

00369

2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MIGRACION DE HIDROCARBUROS EN SUELOS ORGANICOS
CERCANOS A SITIOS DE EXPLOTACION PETROLERA EN EL
DISTRITO DE AGUA DULCE, TABASCO.

288837

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS (EDAFOLOGIA)

P R E S E N T A

RUTILIO ORTIZ SALINAS

DIRECTOR DE TESIS: DRA. SILKE CRAM HEYDRICH

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA



A Dios por brindarme la oportunidad de vivir y compartir muchas vivencias con grandes seres.

A mi padre José Ortiz y a mi madre Hilaria Salinas por su sacrificio, paciencia, amor, confianza e ilusión en mí.

A mis hermanos Cesar, Rolando y Karina por compartir grandes experiencias de una vida unida.

A mis Abuelos Rutilio, Basilio, Hilaria, Dolores y Consuelo por sus enseñanzas de amor, sinceridad y respeto a los demás.

A mis Profesores que me han impulsado a seguir adelante con sus enseñanzas, ideales y esperanzas para un futuro mejor.

Y sobre todo a mis amigos que me han acompañado en todo momento y por compartir parte de su vida conmigo.

AGRADECIMIENTOS



La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA) del Instituto de Geografía, UNAM.

Se agradece a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP) por la beca otorgada.

A la Dra. Silke Cram, Dra. Cristina Siebe y Dra. Rosario Iturbe por la oportunidad de realizar este trabajo y darme su apoyo para su buen término.

Al Dr. Gilberto Díaz por su ayuda en establecer la técnica de cromatografía, sus consejos en el trabajo, los buenos juegos compartidos y sobre todo la amistad sincera de una gran persona, con todo respeto y cariño.

Al Dr. Jorge Gama, Dra. Norma García y M. En C. Lourdes Flores por la revisión del escrito y sus valiosos comentarios para el mejoramiento del mismo.

A mis Amigos que han compartido parte de su vida conmigo y brindarme su verdadera amistad en los buenos y malos momentos.

A todos los seres queridos que me han apoyado con sus consejos y buenas intenciones para seguir adelante además de la valiosa ayuda sin condiciones, esperando no defraudar su confianza.

INDICE

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	
2.1 Antecedentes	2
2.2 Legislación Ambiental en Materia de Hidrocarburos	5
2.3 Características de los Hidrocarburos	8
2.4 Hidrocarburos en Suelo	14
7.4.1 Naturaleza y Propiedades del Suelo	17
7.4.2 Parámetros Ambientales que afectan a los Contaminantes	20
7.4.3 Transporte y Transformación de los Contaminantes en el Suelo	20
3. Zona de Estudio	
3.1 Ubicación	24
3.2 Fisiografía	26
3.3 Geomorfología	27
3.4 Estratigrafía	27
3.5 Hidrología	27
3.6 Clima	28
3.7 Clasificación del Suelo	28
3.8 Flora y Fauna	29
4. Objetivos	30
5. Hipótesis	31
6. Método	
6.1 Fase de revisión bibliográfica	32
6.2 Fase de Campo	32
6.3 Zona de Muestreo	33
6.4 Fase de Laboratorio	35
6.5 Fase de Gabinete	37
7. Resultados	
7.1 Características generales de los suelos del Distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes)	38
7.2 Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en suelo en el Distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes)	44
7.3 Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en agua en el Distrito de Agua Dulce	69
8. Discusión	
8.1 Fuentes de contaminación de hidrocarburos en el suelo	76

8.2	Migración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en suelo	82
8.3	Comparación de los derrames antiguos y recientes en el Distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes)	104
9	Conclusiones	106
10	Bibliografía	109
11	Anexos	
	Anexo 1. Estructuras Químicas de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)	
	Anexo 2 Contenido de HAP's y alifáticos en suelos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	
	Anexo 3. Contenido de HAP's y alifáticos en Agua del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó el comportamiento de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) en Histosoles y Gleysoles en el Distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes) en el Estado de Tabasco. Se identificaron las fuentes de contaminación de la zona, se determinó la migración de los hidrocarburos del petróleo en función del flujo de agua superficial y de las características propias del suelo, y finalmente se trató de definir algunos alifáticos y HAP's propios de los derrames antiguos y recientes. Las muestras analizadas correspondieron a diferentes profundidades del suelo, y agua del manto freático en los sitios seleccionados, a partir de dos muestreos aplicados a la zona; el primero, en un transecto de la microcuenca en dirección del flujo de agua (Paraíso a Panga Vieja) paralelo a la petroquímica de la Venta comprendiendo un área aproximada de 10 km² y, el segundo, en transectos a partir de derrames antiguos y recientes a una distancia de 10, 50 y 100 m de distancia, definiendo sitios control para la Venta, Cinco Presidentes, Ogarrío y Aquiles Serdán. Los alifáticos y HAP's fueron cuantificados por medio de la técnica de Cromatografía de Gases con Detector de Ionización a la Flama (FID).

Los resultados obtenidos para el primer muestreo definieron que no existe una movilidad de los contaminantes de zonas altas a bajas ya que no se encontró una tendencia clara hallando solamente sitios puntuales de contaminación. Los derrames antiguos y recientes, muestran que la mayor concentración de hidrocarburos alifáticos y HAP's se encuentran en el sitio del derrame. La mayor concentración de hidrocarburos se localizó en los derrames antiguos, probablemente debido a la frecuencia y el mayor tiempo de contacto con el suelo. La movilidad vertical y horizontal se definió como mínima, excepto en aquellos sitios donde los suelos están sujetos al cambio variable de la profundidad del manto freático de acuerdo a la época del año. En estos sitios se registró una migración horizontal hasta de unos 30 m aproximadamente siendo el agua el agente de dispersión. Por lo general, sólo en los puntos de origen de los derrames se rebasa el límite permisible de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) de 100 mgkg⁻¹ establecida por EPA (Environmental Protection Agency), así como de algunos HAP's en la parte superficial del suelo de manera individual o total en 20 mgkg⁻¹. La concentración en las muestras de agua colectadas se hallan por debajo del límite permisible en ambas fracciones, observando que el sedimento es el lugar de mayor concentración de compuestos orgánicos, pero que no rebasa el criterio de limpieza establecido. Se destaca el alto porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial y la textura arcillosa del horizonte C presente en los perfiles de los suelos de la región que limitan el movimiento de dichos contaminantes a través del suelo y, con ello, evitan el movimiento vertical.

Debido a la presencia de varios compuestos orgánicos de bajo peso molecular en los derrames antiguos es probable que los hidrocarburos tengan una fuerte afinidad a la materia orgánica (partición), además de presentar indicios de biodegradación como lo demuestran los "perfiles cromatográficos" que presentan la típica UCM (Unresolved Complex Mixture) de hidrocarburos degradados.

1. INTRODUCCION

El desarrollo económico en México favoreció la concentración territorial de la industria. Hasta 1970 no se aplicó ningún criterio ambiental para su desarrollo, aunque había indicios de impactos crecientes sobre la contaminación atmosférica y la generación de residuos. El resultado de una política de bajos precios de petróleo propició su uso intensivo y, con ello, un crecimiento de la demanda energética más acelerada. En la segunda parte de la década de los 70's, la reestructuración productiva de la industria se modificó debido al crecimiento petrolero. La petroquímica básica se convirtió en la actividad con mayor contribución a la contaminación, también la producción de fibras sintéticas, resinas, fertilizantes, plásticos, pinturas y pigmentos, y gases industriales que pasaron a ser las actividades más relevantes por su impacto potencial al ambiente (Quadri, 1994).

En México, la industria petrolera en su conjunto ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental. Por 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 petroquímicos básicos (Saval, 1995).

El suelo y subsuelo constituyen un recurso natural difícilmente renovable que desempeña funciones entre las que destaca su papel como medio filtrante durante la recarga del manto acuífero y la protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y las redes tróficas, además de ser el espacio donde se realizan las actividades agrícolas, ganaderas y soporte de la vegetación (Saval, 1995).

Durante mucho tiempo y hasta hace poco, nadie se preocupaba por el destino de los residuos generados, dando por hecho que la naturaleza limpiaba el ambiente, pero según fue cambiando la naturaleza y composición de los residuos, y al aumentar su cantidad y complejidad, esta capacidad (degradativa y amortiguadora) empezó a alterarse (Gutiérrez, 1990).

El desarrollo petrolero y el crecimiento de la industria petroquímica han requerido de la utilización intensiva de los energéticos fósiles para cubrir las necesidades de una sociedad más consumista, en artículos indispensables en la industria, hogar, comercio y personal que ha llevado, a lo largo del tiempo, a una fuerte degradación del ambiente, principalmente el aire. En la extracción del petróleo no se considera el bienestar del ambiente, lo que ha contribuido a la degradación del aire, agua y suelo. En México se ha realizado poca investigación sobre este último, en comparación al aire y agua referente a estudios de contaminación, por lo que es necesario llevar a cabo estudios para conocer el estado actual de los suelos cercanos a zonas industriales y urbanas, indispensables para el uso adecuado y conservación de éstos.

La industria petrolera es un componente fundamental de la economía del Estado de Tabasco desde los años sesenta debido a los volúmenes de petróleo y gas extraídos. La exploración y extracción aumentó su importancia durante los años sesenta en la región occidental, en el distrito de Agua Dulce (Activo Cinco Presidentes). La infraestructura petrolera está integrada por pozos, baterías de separación, complejos procesadores de gas,

centrales de almacenamiento y bombeo, red densa de ductos y presas para el confinamiento de desechos sólidos y líquidos procedentes de la perforación y mantenimiento de los pozos.

Estas instalaciones poseen riesgos inherentes de fugas de petróleo, diesel y gasolina por roturas de los ductos, por filtración de aguas aceitosas desde las presas y por los derrames del agua aceitosa de las presas por las inundaciones durante el periodo de lluvias.

Estudios previos (CIMADES, 1997) han determinado la presencia de HAP's totales en agua de norias reportando una concentración de 27.03 ppb, donde la concentración del benzo(a)pireno en las norias fue reportada como 65.12 ppb, lo que es entre 10 veces y 100 veces mayor que el estándar de agua potable subterránea, lo que implica un riesgo de salud pública y al ambiente.

Los HAP's son un grupo de compuestos orgánicos que presentan dos o más anillos bencénicos en su estructura, representan aproximadamente el 2 % del total del crudo, incluyen compuestos tóxicos que es necesario evaluar, principalmente los de alto peso molecular benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, criseno, benzo(b)fluoranteno e indeno(123cd)pireno; sin embargo, sus efectos en la salud humana son variables. Se forman durante la combustión incompleta del carbón, aceite y gas, basura y otras sustancias orgánicas. Pueden ser producidos por las actividades del hombre, o presentarse en forma natural y en los depósitos que resultan de la quema de material vegetal y actividades volcánicas. Algunos HAP's son utilizados en la elaboración de medicamentos, preparación de teñidos, plásticos y pesticidas.

La información existente sobre el comportamiento de hidrocarburos en suelos orgánicos afectados por las actividades petroleras en Tabasco, principalmente su migración a aguas subterráneas es limitada. Por esto, el objetivo central de este trabajo es el de analizar el comportamiento de los hidrocarburos del petróleo en suelos orgánicos del distrito de Agua Dulce, Tabasco, que es una zona que ha sido afectada por derrames de hidrocarburos continuamente desde los años 60's.

2. MARCO TEORICO.

2.1 ANTECEDENTES.

Por la importancia económica que representa el petróleo para México y, ante la demanda en el mercado exterior, a pesar de las fluctuaciones de su precio, se ha intensificado su explotación lo cual representa el renglón más fuerte en la captación de divisas. Durante el periodo 1995-1999, Pemex ha entregado al Gobierno Federal 854 mil millones de pesos por concepto de impuestos directos e indirectos así como derechos de extracción (Pemex, 2000). Ante esta situación, México se ha convertido en el cuarto productor de petróleo en el mundo, con producción diaria de 3 millones de barriles, exportando 1.4 millones de barriles diarios. Este producto se exporta a Canadá, Estados Unidos, Centroamérica, España, Francia, Yugoslavia, Japón e Israel (Ayllon & Chavez, 1994). Las reservas probadas, probables y posibles ascendieron –al primero de enero del 2000- a 58 mil 204 millones de barriles de petróleo crudo equivalente, por lo que la relación reserva – producción es superior a los 40 años (Pemex, 2000).

A la industria petrolera la constituyen las áreas de la 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 industria petroquímica surge de la necesidad de obtener una serie de derivados del petróleo, y básicos para otras industrias. Su importancia deriva de la gran variedad de las industrias a las que abastece, entre ellas la de fertilizantes, fibras sintéticas, plásticos, llantas, jabones y detergentes, artículos para el hogar, empaques, etc. (Ayllon & Chavez, 1994).

Por las diferentes actividades industriales que efectúa PEMEX, existe un potencial de contaminación del ambiente por la emisión de humos, polvos, gases y descargas de aguas residuales generadas durante la perforación de pozos petroleros, por la extracción de líquidos, por su refinación y producción de petroquímicos. Además, la transportación de petróleo crudo y productos refinados por buques tanque y tuberías tiene implícita la posibilidad de derrames que pueden contaminar suelo, agua y atmósfera.

La institución petrolera asume la obligación de proteger, controlar y restaurar al ambiente en lo relativo a sus actividades industriales, así como de las comunidades y poblaciones en donde opere (PEMEX, 1988).

PEMEX - Refinación, lleva a cabo múltiples y variadas acciones para reducir las emisiones de contaminantes, contando con un inventario de emisiones atmosféricas de todas las refinerías, el cual se elaboró mediante un programa de 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 a la información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería "Lázaro Cárdenas" y el Pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México (Veracruz y Tabasco) (González & Quintero, 1995).

Por otra parte, se tiene que los residuos o desechos de la actividad petrolera están clasificados como residuos peligrosos. Se calcula que en 1991 se generaron 5,292 miles de T/año de residuos peligrosos y se ha estimado que el 24% son derivados del petróleo, es decir, 130,183 T/año. Un informe de la SEDESOL menciona que los residuos anuales de los procesos de refinación y petroquímicos de Petróleos Mexicanos, alcanzan la cifra de 1.7 millones de T de residuos, de estos el 90.15% corresponde a desperdicios semisólidos; 9.6% a líquidos y 0.25% a sólidos; 18% del total se consideran peligrosos. Los residuos reciclados representan 0.1% y se estima que sólo 13% del total es susceptible de ser reutilizado, ver cuadro 1 (Saval, 1995).

Cuadro 1. Residuos anuales generados por los procesos de Refinación y Petroquímica de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

RESIDUOS	10 ³ T/año	%
Desperdicios semisólidos	1,532.55	90.15
Desperdicios líquidos	163.2	9.6
Desperdicios sólidos	4.25	0.25
Residuos peligrosos	221.0	18.0
Residuos reciclados	1.7	0.1
Residuos susceptibles de ser utilizados	187.0	13.0

Tomado de Saval, 1995.

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 la política ambiental. El único informe disponible al público se elaboró en 1995, donde la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) reporta que durante 1992 a 1994, 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; La Cangrejera, Coatzacoalcos (Bojórquez & García, 1995).

Las instalaciones que han recibido certificados de industria limpia son las más importantes de Pemex, tales como 4 refinerías, 10 centros de procesamiento de gas y 7 centros petroquímicos y se añaden 53 terminales de almacenamiento y distribución, y diversos ductos e instalaciones de explotación de crudo (Pemex, 2000). Atendiendo a 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

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.

PROFEPA entregó certificados de industria limpia a 10 instalaciones de PEMEX Exploración y Producción, 2 a PEMEX Refinación, 1 a PEMEX Gas y Petroquímica Básica y otra más a PEMEX Petroquímica. Asimismo, otorgó 8 refrendos, de los cuales 6 fueron para PEMEX Gas y Petroquímica Básica y 2 para PEMEX Petroquímica (Pemex, 2000).

En el informe anual de Pemex 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 derrames 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. Las emisiones al aire constituyen 84 % de las emisiones y descargas totales. Cerca de 70 % de las emisiones al aire se refieren a SO_x , mientras que casi 20 % son compuestos orgánicos volátiles totales (COVT). El 91 % de las emisiones de COVT provienen de la evaporación de hidrocarburos, mientras que 9 % se refiere a hidrocarburos liberados por procesos de combustión parcial. Las refinerías participan con el 87 % del total, esta evaporación se da principalmente en los tanques de almacenamiento.

2.2 LEGISLACION AMBIENTAL EN MATERIA DE HIDROCARBUROS.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) es el instrumento fundamental que introdujo la modificación en el régimen de las autorizaciones de obras o actividades “que pueden causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o de reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente”. Se menciona particularmente, para las actividades petroleras:

- I. Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, **oleoductos, gasoductos y carboductos**;
- II. Industria del petróleo, **petroquímica**, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica;
- XIII. Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal, que pueden causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (LGEEPA, 1996).

La protección de los elementos naturales del suelo queda alineada en el ámbito general de la LGEEPA, por lo mismo, son aplicables sus instrumentos de control, la ordenación ecológica del territorio, la manifestación del impacto ambiental para obras y actividades antes mencionadas, la adopción de medidas de protección en áreas naturales, a través del

Instituto Nacional de Ecología (INE) y Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), órganos desconcentrados de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, en la inspección, vigilancia y aplicación de medidas para la conservación y preservación del ambiente (Díaz, 1995).

La LGEEPA establece los siguientes aspectos para atender la contaminación del suelo con 11 artículos, destacando:

Art. 134. Menciona los criterios de la prevención y control de la contaminación; párrafo I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo. II. Deben controlarse los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación del suelo; IV. Se establece que en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

Art. 136. Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar: I. Contaminación del suelo, II Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos; III. Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación y; IV. Riesgos y problemas de salud.

Art. 139. Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley, la ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

Art. 140. La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a la que establezca en las Normas Oficiales Mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (Diario Oficial, 13 de Diciembre de 1996).

De acuerdo al Programa Nacional Forestal y de Suelo 1995-2000 es de importancia el fomento de la conservación de los suelos como acción prioritaria, por lo que se busca inducir cambios en los sistemas productivos a nivel nacional que combinen la optimización de ingresos y rendimientos con la conservación, abriendo espacios formales para la participación de los productores en las tareas de diagnóstico, selección de alternativas e instrumentación de acciones para contener el deterioro ambiental, por lo que menciona una serie de programas y objetivos a alcanzar, involucrando a la parte industrial, gubernamental y académica.

En lo relativo al marco normativo de la restauración y conservación de suelos, se observan múltiples deficiencias y contradicciones en los diversos aspectos de cada instrumento jurídico. Por otro lado, se identifica un rezago en la generación de normas que permitan un ejercicio eficaz de la acción pública y la orientación para los productores, buscando una congruencia de todo el marco normativo, tomando en cuenta las tendencias internacionales en la materia (Poder Ejecutivo Federal, 1995).

En nuestro país no existen normas con respecto a 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). En los Estados Unidos, cada gobierno estatal ha desarrollado sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo (Saval, 1995). Para un mismo parámetro existe una gran discrepancia por ejemplo para HTP el límite varía de 40 a 2000 mgKg⁻¹ como se muestra en los cuadros 2 y 3. En México, la PROFEPA ha manejado criterios de limpieza desarrollados por el Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados conformado por esta dependencia (Cuadro 3) (Profepa, 1999).

Con la necesidad de proveer un marco legal en la protección y contaminación del suelo, se han definido aspectos relevantes por el Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados en la gestión de una guía de evaluación de daños ambientales y propuestas de restauración, destacando lo siguiente:

1. Acciones de contención, evaluación y restauración de los suelos contaminados
2. Decisión en 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.

Cuadro 2. Límites permisibles o Niveles de limpieza en algunas entidades de E.U.

Estado	Tipo de Contaminante	Parámetro Indicador	Límite (nivel de Suelo) (mgkg ⁻¹)	Permisible (nivel de limpieza) Agua subterránea (µg/l ⁻¹)	Método Suelo	Análisis Agua subterránea
Alabama	Gasolina diesel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071, EPA 418.1	
Arizona	Gasolina	HTP		1		EPA 418.1
Arkansas	Gasolina diesel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
Delaware	Gasolina diesel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
Florida	diesel	naftaleno		100		EPA 610
Idaho		HTP	40-200		EPA 9015	
	diesel	HTP	100-2000		EPA 8015	
		HTP	100		EPA 418.1	
Georgia	Gasolina diesel aceite gastado	HTP	100-500		California M	
	diesel	benzopireno		0.03-0.2		EPA 550 EPA 8270
		antraceno		110,000		EPA 8270
		criseno		0.3		EPA 8270
		fluorantreno		370		EPA 8270
		fluoreno		14,000		EPA 8270
		pireno		11,000		EPA 8270
Kansas	Gasolina diesel aceite gastado	HTP	100			
	diesel	naftaleno		143		

Continuación						
Missouri	Gasolina	HTP	50-500	5-10	EPA 418.M	EPA 418.1
Montana	Gasolina diesel	HTP	100			
Nevada	Gasolina diesel	HTP	100		EPA 8015	

HTP: hidrocarburos totales de petróleo; M: método modificado (Tomado de Saval, 1995 en PEMEX: Ambiente y Energía).

Cuadro 3. Límites permisibles para HAP's establecido por Canadá y los Países Bajos y Criterios de limpieza desarrollados por la PROFEPA

Fuente	Parámetro	Suelo 1 (mgkg ⁻¹)	Suelo 2 (mgkg ⁻¹)	Suelo 3 (mgkg ⁻¹)	Agua (µgL ⁻¹)
Profepa	HTP	1000	1000	2000	---
	Benzo(a)pireno	0.08	0.08	0.75	---
	Benzo(a)antraceno	0.8	0.8	7.5	---
	Benzo(b)fluoranteno	0.8	0.8	7.5	---
	Benzo(k)fluoranteno	8.0	8.0	75	---
	Criseno	80	80	750	---
Canadá	Benzo(a)antraceno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Benzo(a)pireno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Benzo(a)fluoranteno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Benzo(b)fluoranteno	0.1	1.0	10.0	---
	Dibenzo(a,h)antraceno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Indeno(1,2,3 cd)pireno	0.1	1.0	10.0	0.01
	Naftaleno	0.1	5.0	50.0	0.1
	Fenantreno	0.1	5.0	50.0	0.2
	Pireno	0.1	10.0	100.0	0.2
	Países Bajos	Naftaleno		5	
Fenantreno			10		2.0
Antraceno			10		2.0
Fluoranteno			10		1.0
Criseno			5		0.5
Benzo(a)antraceno			5		0.5
Benzo(a)pireno			1		0.2
Benzo(k)fluoranteno			5		0.5
Indeno(1,2,3-c,d)pireno			5		0.5
Benzo(g,h,i)perileno			10		1.0
HPA total			20		10

Suelo 1: Se refiere a uso agrícola. Suelo 2: De uso residencial/recreativo. Suelo 3: De uso industrial (Profepa, 1999).

2.3 CARACTERISTICAS 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 (Wood, 1974; Chappin, 1988 y PEMEX, 1988).

Se considera a los hidrocarburos de petróleo como una mezcla líquida compleja de gases, líquidos y sólidos, existiendo pequeñas cantidades de mezclas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de contener compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales (PEMEX, 1988; Wood, 1974).

De manera general, el petróleo tiene una proporción de 76 a 86% de carbono, e hidrógeno de 10 a 14%. Los hidrocarburos se clasifican de la siguiente forma:

	* Hidrocarburos saturados	-Alcanos normales o ramificados (parafinas) y cicloalcanos (naftenos)
Petróleo	* Hidrocarburos aromáticos	-Aromáticos, aromáticos policíclicos, cicloalcanos aromáticos (naftenoaromáticos) y compuestos de sulfuro cíclico
	* Resinas y Asfaltenos	-Fracciones policíclicas de alto peso molecular que contienen nitrógeno, sulfuro y oxígeno.
	* Además dentro de los hidrocarburos cíclicos existen por lo menos los anillos con un carbono sustituido por O, N y S pertenecientes a otro tipo de compuestos orgánicos.	

Tomado de Green & Trett, 1989

En la naturaleza, los hidrocarburos se presentan de la siguiente forma:

Hidrocarburos Biogénicos: Estos son sintetizados por casi todas las plantas, animales terrestres y marinos, incluyendo la microbiota, bacterias, plancton marino, diatomeas, algas y plantas superiores (Bedair & Al-Saad, 1992). La síntesis de este tipo de hidrocarburos está controlada por rutas metabólicas, lo cual trae como resultado mezclas de compuestos de limitada complejidad estructural relacionada directamente con la función biológica específica.

Las características de los hidrocarburos biogénicos son:

- Los formados recientemente exhiben un alto nivel de n-alcanos de número impar
- Los aportes por detritus de plantas terrígenas se caracterizan por n-alcanos de número impar en la región de C_{23} - C_{33}
- Los aportes de origen marino se ven marcados por la presencia de los alcanos C_{15} , C_{17} y C_{19}
- Las contribuciones biogénicas notan el predominio del isoprenoide pristano
- Compuestos de tipo aromático no se presentan frecuentemente o al menos en proporciones significativas (Bedair & Al-Saad, 1992).

Estos pueden ser biosintetizados por los organismos o bien pueden ser ingeridos con el alimento y alterados después de su ingestión. El fitano y el pristano son compuestos que se encuentran comúnmente en el petróleo, en los organismos sólo se conoce el pristano que al parecer ingresa con el alimento (Padilla, 1989).

La formación de compuestos aromáticos y alifáticos de bajo peso molecular es dado conforme al tiempo de la descomposición de la materia orgánica, estos compuestos pueden ser condensados para dar lugar a sustancias de mayor peso molecular como lo explica Schnitzer & Khan (1978) y Blumer & Youngblood (1975) como parte de la teoría de la biosíntesis confirmada por un gran número de compuestos de bajo peso molecular que es un buen indicador de la presencia microbiana en el suelo.

Hidrocarburos Antrópicos: Son aquellos que son introducidos como resultado de cualquier tipo de actividad humana. Los procesos de combustión industrial que contribuyen con niveles mucho más altos debido principalmente al humo generado por

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 HAP's constituyen contaminantes orgánicos relacionados con las actividades humanas. Los compuestos que más conciernen de los hidrocarburos del petróleo y de la pirólisis de combustibles son los hidrocarburos aromáticos policíclicos, sus homólogos alquil y los HAP's sustituidos con sulfuro o nitrógeno. Muchos de esos compuestos son estables y altamente tóxicos, algunos son potentes carcinógenos y otros mutagénicos. Se ha reportado que los HAP's son producidos a altas temperaturas de 400 a 500°C, mientras los homólogos alquil sustituidos se producen a bajas temperaturas de 100 a 150° C (Green & Trett, 1989).

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

Hay dos clases de hidrocarburos aromáticos: los de bajo peso molecular que tienen de 2 a 3 anillos aromáticos como el naftaleno, fluoreno, fenantreno y antraceno y derivados, y los de alto peso molecular que tienen de 4 a 7 anillos aromáticos como el criseno. Sus características físicas y químicas varían de acuerdo a su peso molecular y, en consecuencia, en su distribución y conducta del ambiente, lo mismo sus efectos en los sistemas biológicos.

Su importancia está relacionada a su movilidad, debido a su peso molecular, presentándose en un intervalo de 128.16 a 300.36 u.m.a. para el naftaleno y coroneno, respectivamente. Los HAP's de alto peso molecular son relativamente inmóviles y, por ende, de baja volatilidad y solubilidad. Dieciséis HAP's (naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoreno, benzo(k)fluoreno, benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-cd)pireno, dibenzo(ah)antraceno y benzo(ghi)perileno) son considerados como contaminantes prioritarios por EPA, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Económica Europea (CEE) debido a sus efectos carcinógenos (Menzie *et al.*, 1992).

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

Las características determinantes de los hidrocarburos en el ambiente son las siguientes:

Densidad. Se define como la relación entre la masa y una unidad de volumen determinado para una sustancia en particular (Redmore, 1981). Los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: Compuestos orgánicos ligeros: son aquellos cuya densidad es menor que la del agua. Compuestos orgánicos densos: son aquellos que poseen una densidad mayor a la del agua.

Polaridad. Se refiere a la existencia o no de una distribución equitativa de las nubes electrónicas que forman varios enlaces. Si no es equitativa, una parte de la molécula será más positiva y la otra será más negativa. Por tanto, la molécula se comporta como un dipolo o que es una molécula polar. Por otra parte, si las nubes electrónicas están igualmente distribuidas, decimos que la molécula es no polar. La polaridad depende de la electronegatividad de los átomos y la forma de la molécula, si no hay diferencia de electronegatividad de los átomos la molécula será no polar. Todos los compuestos orgánicos contienen carbono y la mayoría también hidrógeno, debido que existe una leve diferencia en electronegatividad entre el carbono y el hidrógeno; la mayoría de los compuestos son no polares (Redmore, 1981).

De acuerdo a McBride (1994), los hidrocarburos alifáticos son compuestos no polares y son, por lo tanto, pobres competidores con el agua. Los hidrocarburos aromáticos, son compuestos no polares o muy débilmente polares como los alifáticos. Se ha determinado que compuestos no polares o débilmente polares tienen afinidad por las fases orgánicas hidrofóbicas en ácido húmico siendo las fuerzas de Van der Waals o la atracción hidrofóbica como unión de enlace.

Hidrofobicidad. Se refiere a la poca afinidad de los compuestos orgánicos al agua como es el caso de los hidrocarburos del petróleo. El comportamiento resultante es una baja solubilidad de las moléculas no polares y aquellas débilmente polares que tienen una mayor afinidad de reaccionar con la materia orgánica a través de las interacciones de Van der Waals.

Solubilidad al agua.- Es la característica química más importante usada para asegurar: (a) movilidad química, (b) estabilidad química, (c) acumulación química, (d) bioacumulación química y (e) sorción química, en el ambiente

Las características de la solubilidad son:

- La alta solubilidad al agua de un compuesto químico promueve su mayor movilidad, y es menos probable a ser acumulativo, bioacumulativo, volátil y persistente; un compuesto químico altamente soluble es propenso a ser biodegradado y metabolizado por los microorganismos.
- Un contaminante químico poco soluble en agua es más probable de ser inmovilizado por vía adsorción y es menos móvil, más acumulativo o bioacumulativo, persistente en los compartimentos ambientales y ligeramente propenso a biodegradarse y puede ser metabolizado por plantas y animales (Ney, 1990).

Los valores numéricos de la solubilidad son los siguientes:

- solubilidad baja < de 10 ppm
- solubilidad media entre 10 y 1000 ppm
- solubilidad alta >1000 ppm

La solubilidad de los hidrocarburos varía de acuerdo a sus características químicas y físicas que influyen de manera determinante en el transporte de tales compuestos hacia zonas profundas, como a continuación se observa en el siguiente cuadro 4:

Cuadro 4. Solubilidad de Hidrocarburos y Derivados

Grupo de Hidrocarburo	Hidrocarburo Representativo	Solubilidad en agua (mgL ⁻¹)
n-Alcanos		
C4	n-butano	61.4
C5	n-pentano	38.5
C6	n-hexano	13.3
C7	n-heptano	2.2
C8	n-octano	0.43
C9	n-nonano	0.12
C10-C14	n-decano	0.05
Alcanos Ramificados		
C4	Isobutano	49
C5	Isopentano	48
C6	2-metilpentano	78
C7	2-metilhexano	2.54
C8	2,4-dimetilhexano	1.29
C9	2,2,4-trimetilhexano	0.53
Cicloalcanos		
C6	Ciclohexano	55
C7	Metilciclohexano	14
C8	1,2,4-Trimetilciclopentano	
C9	1,1,3-Trimetilciclohexano	1.77
Oleofinas		
C4	1-buteno	222
C5	1-pentano	148
C6	1-hexano	69.7
Monoaromáticos		
Benceno	Benceno	1,760
Tolueno	Tolueno	470
Xilenos	m-xilenos	172
Etil benceno	Etilbenceno	140
C3-bencenos	1,3,4-trimetilbenceno	48.2
C4-bencenos	1,4-dietilbenceno	15
Fenoles		
Fenol	Fenol	82,000
C1-fenoles	o-cresol	31,000
C2-fenoles	2,4-dimetilfenol	4,600
C3-fenoles	2,4,6-trimetilfenol	14,000
C4-fenoles	m-etilfenol	

Tomado de Fan & Krishnamurthy, 1995

Coefficiente de partición agua octanol. Expresa la relación de concentraciones en equilibrio de un químico en las fases de octanol y agua. Es un indicador de la bioacumulación o potencial bioconcentración de un compuesto químico en el tejido graso de los organismos. El coeficiente es un indicador de la solubilidad al agua, movilidad, sorción y bioacumulación. Su valor se describe de la siguiente forma:

- Alto coeficiente, significa mayor afinidad de bioacumularse/bioconcentrarse en la cadena alimenticia, mayor su potencial de sorción en suelo y baja su movilidad además de significar una baja solubilidad en agua.
- Bajo coeficiente, significa menor afinidad química a bioacumularse, mayor su potencial de movilidad, mayor solubilidad y mayor su potencial a biodegradarse y poder ser metabolizado.

