Refinación. Los autores agradecen el apoyo de los ingenieros Florentino Morfiel y de Roberto Martínez durante la ejecución de los trabajos en campo.

### REFERENCIAS

- Baugh, A.L., y J.R. Lovegreen, "Differentiation of Crude Oil and Refined Petroleum Products in Soil", en Calabrese, E. J. y Kostecki PT. (eds.), *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Lewis Publishers, Boca Raton, 1993.
- Dragun, J., "Recovery Techniques and Treatment Technologies for Petroleum and Petroleum Products in Soil and Groundwater", en *Petroleum Contaminated Soils*, vol. 1, Calabrese, E. J. y Kostecki PT. (eds.), Lewis Publishers, Boca Raton, 1989.
- Lesser, J. M., "Prospección de contaminación por hidrocarburos", *Revista del Colegio de Ingenieros Geólogos de México*, vol. 1, núm. 8, 1989, pp. 5-8.
- National Ground Water Association (NGWA), *Proceedings of the 1998 Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: prevention, detection and remediation*, 1998.
- Nyer, E. K., *Groundwater and Soil Remediation: Practical Methods and Strategies*. Ann Harbor Press, USA, 1998.

**FIGURA 4A. SECCIÓN MOSTRANDO EL TIPO Y DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES GEOLÓGICOS QUE CONSTITUYEN EL SUBSUELO**



**FIGURA 4B. PROFUNDIDAD AL NIVEL FREÁTICO, ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE Y ZONA DE PRESENCIA DE HIDROCARBUROS ADSORBIDOS POR LAS ARCILLAS**

Potter, J.L., "Analysis of Petroleum Contaminated Soil and Water", en Calabrese E.J. y Kostick PT (eds.), *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*, Boca Raton, Lewis Publishers, 1993, pp. 1-14

Riser-Roberts, E., *Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites*, Boca Raton, C.K. Smoley, 1992

Savai, S., "La reparación del daño. Aspectos técnicos: remediación y restauración", en *La responsabilidad jurídica en el daño ambiental*, México, UNAM/Petróleos Mexicanos, 1998, pp. 209-235

Savai, S. y Lesser, J.M., *Behavior of Diesel Contamination in an Unconsolidated Clayey Soil*, Proceedings of 4th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Boston, Mas., 1998.

Sulherian, S.S., *Remediation Engineering Design Concepts*, Boca Raton, Lewis Publishers, 1996

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *Method 8015 B, Nonhalogenated organics using GC/MS*, 1996.

**FYPASA Construcciones, S.A. de C.V.**  
**FYPASA, A.C.**  
 Nicolás San Juan 1541  
 Col. del Valle  
 Del. Benito Juárez  
 CP. 03100 México, D.F.  
 Tel. 5688 6282 / 7115 / 0585  
 Fax. 5661 8488  
 fypasa@mail.internet.com.mx



**Aguas, Servicios e Inversiones de México, S. de R.L. de C.V.**  
**ASIM**  
 Ejército Nacional 926 esq. Sófoeles  
 4º piso Col. Polanco  
 CP. 11560 México, D.F.  
 Tel. 5514 1572  
 Fax. 5514 8324  
 asimex@mail.internet.com.mx

**AGUA PROCESS, S.A. de C.V.**  
 Bahía de Santa Bárbara 157  
 Col. Verónica Anzures  
 CP. 11300 México, D.F.  
 Tel. 5255 9019  
 Fax 5299 9000 ext. 9404  
 elflores@degremont.com.mx



**Siglo Ambiental Coyoacán, S.A. de C.V.**  
 Calle del Ángel 36  
 Col. San José Insurgentes  
 Del. Benito Juárez  
 C.P. 03900 México, D.F.  
 Tel./Fax 5615 2195 al 99  
 pyr@usa.net



**GERM-EX, S.A. de C.V.**  
 Av. Uno núm. 10, Fracc. Ind. Alce Blanco  
 Naucalpan Edo. de México, C.P. 53370  
 Tel. 5576 2499, 5358 8829  
 germexsa@df1.telmex.net.mx



**Grupo PROAGUA, S.A. de C.V.**  
 Himno Nacional 1911, 1er piso  
 Fracc. Tangamanga  
 San Luis Potosí, C.P. 78269  
 San Luis Potosí  
 Tel. (0148) 33 1865/66/67  
 Fax (0148) 17 4411  
 gproagua@prodigy.net.mx



**Planeación y Sistemas de Control, S.A. de C.V.**  
 Ferrocarril de Cuernavaca 2807  
 Col. San Jerónimo Lidice  
 Del. Magdalena Contreras  
 C.P. 10200 México, D.F.  
 Tel. 5681 5863 Fax 5595 2827  
 psc@mail.internet.com.mx



**Solano Consultores, S.A. de C.V.**  
 Tennesi 8  
 Col. Nápoles CP 03810  
 Tel/fax 5563 2060 y 5598 5016  
 siasacea@data.net.mx  
 solano@data.net.mx