Los valores numéricos para este parámetro (K_{ow}) son los siguientes:

- Un coeficiente menor de 500 puede ser indicativo de una alta solubilidad al agua, movilidad, poco o nada de bioacumulación o acumulación y degradabilidad por microbios, plantas y animales.
- Un coeficiente mayor de 1000 es indicativo de la baja solubilidad, inmovilidad, no biodegradabilidad y es un químico que es bioacumulativo, acumulativo, persistente y adsorbido al suelo (Ney, 1990).

Presión de Vapor. En el caso de los HAP's de bajo peso molecular (2 anillos) su valor es de 10^{-4} atm indicativo de ser volátiles al ambiente y los de alto peso molecular (>5 anillos) con un valor de 10^{-13} atm tienden a quedar en suelo dado su peso molecular. Los alifáticos con un peso molecular bajo (C_5H_{12}) con un valor de 1 atm y los de peso molecular alto ($C_{18}H_{36}$) con un valor de 10^{-7} atm. Para los compuestos orgánicos como es el caso de los hidrocarburos estos se pueden manifestar de la siguiente manera:

- (a) Un compuesto químico con una presión de vapor baja, alta capacidad de adsorción o alta solubilidad al agua es menos probable a volatilizarse (principalmente compuestos orgánicos de alto peso molecular).
- (b) Un compuesto químico con una presión de vapor alta, baja capacidad de adsorción o baja solubilidad al agua es más probable a volatilizarse.

Coefficiente de partición en suelo. Es frecuentemente interpretado como una medida de la contribución de las fuerzas hidrofóbicas para la sorción. Esto es preciso para compuestos altamente no polares, y puede no ser preciso para especies polares. El K_{oc} puede ser calculado de otras propiedades del compuesto químico como la solubilidad al agua, el coeficiente de partición agua octanol (K_{ow}) y de la estructura molecular del compuesto. El contenido de materia orgánica del suelo o sedimento es importante en la adsorción de los contaminantes orgánicos (Karickhoff, 1985; Ney, 1990).

En los sistemas de agua-suelo/sedimento, donde el contenido de materia orgánica es significativo, la adsorción de los contaminantes orgánicos no polares ocurre principalmente por partición dentro de la materia orgánica. De acuerdo al coeficiente de distribución agua-suelo/sedimento (K_d) de contaminantes no polares es fuertemente dependiente del contenido de materia orgánica del suelo o sedimento (f_{om}) o alternativamente del contenido de carbón orgánico del suelo/sedimento (f_{oc}) (Chiou *et al.*, 1998). Expresando la siguiente relación:

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

En el cuadro 5 se muestra el destino de los contaminantes orgánicos en el ambiente en función de su coeficiente de distribución en suelo y solubilidad al agua,

Cuadro 5. Relación de compuestos orgánicos y su destino en el ambiente

Suelo	Koc > 10, 000 SA < 10 ppm	Koc 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	n	Otra vía	Sí

n* denota insignificante, Koc: Coeficiente de partición en suelo y SA: Solubilidad al agua. Otra vía se refiere a que puede participar cualquiera de los procesos del suelo.

Tomado de Ney, 1990

2.4 HIDROCARBUROS EN EL SUELO.

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas (densidad, solubilidad, polaridad, entre otras.), además de las características del medio como son la unidad de 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 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Parámetros del compuesto químico, suelo y ambiente que influyen en el transporte a través del 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	

Tomado de Jury, 1989.

Los compuestos orgánicos ligeros como las 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 al flujo de agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad (Figura 1).

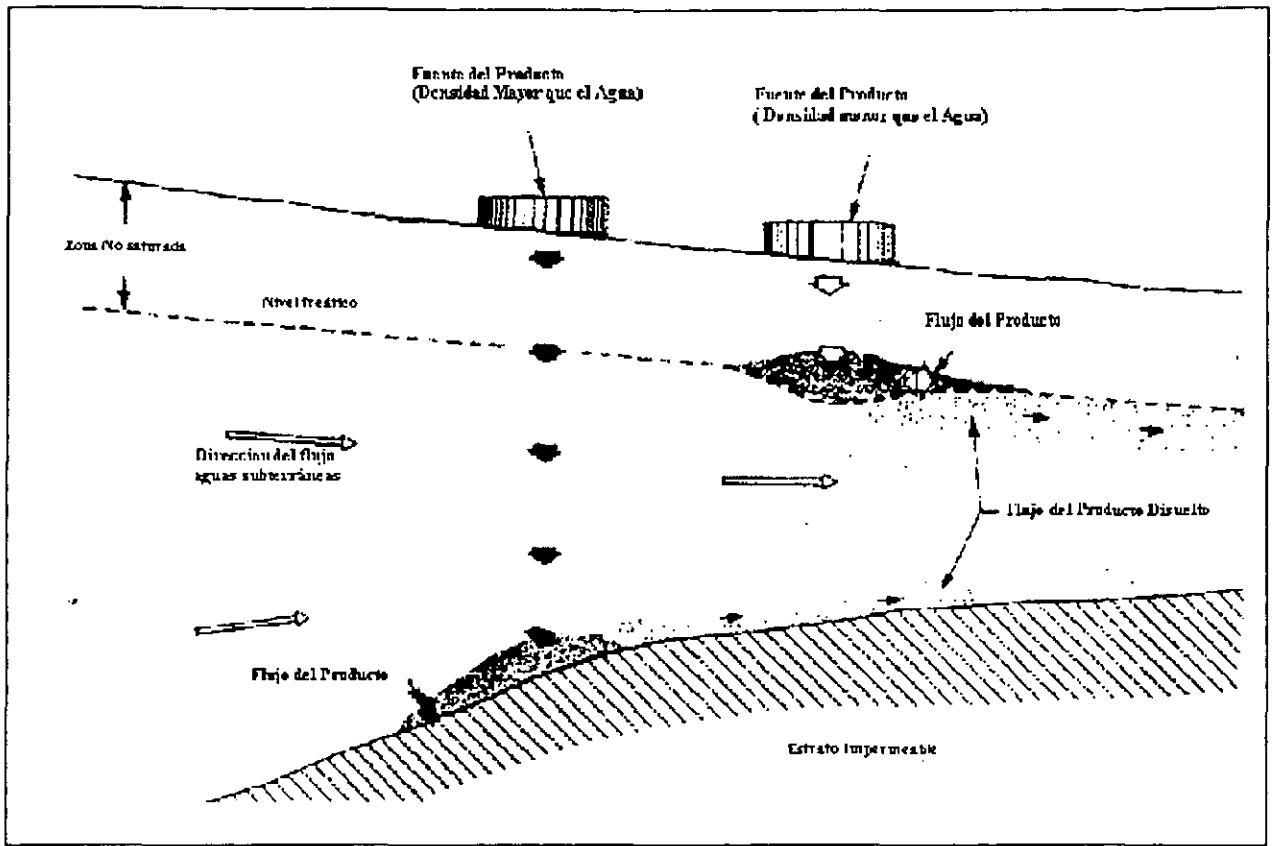


Figura 1. Efectos de la densidad en la migración de contaminantes (Tomado de Barcelona *et al.*, 1990)

Para la zona superficial se han conceptualizado algunas relaciones con respecto al suelo y la presencia de contaminantes, a través de observaciones indirectas de acumulación de los contaminantes orgánicos en asociación con adsorbentes naturales (Luthy *et al.*, 1997), estableciendo los siguientes procesos:

- A. Absorción a la materia orgánica amorfa o natural o en Líquidos de la Fase No Acuosa (LFNA) como es el caso del petróleo,
- B. Absorción a la materia orgánica condensada o en polímeros o residuos de combustión,
- C. Adsorción a superficies orgánicas húmedas (hollín),
- D. Adsorción en superficies minerales (cuarzo) y
- E. Adsorción dentro de los microporos o en minerales microporosos (zeolitas) con superficies porosas a saturación de agua < 100 % (Figura 2).

En la figura 2 se indican las interacciones del geosorbente con los contaminantes orgánicos hidrofóbicos siendo de tres tipos principalmente: (1) El mineral con su superficie reactiva atribuible a: I. Superficies minerales externas expuestas a la escala de la partícula y superficies dentro de los macroporos; II. Superficies interlaminares de arcillas expandibles a una escala de nanómetros; III. Superficies dentro de los mesoporos y microporos. (2) La

materia orgánica del suelo a una escala de nanómetros. (3) Los LFNA adheridos o atrapados que pueden funcionar como materia orgánica, excepto para material altamente intemperizado o películas interfaciales.

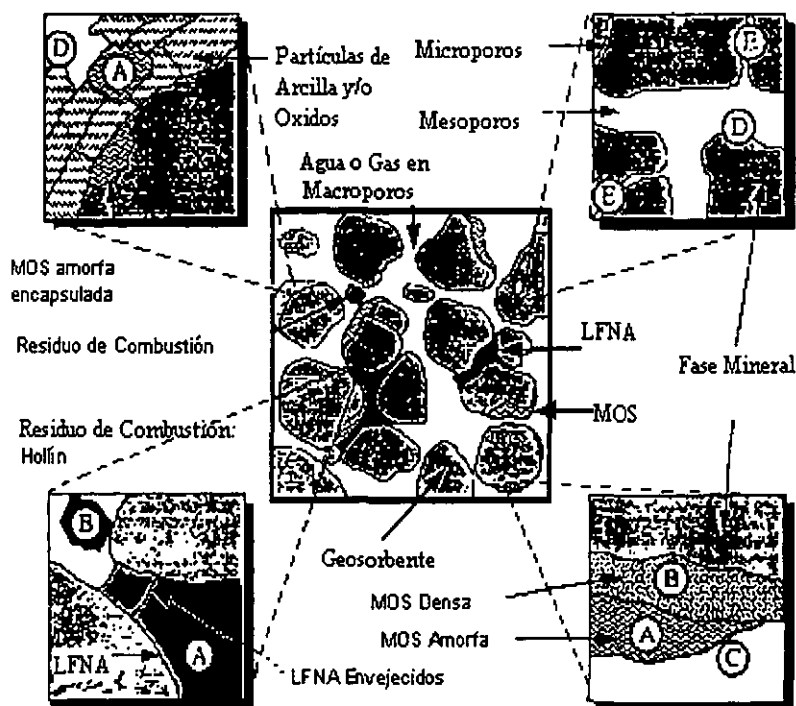


Figura 2. Modelo conceptual de Geosorbentes dominantes, que incluyen a las diferentes formas de la materia orgánica sorbente (MOS), carbón particulado como residuo de combustión (hollín), y carbón antropogénico incluyendo líquidos de la fase no acuosa (LFNA). Las letras en los círculos representan a los mecanismos de sorción (Luthy *et al.*, 1997).

Elías-Munguía y Martínez (1991) en Semarnap (1996), concluyen que las propiedades físicas del suelo más afectadas por derrames de hidrocarburos son:

- a. La estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados
- b. Aumento de la retención del agua en la capa superficial.
- c. 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 gran área superficial para la absorción de los productos químicos.

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

- a. Aumento del carbono orgánico ya que el 75 % del carbono del petróleo crudo es oxidable

- b. Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos.
- c. Aumento del manganeso y hierro intercambiable
- d. Aumento del fósforo disponible (Semarnap, 1996).

Los efectos tóxicos de los hidrocarburos en el ambiente dependerán de:

- a. La cantidad y composición del petróleo
- b. La frecuencia y tiempo de exposición
- c. El estado físico del derrame.
- d. Las características del sitio donde sucedió el derrame.
- e. Variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno.
- f. El uso de dispersantes químicos (está restringido su uso).
- g. La sensibilidad de la biota específica del ecosistema impactado (Semarnap, 1996).

2.4.1 Naturaleza y Propiedades del Suelo

Los hidrocarburos se pueden encontrar de la siguiente forma en el suelo: líquida, soluble en el agua del suelo, adsorbidos por el suelo y en la atmósfera edáfica (Lesser, 1995).

Las propiedades y condiciones que afectan la migración, retención y transformación de compuestos orgánicos en el suelo son:

Materia Orgánica. Se ha correlacionado positivamente con la adsorción de compuestos orgánicos en numerosos estudios. Un efecto inmediato del aumento de este parámetro es el incremento de los sitios de adsorción, disminuyendo la concentración en la fase acuosa y gaseosa del contaminante orgánico como también su transporte y su biodisponibilidad.

La adsorción es afectada por dos factores: la hidrofobicidad del contaminante (es la dificultad para disolverse en agua) y la fracción de la materia orgánica en el suelo (contenido de carbono orgánico). Muchos de los compuestos hidrofóbicos pueden ser altamente adsorbidos, de acuerdo a varios estudios de campo (Mackay *et al.*, 1985).

Los mecanismos de enlace de hidrógeno y la interacción ion dipolo no son operativos para las moléculas no polares. La adsorción de las moléculas no polares puede ocurrir en la materia orgánica, aunque hay debate acerca de la naturaleza del proceso (Fränzle, 1993).

Las moléculas no polares o débilmente polares tienen una gran afinidad por fases orgánicas hidrofóbicas en ácidos húmicos con fuerzas de atracción débil (Van der Waals) o bien una atracción hidrofóbica y para aquellas polares sin carga demuestran una afinidad por grupos polares húmicos, sitios de coordinación de metales multivalentes en coloides, superficies minerales con grupos Si-O-Si a través de fuerzas dipolo-dipolo y ion-dipolo (ligeramente fuerte a débil) (McBride, 1994).

Este comportamiento es debido a que las moléculas no polares, tienen una mayor atracción hacia la materia orgánica que hacia las superficies de los minerales, siendo la existencia de las superficies hidrofóbicas (organofílicas) o enlaces dentro de la matriz orgánica las que favorecen el fenómeno de atracción hidrofóbica, siendo la atracción entre la superficie y el adsorbente en un solvente debido a la interacción de atracción disolvente-adsorbente que es más débil que la interacción disolvente-disolvente, explicando la "afinidad" de las moléculas no polares orgánicas hacia el humus. Una vez que el agua es el disolvente en el suelo, la atracción hidrofóbica llega a ser una fuerza conductora de la absorción, si el adsorbente orgánico tiene una baja afinidad por el agua (Murray, 1994).

Las sustancias húmicas pueden afectar el destino de los compuestos químicos orgánicos en varias vías que incluyen la adsorción y partición, solubilización, degradación por hidrólisis y fotodescomposición, fundamentales en el destino del contaminante químico y, subsecuentemente, en la transferencia a aguas subterráneas.

Contenido de agua. Tiene gran influencia en el transporte de difusión líquida o gaseosa. Para la difusión líquida el transporte aumenta con el contenido de agua debido a su trayectoria en los espacios porosos reemplazando el aire contenido; inversamente, la difusión de vapor disminuye con el contenido de agua. Cuando el contenido de agua disminuye a un bajo porcentaje (ocurriendo en la superficie del suelo durante una intensa sequía) las moléculas que ocupaban los sitios de adsorción son desplazadas y la capacidad de adsorción química aumenta considerablemente causando que las concentraciones líquida y gaseosa disminuyan reduciendo el mecanismo de transporte líquido y gaseoso. Sin embargo, este efecto de adsorción es reversible cuando la superficie vuelve a rehumedecerse (EPA, 1983).

Para el caso de hidrocarburos alifáticos no polares son definidos como pobres competidores con el agua en los sitios de adsorción en el complejo de intercambio. Cuando éstos son retenidos, el fenómeno presente es por las fuerzas de Van der Waals, predominante en las superficies de los minerales arcillosos. Las moléculas de un material dado pueden adsorberse de la fase gaseosa o líquida al sólido por fuerzas de Van der Waals, este proceso es llamado adsorción física y puede alcanzar el equilibrio en un tiempo limitado, principalmente por las velocidades de difusión molecular. Las fuerzas de Van der Waals (y de London) son fuerzas intermoleculares relativamente débiles que sostienen líquidos o cristales de hidrocarburos, agua y alcoholes, entre otros (Fränzle, 1993).

La intercalación de especies de hidrocarburos dentro de los silicatos de capas expandibles es un proceso en que parte del agua interlamina asociada con los cationes intercambiables es reemplazada por especies orgánicas. Se demostró que el n-hexano fue capaz de formar una sola lámina compleja con una montmorillonita de Wyoming penetrando 110 mg por gramo de arcilla. Resultados similares fueron obtenidos para el n-dodecano. Esas observaciones sugieren fuertemente que los n-alcanos pueden penetrar al espacio interlamina de la montmorillonita Wyoming-Ca a una velocidad muy baja (Yong *et al.*, 1992).

El agua es un medio de transporte en dirección horizontal y vertical, principalmente, para sustancias menos adsorbentes y más polares como es el caso de los alcoholes seguido por los aromáticos y finalmente los alifáticos (Tölgyessy, 1993).

Textura del suelo. La lixiviación en texturas gruesas (suelos arenosos y grava) es más rápida que en texturas finas (suelos arcillosos), con mayor capacidad de retener los contaminantes y prevenir su alcance a aguas subterráneas. Además, otros parámetros dinámicos como permeabilidad, conductividad hidráulica y espacio poroso son dependientes de la textura.

El contenido de arcilla está correlacionado con la capacidad de campo, área superficial específica, capacidad de intercambio catiónico influyendo en la adsorción de iones. Para compuestos orgánicos no polares, generalmente no existe correlación entre el contenido de arcilla y la adsorción (Jury, 1989).

En experimentos realizados por Morrill *et al.*, (1982), las moléculas aromáticas como son los HAP's, pueden interactuar con las superficies arcillosas a través de sus electrones π ; por ejemplo, el benceno forma un complejo estable a través de sus electrones π en la arcilla o con el cobre, bajo la condición de tener un suelo seco como en el caso de la época de estiaje.

Los aspectos específicos de la contaminación pueden presentarse en: a) formación de películas superficiales y emulsiones, y b) solubilidad en el agua de ciertos productos. Los problemas asociados con las películas superficiales son minimizados debido a la capacidad del material del subsuelo en adsorber y absorber una cantidad del producto. Sin embargo, este fenómeno magnifica los problemas asociados con los componentes solubles de los productos una vez que los hidrocarburos retenidos están sujetos a la lixiviación (Testa, 1994).

Profundidad de la capa freática. Determina el tiempo y espacio para la retención y degradación del contaminante previo a su penetración dentro del acuífero, dado por las propiedades de retención del perfil del suelo.

Se ha demostrado experimentalmente y teóricamente que en suelos de textura fina, el agua (y flujos de masa de compuestos orgánicos) pueden ascender desde grandes profundidades en comparación con los suelos arenosos. La profundidad puede influir en la extensión del flujo de agua ascendente hacia la capa superficial que se ha evaporado sin ninguna entrada de agua por un período dado. También afecta el tiempo de viaje de un compuesto lixiviado de la superficie a aguas subterráneas, siendo ésta una influencia indirecta en el transporte.

Estructura del suelo. Es una característica importante; se pueden presentar fisuras, grietas o canales que sirven como vías de transporte, permitiendo corrientes transitorias de grandes volúmenes de contaminantes a las aguas subterráneas. En la ausencia de tales canales, la agregación estructural de los suelos induce un flujo más rápido en los macroporos de los interagregados, que dentro de los microporos de los intragregados donde los contaminantes potenciales pueden ser retenidos. En ocasiones, la estructura del suelo favorece la

tendencia para concentrarse en corrientes verticales o convergentes (llamados dedos) que generalmente comienzan en la transición de texturas finas a capas de textura granular, con un gran volumen de la zona superficial y siguiendo un transporte directo de contaminantes a la capa freática (Hillel, 1989).

Un compuesto orgánico volátil dentro de la zona superficial puede distribuirse en cada una de las tres fases a una misma concentración de equilibrio en función de la solubilidad y la volatilidad (Crouch, 1990).

2. 4. 2. Parámetros Ambientales que afectan a los Contaminantes

Temperatura. La presión de vapor está en función de la temperatura, al tener un valor bajo (10^{-4} atm) la fracción de un compuesto orgánico pasa rápidamente a la fase vapor. Por esta razón la difusión gaseosa es mucha más importante que la difusión líquida.

Precipitación. Puede tener una influencia dominante debido al volumen de lluvia, afectando la velocidad de flujo en el suelo. Los suelos en regiones con lluvia intensa y frecuente tienen altos flujos de agua y de dispersión, extendiendo la difusión líquida y disminuyendo la gaseosa.

Evapotranspiración. Representa la cantidad de agua aplicada y que es removida por plantas o es perdida en la superficie. Así, la extensión de la evapotranspiración afecta el flujo de agua debajo de la zona de la raíz y la lixiviación de los compuestos. La cantidad de agua lixiviada en suelos que no reciben entrada de agua por irrigación está determinada por el agua de lluvia menos el agua de evapotranspiración. Este parámetro es positivo, si implica un drenaje con movimiento descendente, y es negativo, si existe un proceso de secado con un bajo contenido de agua e induciendo un flujo ascendente de agua subterránea. Esto puede ser regulado por las condiciones meteorológicas externas como la radiación solar, viento, temperatura y humedad ambiente o por la resistencia del suelo o planta (Jury, 1989).

2. 4. 3 Transporte y Transformación de los Contaminantes en el Suelo

El principal transporte y procesos de transformación para los contaminantes orgánicos disueltos en el suelo son: la advección, dispersión, lixiviación, adsorción y retardo, y la transformación química y biológica. La migración de una fase orgánica líquida inmisible es gobernada, en gran parte, por su densidad, viscosidad y propiedades de superficie húmeda (Bonazountas & Kallidromitou, 1993). El transporte vertical de contaminantes en la zona no saturada se produce debido a la gravedad y a las fuerzas capilares.

Advección: En horizontes de arena y grava, el factor dominante en la migración del compuesto químico disuelto es la advección, proceso por el cual los solutos son transportados por un volumen móvil o por la circulación de agua.

Dispersión: Se presenta por el agua del medio resultando dos procesos básicos: difusión molecular en solución y la mezcla, existiendo así una dispersión hidrodinámica; debido a pasajes tortuosos o pequeños en el medio poroso, algunos líquidos realizan un movimiento menos directo al manto acuífero. En suma, el compuesto puede difundirse dentro de los poros inactivos para ser liberados lentamente cuando la principal concentración ha pasado. Esta dispersión está en función de la velocidad promedio del agua en el poro (Fränzle, 1993). La mezcla mecánica resulta de las variaciones en la velocidad del agua dentro de los poros del horizonte causado por fuerzas de fricción, variaciones en la geometría de los poros, y fluctuaciones en las direcciones locales hacia el flujo principal resultando una dilución y atenuación de los picos de concentración, las máximas concentraciones disminuyen con el incremento de la distancia (Barcelona *et al.*, 1990).

Lixiviación: El movimiento de un químico hacia zonas profundas a través del suelo por medio del agua es llamado lixiviación. Es importante considerar la posibilidad de que un químico se mueva en el suelo y llegue a contaminar el agua subterránea; de suceder, entonces los pozos de agua, organismos acuáticos y la cadena trófica pueden contaminarse. Los factores determinantes en la lixiviación incluyen: la solubilidad, biodegradación, disociación, sorción, volatilidad, lluvias y evapotranspiración. Los efectos de la movilidad se describen en los siguientes apartados:

- a. Un compuesto químico que es soluble al agua puede lixivarse en el suelo y probable a ser biodegradado. Si la biodegradación es rápida, entonces la lixiviación no es un problema.
- b. Un compuesto químico que es insoluble en agua puede ser adsorbido en el suelo, moviéndose con las partículas, y quizás sea biodegradado lentamente.
- c. Los compuestos químicos en la superficie del suelo pueden ser fototransformados y no ser disponibles a lixivarse, sin embargo, los productos pueden ser disipados.
- d. Entre más precipitación mayor será la oportunidad de los contaminantes químicos a lixivarse.
- e. La hidrólisis y la disociación pueden prevenir la lixiviación (Ney, 1990)

Adsorción e Intercambio iónico: La adsorción es la adhesión de iones o moléculas a superficies o interfases líquido-sólido, sólido-gas, líquido-gas y líquido-líquido produciendo un incremento en la concentración de químicos en la superficie o interfase sobre la concentración en solución (Fränzle, 1993).

Los contaminantes orgánicos pueden alcanzar la zona de aguas subterráneas por la solución del suelo o como fases de líquidos orgánicos que pueden ser inmiscibles en el agua.

Volatilización: Un compuesto químico presente en el suelo, agua, plantas o animales puede volatilizarse hacia la atmósfera. La presión de vapor es uno de los factores más importantes que gobiernan la volatilización y provee información acerca de la volatilización bajo condiciones ambientales. Algunos factores que afectan dicho fenómeno son: el clima, sorción, hidrólisis y fototransformación. Estableciendo los siguientes enunciados:

1. Un compuesto químico con una baja presión de vapor tiene una alta capacidad de adsorción o una alta solubilidad al agua siendo menos probable a volatilizarse.
2. Un compuesto químico con una alta presión de vapor tiene una baja capacidad de adsorción o una muy baja solubilidad al agua siendo más probable a volatilizarse.

Fotólisis: Un químico puede ser fototransformado tanto como pueda absorber luz solar; puede ocurrir en el aire, suelo, agua, plantas y animales. Los productos pueden ser químicos de alto y bajo peso molecular. Las influencias ambientales tienen un efecto en la velocidad de fototransformación, tales como: la profundidad del químico en el suelo y en el agua, sorción en el suelo y pH. La velocidad de fotólisis puede determinar la persistencia en el ambiente; entre más rápida sea la degradación es poco probable que continúe en el ambiente (vida media < 30 días), si tiene una vida media de 30 a 90 días, el compuesto químico puede tener un comportamiento hacia algunos compartimentos del ambiente y, si tiene una vida media > 90 días, existen problemas de contaminación (Ney, 1990).

Degradación: El comportamiento químico del suelo es fundamental para la degradación de muchos químicos orgánicos en una o más reacciones químicas (abióticas); en general, cinco reacciones pueden ocurrir en el suelo: Hidrólisis, Sustitución, Eliminación, Oxidación y Reducción. Sólo dos reacciones pueden transformar los contaminantes orgánicos que se pueden considerar para este caso:

Oxidación: Se presenta en el suelo afectando a muchos compuestos químicos aromáticos experimentando una oxidación de radical libre, por ejemplo, benceno, bencidina, etilbenceno, naftaleno y fenol. Otro segundo grupo, incluye, tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD), hexaclorobenceno, hexaclorociclopentadieno, bifenilos polibromados (PBB's) y policlorados (PCB's) y no aromáticos.

Reducción: Definido en términos de transferencia de electrones, involucra a compuestos orgánicos en sistemas de agua-arcilla. El efecto se acelera al aumento de agua sugiriendo la existencia del mecanismo de transferencia de un electrón donde la arcilla actúa como un aceptor. En general, uno puede esperar que un químico orgánico puede experimentar una reducción química si el potencial del suelo es menor que el compuesto orgánico en cuestión.

Degradación Biológica: Es importante notar la presencia de microorganismos nativos del suelo que tienen un papel fundamental en la ausencia y/o permanencia de compuestos orgánicos, siendo considerado como una vía de pérdida de los compuestos orgánicos volátiles, llamada biodegradación; los compuestos químicos que poseen otras estructuras que los azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, no pueden entrar inmediatamente dentro del metabolismo microbiano; esos compuestos requieren de una aclimatación definida en horas o meses, durante el cual poco o nada se degrada. El periodo de retraso generalmente es causado por: a) la transferencia de la información genética responsable de la degradación para una población, y b) la fase inicial de crecimiento exponencial de organismos capaces de degradar el compuesto, la alta solubilidad al agua que puede favorecer una rápida degradación (EPA, 1983), pero puede existir una acumulación a largo plazo de los productos de descomposición recalcitrante.

La temperatura que provee un crecimiento favorable fue de 27 °C, estableciendo que aumenta la velocidad de degradación para desechos de refinería y petroquímicos cuando las temperaturas van de 10 a 30 °C, pero disminuye ligeramente cuando las temperaturas aumentan de 30 a 40 °C (EPA, 1983). El contenido de oxígeno en suelo es frecuentemente un factor limitante en la biorremediación.

La bioacumulación fue explicada observando la absorción de compuestos orgánicos por parte de plantas comestibles, donde se analizó los cultivos presentes en los terrenos agrícolas aledaños a zonas industriales siendo otro medio de remoción de estos compuestos en el suelo (Fränzle, 1993).

Finalmente, la combinación de las características del subsuelo, contaminantes y condiciones climatológicas del sitio pueden dar lugar a los diferentes procesos de transporte y distribución de los contaminantes. Para entender el transporte y destino de los contaminantes en el subsuelo es necesario realizar una buena caracterización del sitio con la cual se conocerán la carga hidráulica y la estratigrafía, así como los coeficientes de adsorción y la permeabilidad del suelo. Con esta información es posible calibrar modelos matemáticos que sean representativos de la distribución tridimensional de los contaminantes en el sitio (Saval, 1995).

3. ZONA DE ESTUDIO

Ubicación: El Estado de Tabasco forma parte de la zona petrolera continental más importante del país (Figura 3), ya que aporta aproximadamente el 25% de la producción nacional de crudo y el 47% de gas. La superficie con actividades petroleras cubre la mayoría de los municipios del Estado (Figura 4), que en su conjunto comprenden 4 distritos petroleros, 58 campos, más de 7 mil pozos, 50 baterías, 5 deshidratadoras, 2 centrales de almacenamiento y bombeo, 21 compresoras, 4 plantas de inyección de agua y 1 terminal marítima (Zavala *et al.*, 1996-1997).

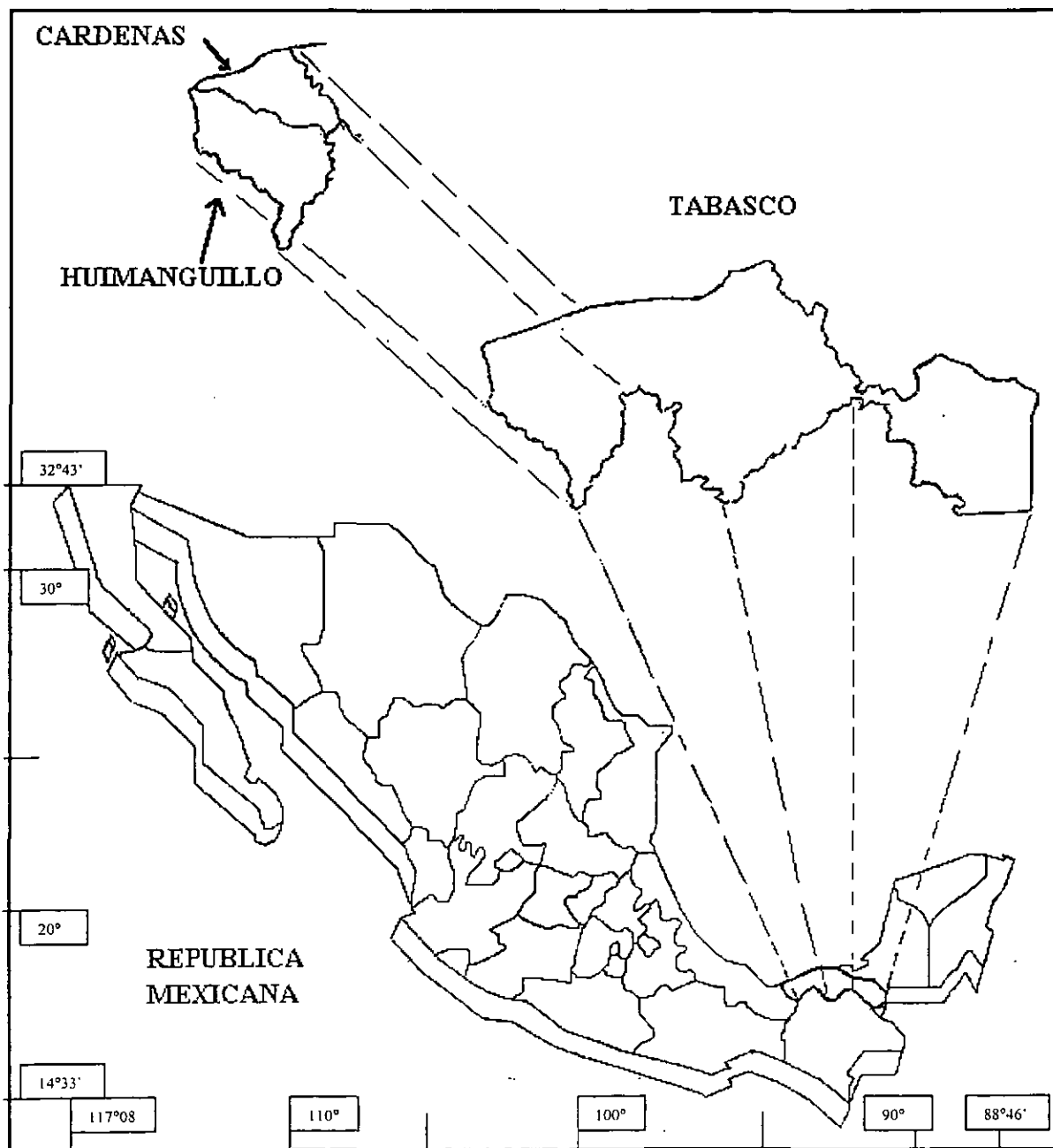


Figura 3. Ubicación de los Municipios de Cárdenas y Huimanguillo pertenecientes al Distrito de Agua Dulce (actualmente llamado Activo 5 Presidentes), Estado de Tabasco.

El problema más serio en cuanto a derrames y fugas de hidrocarburos se presenta en instalaciones del Distrito de Agua Dulce ya que éstas datan de los años de 1955, 1960 y 1970 en adelante, y comprende como problemáticos a los campos de la Venta, Blasillo, Otates, Ogarrío, Bacal, Cinco Presidentes, San Ramón y Sánchez Magallanes (Cuadro 7) (Semarnap, 1996).

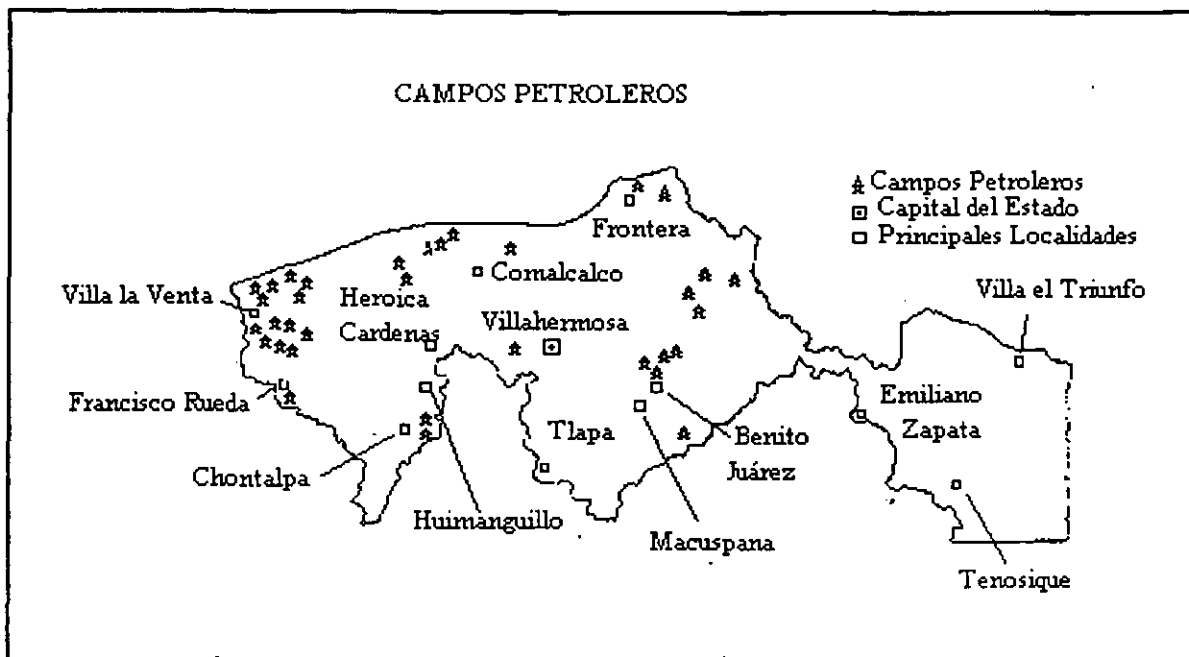


Figura 4. Ubicación de los campos petroleros, Estado de Tabasco (INEGI, 1988).

Comprende 21 baterías de separación, 1 planta deshidratadora, 8 estaciones de compresión, 2 plantas de inyección de agua y la unidad petroquímica, enlazados por una densa red de ductos y terracerías a tramos carreteros federales o estatales y abarcando una superficie de 559 km².

Cuadro 7. Fugas y derrames de hidrocarburos (Semarnap, 1996)

Campo y Año de Descubrimiento	Instalación	Area afectada	Unidades de Suelos	Municipio
La Venta (1954)	UPLU	Pantano	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	Huimanguillo
	Batería la Venta	800 m ²	Gleysol mólico + Gleysol vértico	
	Compresora la Venta	500 m ²	Gleysol mólico + Gleysol vértico	
	Batería la Venta Norte		Gleysol mólico + Gleysol vértico	
	Batería la Venta Sureste	5000 m ² agua congénita 1000 m ² hidrocarburo	Gleysol éútrico + Gleysol vértico Gleysol éútrico + Gleysol vértico	

Continuación

Cinco Presidentes (1960)	Batería 1 de 5 Presidentes	1.5 ha	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	Huimanguillo
	Batería 3 de 5 Presidentes	1.6 ha	Gleysol mólico + Gleysol vértico	
	Compresora 2 de 5 Presidentes	Río Chicozapote	Solonchak	
	Batería 4 de 5 presidentes	Laguna Yucateco		
	Pozo lacustre	Laguna Yucateco		
Blasillo (1965)	Batería Blasillo No. 1	7 ha	Gleysol mólico + Gleysol vértico	Huimanguillo
Magallanes Ostucan 1968 (1957)	Batería S. Mag. No. 1	100 m ²	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	Huimanguillo
	Batería S. Mag. No. 3	2.5 ha	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	
	Batería S. Mag. No. 4	6 ha	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	
	Batería S. Mag. No. 5	16 ha	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	
San Ramón (1962)	Batería San Ramón No. 1	1.5 ha	Gleysol éútrico + Gleysol vértico	Huimanguillo

Este estudio comprende el Distrito de Agua Dulce, correspondiendo al municipio de Huimanguillo y se localiza en la región del Grijalva, ubicada en los paralelos 17° 50' de latitud norte y 93° 23' de longitud oeste, tiene una extensión territorial de 3, 757.59 Km². Limita al norte con el municipio de Cárdenas, al sur con los Estados de Chiapas y Veracruz; el este con el de Chiapas y al oeste con el de Veracruz.

Fisiografía: Está comprendida en la Provincia de la Llanura Costera del Sur, el relieve en esta zona es casi nulo con pocos metros sobre el nivel del mar, sólo interrumpido por algunos lomeríos en la porción central del área. En esta región, existen innumerables zonas sujetas a inundación. La red hidrográfica está constituida por corrientes perennes con patrones de drenaje anastomosados y forman parte de la cuenca del Río Grijalva que pertenece a la vertiente del Golfo de México (Figura 5).

Esta zona es definida como llanura de inundación, que se distribuye por todo el Estado, hacia el norte colindando con la zona costera, destacándose en los municipios de Centla, Jonuta de la región de los Ríos, Cárdenas, Huimanguillo, Jalpa de Méndez y Nacajuca de la región Chontalpa. Se caracteriza por poseer superficies inundadas e inundables principalmente de agua dulce y, en ocasiones, con agua salada. Fisiográficamente se caracteriza por presentar un relieve cóncavo y un drenaje natural deficiente ya que no tiene salida para el agua excedente.

Tiene un relieve compuesto de terrenos planos con áreas de depresión a una altitud que varía de 2 a 17 m.s.n.m., no encontrándose elevaciones superiores a los 25 m.

Presenta 3 formas de relieve, la primera corresponde a zonas accidentadas y abarca aproximadamente el 2 % de la superficie, la segunda a zonas semiplanas y abarca el 11 %, y la tercera corresponde a zonas planas 87 %. Una elevación importante por su ubicación geopolítica que sirve de límite entre los estados de Tabasco y Chiapas, lo constituye el cerro Mono Pelado, además de ser la elevación más alta en el Estado con una altura de 1,000 m.s.n.m.

Geomorfología: Caracterizada por su relieve escaso casi plano, con altitudes menores de 100 m, las cuales están cortadas por amplios valles, resultado de la acumulación de grandes depósitos fluviales en diferentes medios, como el lacustre, el palustre y el litoral. Presenta extensas planicies de inundación y lagunas, entre las que destacan La Machona, Mecoacán, Sitio Grande y El Rosario.

Para Benito Juárez se tiene una geología del Cuaternario palustre, constituida por depósitos arcillosos de color negro con un alto contenido de materia orgánica, desarrollados en zonas que tienen un drenaje deficiente y distribuido en todo el área, además cuenta con depósitos aluviales con granulometría muy pequeña y cuyos componentes son fragmentos de roca, cuarzo, feldespatos y arcillas, su estratificación es masiva y se han desarrollado en esta área.

Estratigrafía: Afloran depósitos de arenas y suelos que varían del Mioceno al Cuaternario en el tiempo geológico. El Mioceno está representado por depósitos de arenas marinas que afloran en la porción central del área y el Cuaternario está consignado en los depósitos recientes no consolidados (INEGI, 1988).

Hidrología: Región Hidrológica "Río Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona (29 A)", abarca en el Estado una superficie de 5915.15 Km². La corriente principal de esta cuenca nace en la Sierra Madre de Chiapas, a unos 1000 m.s.n.m. y en la mayor parte de su recorrido sirve como límite entre Veracruz y Tabasco. Su dirección es generalmente al noroeste y es navegable en la época de estiaje en gran parte de su extensión, lo mismo en sus afluentes.

El río Tonalá en su curso superior es conocido como río Tancachapa, los afluentes principales de esta corriente en territorio tabasqueño son los ríos Zonapa, Blasillo y Chicozapote. A pesar de la relevancia del río Tonalá no se tienen registros hidrométricos.

En la zona que abarca la cuenca se aprecia una tendencia acelerada de desarrollo económico, y es probable que en un periodo inmediato los niveles de contaminación sean altos, como consecuencia del crecimiento de la población y el establecimiento de industrias. Asimismo, se prevé un aumento en las demandas de agua y en la descarga de aguas residuales que vertidos en los cuerpos receptores, sin previo tratamiento pueden ocasionar un desequilibrio ecológico de distinto grado.

El río Mezcalapa recorre el municipio en su parte oriental. Se localizan dos lagunas importantes, clasificadas como albuferas: La Machona y la del Carmen, las cuales unen a las lagunas del Pajonal y el Golfo de México por la barra de Santana. Además se localizan las lagunas de la Palma y Santa Teresa. En la parte norte, los ríos San Felipe, Naranjeño y Santana, desembocan en las lagunas del Carmen, los dos primeros, y en la laguna de la Machona el último; cerca de la boca del río Tonalá que es límite con Veracruz, desemboca el río Chicozapote, naciente del Lodazal y rodea a Villa Benito Juárez.

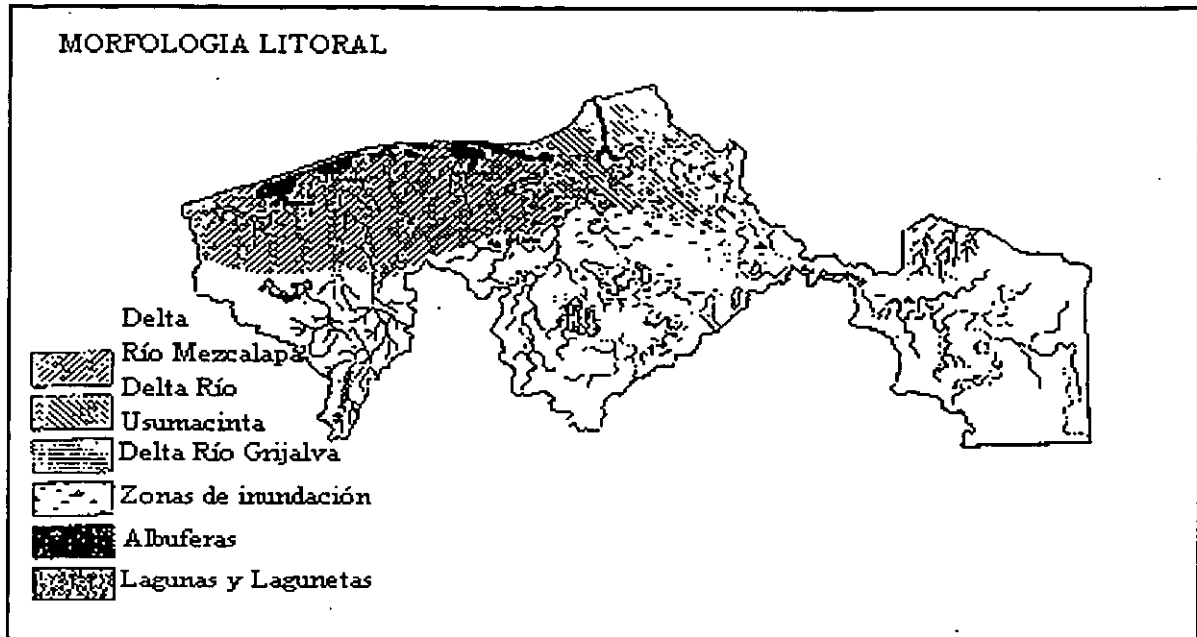


Figura 5. Hidrología del Estado de Tabasco (INEGI, 1988).

Clima: Se caracteriza el Cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), con cambios térmicos en los meses de diciembre y enero, su temperatura media anual es de 26.2 °C siendo la máxima media mensual en mayo de 30.6 °C, la mínima media en diciembre y enero de 20° C, la máxima y la mínima absolutas alcanzan los 45 °C y 14 °C. Presenta un régimen de precipitación por un total de 2 643 mm con un promedio máximo mensual de 335 mm en el mes de septiembre y un mínimo mensual de 0 mm en el mes de abril (INEGI, 1987).

La humedad relativa promedio anual se estima en 83%, con máxima de 86% en enero y febrero y mínimo de 77% en mayo. Las mayores velocidades de los vientos se encuentran en los meses de noviembre y diciembre con 30 Km/h, en el mes de mayo las mínimas siendo de 18 Km/h.

Clasificación del Suelo: La mayoría de los suelos están clasificados como Gleysol según FAO, generalmente de texturas arcillosas o francas que presentan problemas de exceso de humedad por deficiencia de drenaje como en algunas áreas clasificadas como Histosol asociado con el Gleysol en las zonas inundables. Alrededor de las principales lagunas son suelos Solonchak, que son suelos salinos debido a la cercanía de las aguas del Golfo de

México. Se presenta el Cambisol y Fluvisol ubicados en las márgenes o riberas de los ríos (INEGI, 1987).

Palma (1996) define para la zona suelos Histosoles fibricos, Gleysoles mólicos, Gleysoles éutricos y una asociación de Gleysol éutrico + Gleysol mólico + Histosol fibrico.

El Histosol fibrico (HSf) se caracteriza por materiales orgánicos brutos o poco descompuestos, los contenidos de fibras vegetales son dominantes en al menos los primeros 35 cm de profundidad, debajo pueden presentar materia orgánica más descompuesta, e incluso, materiales minerales arcillosos. Su drenaje es muy pobre o nulo y no presenta materiales sulfídicos u horizontes sulfúricos en los primeros 125 cm de profundidad. El espesor del material orgánico puede variar desde 80 cm hasta más de 200 cm, dependiendo principalmente del tipo de vegetación natural, del estado de anegamiento y del uso al que están sujetos.

Gleysoles mólicos (GLm) son representativos en áreas cercanas a las lagunas interiores de los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso y Centla. Fisiográficamente, ocupan zonas bajas con pendiente de plana a ligeramente cóncava inferior a 0.5 %. Tienen un horizonte A friable y enriquecido por material orgánico en proceso de descomposición; presentan texturas francas en la superficie que sobreyacen a texturas arcillo limosas (horizonte C), en ocasiones se presentan texturas arenosas en el fondo del perfil. Son suelos profundos, sin embargo, el manto freático se encuentra cercano a la superficie la mayor parte del año.

Gleysoles éutricos (GLE) se distribuyen principalmente en los bajos de las regiones de los Ríos y de la Sierra, en zonas cercanas a los cauces de los ríos y arroyos. El material parental que forman estos suelos, son sedimentos aluviales recientes. Son muy parecidos a los mólicos, con excepción de que éstos no presentan un horizonte A tan enriquecido en materia orgánica y, por lo tanto, su consistencia no es tan friable como en el caso del horizonte A mólico, esto se debe principalmente a que la vegetación que se encuentra sobre los Gleysoles éutricos no es tan abundante y aportadora de residuos como en los Gleysoles mólicos. En general, son suelos profundos con horizontes A y C no muy desarrollados ricos en nutrimentos, anegados la mayor parte del año y con manto freático elevado.

Flora y Fauna: La vegetación original es selva mediana y alta perennifolia, la vegetación secundaria la constituyen los cultivos agrícolas, pastizales y acahuales. Existe vegetación hidrófila conocida como popal y platanillo cuya presencia se debe a la deficiencia de drenaje. En algunos de estos suelos inundados se cultiva maíz, frijol y calabaza en diferentes épocas del año. Se detecta una extensión bastante grande de sabanas (140, 000 ha.) utilizadas para la ganadería, cuyas características son pasto natural de 1.5 m. La fauna es escasa, se pueden mencionar algunas especies como el zaraguato, conejo, tepezcuintle, tortuga y una gran variedad de aves (INEGI, 1987).

4. OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar la migración de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) del petróleo, provenientes de derrames en áreas de explotación petrolera en suelos del distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes), municipio de Huimanguillo (La Venta y Benito Juárez), Estado de Tabasco.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- Identificar y cuantificar los hidrocarburos alifáticos (C10 - C34) y HAP's (naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoreno, benzo(k)fluoreno, benzo (a)pireno, indeno (1,2,3-cd)pireno, dibenzo(ah)antraceno y benzo(ghi)perileno) del petróleo en suelos afectados, mediante la técnica de cromatografía de gases empleando el detector de ionización por flama (FID) en suelo y agua provenientes del Distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes).
- Definir las fuentes de contaminación en el aporte de contaminantes orgánicos (hidrocarburos alifáticos y HAP's) en suelo y agua para el distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes).
- Identificar los compuestos orgánicos particulares a los derrames antiguos y recientes, así como conocer los niveles de fondo para la zona.
- Realizar un muestreo en la microcuenca de La Venta para definir la migración de los contaminantes debido al flujo del agua superficial, además de realizar transectos en los derrames ocurridos con puntos de muestreo cercanos para determinar la movilidad horizontal.
- Determinar aquellas características de los suelos que son determinantes para el comportamiento de hidrocarburos (materia orgánica, textura y humedad).

5. HIPOTESIS:

La contaminación para esta zona es dada por la explotación petrolera propiciada por la antigüedad, mantenimiento y accidentes de las instalaciones, identificando en el medio ambiente compuestos de petróleo en suelo y agua (alifáticos y HAP's).

El peso molecular de los alifáticos y HAP's del petróleo en suelo definirá el tipo de derrame presente en el lugar (antiguo o reciente) reportándose a los compuestos de alto peso molecular en los derrames antiguos y los compuestos de bajo peso molecular en los derrames recientes.

La migración de los contaminantes orgánicos en la zona de la microcuenca La Venta será influida por las corrientes de agua superficial dado por ser terrenos sujetos a inundación y al relieve del terreno definiendo una mayor área de afectación en función del tamaño del derrame.

La migración de los contaminantes orgánicos en los transectos realizados se hallará fuertemente influenciada por las características propias del lugar considerando las características químicas y físicas del compuesto orgánico (solubilidad, peso molecular entre otros) como de las propiedades físicas y químicas del suelo principalmente de la textura, contenido de materia orgánica y humedad, además de las condiciones ambientales que prevalecen.

6. MÉTODO

El desarrollo del presente trabajo está dividido en cuatro fases: Revisión bibliográfica, Trabajo de campo, Laboratorio y Gabinete, cuyas actividades se mencionan a continuación.

Fase de Revisión Bibliográfica:

1. Características generales y específicas de la zona de estudio así como la problemática de contaminación por derrames de petróleo.
2. Comportamiento de los compuestos orgánicos en suelo y agua.

Fase de Campo:

1. Previo a la toma de muestras se realizó una limpieza con solventes (acetona, metanol y hexano) de todo el material a utilizar durante el muestreo para asegurar la limpieza de contaminantes en dicho material, guardándolos en bolsas de plástico para su transporte (American Petroleum Institute, 1987).
2. El muestreo de los suelos se realizó siguiendo dos etapas:
 - A. La primera consistió en muestrear a lo largo de un transecto en la microcuenca donde está ubicada la petroquímica La Venta siguiendo la dirección del flujo de agua desde El Paraíso (parte alta) hasta el río Tonalá (Panga Vieja, parte baja) (Figura 6).
 - B. En la segunda etapa se escogieron sitios control (6 sitios) para tener una referencia propia de la zona o de fondo con respecto a los contaminantes con muestreos puntuales. Además se seleccionaron derrames antiguos (3 sitios) y derrames recientes (3 sitios) donde se realizaron transectos a 0, 10, 30 y 100 metros de distancia del derrame aproximadamente en función de un recorrido previo para cada lugar de interés (Profepa, 1999) (Figura 7).
3. En los sitios no inundados se realizó un perfil de 1.5 x 1.5 m de ancho y largo hasta encontrar el manto freático, describiendo las características en los horizontes presentes del suelo. Se tomaron muestras en viales de plástico para su caracterización física y química en laboratorio con una barrena y en viales de acero de 30 cm utilizando papel aluminio en los extremos con sus debidas tapas para la determinación de hidrocarburos. En algunos casos se colectó manualmente el horizonte orgánico (Hf) debido a que los tubos se atoraban en las raíces y no tomaban nada de este horizonte llegando a recolectar sólo la parte mineral del suelo. Además, se recolectaron muestras de agua del manto freático en botellas ámbar (de cuatro litros), anotando la profundidad y los datos correspondientes de cada sitio.
4. En sitios inundados se realizó la colecta del suelo sólo con la barrena y los viales de plástico y acero. En algunos casos se separó la muestra del vial de plástico para definir los horizontes presentes del sitio guardando el material en bolsas de plástico. Con los viales de acero se llevó a cabo lo mismo pero en el laboratorio previo al análisis de hidrocarburos. También se tomaron muestras de agua superficial en botellas ámbar, anotando los datos correspondientes de cada sitio.
5. Se limpiaron los utensilios empleados (barrena, palas, navaja, espátula) con hexano después de cada toma de muestra.
6. Las muestras de suelo y agua se conservaron a una temperatura de 4°C para su transporte al laboratorio.

ZONA DE MUESTREO

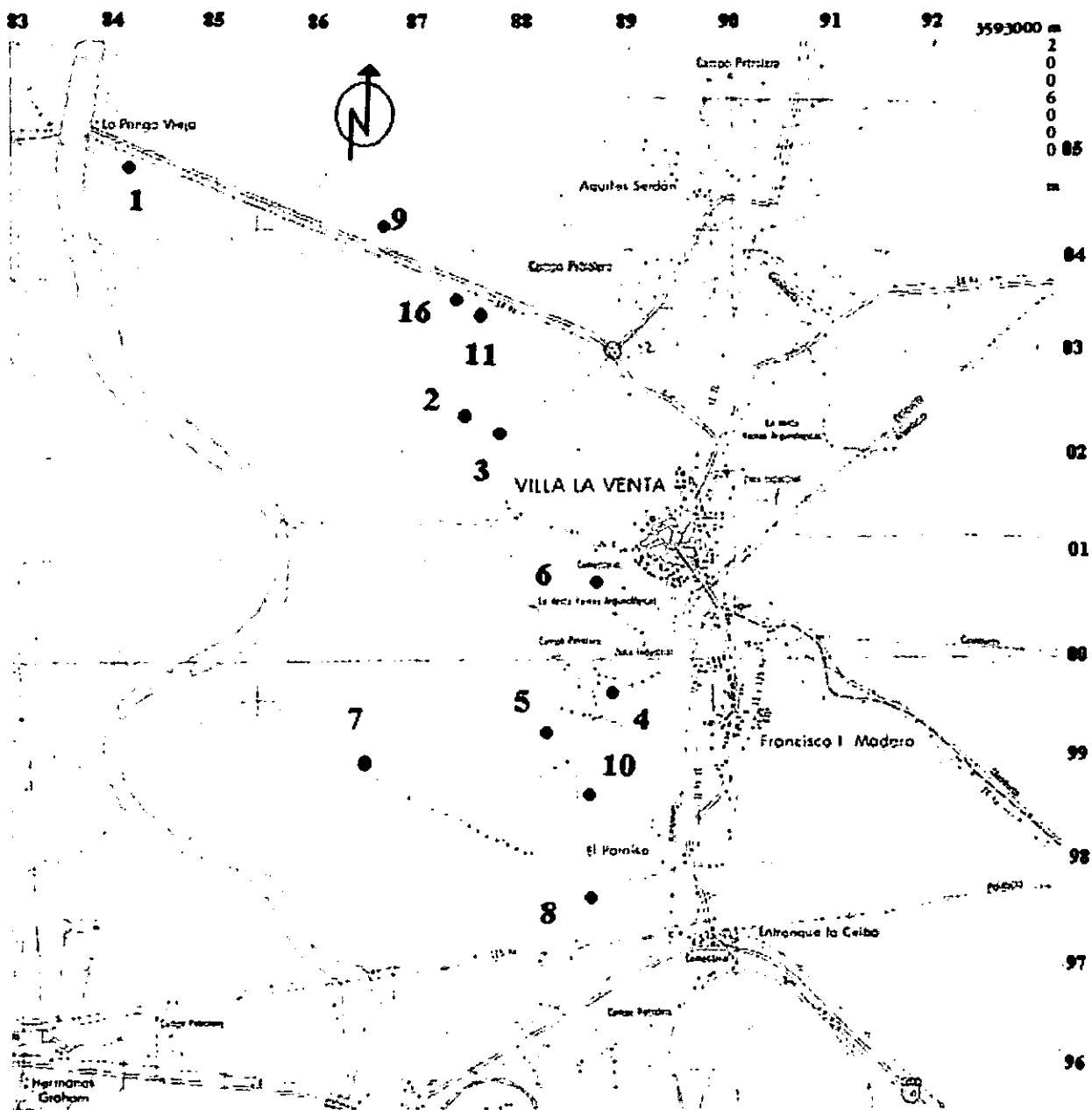


Figura 6. Ubicación de los sitios de muestreo para la microcuenca de La Venta (Panga Vieja a El Paraíso), Estado de Tabasco (Escala 1:50 000).

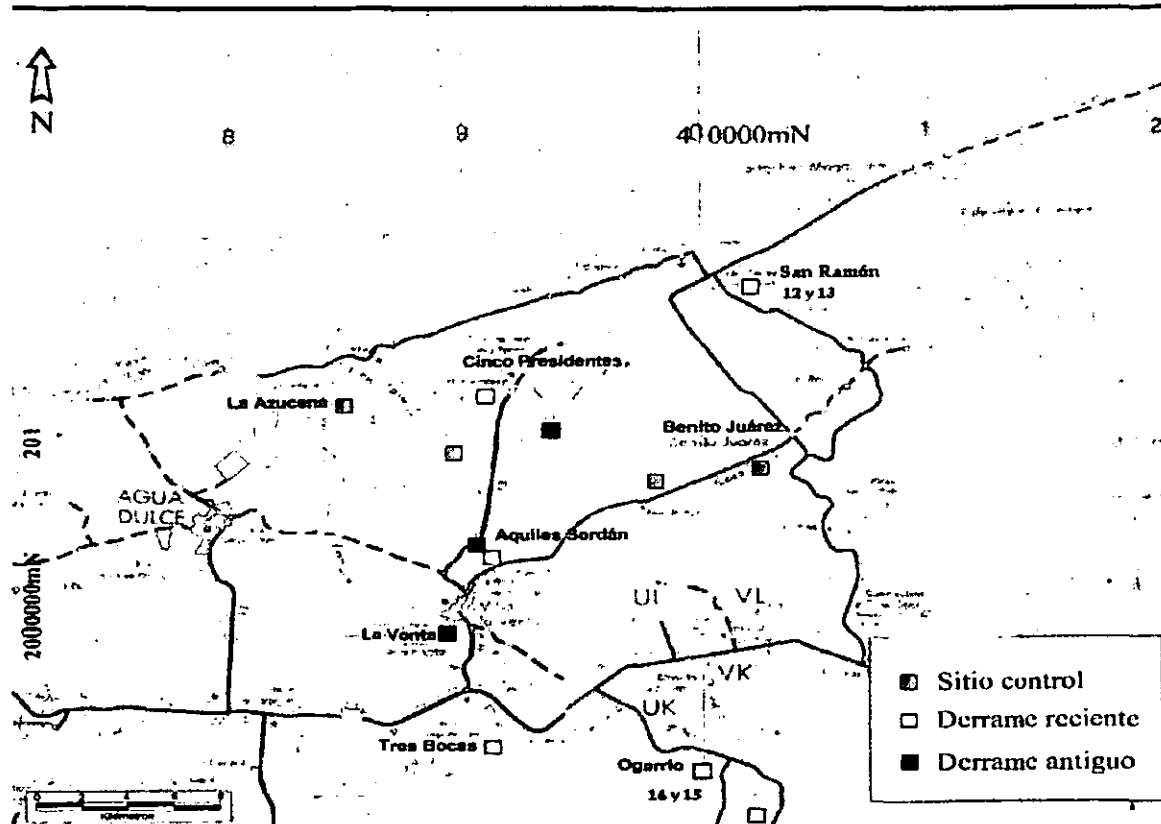


Figura 7. Ubicación de los sitios de muestreo de la segunda etapa en el Distrito de Agua Dulce (Sitios Control, Derrames Antiguos y Derrames Recientes).

En la microcuenca de la Venta, los sitios se hallan ubicados en dirección al flujo de agua a partir del ejido El Paraíso a Panga Vieja (Figura 6). En la primera etapa, y después de haber evaluado los resultados de las primeras muestras que indicaban que la contaminación por hidrocarburos de petróleo fue puntual para algunos sitios analizados sin observar una movilidad horizontal a lo largo del transecto, se definió volver a tomar muestras pero esta vez se consideró tomarlos directo en sitios que tuvieron un derrame. Así que se tomaron muestras adicionales con derrames recientes en el punto de origen y a 100 m de distancia en dirección al flujo de agua (La Venta 11 y 16 -Figura 6-, San Ramón 12 y 13 y Ogarrio 14 y 15 -Figura 7-).

Los resultados del primer muestreo no permitieron sacar conclusiones sobre el movimiento lateral de los contaminantes debido a las concentraciones irregulares halladas en los sitios de muestreo, por lo que en el segundo muestreo se tomaron muestras en transecto a distancias cortas. Y para poder decir algo sobre el comportamiento de los hidrocarburos a lo largo del tiempo se consideraron derrames antiguos (aproximadamente 30 años) y derrames recientes (meses), cubriendo un área más amplia a La Venta para considerar la situación de contaminación como se muestra en la Figura 7. El tipo de vegetación en cada sitio se muestra en las tablas de resultados que define en gran parte el tipo de materia orgánica en el suelo y con ello, la asociación con los contaminantes orgánicos. La causa más importante de los derrames por lo observado en campo es debido a la antigüedad de las líneas de conducción del petróleo en la zona o por el descuido en el cambio de dichas

líneas. En algunos sitios también se tomaron muestras profundas con un equipo de perforación manejado por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y en agua de noria cuando estaban cercanas al sitio de muestreo para evaluar el movimiento de contaminantes hacia partes más profundas.

Las características de los perfiles realizados en ambas etapas de muestreo corresponden a lo descrito por Palma (1996) en la zona de estudio, dominando terrenos sujetos a inundación y con una abundante comunidad de vegetación acuática, sea manglar, popal, tular y platanillo. Algunos sitios se hallaron secos; esto a causa de un período de sequía prolongada en 1998 además de presentarse incendios naturales y provocados para alguna actividad humana.

Los suelos en la zona tienen un gran contenido de materia orgánica debido a la acumulación de material vegetal que no llega a descomponerse por estar sujeto a períodos de inundación, restringiendo el oxígeno para los microorganismos descomponedores y favoreciendo un gran espesor de residuos vegetales sobre la superficie mineral, dando paso a suelos orgánicos denominados Histosoles que tienen un horizonte H o un horizonte O de 40 cm o más. En el muestreo se observó la asociación de Histosol con Gleysol. El Gleysol presenta patrones de color formados en respuesta al grado de humedad, lo que induce la reducción del hierro (III) a hierro (II) en alguna o todas las partes del suelo, corroborado por la presencia de manchas de color verde y gris con una textura fina dominada por la arcilla; la alternancia de condiciones de óxido-reducción puede ocasionar efectos de acidificación sobre el suelo cercano al horizonte C (Gama, 1992). Falta por definir con más detalle el suborden de cada perfil que requiere pruebas específicas en laboratorio para tener una información más detallada del suelo.

Fase de Laboratorio:

1. Las muestras de suelo de los viales de acero se dividieron por horizontes de acuerdo a los datos de campo y se destinaron al análisis de hidrocarburos alifáticos y de HAP's.
2. Para ello se realizó la técnica de extracción para hidrocarburos del petróleo UNEP/IOC/IAEA (1992), Reference Method No. 20 UNITED NATIONS EXPERTS POLLUTION (UNEP) aplicando una limpieza con hexano a todo el material de vidrio, papel filtro y fibra de vidrio por 4 horas en el sistema Soxhlet.
3. Se pesaron 5 g de suelo húmedo en papel filtro previamente purificado haciendo un cartucho y colocándolo en la cámara del Soxhlet utilizando una mezcla extractante de hexano - diclorometano relación 5:5 durante 8 horas. Después se concentró el extracto a un volumen aproximado de 3 a 5 mL.
4. Se montó un sistema de separación utilizando columnas de vidrio de 2 cm de diámetro interno x 30 cm de longitud, empaçadas en el siguiente orden: fibra de vidrio + hexano + 4 gramos de sílica gel (en hexano) + 4 gramos de alúmina (en hexano) + sulfato de sodio anhidro (2 cucharadas) + hexano. Cuidando que la columna no llegara a sequedad. Antes de su uso, la sílica gel y la alúmina se activan a 200 °C durante 4 h y se desactivan al 5 % en peso/peso con agua tridestilada.
5. Se vació el concentrado obtenido a la columna con ayuda de una pipeta Pasteur, y se abrió la llave de paso con un goteo continuo. Cuando llegó casi a sequedad en la

superficie del sulfato anhidro, se volvió a repetir el enjuague y así sucesivamente hasta 4 lavados de hexano. Al término del último lavado, se adicionan 20 mL de hexano para obtener la fracción de alifáticos, que se colectan en un matraz de bola y una vez agotado el solvente se retira el matraz y se pone otro para recibir la fracción de aromáticos, adicionando 30 mL de una mezcla de hexano-diclorometano (9:1), al llegar a casi sequedad se adicionan 20 mL de hexano-diclorometano (5:5) y cuando deja de gotear se abre totalmente la llave.

6. Las fracciones obtenidas se concentran a un volumen de 5 mL.
7. Se montó el sistema de sequedad (milivap) con flujo de nitrógeno colocando los viales correspondientes para cada muestra. Con una pipeta Pasteur se adicionó el concentrado al vial y se llevó a sequedad. El recipiente del concentrado de alifáticos se enjuagó con hexano 4 veces con el volumen de la pipeta Pasteur y también se pasó al vial. De igual modo se hizo con la fracción de aromáticos siendo los enjuagues con hexano-diclorometano. Una vez secos los viales en el milivap se retiran con ayuda de una pinza del sistema y se tapan con su etiqueta de información. De esta forma se guardaron a 4 °C hasta su utilización en el Cromatógrafo de Gases.
8. Se reconstituyó con hexano (250 µL) a los viales de alifáticos y metanol (250 µL) para los viales de aromáticos, utilizando un baño de ultrasonido durante media hora para homogenizar el extracto con el solvente.
9. Se realizó una curva de calibración en el Cromatógrafo de Gases con Detector de ionización con Flama CG-FID para establecer la linealidad del instrumento y el límite de detección fue de 0.1 ppm de alifáticos y HAP's para suelos. En agua fue de 3×10^{-6} ppb de alifáticos y HAP's, utilizando una columna capilar de 30 m (5 % Fenil Metilpolisiloxano), definiendo los picos de interés a través de su comparación con un estándar por medio de los tiempos de retención.
10. Las condiciones de trabajo en el Cromatógrafo de gases para los alifáticos y aromáticos fueron:

Alifáticos	Rampa de Temperatura de 70 a 300 °C 70 °C en 0.5 min. Con rampa de 11 °Cmin ⁻¹ . 180 °C con rampa de 10 °Cmin ⁻¹ . 245 °C con rampa de 9 °Cmin ⁻¹ . 300 °C en 14 min. Gas acarreador: Nitrógeno Temperatura del detector: 300 °C Temperatura del Inyector: 300 °C Tiempo de Corrida: 38.11 min. Inyección: Splitless con relevador de 0.75 min. Estándar empleado: Rango Diesel mezcla #2 GRO/DRO en cloruro de metileno (Diclorometano)
Aromáticos	Rampa de Temperatura de 90 a 300 °C 90 en 0.5 min. Con rampa de 8 °Cmin ⁻¹ . 180 °C con rampa de 5 °Cmin ⁻¹ . 245 °C con rampa de 2 °Cmin ⁻¹ . 300 °C en 1 min. Gas acarreador: Nitrógeno Temperatura del Detector: 320 °C Temperatura del Inyector: 320 °C Tiempo de corrida: 54.40 min. Inyección: Splitless con relevador de 0.75 min. Estándar empleado: Mezcla de HAP's 610/525/550 en metanol

11. Los flujos de gases recomendados para el Cromatógrafo Varian 3400 CX son del hidrógeno: 30 mLmin⁻¹; aire 300 mLmin⁻¹; Acarreador 30 mLmin⁻¹; Make up 30 mLmin⁻¹; en el panel la presión de gas de la columna es de 12 y en la salida del detector es de 0.8 mLmin⁻¹.
12. Por cada lote de muestras (15) se corrió un blanco y dos repeticiones de una muestra.
13. Se inyectó en el Cromatógrafo de Gases, la muestra problema de 1 µL o 0.5 µL si la muestra se halló muy sucia.
14. Obtenido el cromatograma correspondiente se comparó con el estándar y se calculó el área de los picos identificados. Se aplica la siguiente fórmula para el cálculo de los compuestos de interés, teniendo un peso corregido, dado al secar otra muestra húmeda en la estufa obteniendo el peso seco del suelo.

$$\mu\text{g/g o ppm} = \frac{\text{Área del pico muestra}}{\text{Área del pico Estándar}} \frac{\text{Volumen inyectado STD}(\mu\text{L})}{\text{Volumen inyectado muestra}} \frac{\text{Concentración STD}(\mu\text{g/mL}^1)}{\text{Aforo de la muestra (mL)}} \frac{\text{Peso seco de la muestra (g o L)}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

15. Las determinaciones del pH, materia orgánica (M.O.) y textura se llevaron a cabo en el Laboratorio de Edafología Ambiental en el Departamento de Edafología del Instituto de Geología, UNAM.

Fase de Gabinete:

1. Se realizó la interpretación y cuantificación de los datos obtenidos del cromatograma detectados en suelo para los hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos.
2. Las propiedades del suelo determinadas se analizaron con la presencia y dinámica de compuestos del petróleo en los suelos cercanos a pozos de explotación.
3. Finalmente se redactó el escrito del estudio.

7. RESULTADOS

7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SUELOS DEL DISTRITO DE AGUA DULCE (ACTIVO 5 PRESIDENTES).

Microcuenca:

Los suelos de la zona están clasificados como Histosoles y Gleysols que se hallan sujetos a inundación gran parte del año. Los horizontes de diagnóstico identificados en los perfiles descritos en su mayoría mostraron un horizonte superficial orgánico hístico con fermentación, un horizonte húmico, sobre un horizonte mineral A rico en materia orgánica y, finalmente, el horizonte C consistente de material aluvial de textura fina. En el caso de la textura no se logró determinar la granulometría en el laboratorio debido al alto contenido de materia orgánica y cantidad de muestra recolectada, por lo que se hace referencia a la textura al tacto que en la mayoría de los sitios se clasifica como suelos arcillosos y en otros como franco arcillosos. La materia orgánica en la zona presenta altos porcentajes en la superficie que disminuye conforme a la profundidad clasificándose en extremadamente rico a lo largo del perfil. El pH medido en KCl para la microcuenca se clasifica en fuerte a moderadamente ácido que tiende a tener un valor más alto a mayor profundidad como se observa en el cuadro 8.

Cuadro 8. Características y concentración de hidrocarburos en los suelos de la Microcuenca la Venta, Estado de Tabasco.

Descripción	Tipo de Vegetación	Unidad de Suelo	Profundidad (cm)	Horizonte	pH	Humedad	M.O.	C orgánico total	HAP's Total	Alifáticos Total
					KCl	[Vol. %]	[%]	(%)	(mgkg ⁻¹)	(mgkg ⁻¹)
Panga Vieja, P1	Popal quemado	Gleysol	0-10	Aa	n.d.	108	16.6	9.6	0.36	31.0
			10-35	Ah	5.3	61	7.6	4.4	0.20	23.9
			35-63	Ah/Cr	5.4	82	7.1	4.1	1.01	37.9
El Ralé, P2	Helechos	Histosol	63-93	Cr	5.8	57	4.6	2.7	0.33	30.2
			30-60	Hf	3.3	486	91.8	53.4	4.35	90.0
			60-77	Hh1	4.1	337	38.9	22.6	3.82	53.3
			77-85	Hh2	2.9	216	66.6	38.7	2.10	51.5
El Ralé P3	Popal quemado	Histosol	85-120	Cr	3.1	93	9.9	5.8	2.10	5.6
			20-32	Hf	n.d.	232	88.2	51.3	N.D.	147.3
			32-47	Ah1	2.9	195	12.7	7.4	0.81	14.3
El Ralé P4	Popal	Histosol	47-99	Ah2	2.9	104	13.8	8.0	0.78	19.5
			99-120	Cr	2.8	69	8.0	4.7	0.62	7.7
			0-38	Hh	4.6	595	49.0	28.5	77.33	714.6
			38-46	Ah1	5.4	107	11.8	6.9	1.36	68.3
El Ralé P5	Pasto	Histosol	46-120	Ah2	5.7	74	11.2	6.5	1.78	1.7
			0-30	Hf	4.2	227	87.5	50.9	17.43	22.5
			30-40	Hh	n.d.	254	58.5	34.0	0.63	68.5
			40-53	Aa	5.2	148	19.3	11.2	1.17	12.2
El Ralé P6	Pasto seco	Histosol	53-76	Ah	5.7	86	11.8	6.9	0.78	0.4
			76-109	Cr	4.2	83	6.6	3.9	2.01	42.6
			0-34	Hh	4.4	194	39.5	22.9	1.41	18.3
			34-40	Aa	5.2	235	15.9	9.2	0.43	3.1
			40-74	Ah/Cr	5.0	239	11.1	6.4	0.93	5.3

Continuación

El Paraíso P7	Helechos y popal	Histosol	0-26	Hf1	4.3	186			9.42	83.9
			26-37	Hf2		360	74.2	43.1	0.85	95.0
			37-54	Hh	4.1	322	55.8	32.4	6.18	558.1
			54-80	Aa	4.7	170	22.8	13.2	0.53	19.0
			80-95	Cr	3.6	248	7.2	4.2	0.10	25.5
El Paraíso P8	Popal quemado	Histosol	0-48	Hf1	n.d.	420	90.0	52.3	0.26	265.8
			48-59	Hf2	4.8	319	95.7	55.6	0.03	14.8
			59-69	Hh1	4.8	200	82.3	47.8	287.41	491.3
			69-89	Hh2	5.8	86	65.8	38.2	0.27	55.7
			89-100	Ah/Cr	3.7	86	11.2	6.5	0.26	2.0
			100-120	Cr	4.3	85	5.6	3.2	3.61	0.5
Panga Vieja P9	Helechos	Histosol	45-59	Hf	3.8	170	45.3	26.3	7.49	43.3
			59-69	Ah	5.0	89	15.6	9.0	0.34	27.4
			69-95	Hh	5.1	271	31.6	18.4	2.20	22.6
Batería de la Venta P10	Pasto	Histosol	20-40	Hf	3.8	88			N.D.	N.D.
			>40	Hh	4.0	377	32.8	19.0	N.D.	N.D.
La Venta P11	Pasto	Histosol	0-10	Hf	4.6	323	50.7	29.5	0.20	204.8
			10-20	Hh	4.4	49	51.8	30.1	0.19	89.2
			20-30	Aa	n.d.		22.5	13.1	1.02	1315.1
			30-40	Cr1	n.d.					13352.6
			40-50	Cr2	n.d.					21.3
San Ramón P12	Helechos y popal	Histosol	0-20	Hf1	4.3	233	61.2	35.6	0.54	128.2
			>20	Hf2	5.1	622	94.6	55.0	N.D.	---
San Ramón P13	Helechos y popal	Histosol	30-40	Hf1	4.0	521	94.2	54.7	0.54	65.3
			>40	Hf2	4.0	983	93.9	54.6	N.D.	N.D.
Ogarrio P14	Popal	Histosol	0-20	Hf	4.4	476	86.6	50.3	N.D.	611.6
			>20	Hh	4.6	881	89.0	51.7	N.D.	N.D.
Ogarrio P15	Popal	Histosol	0-35	Hf	4.6	849	68.3	39.7	0.43	14.4
			>35	Hh	4.4	381	82.3	47.8	N.D.	N.D.
La Venta P16	Pasto	Histosol	0-18	Hf	4.0	161	49.2	28.6	0.18	26.8
			18-29	Hh	4.2	296	27.0	15.7	0.15	32.2
			29-39	Aa	3.9	228	6.3	3.7	0.24	19.63
			39-69	Cr	n.d.				---	N.D.

Nota: n.d. = No determinado. N.D. No detectado, por debajo del límite de cuantificación. Los valores sombreados rebasan el límite permisible establecido por Países Bajos (20 mgkg^{-1}) en HAP's y el límite de limpieza de EPA (100 mgkg^{-1}) y el criterio de limpieza de Profepa (1000 mgkg^{-1}) para alifáticos.

Sitios Control:

Los suelos analizados en los sitios control registran un alto contenido de agua por arriba del 50 %, dado que son terrenos sujetos a inundación o donde está totalmente inundado, observando, además, que a mayor profundidad el porcentaje de humedad disminuye notoriamente en función a la textura determinada en campo, clasificando a los suelos como arcillosos o franco arcillosos que son dominantes para la región. Los horizontes definidos para los perfiles en su mayoría exhiben un alto contenido de material vegetal acumulado originando capas hísticas en fermentación seguidas de capas húmicas, seguido de un horizonte A y finalmente el horizonte C con características de material sedimentario y, en

algunos casos, con características de gleización. La materia orgánica en la zona presenta altos porcentajes en la superficie que disminuye conforme la profundidad, clasificándose en extremadamente rico a lo largo del perfil como se observa en el cuadro 9. El pH en todo el perfil se clasifica como fuertemente ácido para los suelos control dado por la inundación presente o al tener en la superficie el manto freático provocando un ambiente anareobico.

Cuadro 9. Características y concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos totales de los sitios control, Estado de Tabasco.

Descripción	Tipo de Vegetación	Unidad de Suelo	Profundidad (cm)	Horizonte	Humedad (%)	M.O. [%]	C orgánico (%)	pH KCl	HAP's total mgkg ⁻¹	Alifáticos total mgkg ⁻¹
Sitio Control 1 (rancho Isidro Bocas, camino La Venta-5 Presidentes). Ubicación UTM: punto 1 (390742 y 2007030), punto 2 (390750 y 2006980), punto 3 (390850 y 2006900)										
Punto 1	Hidrofila	Gleysol	0-30	Hh	209	44.1	25.5	4.2	N.D.	3.0
			30-40	Aa/Cr	118	12.7	7.4	4.0	0.18	2.0
			40-60	Cr	60	2.6	1.5	3.8	N.D.	0.5
Punto 2	Hidrofila	Histosol	0-20	Hf	735	78.6	45.7	3.6	N.D.	2.4
			20-50	Hh	502	81.6	47.4	3.9	2.06	20.3
			50-60	Cr	59	6.0	3.5	4.0	0.52	0.7
Punto 3	Hidrofila	Histosol	0-30	Hf	725	90.3	52.5	3.6	N.D.	5.1
			30-40	Hh	304	58.4	33.9	4.1	1.35	3.1
			50-60	Cr	76	5.3	3.0	4.5	0.34	1.0
Control 2, rancho Juan Gómez Córdoba, camino La Venta-Benito Juárez. Ubicación UTM: punto 1 (397086 y 2006687), punto 2 (397086 y 2006600), punto 3 (396986 y 2006640).										
Punto 1	Acahual	Gleysol	3-0	L	182		5.64	-	N.D.	8.3
			0-10	Aa	162	33.2	-	4.3	6.52	9.8
			10-14	Aa/Cr	114	13.1	-	4.5	N.D.	4.4
			14-22	Cr	28	1.2	-	4.9	0.31	0.3
			22-30	Crg	51	1.0	-	5.1	N.D.	2.1
Punto 2	Platanillo	Histosol	0-15	Hf	336	41.1	9.4	4.4	0.33	0.2
			15-35	Ah	65	6.0	-	4.1	1.43	2.1
			35-45	Cr	40	1.3	-	4.2	N.D.	0.8
Punto 3	Tule	Histosol	0-7	Hf	285	21.4	-	4.3	N.D.	0.9
			7-10	Ah	78	9.2	-	4.2	1.29	N.D.
			10-25	Cr	42	3.0	6.51	4.4	N.D.	0.9
Control 3, Ranchería Tres Bocas. Ubicación UTM: punto 1 (401242 y 1986748), punto 2 (401250 y 1986690), punto 3 (401260 y 1986762).										
Punto 1	Pasto	Histosol	0-15	Hf	1218	62.1	36.1	4.5	N.D.	46.4
			15-30	Hh	258	40.1	23.3	4.8	N.D.	35.7
			>30	Aa	109	22.4	13.0	4.6	N.D.	4.8
				Cr	85	7.5	4.4	5.0	N.D.	3.8
Punto 2	Popal	Histosol	0-5	Hf	659	81.4	47.3	4.3	0.50	15.3
			5-35	Hh1	683	70.6	41.0	4.4	1.48	1.7
			35-60	Hh2	320	48.7	28.3	4.1	N.D.	0.9
			60-75	Aa/Cr	72	8.6	5.0	4.1	N.D.	13.9
Punto 3	Acahual	Gleysol	0-5	Ah1	30	13.7	8.0	4.1	5.37	1.0
			5-19	Ah2	26	7.2	4.2	4.1	0.38	1.0
			19-35	Acg	22	1.8	1.0	4.3	0.58	2.0
			35-70	Cg1	38	0.8	0.5	5.1	N.D.	0.4
			70-100	Cg2	44	0.9	0.5	5.4	N.D.	0.7
			100-140	Cr	47	1.4	0.8	5.9	N.D.	0.2
			140-160	Aa	119	15.6	9.0	5.2	N.D.	0.4
			160-180	2Hh	226	27.5	16.0	4.6	2.49	1.2
Control 4, La Venta-Benito Juárez. Ubicación UTM: punto 1 (401498 y 2008206), punto 2 (401567 y 2008211), punto 3 (397731 y 2006559).										
Punto 1	Pasto	Histosol	0-20	Hf	793	82.5	47.9	4.1	N.D.	29.8
			20-60	Aa	108	12.6	7.32	4.0	0.18	N.D.
			>60	Aa/Cr	60	4.6	2.7	3.6	0.28	0.5
Punto 2	Popal	Histosol	0-20	Hf	488	70.8	41.1	4.2	0.77	N.D.
			20-40	Aa	108	22.3	12.9	3.9	N.D.	1.4
			>40	Aa/Cr	76	7.7	4.5	3.7	N.D.	N.D.
Punto 3	Apompal	Histosol	0-13	Hf	265	37.4	21.7	4.6	0.08	1.4
			13-26	Hh	604	29.5	17.1	4.6	7.74	12.5
			26-40	Cr	79	2.4	1.4	4.7	0.12	0.7
			40-60	2Hf	900	88.3	51.3	4.6	N.D.	1.0

Continuación

			60-70	2Hh	635	58.2	99.8	4.7	0.96	1.5
Control 5, La Azucena. Ubicación UTM (384285 y 20107010).										
Sitio	Manglar quemado	Histosol	0-17	Hf	843	69.3	40.2	4.8	20.24	19.1
				Hh1	410	72.8	42.3	5.0	3.53	2.1
				Hh2	335	61.9	35.9	4.1	1.95	1.5
				Hh3		67.6	39.3	4.5	N.D.	N.D.
				Aa		38.4	22.32	2.9	N.D.	N.D.
Control 6, La Azucena. Ubicación UTM (384385 y 2011609).										
Sitio	Manglar	Histosol	0-8	Hf	403	65.8	38.2	4.2	2.44	12.7
			8-20	Hh	247	45.0	26.1	4.4	N.D.	1.0
			>20	Aa	67	7.6	4.4	5.3	0.03	1.4
				Cr					N.D.	

Nota: N.D. No detectado, por debajo del límite de cuantificación. Los valores sombreados rebasan el límite permisible establecido por Países Bajos (20 mgkg^{-1}) en HAP's y el límite de limpieza de EPA (100 mgkg^{-1}) y el criterio de limpieza de Profepa (1000 mgkg^{-1}) para alifáticos.

Derrames Antiguos:

Los suelos analizados en los derrames antiguos registran un alto contenido de humedad superior al 50 %, de acuerdo a la fisiografía de la zona están sujetos a inundaciones y el comportamiento de la humedad es en descenso con la profundidad en la mayor parte de los sitios, y en pocos existe el comportamiento inverso. La textura determinada en campo definió suelos con características arcillosas y/o franco arcilloso que es dominante para la región. Los horizontes definidos para los perfiles exhiben un alto contenido de material vegetal acumulado originando horizontes hísticos de fermentación en la mayor parte de los casos y, en otros, asociados con capas húmicas, seguido de un horizonte A y finalmente el C con características de sedimentos finos (arcillas). El pH en el derrame de La Venta en la mayor parte de los sitios registró de ligeramente ácido a neutro; en 5 Presidentes registró una clasificación en la mayor parte de fuerte a moderadamente ácido y en Aquiles Serdán se clasifica a lo largo del perfil como fuertemente ácido. La materia orgánica en la zona presenta altos porcentajes en la superficie que disminuyen con la profundidad, clasificándose en extremadamente rico a lo largo del perfil como se observa en el cuadro 10, con excepción de 5 Presidentes; se determinó que en el punto del derrame y, a 30 y 90 m hay un aumento del contenido de materia orgánica a mayor profundidad.

Cuadro 10. Características y concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos totales en sitios con derrames de petróleo antiguos (más de 30 años), Estado de Tabasco.

Descripción	Tipo de	Unidad de Suelo	Profundidad (cm)	Horizonte	pH	Humedad	M.O.	C orgánico	HAP's	Alifáticos
	Vegetación				KCl	(%)	(%)	(%)	total (mgkg^{-1})	Total (mgkg^{-1})
Derrame antiguo, quemado, La Venta. Ubicación UTM: 0 m (388536 y 2000060), 10 m (388526 y 2000060), 25 m (388501 y 2000060), 75 m parte baja (388451 y 2000060), 75 m parte alta (388451 y 2000060).										
punto 1, 0 m	---	Histosol	0-18	Chapo		76			N.D.	217.4
			18-27	Hf	5.8	315	27.7	16.1	0.34	1.5
			>27	Aa	6.4	56	4.7	2.7	0.23	0.5
				Cr	6.1	49	3.2	1.8	0.31	2.8
punto 2, 10 m, parte alta	Manglar	Histosol	0-30	Hf	4.9	291	70.2	40.8	N.D.	50.2
			30-50	Aa/Cr	5.4	62	3.5	2.0	N.D.	0.7
			50-60	Cr	6.6	42	1.9	1.0	N.D.	0.8
sedimento Geoprobe			1800	C		55			0.28	0.8

Continuación

punto3, 25 m, parte alta	Manglar	Histosol	2-0	L		54			0.09	16.7
			0-23	Hf	4.6	372	69.1	40.1	0.16	352.0
			23-33	Aa/Cr	4.7	142	3.9	2.3	N.D.	15.1
			33-40	Cr	4.1	52	4.3	2.5	N.D.	3.1
punto 4, 75 m, parte alta	Manglar	Histosol	2-0	L		88			N.D.	22.7
			0-24	Hf	5.0	116	32.1	18.6	0.94	27.1
			24-35/40	Aa	4.5	67	8.2	4.7	1.11	1.5
			40-60	Cr	6.9	48	1.3	0.7	N.D.	1.1
punto 5, 75 m, parte baja	Manglar	Histosol	2-0	L		233			1.21	7.4
			0-5	Chapo		152			3.05	222.2
				Hf	5.6	125	13.5	7.8	N.D.	2.5
				Aa/Cr	6.3	53	4.4	2.5	0.39	1.3
				Cr	6.4	57	3.6	2.1	N.D.	0.9
Derrame antiguo 2, 5 Presidentes-Batería 4. Ubicación UTM: 0 m (393290 y 2009957), 10 m (393290 y 2009947), 30 m (393290 y 2009927), 90 m (393290 y 2009867).										
punto 1, 0 m	Manglar	Histosol	0-1	Chapo		17			129.09	746.3
			1-10	Hf1	4.9	297	58.4	33.9	159.08	1424.1
			10-20	Hf2	5.3	150	68.3	39.7	74.49	1304.3
			20-25	Chapo		83			203.68	283.8
			25-55	Hf3	6.1	468	72.7	42.2	0.46	4.4
			>55	Hh	6.1	632	76.6	44.5	1.15	N.D.
punto 2, 10 m	Manglar	Histosol	0-12	Hf1	4.3	408	66.0	38.4	29.01	432.6
			12-30	Hf2	5.5	449	70.3	40.9	1.02	0.9
			30-40	Hh	5.3	681	54.5	31.7	59.17	3.8
			>40	Aa	5.8	95	34.2	19.9	0.17	1.6
punto 3, 30 m	Manglar	Histosol	0-13	Hf1	4.4	575	65.8	38.2	30.08	260.2
			13-50	Hf2	5.0	557	72.8	42.3	N.D.	42.9
			50-60	Hh	5.2	465	78.2	45.5	1.93	6.0
punto 4, 90 m	Manglar	Histosol	0-15	Hf1	4.6	575	69.1	40.2	1.12	3.7
			15-45	Hf2	4.8	825	72.9	42.4	N.D.	2.3
			>45	Hh	5.0	495	79.2	46.0	1.56	30.4
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán. Ubicación UTM: 0 m (389830 y 2003700), 50 m (389728 y 2003700), 100 m (389728 y 2003710)										
punto 1, 0 m	Pasto	Histosol	0-9	Hf	4.6	604	82.5	48.0	N.D.	6.3
			9-11	Chapo		52			208.94	700.3
			11-25	Hh	4.9	215	86.2	50.1	92.45	3282.0
			25-35	Aa/Cr	4.8	52	7.8	4.5	0.19	42.0
			35-50	Cr1	4.4	77	1.9	1.1	0.55	N.D.
			>50	Cr2	3.9	48	1.1	0.6	0.79	1.7
punto 2, 20 m	Pasto	Histosol	0-6	Hf	4.9	533	83.5	48.5	1.94	2.4
			6-15	Hh1	4.9	468	75.8	44.0	2.63	55.1
			15-30	Hh2	5.1	462	74.5	43.3	83.19	5011.3
			30-42	Aa	5.0	79	4.6	2.7	N.D.	1.4
			42-58	Crg1	4.8	41	2.1	1.2	0.23	4.4
			58-73	Crg2	4.6	87	1.6	0.9	N.D.	3.1
			>73	Cr	5.3	41	0.7	0.4	0.66	0.1
punto 3, 50 m	Pasto	Histosol	0-21	Hf	4.8	449	77.9	45.3	13.46	26.4
			21-30	Aa	5.0	55	8.8	5.1	N.D.	0.3
			30-47	Aa/Cr	5.0	49	3.3	1.9	0.13	N.D.
			>47	Cr	5.0	50	1.7	1.0	N.D.	N.D.
punto 4, 100 m	Pasto	Histosol	0-10	Hf	4.8	681	74.5	43.3	6.01	N.D.
			10-26	Hfh	4.7	826	71.9	41.8	N.D.	0.1
			26-33	Aa	4.9	90	18.3	10.6	0.21	0.3
			33-45	Cr1	4.6	79	2.6	1.51	3.13	0.3
			>45	Cr2	4.7	46	1.2	0.7	0.82	N.D.

Nota: N.D. No detectado, por debajo del límite de cuantificación. Los valores sombreados rebasan el límite permisible establecido por Países Bajos (20 mgkg^{-1}) en HAP's y el límite de limpieza de EPA (100 mgkg^{-1}) y el criterio de limpieza de Profepa (1000 mgkg^{-1}) para alifáticos.

Derrames Recientes:

Los suelos analizados en los derrames recientes registran también un alto contenido de agua por arriba del 50 %, excepto para las tres primeras distancias de Aquiles Serdán (0, 10 y 30 m) en función de pertenecer a terrenos sujetos a inundación donde el porcentaje de la humedad descende con la profundidad; la textura determinada en campo definió suelos con características arcillosas para los perfiles realizados. Los horizontes definidos para los perfiles exhiben un alto contenido de material vegetal acumulado, originando horizontes hísticos en fermentación en la mayor parte de los casos, excepto en Aquiles Serdán (0, 50, 125 y 200 m) y asociadas con capas húmicas, en algunos casos seguido de un horizonte A (sólo en Aquiles Serdán) y finalmente el C (en Ogarrio y Aquiles Serdán) con características del material de origen. El pH en Ogarrio en el punto del derrame fue de fuertemente ácido a neutro mientras en los otros sitios este se clasificó como fuerte, moderadamente ácido a neutro; en Aquiles Serdán, los sitios se clasifican a lo largo del perfil como fuertemente ácidos y en 5 Presidentes, los sitios se clasifican como moderadamente ácidos. La materia orgánica para la zona presenta altos porcentajes en la superficie que disminuyen con la profundidad, clasificándose en extremadamente rico a lo largo del perfil como se observa en el cuadro 11 con excepción de Aquiles Serdán; se determinó que en las distancias de 0 y 50 m existe un bajo contenido de materia orgánica a lo largo del perfil, clasificándose como pobre a extremadamente pobre.

Cuadro 11. Características y concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en suelos de los sitios con derrames recientes (menos de 6 meses), Estado de Tabasco.

Descripción	Tipo de Vegetación	Unidad de Suelo	Profundidad (cm)	Horizonte	Humedad (%)	pH KCl	M.O. [%]	C orgánico (%)	HAP's Total mgkg ⁻¹	Alifáticos Total mgkg ⁻¹
Derrame reciente 1, sin quemar, Campo Ogarrio, rancho de Tranquillino de la Cruz, ejido Luis Cabrera, pozo 1247. Ubicación UTM: 0 m (399220 y 1992398), 10 m (399210 y 1992398), 30 m (399190 y 1992398), 70 m (399150 y 1992398).										
punto 1, 0 m, derrame	---	Histosol	0-1	Chapo	50				N.D.	16141.0
			1-30	Hf	60	4.6	68.9	40.0	4.38	17.1
			120	Hh	772	4.8	77.7	45.1	N.D.	5.1
			150	Cr	420	7.4	1.8	1.0	0.16	0.1
vegetación quemada			0-5	Hf	63				N.D.	2.6
punto 2, 10 m	Platanillo	Histosol	0-20	Hf1	40	4.4	85.4	49.6	4.70	49.9
			20-30	Hf2	762				N.D.	75.6
			120	Hh	900	5.5	54.7	31.8	2.45	17.8
			150-160	Cr	762	6.9	5.07	2.9	0.27	2.7
sedimento Geoprobe			1000	C	89				N.D.	1.5
punto 3, 30 m	Platanillo	Histosol	0-25	Hf	6	4.5	84.9	49.3	2.55	9.9
			125-130	Hh	776	5.3	51.4	29.9	14.03	0.2
			130-140	Cr	439	7.2	2.7	1.5	N.D.	1.0
punto 4, 70 m	Apompal	Histosol	0-20	Hh	720	4.5	87.7	50.9	N.D.	1.6
			60-70	Hfh	1233	4.6	89.1	51.8	N.D.	0.3
Derrame reciente 2, Aquiles Serdán. Ubicación UTM: 0 m (390388 y 2003414), 30 m (390398 y 2003416), 50 m (390227 y 2003496), 70 m (390192 y 2003635)										
punto 1, 0 m	---	Gleysol	0-2	chapo					478.38	9000.3
			2-7	Ahg1	40	4.1	6.4	3.7	44.53	515.4
			7-14	Ahg2	30	4.2	3.9	2.2	0.21	0.5
			14-20	Crg1	23	4.3	1.5	0.9	0.15	0.9
			20-25	Crg2	33	4.0	0.9	0.5	N.D.	2.2
sitio remediado	Maiz	Gleysol	0-20	Ap	27				9.02	135.8
punto 2, 50 m	Pasto	Gleysol	0-7/11	Ahg1	28	3.9	7.1	4.1	N.D.	10.4
			7/11-22	Ahg2	44	4.0	4.5	2.6	3.86	0.3
			22-27	Crg1	23	4.0	0.8	0.4	N.D.	0.4
			27-42	Crg2	28	3.9	0.4	0.2	N.D.	0.3
			42-65	Crg3	39	4.3	0.3	0.1	0.60	0.1
punto 3, 125 m	Pasto	Gleysol	0-7	Aa	52	4.5	37.1	21.5	42.48	131.7

Continuación

			7-25	Ah1	56	4.3			1.81	92.0
			25-40	Ah2	48	4.1	6.4	3.7	12.76	108.8
			40-60	Cr1	42	3.9	3.7	2.1	8.31	0.4
			60-66	Cr2	27	3.7	2.3	1.3	N.D.	22.2
punto 4, 200 m	Pasto	Histosol	0-8	Hf	475	4.9	4.9	2.8	35.38	147.3
			8-19	Aa	44	4.7	15.2	8.8	1.69	6.4
			>19	Cr1	57	4.9	4.8	2.8	1.30	2.1
				Cr2	38	4.8	4.6	2.6	N.D.	0.3
Derrame reciente 3, 5 Presidentes. Ubicación UTM: 0 m (393200 y 2012600), 10 m (393200 y 2012590), 30 m (393200 y 2012570), 70 m (393200 y 2012530).										
punto1, 0 m	---	Histosol	0-5	Hf1	385	5.2	91.9	53.4	587.99	12431.1
			5-20	Hf2	900	5.5	86.9	50.5	252.38	10277.1
			<20	Hh	669	5.9	81.4	47.3	7.55	27.9
punto 2, 10 m	Manglar	Histosol	0-5	Hf1	900	5.0	79.4	46.1	9.93	22.9
			5-20	Hf2	1036	5.2	74.4	43.2	10.84	69.7
			>20	Hh	635	5.6	69.4	40.3	N.D.	1.0
punto 3, 30 m	Manglar	Histosol	0-5	Hf1	733	5.9	76.5	44.4	1.37	5.6
			5-25	Hf2	942	5.3	72.6	42.2	1.76	4.8
			>25	Hh	694	5.6	62.7	36.4	1.44	N.D.
punto 4, 70 m	Manglar	Histosol	0-10	Hf1	793	5.0	77.5	45.0	N.D.	N.D.
			10-50	Hf2	880	5.1	72.8	42.3	0.28	0.6
			>50	Hh	400	4.4	95.6	55.5	0.68	N.D.

Nota: N.D. No detectado, por debajo del límite de cuantificación. Los valores sombreados rebasan el límite permisible establecido por Países Bajos (20 mgkg^{-1}) en HAP's y el límite de limpieza de EPA (100 mgkg^{-1}) y el criterio de limpieza de Profepa (1000 mgkg^{-1}) para alifáticos.

7.2. CONCENTRACION DE HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS (HAP's) Y ALIFATICOS EN SUELO EN EL DISTRITO DE AGUA DULCE (ACTIVO 5 PRESIDENTES).

Microcuenca:

Los resultados de las concentraciones de hidrocarburos alifáticos se presentan el cuadro 8, y se observa una variación entre un sitio y otro, sin definirse una movilidad de contaminantes a lo largo de la microcuenca. Se registran las más altas concentraciones en el perfil 3 correspondiente a un terreno incendiado, el perfil 4 atrás de la petroquímica, con presencia de una capa de chapopote oculto por el desarrollo de popal, el perfil 7 en el horizonte Hh (37-54 cm de profundidad) cercano a una instalación de bombeo abandonada, el perfil 8 en la parte superficial y en el horizonte Hh1 correspondiente a un terreno agrícola incendiado, el perfil 12 cercano a una batería de separación y el perfil 14 en un terreno de pastizal con un derrame antiguo. Estos sitios rebasan el límite permisible de EPA (LPEPA) de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) de 100 mgkg^{-1} pero se hallan debajo del criterio de limpieza propuesto por Profepa (CLP) de 1000 mgkg^{-1} . El perfil 11 exhibe valores por arriba del CLP en la parte superficial del suelo debido a un derrame reciente por la ruptura de un ducto presentando la mayor concentración para la microcuenca en el horizonte Cr1 con un valor de $13352.6 \text{ mgkg}^{-1}$.

En el momento del muestreo algunos sitios se hallaron con rastros de incendios recientes, evidentes por una gran cantidad de ceniza en el terreno; este fue el caso en el perfil 3 y el perfil 8 donde se encontró una concentración de alifáticos por arriba de 100 mgkg^{-1} en la

parte superficial del suelo pero sin rebasar el valor de 1000 mgkg^{-1} , mientras los HAP's no exhibieron una alta concentración total en dichos sitios.

En la figura 8, se observa que en la mayor parte de los perfiles los hidrocarburos alifáticos disminuyen su concentración a mayor profundidad, excepto en aquellos ya mencionados anteriormente, definiendo que la migración de los contaminantes es mínima, lo que se atribuye a las características del suelo de esta zona (contenido de materia orgánica y la presencia de arcilla).

Las concentraciones de HAP's (cuadro 8) en la mayor parte de los perfiles se hallan por debajo del límite permisible de los Países Bajos (LPPB) de 20 mgkg^{-1} en forma total, existiendo una gran variación de concentración entre un sitio y otro. Los lugares que muestran una mayor concentración y rebasan el LPPB fueron el perfil 4 ubicado detrás de la petroquímica donde existe una capa de chapopote, el perfil 5 que se halla cercano a un suelo recuperado a través de un tratamiento de biorremediación y el perfil 8, correspondiente a un terreno de uso agrícola ubicado en el horizonte Hh1. La menor concentración de HAP's se ubicó en el perfil 16 con un valor de 0.15 mgkg^{-1} .

En la figura 9 se observa que la mayor concentración se ubica en la parte superficial del suelo y disminuye conforme a la profundidad. La migración de estos contaminantes a través del suelo es mínima debido al alto contenido de materia orgánica y a la textura del suelo con alto porcentaje de arcilla.

En los sitios analizados se logró identificar una degradación microbiana de acuerdo a la forma del cromatograma en forma de campana llamada Unresolved Complex Mixture (UCM) y en otros casos únicamente la presencia de los picos identificados de acuerdo al estándar rango diesel en función de su tiempo de retención. En la figura 10, se muestra un cromatograma de alifáticos del perfil 4 demostrando una mayor concentración de compuestos de alto peso molecular a partir del C30 además de presentarse compuestos a partir del C10, mientras en la figura 11, el cromatograma correspondiente a los HAP's del mismo perfil se observa también una presencia de aromáticos de alto peso molecular indicativo de un derrame antiguo.

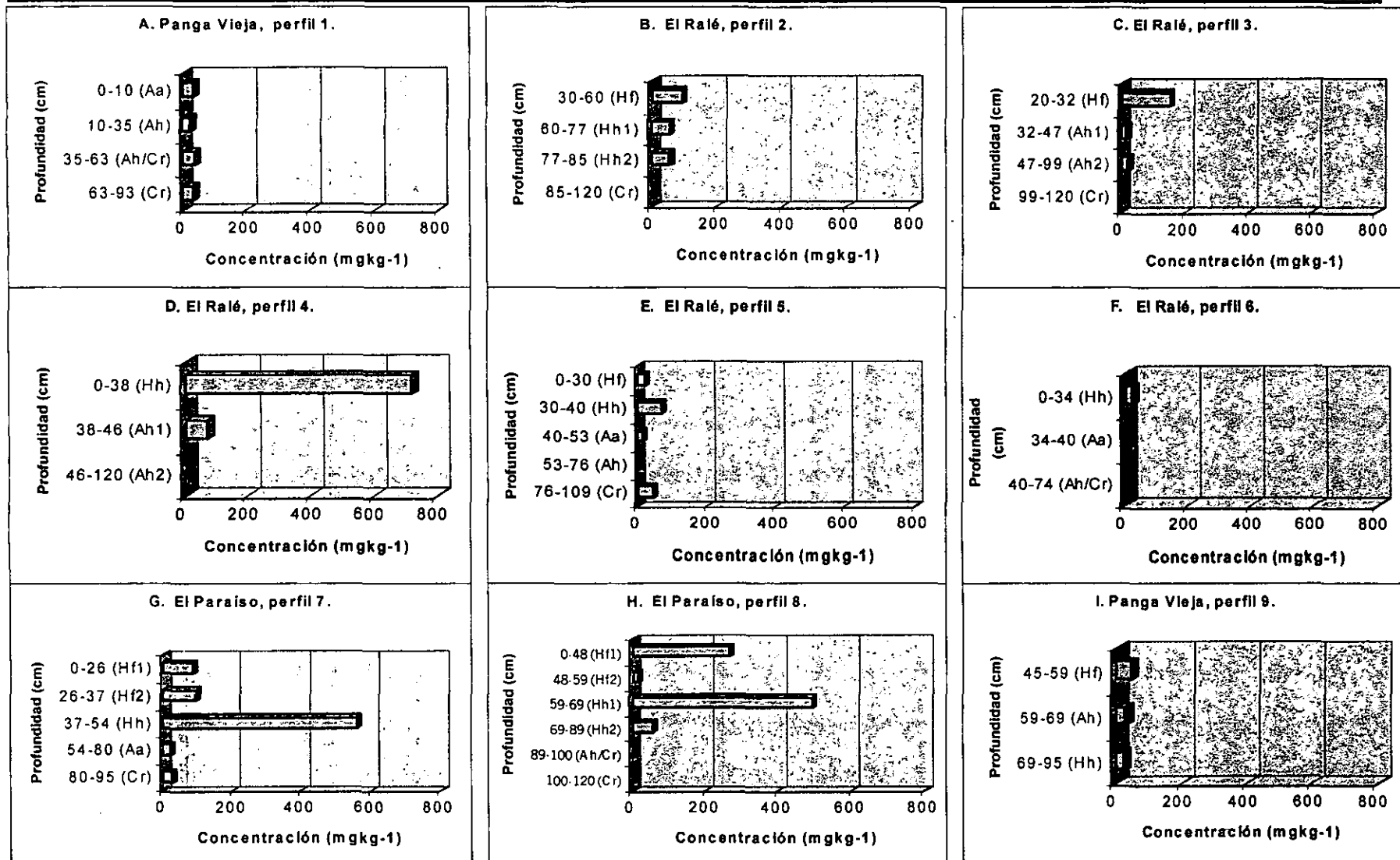


Figura 8a. Concentración de hidrocarburos alifáticos de la microcuenca de La Venta (Distrito de Agua Dulce), Tabasco.

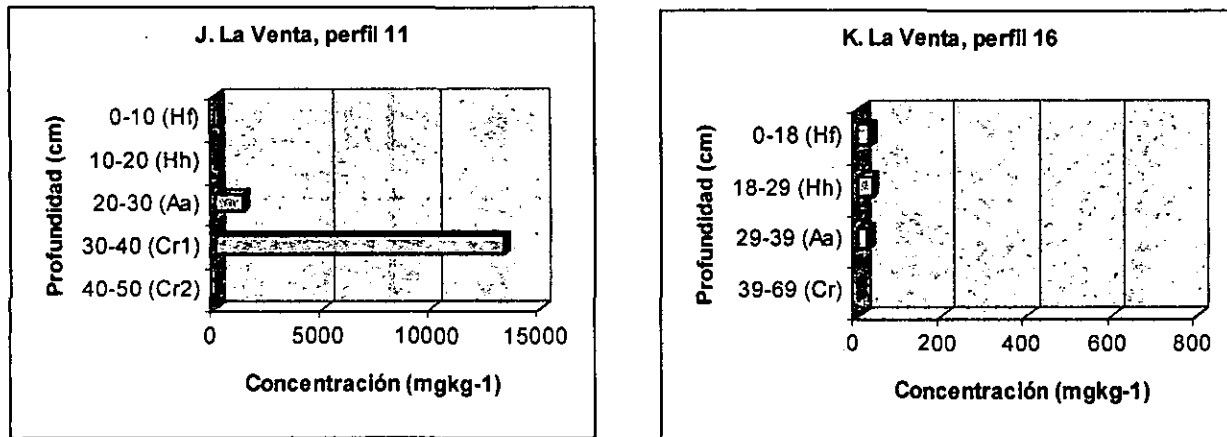


Figura 8b. Concentración de hidrocarburos alifáticos en un sitio con un derrame reciente (perfil 11) y a los 100 m (perfil 16) de distancia en la Venta, Tabasco.

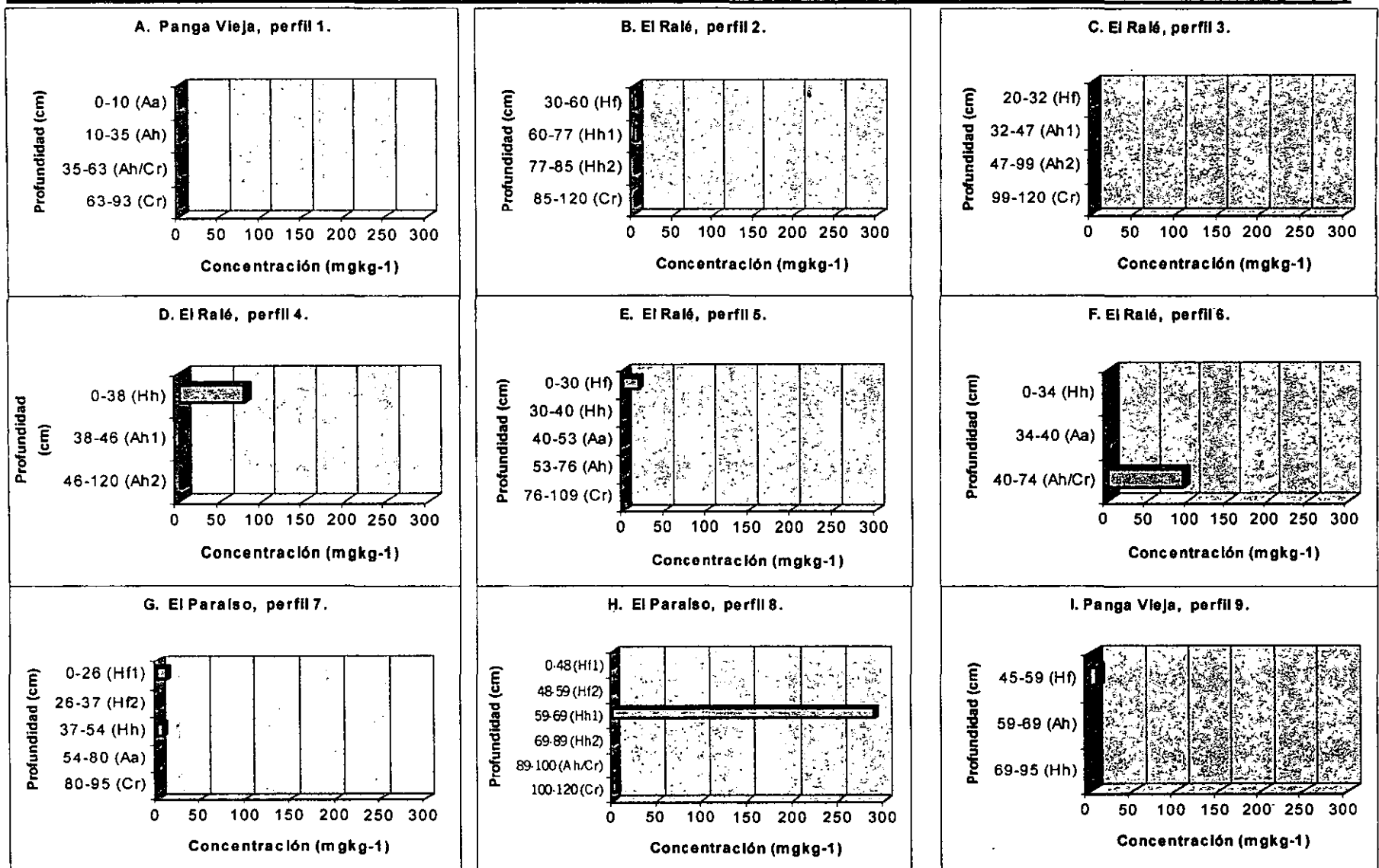


Figura 9a. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en suelos de la microcuenca de la Venta, Tabasco (perfil 1 al 9).

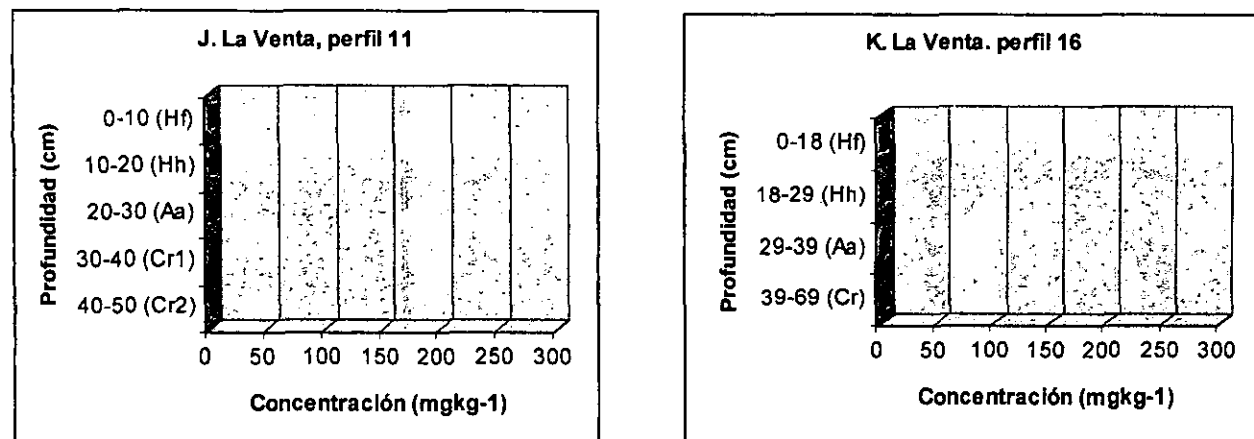


Figura 9b. Concentración de HAP's en un sitio con un derrame reciente (perfil 11) y a los 100 m (perfil 16) de distancia en la microcuenca de la Venta, Tabasco.

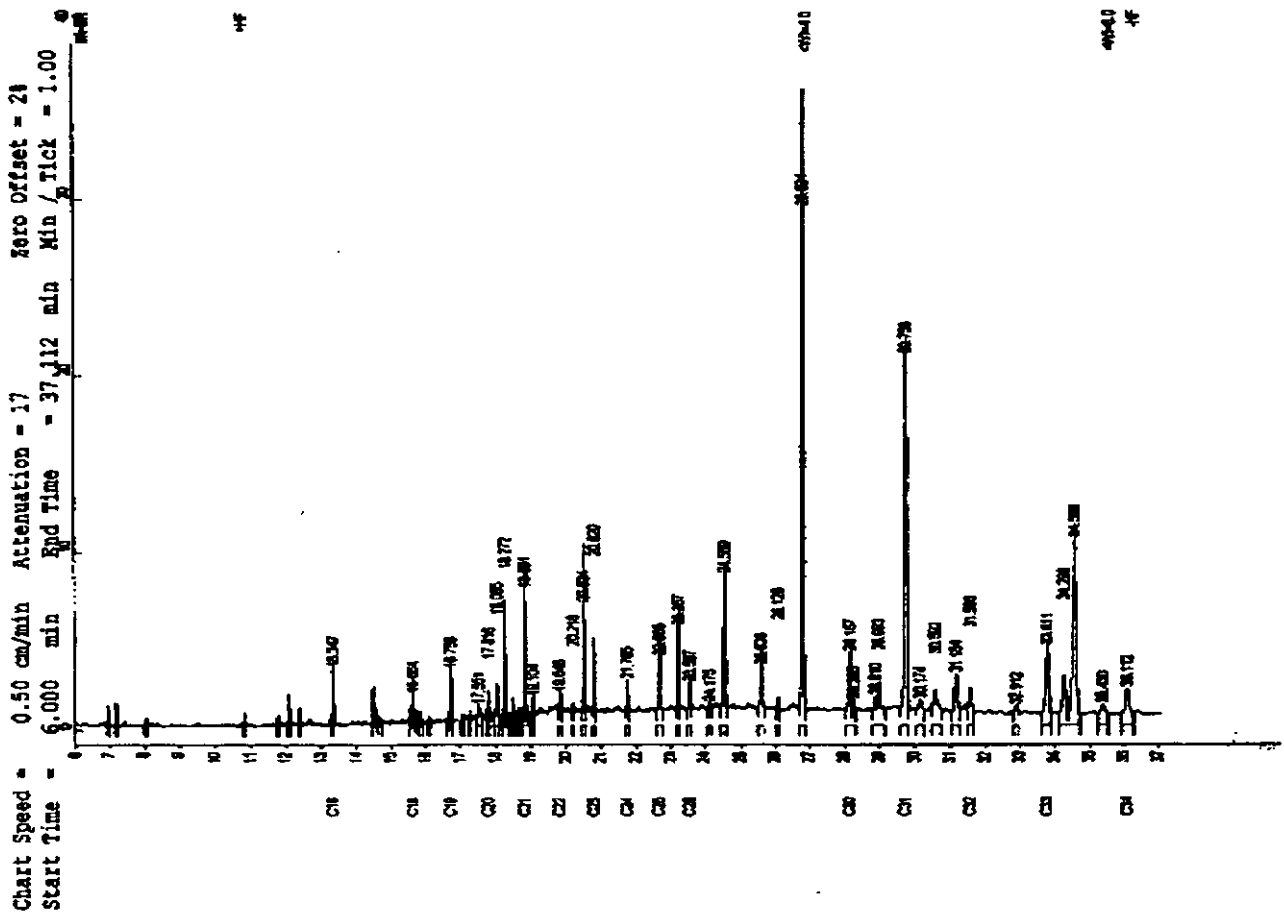


Figura 10. Cromatograma de hidrocarburos alifáticos en suelo (horizonte Ah1 con una capa de chapopote) en el Ralé (Perfil 4), Tabasco.

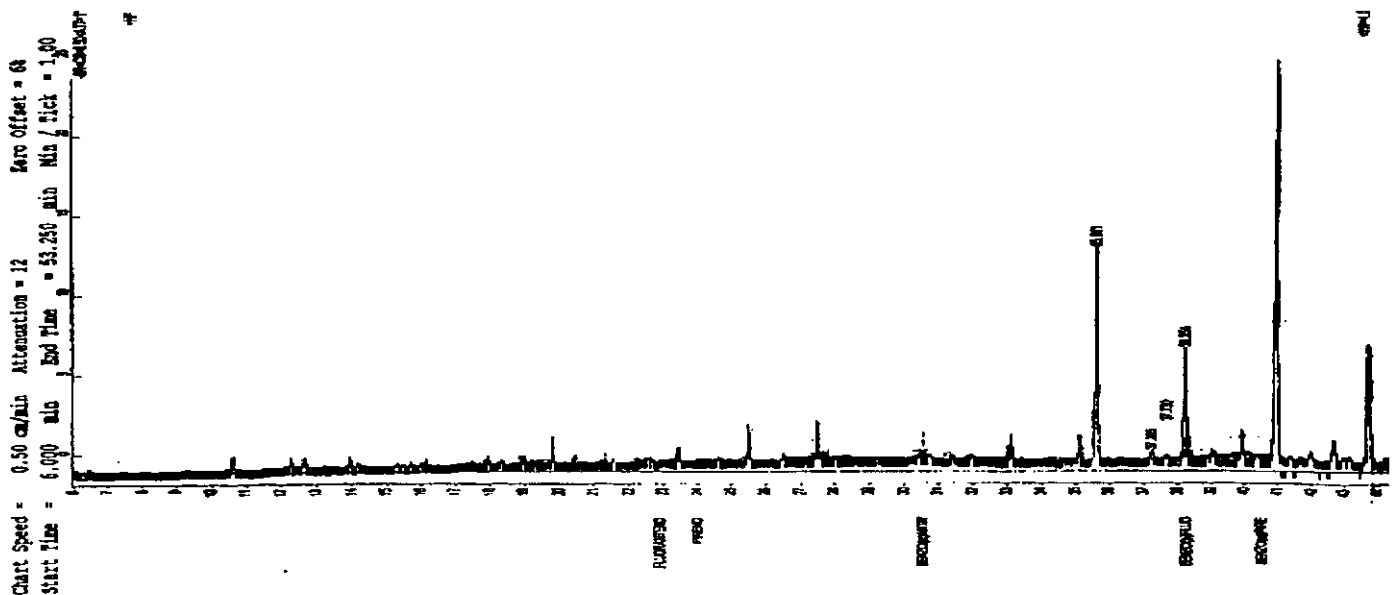


Figura 11. Cromatograma de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelo (horizonte Hh) con una capa de chapopote en el Ralé, observando compuestos de alto peso molecular.

Sitios Control:

En el cuadro 9, las concentraciones de hidrocarburos alifáticos en los sitios control se definen como los niveles de fondo para la zona bajo el criterio de no tener instalaciones petroleras cercanas, registrando la mayor concentración de 46.4 mgkg^{-1} en el control 3 (Ranchería de Tres Bocas) en la parte superficial del suelo y la concentración mínima para la zona fue de 0.3 mgkg^{-1} en el control 2 (Rancho de Juan Gómez) en el horizonte Cr. Los sitios analizados incluyen dos sitios de manglar en La Azucena en donde uno de ellos sufrió un incendio sin presentar una diferencia en concentración con respecto al sitio sin incendio. Tales valores se hallan por debajo de LPEPA y del CLP.

En la figura 12, se observa una tendencia general de descenso conforme a la profundidad de la concentración y en algunos casos se halla una mayor concentración en el horizonte Hh, como es el caso del control 1 (sitio 2) y el control 4 (sitio 3).

Los HAP's presentaron una baja concentración en todos los perfiles excepto en el control 5 perteneciente a manglar quemado que muestra un valor de 20.24 mgkg^{-1} en el horizonte Hf, el cual rebasa el LPPB en la parte superficial del suelo disminuyendo la concentración a mayor profundidad. Los perfiles restantes presentaron una gran variación de concentraciones entre un lugar y otro. La concentración mínima de estos suelos fue de 0.03 mgkg^{-1} correspondiente al control 6 (manglar no quemado) en el horizonte Aa.

En la figura 13 se observa una tendencia de descenso conforme a la profundidad de los HAP's, pero en comparación a las concentraciones de alifáticos estos muestran concentraciones irregulares a lo largo del perfil (ver cuadro 9).

En la figura 14, el cromatograma perteneciente al control 5 (manglar quemado) muestra una presencia de compuestos a partir del C18 al C34 en la parte superficial. Y en la figura 15, los HAP's que destacan en el horizonte superficial del sitio control con manglar quemado son compuestos originados de la combustión, como es el pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoreno e indeno en la superficie.

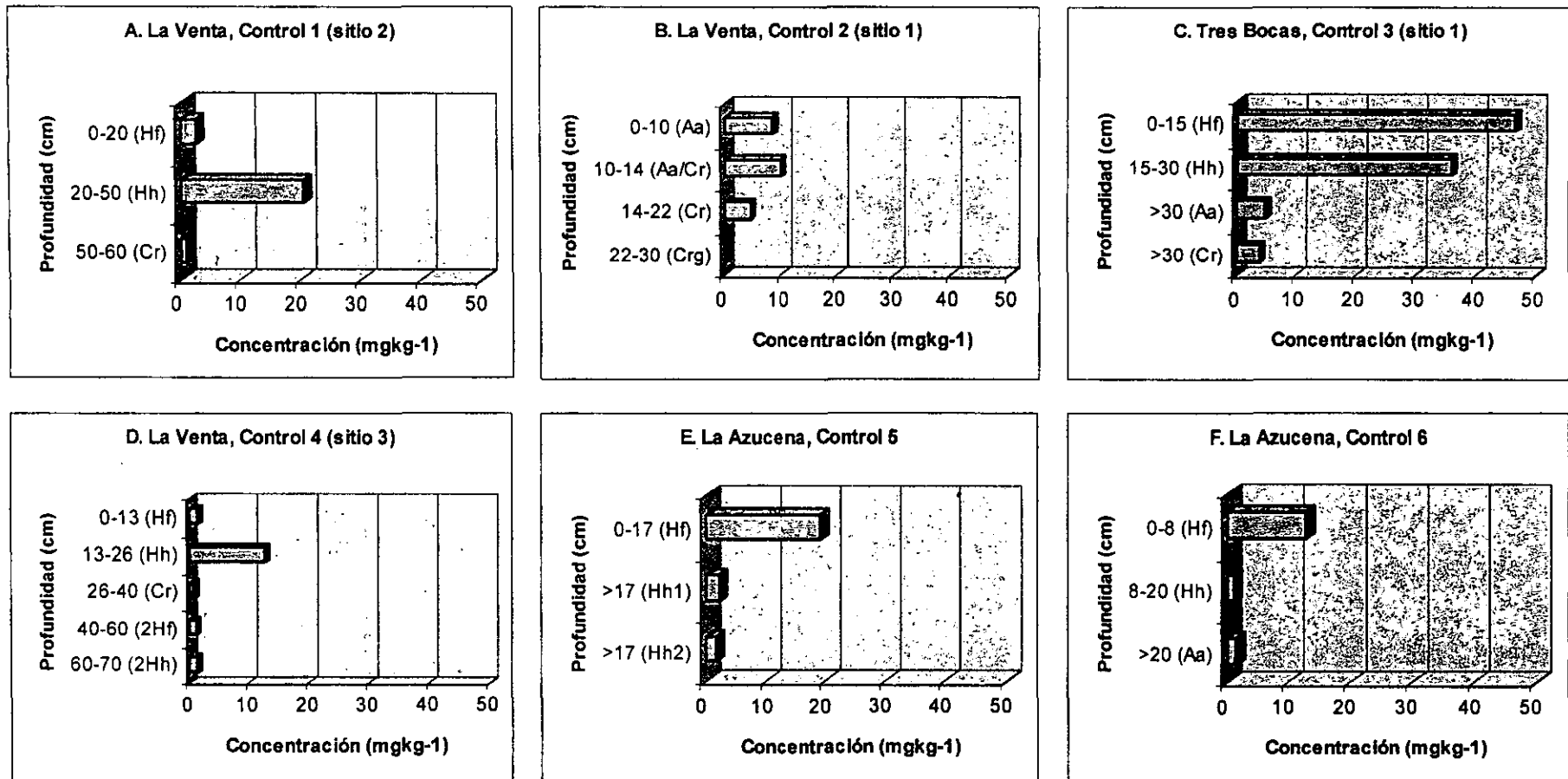


Figura 12. Concentración de hidrocarburos alifáticos en algunos sitios control analizados en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

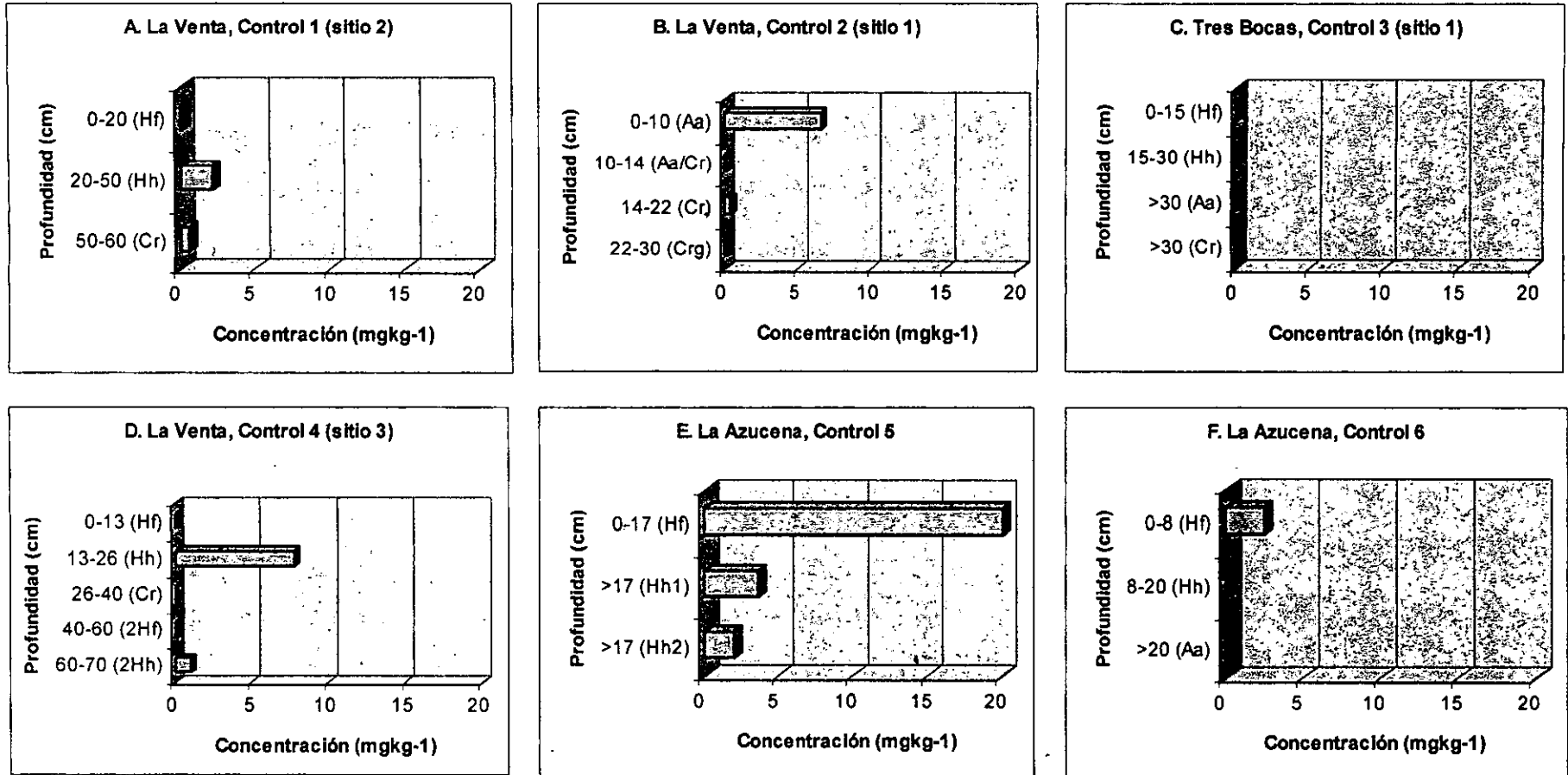


Figura 13. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en algunos sitios control analizados en el Distrito de Agua Dulce.

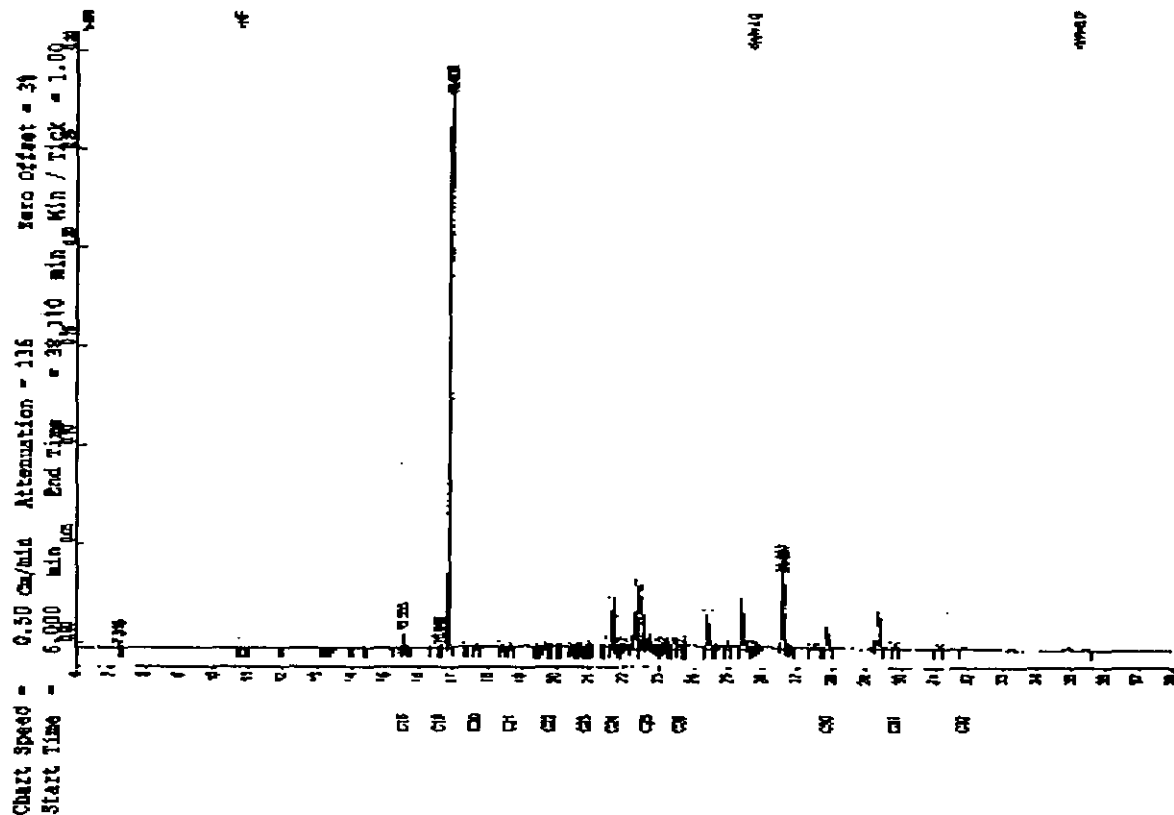


Figura 14. Cromatograma de alifáticos del control 5 manglar quemado (horizonte superficial) en la Azucena, Tabasco.

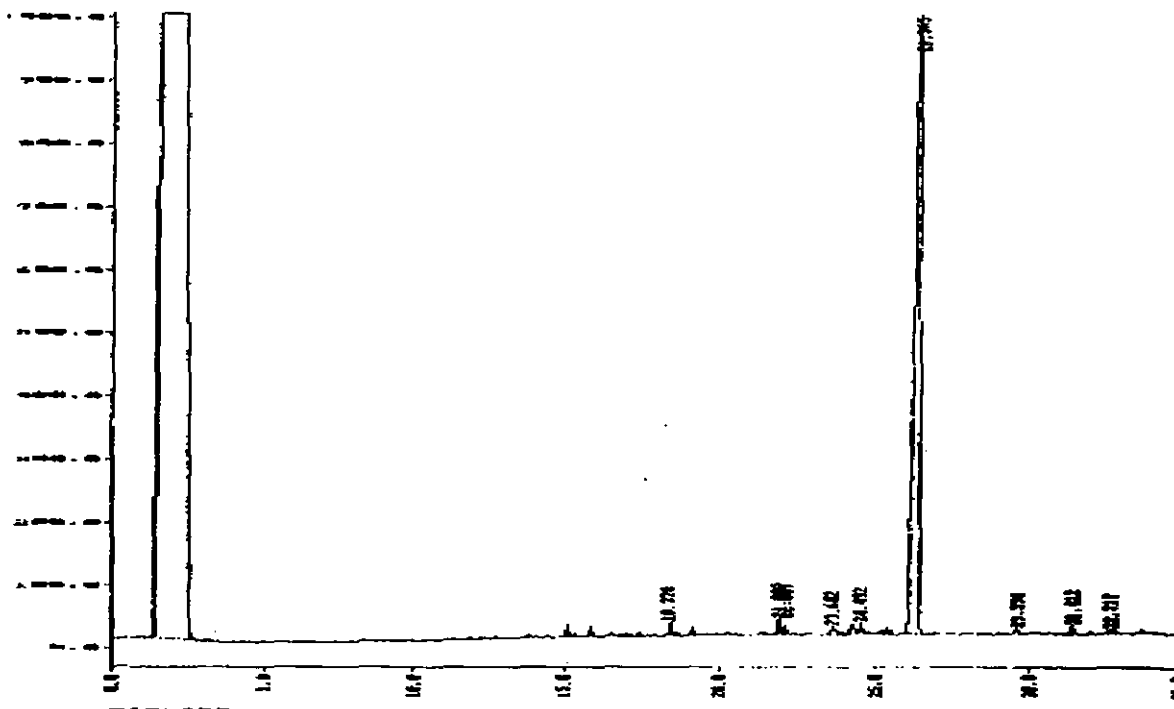


Figura 15. Cromatograma de HAP's del control 5 (horizonte superficial) en la Azucena, Tabasco.

Derrames Antiguos:

En el sitio del derrame antiguo de La Venta, la mayor concentración de hidrocarburos alifáticos se localizó en la capa superficial de chapopote (217.4 mgkg^{-1}), rebasando el LPEPA, y el menor valor se encontró en el horizonte Aa (0.5 mgkg^{-1}) (Cuadro 10). A 10 m de distancia, la mayor concentración se encontró en el horizonte Hf (50.2 mgkg^{-1}) y la menor en el horizonte Aa/Cr (0.7 mgkg^{-1}) sin presentar problema de riesgo de contaminación en este perfil. A 25 m de distancia, el horizonte Hf presentó la mayor concentración de 352 mgkg^{-1} rebasando el LPEPA y la menor concentración en el horizonte Cr (3.1 mgkg^{-1}). A 75 m de distancia en una parte alta referido a un montículo del terreno, la mayor concentración se ubicó en 22.7 mg/Kg en el horizonte Hf y la menor concentración ubicada en el horizonte Cr (1.1 mgkg^{-1}) sin presentarse riesgo de contaminación de acuerdo a los valores establecidos. Y en la parte más alejada del transecto a los 75 m de distancia parte baja, la mayor concentración se ubicó en una capa de chapopote (222.2 mgkg^{-1}) en la superficie del suelo rebasando el LPEPA y la menor concentración en el horizonte Cr (0.9 mgkg^{-1}).

Los HAP's presentaron una baja concentración en todos los sitios analizados sin rebasar el LPPB. En el punto de origen donde se recolectó chapopote de gran espesor (18 cm) hay una baja concentración de HAP's. La mayor concentración registrada fue a 75 m de distancia en la capa de chapopote con un valor de 3.05 mgkg^{-1} y la menor concentración fue de 0.09 en el horizonte L (hojas secas de manglar) en el punto a 25 m de distancia.

La movilidad de alifáticos es influenciada por la inundación del terreno originando la extensión del derrame en la parte superficial pues a mayor profundidad las concentraciones disminuyen drásticamente (figura 16), mostrando con ello una migración mínima hacia partes más profundas. Mientras para los HAP's no existe una movilidad superficial y migración hacia partes más profundas dada por las concentraciones irregulares y bajas aunada su ausencia en algunos horizontes del suelo sin representar problema aparente de contaminación por la concentración total (figura 17).

En el derrame de 5 Presidentes se observa en el sitio del derrame que las más altas concentraciones de alifáticos se encuentran en los primeros 25 cm con valores de 283 a 1424 mgkg^{-1} que comprenden en la parte superficial a una capa de chapopote, y a los horizontes Hf1, Hf2 y una capa de chapopote enterrada. Ubicándose las mayores concentraciones en los horizontes orgánicos (1-20 cm), rebasando el CLP (1000 mgkg^{-1}) (Cuadro 10). Por debajo de la capa de chapopote enterrada, las concentraciones de alifáticos en los siguientes horizontes disminuyen drásticamente e incluso no se verifican estos compuestos a una profundidad de 55 cm. A una distancia de 10 m, únicamente la parte superficial registra la más alta concentración que rebasa el LPEPA (100 mgkg^{-1}) en el horizonte Hf1; para los siguientes horizontes disminuye a valores por debajo de 4 mgkg^{-1} . A 30 m de distancia sólo la superficie correspondiente al horizonte Hf1 registró la mayor concentración para este perfil con un valor de 280.2 mgkg^{-1} rebasando el LPEPA; en los horizontes restantes los valores descienden fuertemente con una concentración de 43 a 6 mgkg^{-1} . A 90 m de distancia las concentraciones registradas no rebasan el LPEPA sin

representar problema alguno en el suelo siendo la mayor concentración en el horizonte Hh con un valor de 30.4 mgkg^{-1} , como se observa en el cuadro 10.

Los HAP's (Cuadro 10), en el sitio del derrame de 5 Presidentes, las concentraciones en la superficie del suelo (Chapopote, Hf1, Hf2 y Chapopote enterrado) registraron los más altos valores con respecto a las siguientes distancias rebasando el LPPB (20 mgkg^{-1}) siendo en el chapopote enterrado el de mayor concentración 203.68 mgkg^{-1} , después de esta capa la concentración disminuye drásticamente, siendo el valor mínimo de 0.46 mgkg^{-1} en Hf3. A 10 m de distancia, existen dos valores que rebasan el LPPB ubicándose en el horizonte Hf1 (29.01 mgkg^{-1}) y en el horizonte Hh (59.17 mgkg^{-1}) y la mínima concentración fue de 0.17 mgkg^{-1} en el horizonte Aa. A 30 m de distancia, la superficie presentó la mayor concentración (30.08 mgkg^{-1}) rebasando el LPPB y el mínimo valor se registró en el horizonte Hh con un valor de 1.93 mgkg^{-1} . A 90 m de distancia las concentraciones presentes no rebasan el LPPB ubicando la mayor concentración en el horizonte Hh (1.56 mgkg^{-1}) y la concentración mínima en la superficie Hf1 con un valor de 1.12 mgkg^{-1} .

La movilidad de los alifáticos en este derrame se observa en la parte superficial del punto del derrame hasta una distancia de 30 m, exhibiendo un descenso en la concentración conforme mayor es la distancia, indicando la extensión del derrame en el lugar, pues a 90 m de distancia no hay riesgo de contaminación al presentarse un valor mínimo en la superficie. La migración de estos compuestos a través del suelo es mínima excepto en el sitio del derrame donde en los primeros horizontes del suelo hay una migración de alifáticos hasta una profundidad de 25 cm y en adelante la migración es mínima. Los HAP's con respecto a la movilidad superficial y migración a través del suelo presentan un comportamiento similar a los alifáticos.

En el derrame de Aquiles Serdán, la mayor concentración de alifáticos en el sitio del derrame se presentó en la capa de chapopote enterrada (700.3 mgkg^{-1}) y en el horizonte Hh (3282.0 mgkg^{-1}), rebasando el LPEPA en el primer caso y en el segundo el CLP (Cuadro 10). La concentración mínima se localizó en el horizonte Cr2 (1.7 mgkg^{-1}). A 20 m de distancia, la concentración más alta se ubicó en el horizonte Hh2 con un valor de 5011.3 mgkg^{-1} rebasando el CLP y la mínima en el horizonte Aa (1.4 mgkg^{-1}). A los 50 m de distancia se localizó la mayor concentración en el horizonte Hf mientras la concentración mínima fue en el horizonte Aa (0.3 mgkg^{-1}), en este perfil no se rebasa ningún límite o criterio de limpieza al hallarse por debajo de 100 mgkg^{-1} . Y a 100 m de distancia, la concentración máxima fue de 0.3 mgkg^{-1} registrada en los horizontes Aa y Cr1 y la concentración mínima fue en el horizonte Hfh (0.1 mgkg^{-1}) de igual forma no se rebasa ningún criterio y/o límite permisible.

Para los HAP's en el punto de origen la mayor concentración se localizó en la capa de chapopote enterrada y en el horizonte Hh rebasando el LPPB y el valor mínimo ubicado en el horizonte Aa/Cr. A 20 m de distancia, la mayor concentración total fue en el horizonte Hh2 (83.19 mgkg^{-1}) rebasando el LPPB y la mínima en el horizonte Crg1 (0.23 mgkg^{-1}). A los 50 m de distancia, la mayor concentración se localizó en el horizonte Hf (13.46 mgkg^{-1}) y la menor concentración fue en el horizonte Aa/Cr (0.13 mgkg^{-1}) sin rebasar el LPPB en este perfil. Y a los 100 m de distancia, el mayor valor se ubicó en el horizonte Cr1 (1.51

mgkg^{-1}) y el menor valor se registró en el horizonte Aa (0.21 mgkg^{-1}) sin rebasar el LPPB en este perfil.

En la figura 19 muestra la distribución vertical y horizontal de alifáticos y HAP's y no se observa una movilidad en la parte superficial, únicamente en los horizontes ubicados entre los 15 y 30 cm de profundidad en el punto del derrame y a los 20 m de distancia. Las siguientes distancias no se presentan indicios de movilidad en alifáticos y HAP's. La migración a través del suelo es mínima o nula para ambas fracciones debido al drástico descenso de concentración hacia horizontes más profundos.

La materia orgánica retiene los contaminantes orgánicos principalmente en el horizonte Hf, combinándose con la presencia de la arcilla para detener el movimiento del agua y del derrame hacia zonas profundas.

En el derrame de 5 Presidentes, la figura 20 se observa la degradación del petróleo por parte de los microorganismos debido a la gran cantidad de picos no resueltos en el cromatograma debido al tiempo de exposición en la superficie (Wang *et al.*, 1999). En la figura 21, se observa un cromatograma de HAP's en donde se aprecia una ligera tendencia de degradación semejante a los alifáticos.

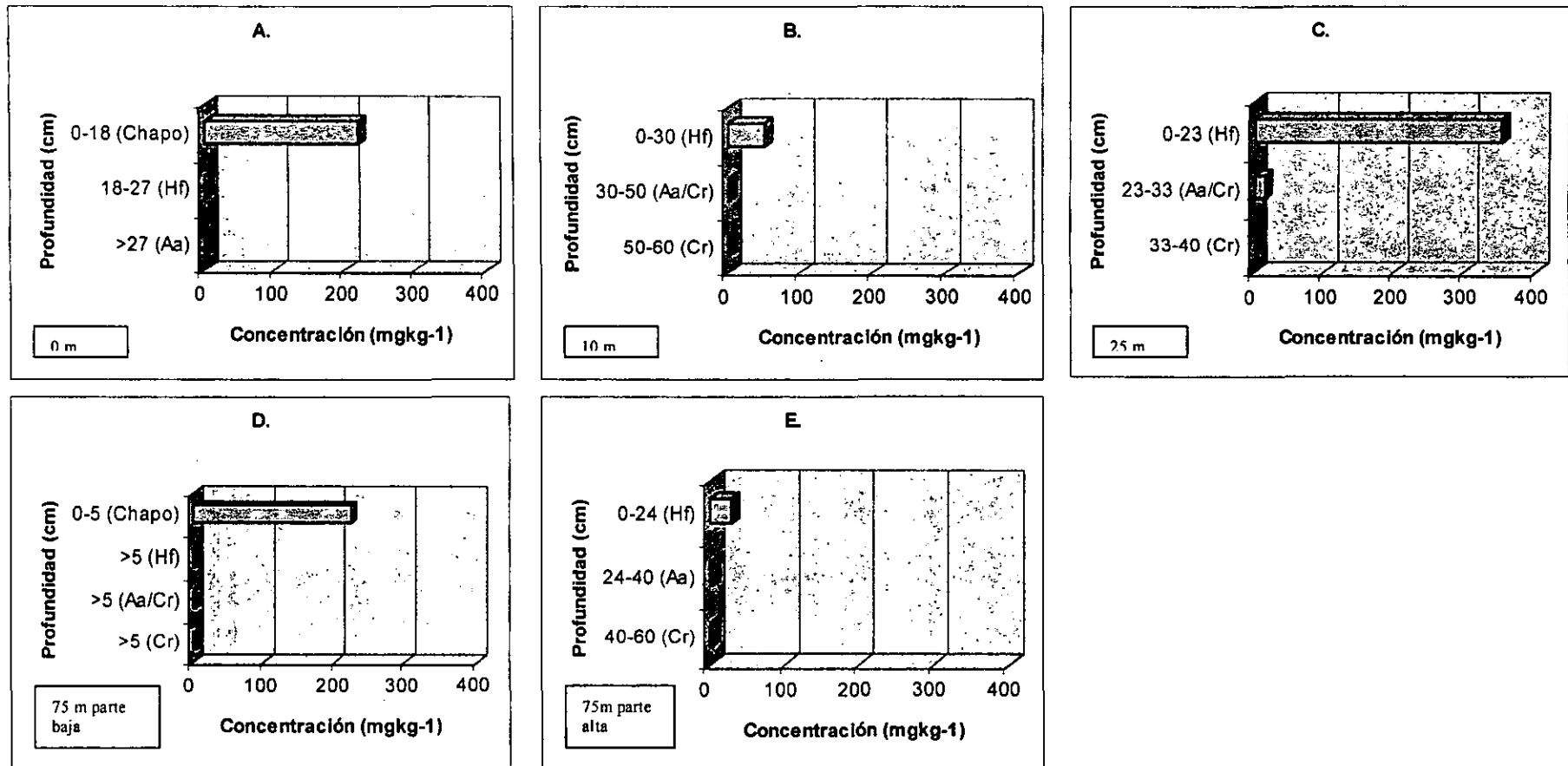


Figura 16. Concentración de hidrocarburos alifáticos a diferentes distancias en el derrame antiguo de La Venta, del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

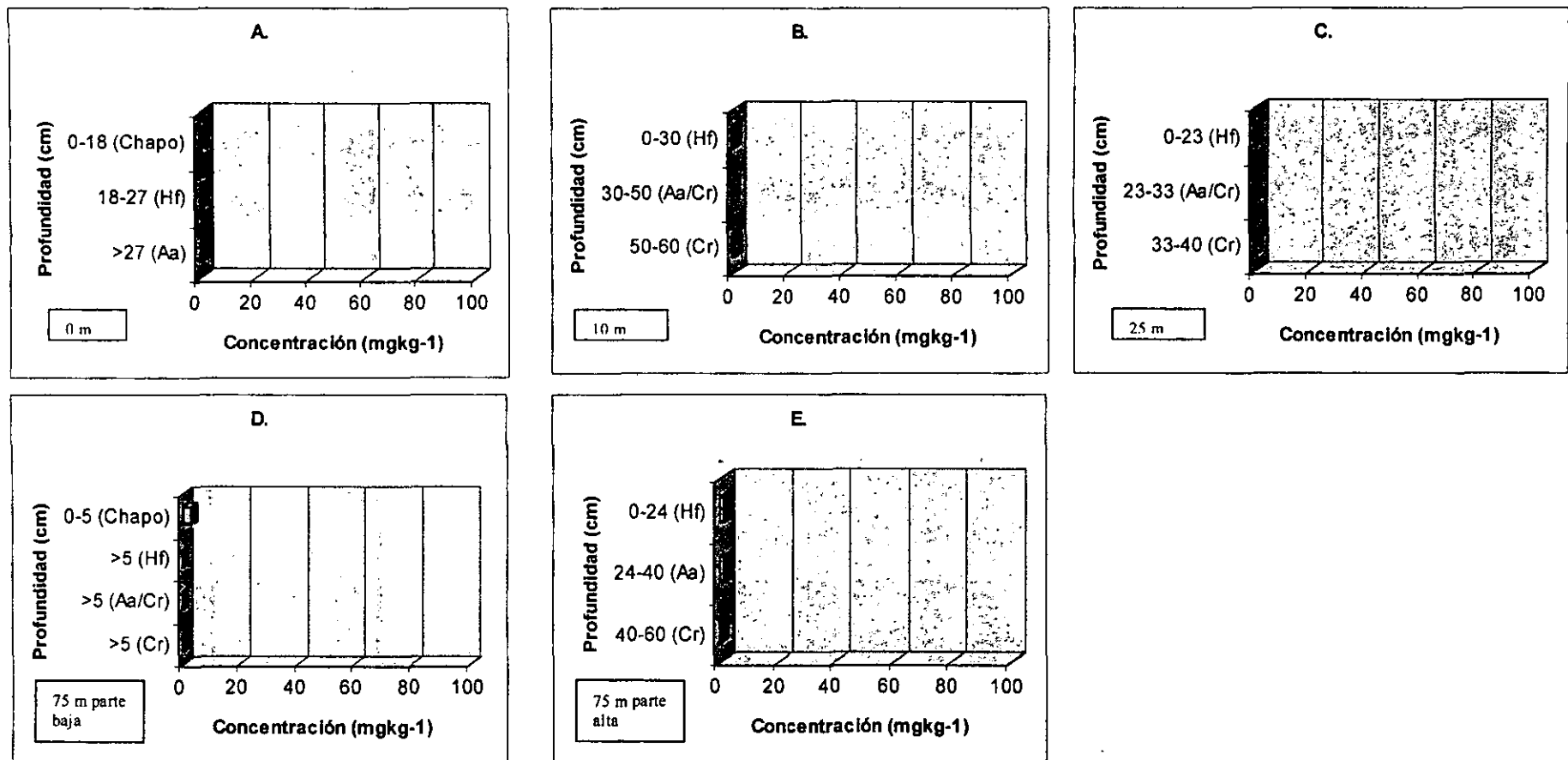


Figura 17. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) a diferentes distancias del derrame antiguo de La Venta del Distrito de Agua Dulce.

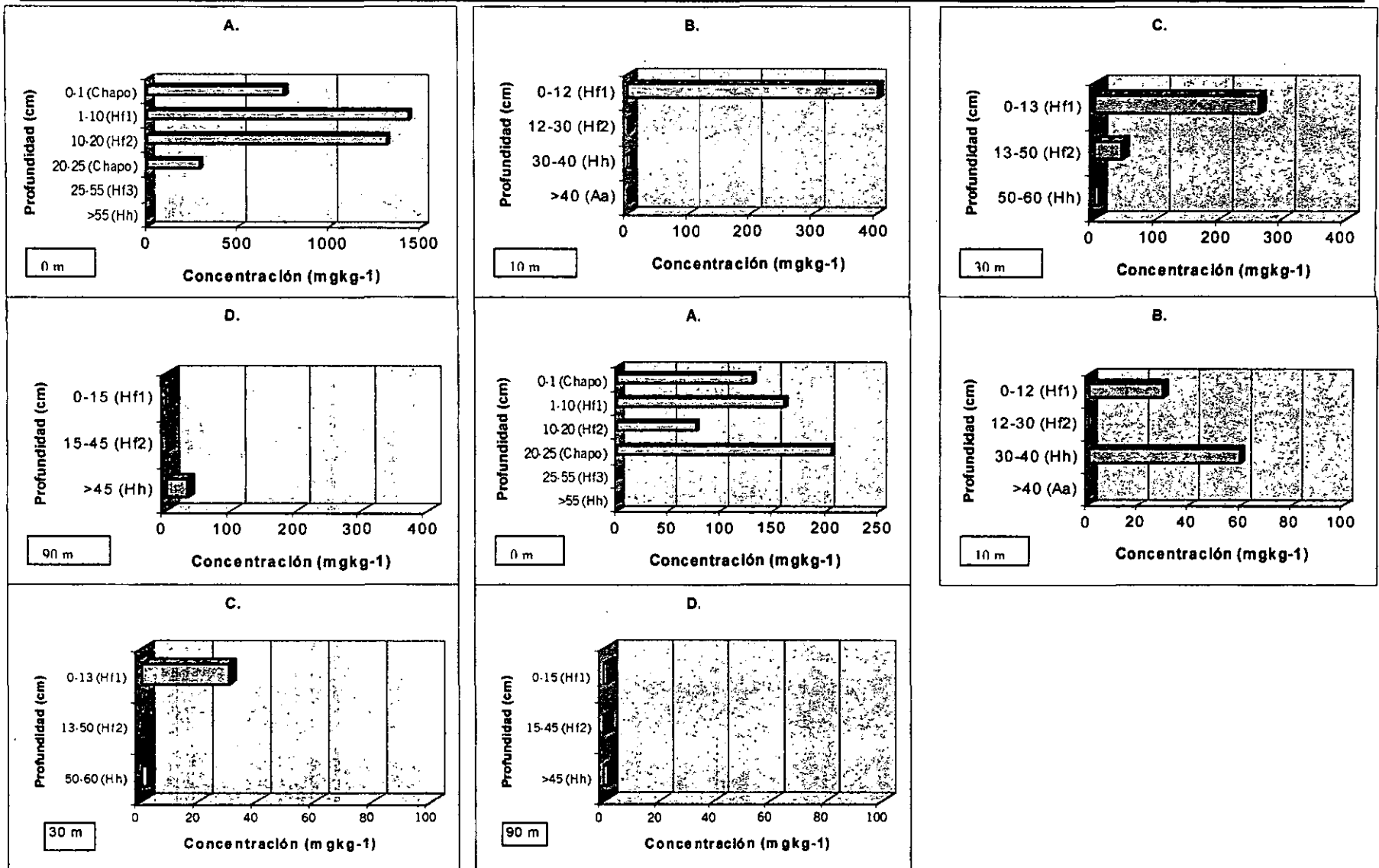


Figura 18. Concentración de alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) a diferentes distancias del derrame antiguo en 5 Presidents.

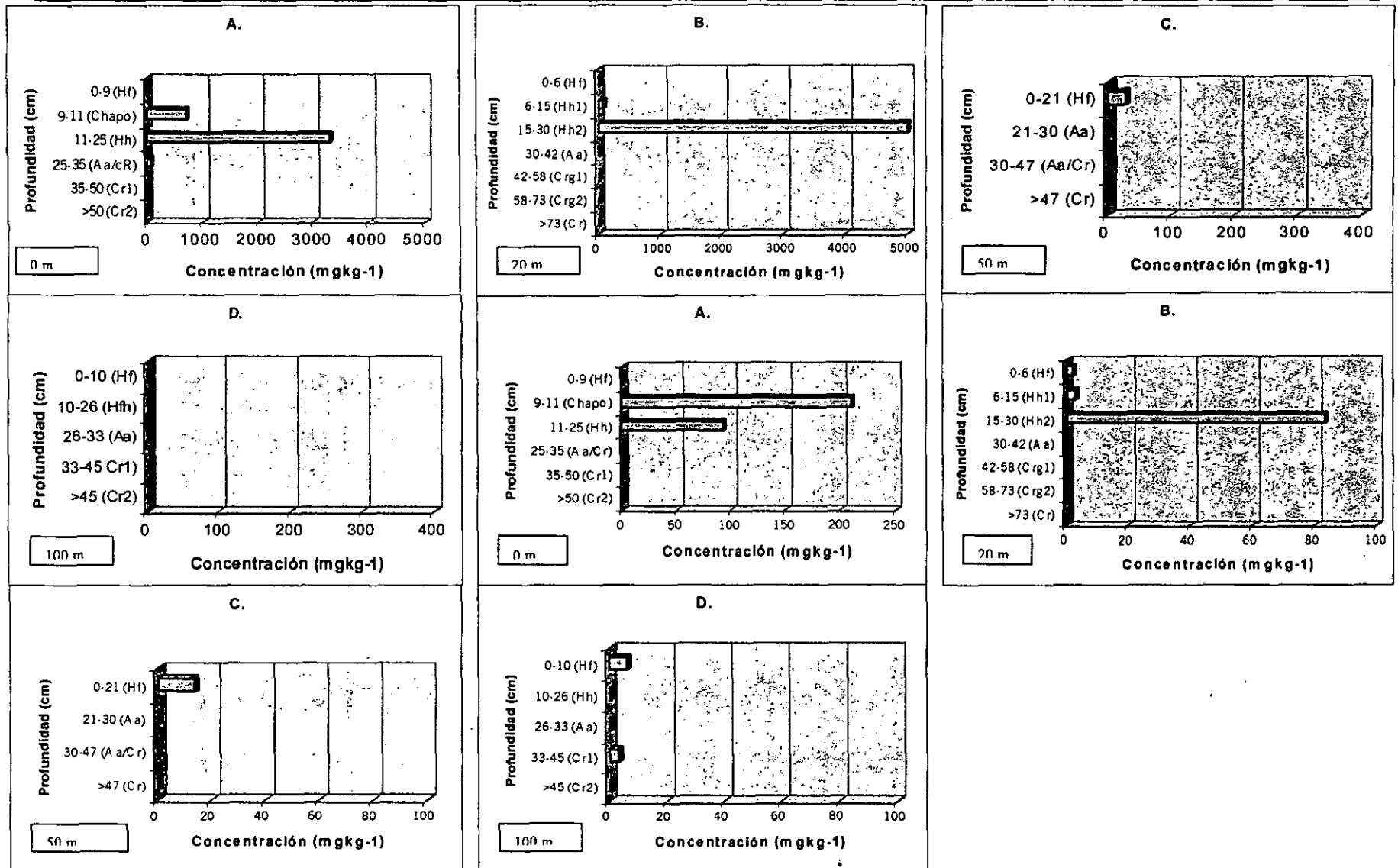


Figura 19. Concentración de alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) a diferentes distancias del derrame antiguo en Aquiles Serdán.

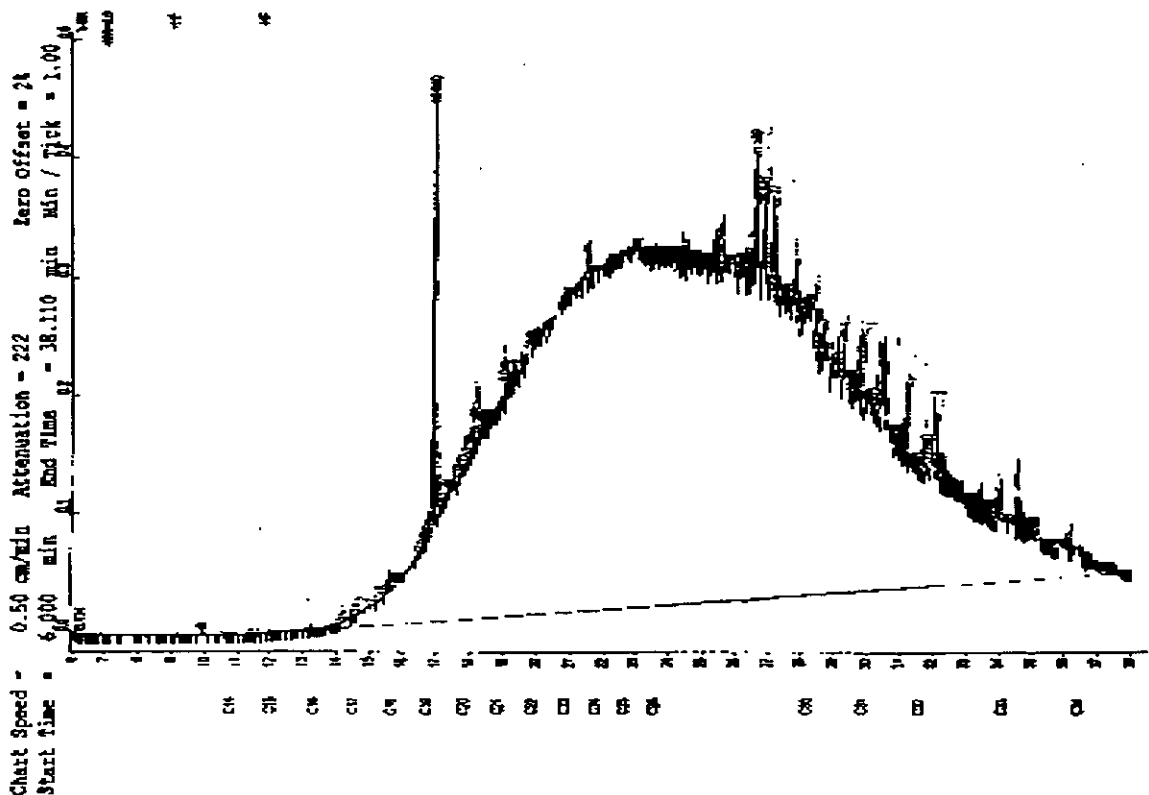


Figura 20. Cromatograma de hidrocarburos alifáticos en el suelo del derrame antiguo en 5 Presidentes, en el sitio de origen del derrame (horizonte Hf).

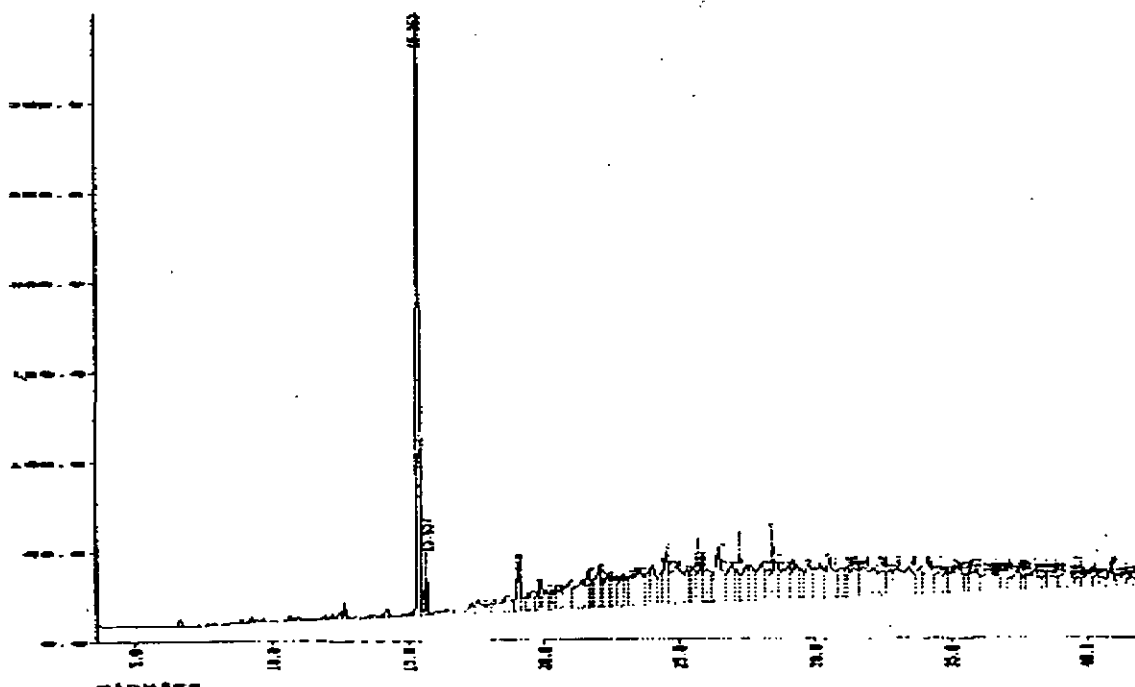


Figura 21. Cromatograma de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en el suelo (horizonte Hf) de un derrame antiguo en 5 Presidentes.

Derrames Recientes:

De acuerdo con las figuras 22-24 y el cuadro 11 pertenecientes a los tres derrames analizados, se observó que en Ogarrio, la mayor concentración de alifáticos se localizó en el sitio del derrame en la superficie con un valor de 16141 mgkg^{-1} en la capa de chapopote, rebasando el LPEPA (100 mgkg^{-1}) y el CLP (1000 mgkg^{-1}) y la menor concentración se registró en el horizonte Cr (0.1 mgkg^{-1}). A 10 m de distancia, la mayor concentración se localizó en el horizonte Hf2 (75.6 mgkg^{-1}) y la mínima concentración se ubicó en el horizonte Cr (2.7 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación. A los 30 m de distancia la mayor concentración fue en el horizonte Hf (9.9 mgkg^{-1}) y el valor mínimo de concentración se encontró en el horizonte Hh (0.2 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación. Y a los 70 m de distancia, la mayor concentración se localizó en el horizonte Hh (1.6 mgkg^{-1}) y la menor concentración ubicada en el horizonte Hfh (0.3 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación. Este sitio de muestreo se hallaba inundado en el momento del derrame por lo que gran parte del crudo flotaba en la superficie y estaba en las hojas del platanillo.

Debido a las condiciones de inundación es probable que ocurra una dispersión de HAP's pues se observa una baja concentración en los sitios analizados. En el sitio del derrame la mayor concentración se ubicó en el horizonte Hf (4.38 mgkg^{-1}) y la menor concentración en el horizonte Cr (0.16 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación en forma total de acuerdo al LPPB (20 mgkg^{-1}). A 10 m de distancia, el horizonte Hf registró la mayor concentración (4.70 mgkg^{-1}) y la menor concentración en el horizonte Cr (0.27 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación. A 30 m de distancia, la mayor concentración fue en el horizonte Hh (14.03 mgkg^{-1}) y sin registrarse una concentración en los siguientes horizontes que represente riesgo de contaminación. Y a los 70 m de distancia no se registró concentración de HAP's.

La movilidad en forma horizontal no se presenta en este sitio, documentada con el drástico descenso de la concentración del sitio del derrame al siguiente punto (10 m de distancia) para ambas fracciones identificadas. La migración a través del suelo para ambas fracciones es mínima de acuerdo a las concentraciones detectadas en los horizontes del suelo (Figura 22).

En Aquiles Serdán, la mayor concentración de los alifáticos se registró en el sitio del derrame en la capa de crudo (9000.3 mgkg^{-1}) rebasando el CLP y en el horizonte Ahg1 (515.4 mgkg^{-1}) rebasando el LPEPA y la menor concentración se ubicó en el horizonte Ahg2 (0.5 mgkg^{-1}). A 50 m de distancia, la mayor concentración se localizó en el horizonte Ahg1 (10.4 mgkg^{-1}) y el valor mínimo en el horizonte Crg3 (0.1 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación. A 125 m de distancia, el mayor valor se localizó en el horizonte Aa (131.7 mgkg^{-1}) rebasando el LPEPA y el valor mínimo en el horizonte Cr1 (0.4 mgkg^{-1}). Y a 200 m de distancia, el valor máximo se ubicó en el horizonte Hf (147.3 mgkg^{-1}) rebasando el LPEPA y la concentración mínima en el horizonte Cr2 (0.3 mgkg^{-1}).

La mayor concentración de HAP's totales en el sitio del derrame, se ubicó en la capa de chapopote (478.38 mgkg^{-1}) rebasando el LPPB y la concentración mínima se encontró en el horizonte Crg1 (0.15 mgkg^{-1}). A los 50 m, la mayor concentración se localizó en el

horizonte Ahg2 (3.86 mgkg^{-1}) y el valor mínimo en el horizonte Crg3 (0.60 mgkg^{-1}) sin rebasar el LPPB. A 125 m de distancia el horizonte Aa presentó la mayor concentración (42.48 mgkg^{-1}) rebasando el LPPB y la concentración mínima se encontró en el horizonte Ah1 (1.81 mgkg^{-1}). Y a 200 m de distancia, la mayor concentración se ubicó en el horizonte Hf (35.38 mgkg^{-1}) rebasando el LPPB y el valor mínimo se ubicó en el horizonte Cr1 (1.30 mgkg^{-1}).

La movilidad de los alifáticos se observó en la parte superficial a partir del punto del derrame hasta los 200 m de distancia, en los sitios alejados del derrame existe una concentración constante en la parte superficial (120 mgkg^{-1}). El mismo comportamiento se presentó para los HAP's a lo largo de los sitios analizados, excepto a 50 m de distancia, dando una idea de la extensión del derrame en el suelo. La migración a través del suelo en ambas fracciones se muestra como mínima debido que en los horizontes más profundos las concentraciones descienden drásticamente (figura 23).

En 5 Presidentes, la mayor concentración de los alifáticos se localizó en el punto del derrame en el horizonte Hf1 ($12431.1 \text{ mgkg}^{-1}$) rebasando el CLP y el valor mínimo se encontró en el horizonte Hh (27.9 mgkg^{-1}). A 10 m de distancia, el mayor valor se registró en el horizonte Hf2 (69.7 mgkg^{-1}) y la concentración en el horizonte Hh (1.0 mgkg^{-1}). A 30 m de distancia, la mayor concentración se ubicó en el horizonte Hf1 (5.6 mgkg^{-1}) y el menor valor en el horizonte Hf2 (4.8 mgkg^{-1}). Y a los 70 m de distancia, la mayor concentración se localizó en el horizonte Hf2 (0.6 mgkg^{-1}) no se presentó una concentración menor debido a que no se detectaron concentraciones en los siguientes horizontes.

La mayor concentración de HAP's se localizó en el punto del derrame, en el horizonte Hf1 (588 mgkg^{-1}) rebasando el LPPB y el valor mínimo se encontró en el horizonte Hh (7.55 mgkg^{-1}). A 10 m de distancia, el mayor valor se ubicó en el horizonte Hf2 (10.84 mgkg^{-1}) y el menor valor en el horizonte Hf1 (9.93 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación en forma total. A 30 m de distancia, la mayor concentración se localizó en el horizonte Hf2 (1.76 mgkg^{-1}) y la menor concentración en el horizonte Hf1 (1.37 mgkg^{-1}) sin representar riesgo de contaminación en forma total. Y a 70 m de distancia, la mayor concentración fue en Hh (0.68 mgkg^{-1}) y la menor concentración en Hf2 (0.28 mgkg^{-1}) sin rebasar riesgo el LPPB.

En la figura 24 muestra que a lo largo del transecto la movilidad en la parte superficial en ambas fracciones es nula debido al drástico descenso de concentración. La migración a través del suelo en ambas fracciones hacia zonas profundas es mínima, sólo en punto del derrame la migración se da hasta los 20 cm de profundidad para ambas fracciones, manifestando la importancia de la materia orgánica y el contenido de arcilla, que ayudan a limitar el movimiento vertical de los contaminantes orgánicos.

En la figura 25 con el cromatograma correspondiente a Ogarrio, la fracción de alifáticos muestra una ligera degradación biológica encontrando compuestos a partir del C16 al C34 y en la figura 26 con el cromatograma correspondiente a la fracción de HAP's se observa un mismo comportamiento al de los alifáticos identificando compuestos tales como el acenaftileno (bajo peso molecular) y el benzo(a)pireno (alto peso molecular).

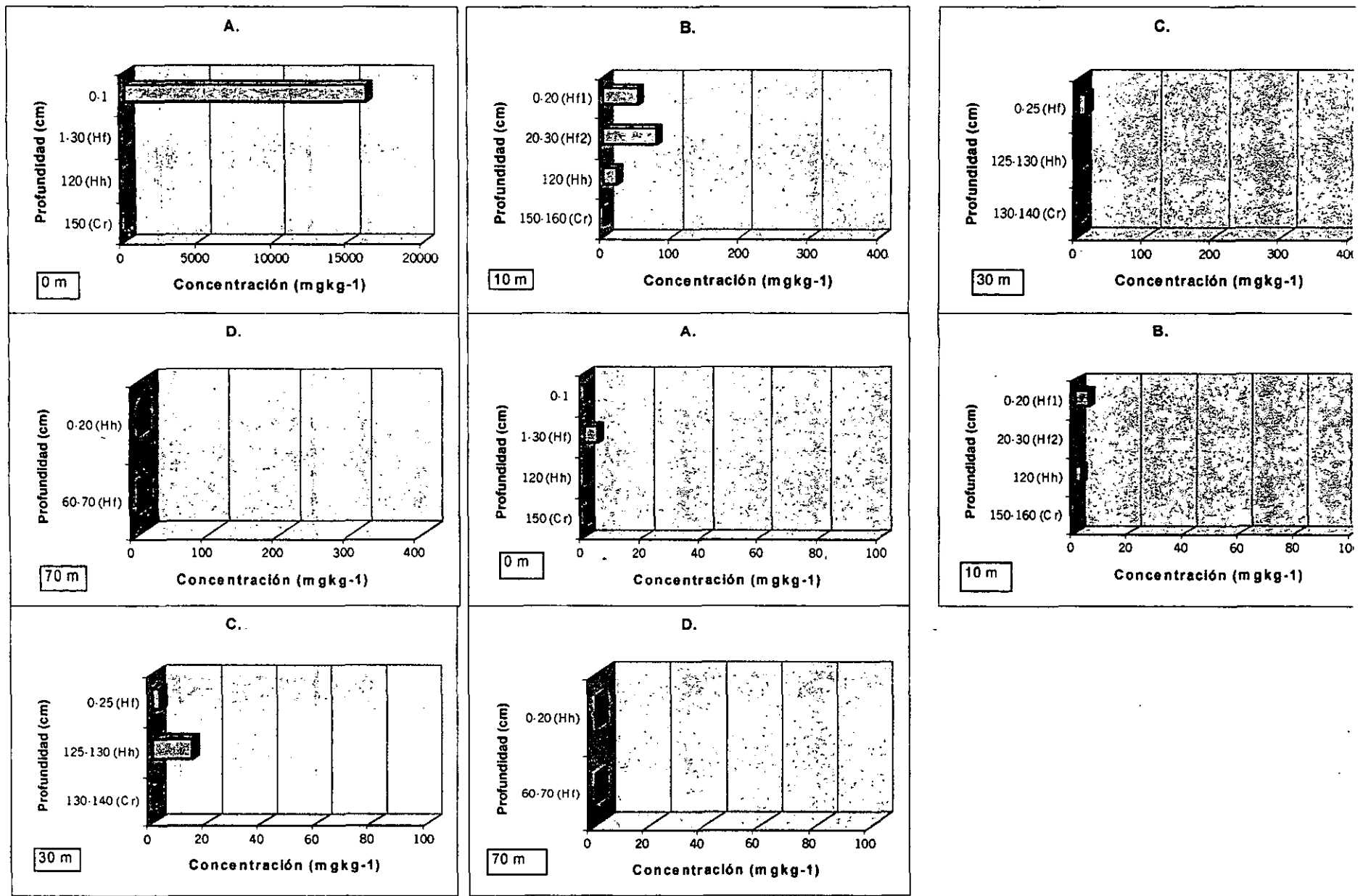


Figura 22. Concentración de hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) en el derrame reciente de Ogarrio.

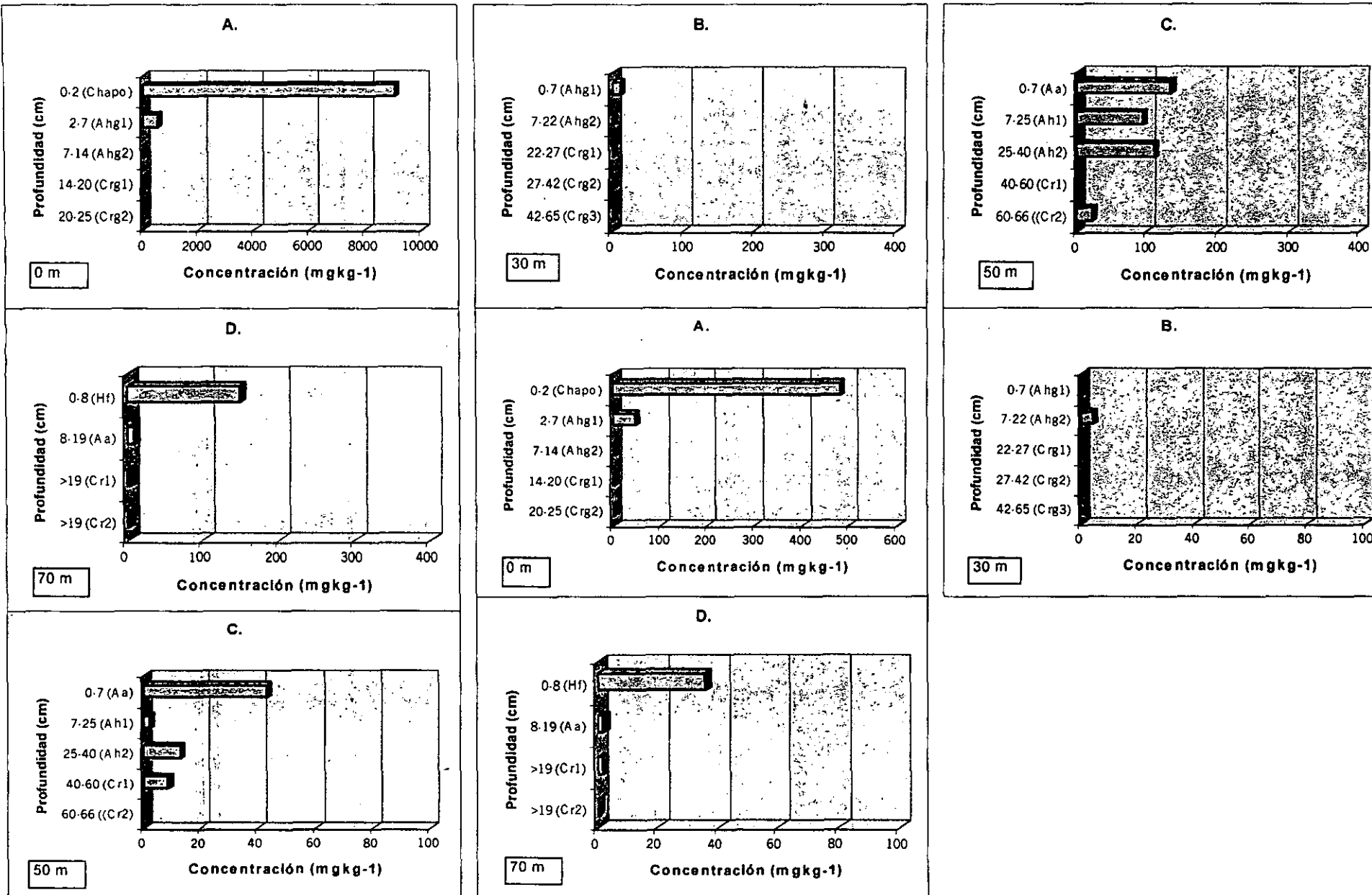


Figura 23. Concentración de hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) en el derrame reciente de Aquiles Serdán.

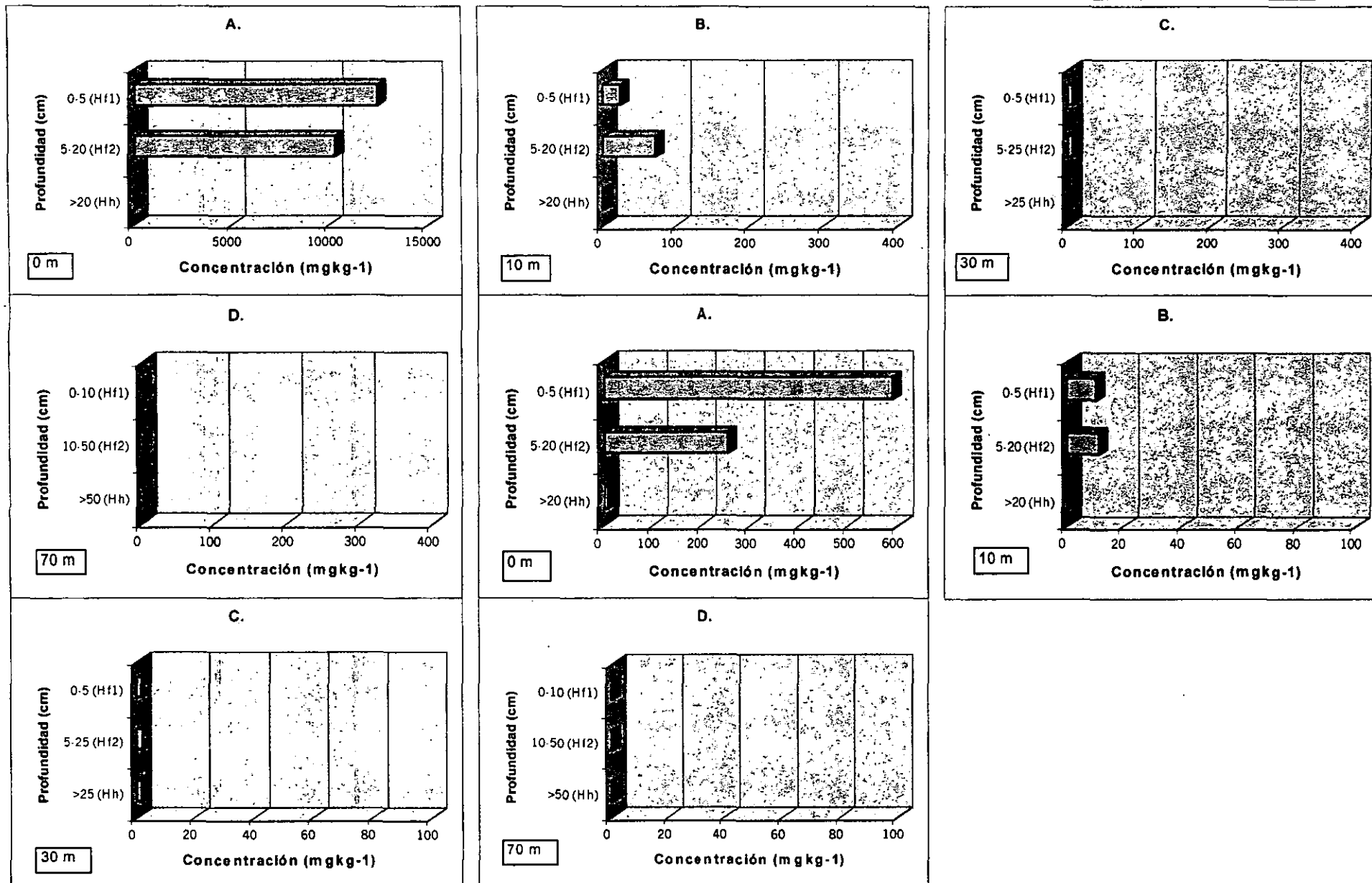


Figura 24. Concentración de hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAP's) en el derrame reciente de 5 Presidentes.

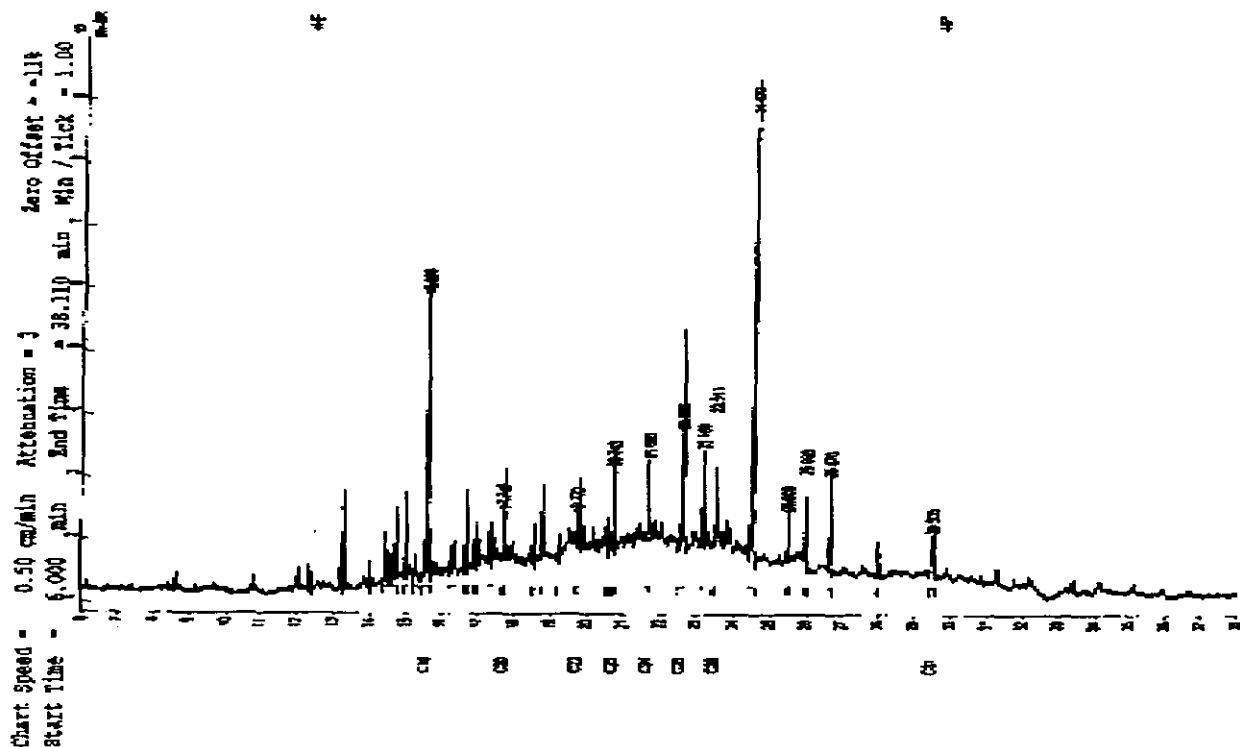


Figura 25. Cromatograma de alifáticos en suelo en el sitio del derrame reciente en Ogarrio (horizonte superficial), Tabasco.

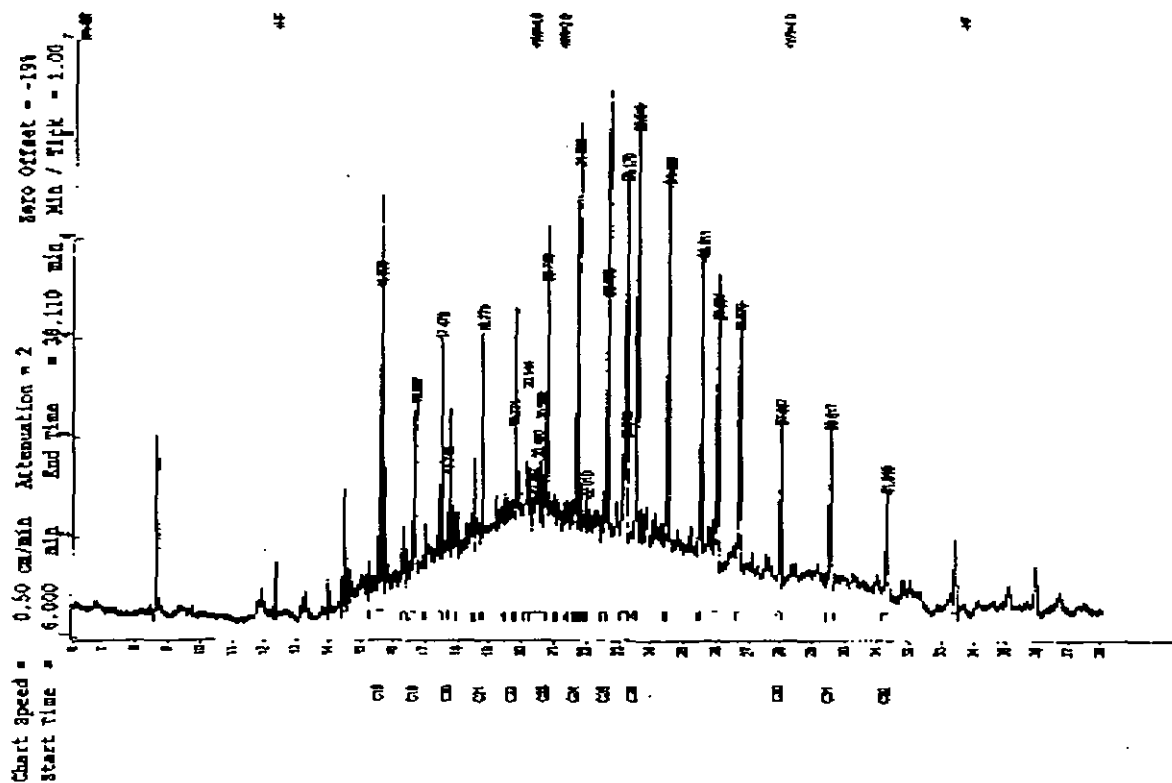


Figura 26. Cromatograma de HAP's en suelo en el sitio del derrame reciente en Ogarrio (horizonte superficial), Tabasco.

7.3 HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS (HAP's) Y ALIFATICOS EN AGUA

Las muestras de agua que se analizaron fueron del manto freático en los sitios donde se tomaron muestras de suelo, esto es, en la microcuenca de la Venta, en sitios control, derrames antiguos, derrames recientes y, además, en 2 norias y 1 perforación profunda. En el apartado anterior se observa la importancia del suelo como principal cuerpo receptor donde quedan atrapados los compuestos orgánicos evitando con ello su movilidad hacia el manto freático, y la contaminación del agua. El agua superficial puede presentar un efecto de dilución debido a que el petróleo se extiende en toda la superficie o que el material orgánico particulado esté funcionando como receptor de tales contaminantes. Se exponen a continuación los resultados de los análisis de agua (alifáticos y HAP's) en cada uno de los sitios muestreados.

Microcuenca:

Cuadro 12. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos y alifáticos en agua del manto freático de los sitios de la Microcuenca La Venta, Estado de Tabasco.

Muestras de agua	Profundidad	HAP's	Alifáticos
Descripción	(cm)	Total (μgL^{-1})	Total (μgL^{-1})
Panga Vieja, Perfil 1	105	0.0059	---
La Curva, Perfil 2	120	0.0011	---
La Curva, Perfil 3	107	0.0076	---
El Ralé, Perfil 4	120	0.0048	---
El Ralé, Perfil 5	160	0.0026	---
El Ralé, Perfil 6	109	0.0054	---
El Paraíso P7	180	0.0194	---
El Paraíso P8	140	0.0025	---
Rancho de Pedro Reyes, (Noria,)	10000	0.0026	---
Rancho de Joaquín Domínguez, (Noria)		0.0084	---
Panga Vieja, Perfil 9 "control"	83	0.0012	---
Batería La Venta	Superficial	---	1.74
La Venta-La Curva P11	60	0.0154	0.04
La Venta-La Curva P16	27	0.0005	
Batería San Ramón	Superficial	---	0.006
Batería San Ramón	Superficial	0.001	0.005
Ogarrio	Superficial	---	0.002
Ogarrio	Superficial	0.0003	0.007

Nota: En los sitios que presentan guiones no se analizó la muestra para la fracción correspondiente.

Las concentraciones de hidrocarburos alifáticos únicamente se determinaron en algunos sitios de la zona debido al mayor interés de evaluación a los HAP's por su toxicidad y de acuerdo a los resultados reportados por CIMADES en 1998 que reportan concentraciones de compuestos individuales considerados de riesgo para la salud. Aún así se tomó la decisión de saber también el comportamiento de la otra fracción y tener una visión más general de la migración de los contaminantes orgánicos. Para aquellos sitios analizados, la mayor concentración de alifáticos se registró en la batería de La Venta ($1.74 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración fue localizada en un sitio de Ogarrio ($0.002 \mu\text{gL}^{-1}$), en este caso no

existe un valor permisible para alifáticos totales que indique problemas de contaminación y con ello algún riesgo para salud humana.

Las concentraciones obtenidas de HAP's en las muestras de agua en la microcuenca de La Venta indican en forma general que las concentraciones detectadas no representan riesgo alguno en su uso para consumo humano en su concentración total de acuerdo al LPPB ($10 \mu\text{gL}^{-1}$). La mayor concentración registrada fue en el perfil 7 ($0.0194 \mu\text{gL}^{-1}$) cercana a una instalación petrolera abandonada y la menor concentración en un terreno de Ogarrio ($0.0003 \mu\text{gL}^{-1}$). Es de observar que las muestras de agua de noria no presentan una concentración alta en forma total, y por lo tanto no representan riesgo para su uso domestico.

Sitios Control

Cuadro 13. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policiclicos y alifáticos en agua superficial en los sitios control.

Muestras de agua Descripción	Profundidad (cm)	HAP's Total (μgL^{-1})	Alifáticos Total (μgL^{-1})
Control 1, punto 1	Superficial	N.D.	0.00007
Control 1, punto 2	Superficial	N.D.	0.0002
Control 1, punto 3	Superficial	0.0002	0.0006
Control 1, perforación profunda (9 - 10 m)	1000	0.00009	ND
Control 2, punto 1	22	N.D.	0.0002
Control 2, punto 2	Superficial	0.0002	0.0001
Control 2, punto 3	Superficial	0.0001	0.0005
Control 3, rancharía Tres Bocas, pto. 1	Superficial	1.4	11.85
Control 3, rancharía Tres Bocas, pto. 2	Superficial	N.D.	12.49
Control 3, rancharía Tres Bocas, pto. 3	160	N.D.	0.48
Control 4, La Venta - Benito Juárez, punto 1	Superficial	0.002	0.31
Control 4, La Venta - Benito Juárez, punto 2	Superficial	0.01	0.23
Control 4, La Venta - Benito Juárez, punto 3	60	0.0002	0.01
Control 5, La Azucena, sitio quemado	Superficial	N.D.	0.24
Control 6, La Azucena, manglar	superficial	N.D.	ND

Nota: N.D.= No Detectado por el Cromatografo de Gases.

En los sitios control, la mayor concentración de los alifáticos se ubicó en el control 3, punto 2 ($12.49 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración fue en el control 1, sitio 1 ($0.00007 \mu\text{gL}^{-1}$). Aquí las concentraciones de los sitios control varían ampliamente por lo que no existe una concentración constante de fondo para el distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes). Esto refiere que existe otras fuentes de hidrocarburos, además de las instalaciones fijas de PEMEX.

La mayor concentración de HAP's en el agua superficial, se registró en el control 3, punto 1 ($1.4 \mu\text{gL}^{-1}$) que rebasa la concentración registrada en la microcuenca de La Venta lo cual es indicativo de dispersión vía aérea a través de los incendios registrados en la cercanía de estos sitios control. La menor concentración se ubicó en el control 1 a una profundidad de 10 m ($0.00009 \mu\text{gL}^{-1}$). Aún con la mayor concentración en estos sitios no se rebasa la concentración total propuesta por el LPPB y con ello no representa un riesgo en su concentración total.

En la figura 27 se muestran los picos de alifáticos registrados por el cromatógrafo de gases y la particularidad de la forma de campana, indicativa de la presencia de compuestos que se originan por degradación microbiana notando compuestos de bajo y alto peso molecular. Y en la figura 28 se muestra el cromatograma del mismo sitio con referencia a los HAP's destacando compuestos de peso molecular intermedio (benzo(a)antraceno y criseno).

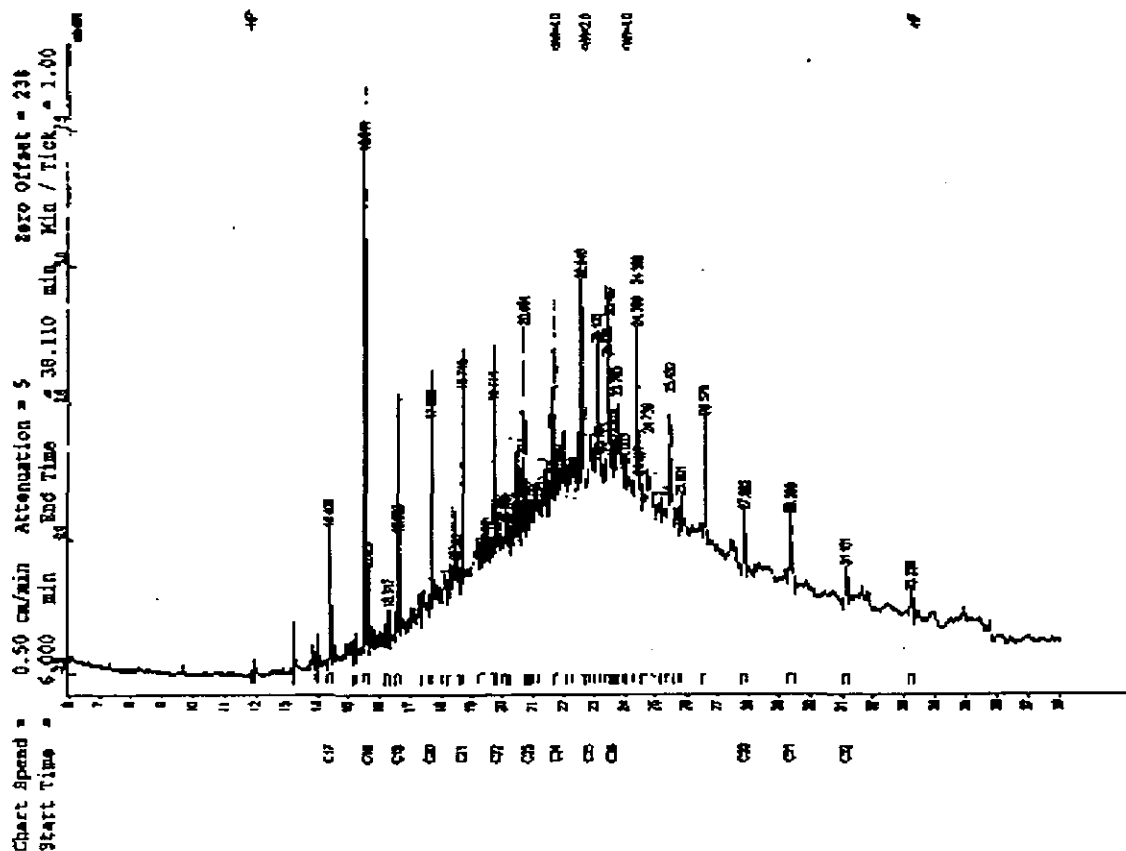


Figura 27. Cromatograma de alifáticos (C18 al C32) en agua en el sitio control 3 (Tres Bocas), Tabasco.

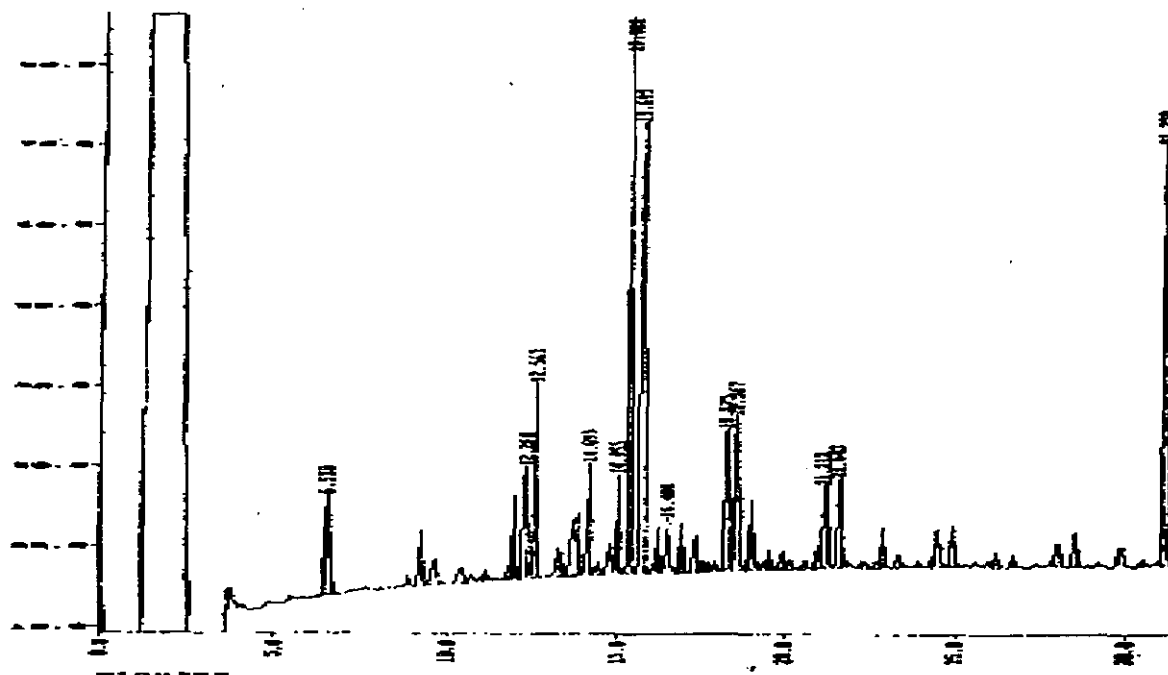


Figura 28. Cromatograma de HAP's destacando el benzo(a)antraceno en agua en Tres Bocas.

Agua de Norias

Cuadro 14. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos y alifáticos en agua de norias.

Muestras de agua	Profundidad	HAP's	Alifáticos
Descripción	(cm)	Total (μgL^{-1})	Total (μgL^{-1})
Noria Cimades 1 (a)	----	0.001	8.98
Noria Cimades 1A (a)	----	0.0007	5.69
Noria Cimades 3 (a)	----	0.0006	8.76
Noria Cimades 7 (a)	----	0.5	11.21
Noria Cimades 1 sedimento (a) *	----	0.24	0.79
Noria Cimades 3 sedimento (a) *	----	0.15	1.88
Noria Cimades 3A sedimento (a) *	----	0.23	1.74
Noria Cimades 7 sedimento (a) *	----	0.39	0.04
Noria Cimades 3 (b)	----	0.02	0.006
Noria Cimades 1 (b)	----	0.001	0.005
Noria Cimades 2 (b)	----	0.0004	0.002
Noria Cimades 1A (b)	----	0.0002	0.007

Nota: * En el caso del análisis de sedimento la concentración se expresa en mgkg^{-1} , observando que es mayor al valor reportado en μgL^{-1} (ppb). (a) primer muestreo analizado y (b) segundo muestreo analizado.

La mayor concentración de alifáticos en agua de noria fue registrada en el lugar denominado Cimades 7 (a) ($11.21 \mu\text{gL}^{-1}$) que es similar al valor registrado en el control 3, punto 1. La menor concentración se localizó en lugar Cimades 2 (b) ($0.002 \mu\text{gL}^{-1}$).

La concentración de HAP's fue mayor en Cimades 7 (a) ($0.5 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración se ubicó en Cimades 1 (b) ($0.0002 \mu\text{gL}^{-1}$) sin representar riesgo de contaminación al estar por debajo del LPPB.

Con respecto a los sedimentos en las norias se observa una mayor concentración siendo la mayor concentración de alifáticos en Cimades 3 con un valor promedio de 1.81 mgkg^{-1} y la menor concentración se registró en Cimades 7 (0.04 mgkg^{-1}). Los HAP's en el sedimento registraron su mayor concentración en Cimades 7 (0.39 mgkg^{-1}) y la menor concentración en Cimades 3 con un valor promedio de 0.19 mgkg^{-1} . En ambos casos, las concentraciones registradas no representan riesgo de contaminación de acuerdo a los valores establecidos dentro de la normatividad existente.

Derrames Antiguos

Cuadro 15. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos y alifáticos en agua en los derrames antiguos.

Muestras de agua	Profundidad	HAP's	Alifáticos
Descripción	(cm)	Total (μgL^{-1})	Total (μgL^{-1})
Derrame antiguo La Venta, 0 m	5	N.D.	0.000002
Derrame antiguo La Venta, 10 m, parte alta	5	N.D.	0.000002
Derrame antiguo La Venta, 25 m, parte alta	5	N.D.	0.0004
Derrame antiguo La Venta, 75 m, parte baja	5	N.D.	0.002
Derrame antiguo La Venta, 75 m, parte alta	5	N.D.	0.00009
Perforación profunda, La Venta, 0.6-0.7 m		N.D.	0.108
Perforación profunda, La Venta, 10.0-10.8 m		0.00009	0.00007
Noria junto al derrame antiguo La Venta, 2.3 m		N.D.	0.0002
Pozo profundo La Venta, 172 m, CNA		N.D.	0.0004
Agua deshidratadora CPG La Venta		N.D.	0.009
Derrame antiguo 2, 5 presidentes, pto. 1, 0 m	superficial	0.02	0.48
Derrame antiguo 2, 5 presidentes, pto. 2, 10 m	5	0.01	2.57
Derrame antiguo 2, 5 presidentes, pto. 3, 30 m	5	0.01	4.72
Derrame antiguo 2, 5 presidentes, pto. 4, 90 m	5	0.01	0.77
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán, pto. 1, 0 m	30	0.02	0.45
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán, pto. 2, 50 m	35	0.0005	ND
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán, pto. 3, 125 m	35	0.03	14.46
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán, pto. 4, 200 m	30	0.18	0.03

Nota: N.D. = No Detectado por el Cromatografo de Gases.

La mayor concentración de alifáticos en el derrame de la Venta, se registró a 75 m del derrame en la parte baja ($0.002 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración a 10 m de distancia ($0.000002 \mu\text{gL}^{-1}$). En el derrame de 5 Presidentes, la mayor concentración se ubicó a 30 m de distancia ($4.72 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración en el punto del derrame ($0.48 \mu\text{gL}^{-1}$). Y en Aquiles Serdán, la mayor concentración se localizó a 50 m de distancia ($14.46 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración a 100 m de distancia ($0.03 \mu\text{gL}^{-1}$). Mientras que en las muestras de agua obtenidas de la perforación profunda, la mayor concentración en La Venta se registró a 0.6-0.7 m ($0.108 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración a 10-10.8 m ($0.00007 \mu\text{gL}^{-1}$). Existe en general una baja concentración de alifáticos en La Venta indicando una nula migración de contaminantes orgánicos desde la superficie, estando por debajo de las concentraciones registradas en el agua de noria y de los sitios control.

No se detectaron HAP's en el derrame de La Venta en los sitios analizados. En 5 Presidentes, la concentración de HAP's es constante en los sitios analizados con un valor de $0.01 \mu\text{gL}^{-1}$ sin representar riesgo de contaminación. Y en Aquiles Serdán, la mayor concentración de HAP's se localizó a 100 m de distancia del derrame ($0.18 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración se ubicó en el punto del derrame ($0.02 \mu\text{gL}^{-1}$) sin representar riesgo de contaminación. Las muestras de agua profunda no registraron presencia de HAP's indicando la nula migración de contaminantes de la fracción aromática hacia zonas profundas. Y la muestra tomada a gran profundidad no presentó una alta concentración definiendo que no hay problemas de migración hacia zonas más profundas.

En la figura 29 se muestra un cromatograma de la fracción de alifáticos observando la forma de campana representativa de la participación de la actividad biológica en la degradación de estos compuestos, destacando compuestos del C16 al C23 principalmente.

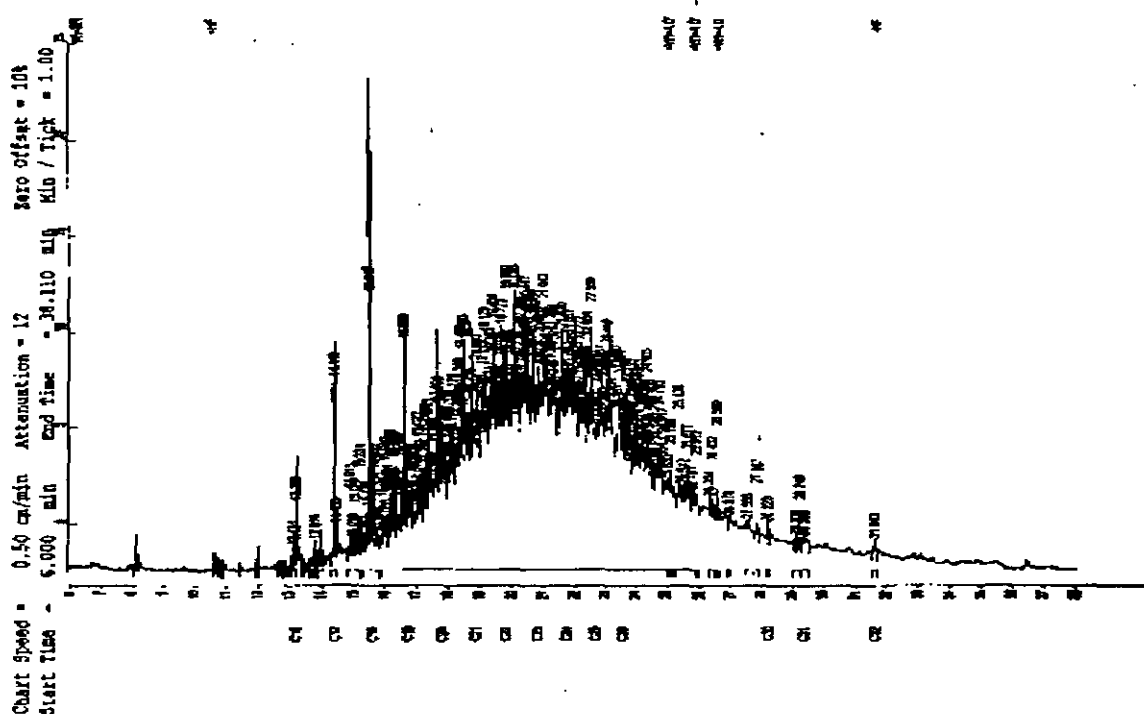


Figura 29. Cromatograma de alifáticos en agua del derrame antiguo 5 Presidentes, Tabasco.

Derrames Recientes

Cuadro 16. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en agua de los derrames recientes.

Muestras de agua	Profundidad	HAP's	Alifáticos
Descripción	(cm)	Total (μgL^{-1})	Total (μgL^{-1})
Derrame reciente, Ogarrio, 0 m, agua freática	Superficial	0.008	0.003
Derrame reciente, Ogarrio, 10 m, agua freática	Superficial	N.D.	0.0002
Derrame reciente, Ogarrio, 30 m, agua freática	Superficial	N.D.	0.0003
Derrame reciente, Ogarrio, 70 m, agua freática	Superficial	0.00008	0.001
Derrame reciente, Ogarrio, perforación prof. 4.1-4.6m	460	0.008	0.1

Continuación

Derrame reciente 2, noria rancho Miranda	80	0.07	0.87
Derrame reciente 2, Aquiles Serdán, pto.2, 50 m	42	0.05	6.06
Derrame reciente 2, Aquiles Serdán, pto. 3, 125 m	50	1.0	16.89
Derrame reciente 2, Aquiles Serdán, pto. 4, 200 m	Superficial	N.D.	13.01
Derrame reciente 3, 5 Presidentes, pto. 1, 0 m	5	0.04	0.95
Derrame reciente 3, 5 Presidentes, pto. 2, 10 m	5	0.02	4.79
Derrame reciente 3, 5 Presidentes, pto. 3, 30 m	5	0.0006	0.01
Derrame reciente 3, 5 Presidentes, pto. 4, 70 m	5	0.006	0.02

Nota: N.D.= No Detectado por el Cromatografo de Gases.

Como se observa en el cuadro 16, la concentración de alifáticos en Ogarrio es mayor en el punto del derrame ($0.003 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración se ubica a 10 m de distancia ($0.0002 \mu\text{gL}^{-1}$). En Aquiles Serdán, la mayor concentración se ubicó a 125 m de distancia ($16.89 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración en el agua de la noria ($0.87 \mu\text{gL}^{-1}$). Y en 5 Presidentes, el mayor valor corresponde al sitio a 10 m de distancia ($4.79 \mu\text{gL}^{-1}$) y el menor valor al sitio a 30 m de distancia ($0.01 \mu\text{gL}^{-1}$). Presentando las mayores concentraciones de alifáticos en comparación a los demás puntos de muestreo (derrames antiguos, sitios control, norias y microcuencia).

El mayor valor de HAP's en Ogarrio se registró en el punto del derrame ($0.008 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración a 70 m de distancia del mismo ($0.00008 \mu\text{gL}^{-1}$). En Aquiles Serdán, la mayor concentración se localizó a 125 m de distancia ($1.0 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración a 50 m de distancia ($0.05 \mu\text{gL}^{-1}$). Y en 5 Presidentes, el mayor valor se ubicó en el punto del derrame ($0.04 \mu\text{gL}^{-1}$) y la menor concentración a 30 m de distancia ($0.0006 \mu\text{gL}^{-1}$). Los valores antes referidos no representan riesgo de contaminación en concentración total.

En la figura 30 se muestra un cromatograma de alifáticos del punto del derrame en Ogarrio indicando la presencia de compuestos a partir del C9 al C34 con la ausencia del UCM, señalando con ello la característica de un derrame reciente.

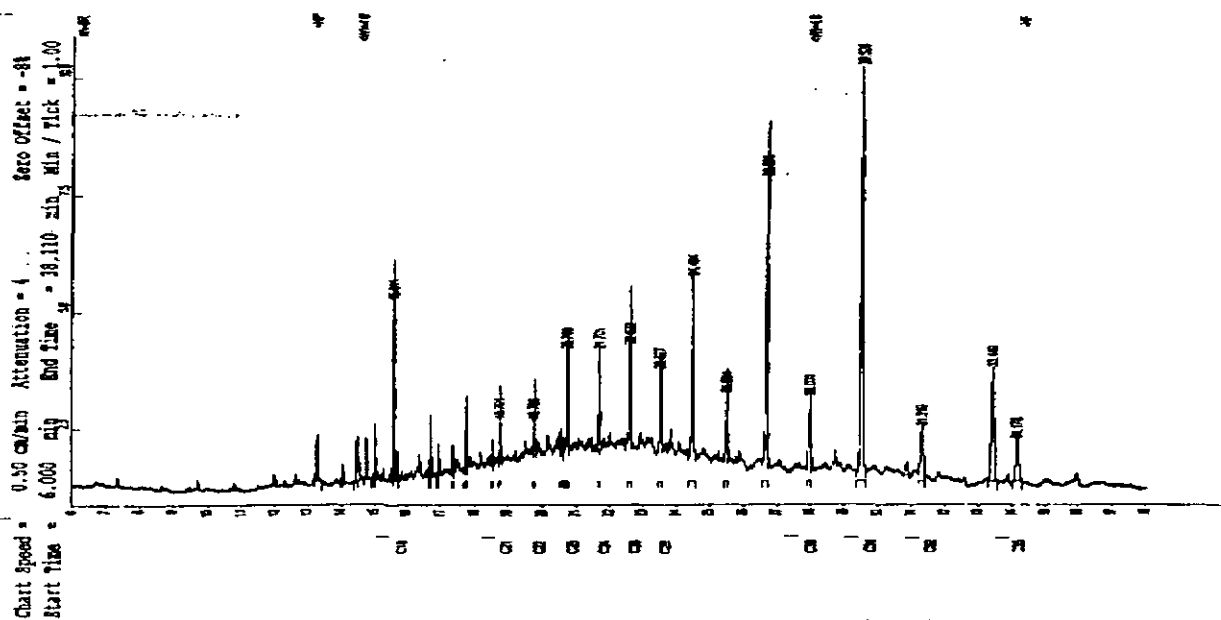


Figura 30. Cromatograma de alifáticos en el punto del derrame reciente en Ogarrio, Tabasco

8. DISCUSION

8.1 FUENTES DE CONTAMINACION DE HIDROCARBUROS EN EL SUELO.

En los resultados obtenidos en los sitios analizados en la microcuenca de La Venta, sitios control, derrames antiguos y recientes, se observó que los derrames de crudo producidos por la antigüedad de las tuberías de conducción o por el mantenimiento de las mismas, son causa importante en el aporte de concentraciones altas de hidrocarburos alifáticos y HAP's en los suelos de la zona. Esto se concluye con lo detectado en algunos sitios de la microcuenca como es el caso del perfil 4 ubicado detrás de la petroquímica y del perfil 7 en donde localizó una instalación abandonada de conducción de crudo, además de los derrames antiguos y recientes producto de las instalaciones de conducción que manifiestan ser la fuente local más evidente.

Se esperaba que los sitios control reflejaran, las concentraciones naturales o de fondo para la región, ya que se eligieron sitios alejados de las instalaciones petroleras y se consideró que no estarían contaminadas pero los resultados de los sitios control reflejan una gran variación en las concentraciones de alifáticos y HAP's tanto en suelo como en agua y en agua de norias y probablemente existen otras fuentes de contaminación que contribuyen a elevar el nivel de fondo.

Suelo en sitios control

En general, la concentración de los hidrocarburos alifáticos y HAP's en suelo se hallaron por debajo del límite y criterio de limpieza establecidos a excepción del control con vegetación quemada que rebasó el LPPB (20 mgkg^{-1}). Esto se expondrá con dos ejemplos en dos sitios similares con manglar, pero uno de ellos con un incendio reciente.

En el control 1 ubicado en el camino la Venta-5 Presidentes del sitio 2, se hallaron en la parte superficial alifáticos de alto peso molecular, a partir del C24 al C32. Estos componentes son probablemente resultado de la descomposición de la materia orgánica, y la ausencia de los carbonos de bajo peso al lavado del agua. A una profundidad de 20 a 50 cm (Hh) se presentó un mayor número de compuestos, abarcando desde el C14 al C32 teniendo el mismo comportamiento de los HAP's por ser una zona de degradación en función del material vegetal del sitio. En el último horizonte, correspondiente al material parental, la migración es mínima, estando presentes los alifáticos de alto peso molecular probablemente debido a su asociación con la materia orgánica. Hay una baja concentración de alifáticos en el perfil (figura 31a).

En este terreno del control 1 (figura 32a), la superficie no muestra la presencia de HAP's; en el horizonte (Hh1) sólo se presentan tres HAP's (acenafteno, antraceno y pireno) que rebasan ligeramente el límite permisible de Canadá (0.1 mgkg^{-1}), Profepa no considera a tales compuestos. La presencia de estos compuestos probablemente se deba a la descomposición de la materia orgánica por una amplia variedad de organismos presentes en el suelo (Blumer & Youngblood, 1975) así como a la solubilidad al agua al encontrar al antraceno, fluoranteno, pireno y benzo(a)antraceno que rebasan ligeramente el límite

permisible de Canadá, y están por debajo de la normatividad de los Países Bajos y del CLP, sin representar riesgo de contaminación.

En el control 5, con vegetación de manglar quemado, los alifáticos identificados fueron de peso molecular intermedio y alto, a partir del C18 al C34, con una ligera tendencia de mayor concentración para los compuestos pesados probable a la combustión del material vegetal; en los siguientes horizontes, la concentración de alifáticos disminuyó, puntualizando que la retención es mayor en la superficie, debido que es un sistema de acumulación de materia orgánica. De igual forma presenta un comportamiento similar al control 6, pero con la característica de tener vegetación quemada. La movilidad de los alifáticos es mínima pues en las restantes profundidades no se logró detectar este tipo de compuestos (figura 31 pertenecientes a la zona de la Azucena, control 5 y 6), aclarando que los controles no presentan problemas de altas concentraciones de alifáticos ni HAP's, las concentraciones son resultado de la descomposición de la materia orgánica de cada sitio, o de la deposición de gases de combustión al suelo derivados de los incendios.

Para este sitio 5 se presentaron compuestos de peso molecular intermedio principalmente (pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno e indeno), que rebasaron ligeramente el límite permisible (figura 32b) y, al aporte de compuestos originados por los incendios como es el caso del pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno y el indeno (Yunker, 1999). En la siguiente profundidad, no bien definida se presentó el fluoranteno, pireno y benzo(ghi)perileno que rebasaron ligeramente el LPC (0.1 mgkg^{-1}). En el tercer horizonte se detectó el pireno y benzo(ghi)perileno que rebasan el LPC. Manifestando que los incendios aportan HAP's a los suelos y pueden representar otra vía importante de contaminación para esta zona.

En el control 6, la presencia de HAP's es mínima en comparación al control 5, estando presentes en la superficie el fluoranteno y criseno que rebasan ligeramente el LPPB (1.0 y 0.5 mgkg^{-1}), para las siguientes profundidades no se logra detectar más compuestos excepto el pireno a más de 20 cm de profundidad. La movilidad es asociada principalmente al contenido de materia orgánica que es soluble en agua en el perfil, que disminuye a mayor profundidad. En las últimas capas no se identificó ningún compuesto orgánico (figura 32c) debido al alto porcentaje de arcilla presente y la baja permeabilidad ayuda a retener a los contaminantes hacia zonas más profundas del perfil (Jury, 1989).

La correlación entre los HAP's y la humedad se observó en control 4, sitio 2, control 5 y control 6; en los alifáticos en el control 1, sitio 1 y 3; control 2, sitio 1; control 3, sitio 1; control 4, sitio 1; control 5 y control 6. Estableciendo una asociación del contenido de agua y la presencia de estos contaminantes con mayor preferencia a los alifáticos. En la correlación del contenido de materia orgánica y los HAP's se ubicó en el control 2, sitio 1 y el control 4, sitio 2 para los alifáticos en el control 2, sitio 1; control 3, sitio 1 y el control 4, sitio 2 indicando una preferencia de los alifáticos en asociarse con la materia orgánica.

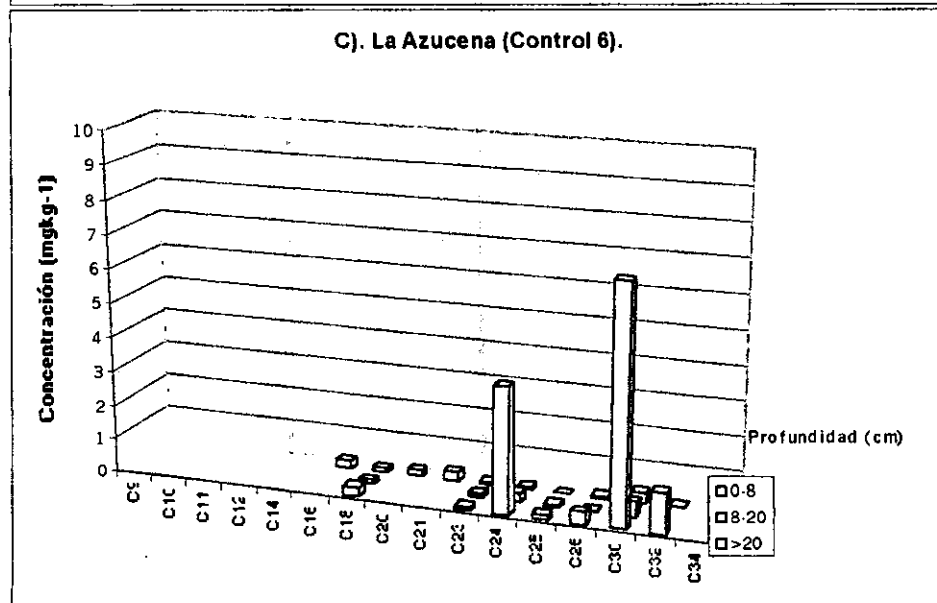
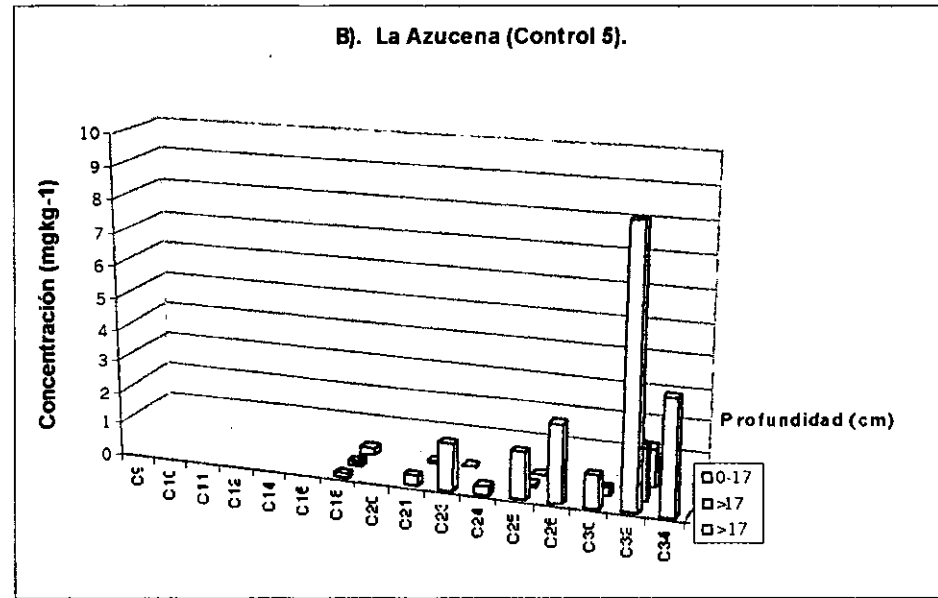
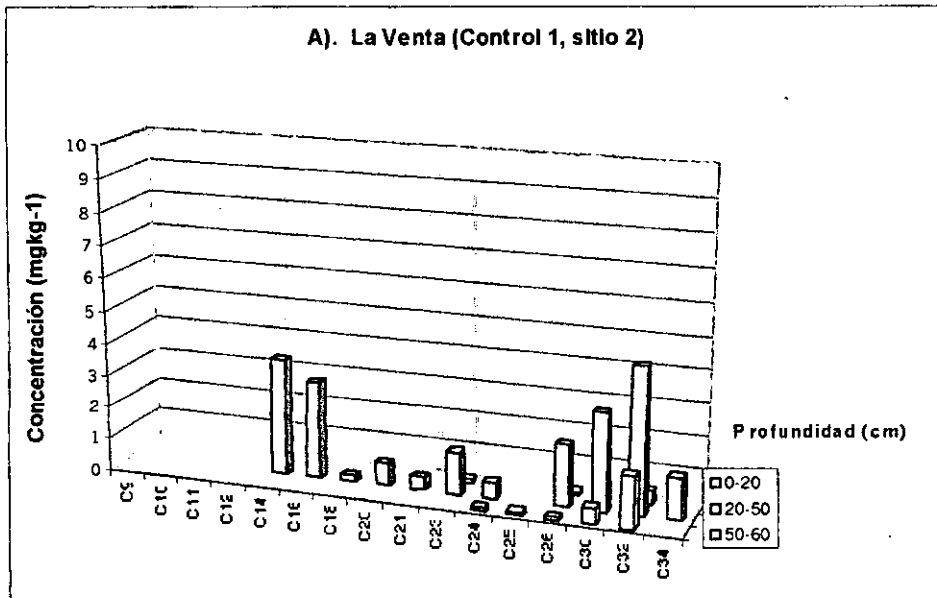


Figura 31. Concentración de hidrocarburos alifáticos en algunos sitios control del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

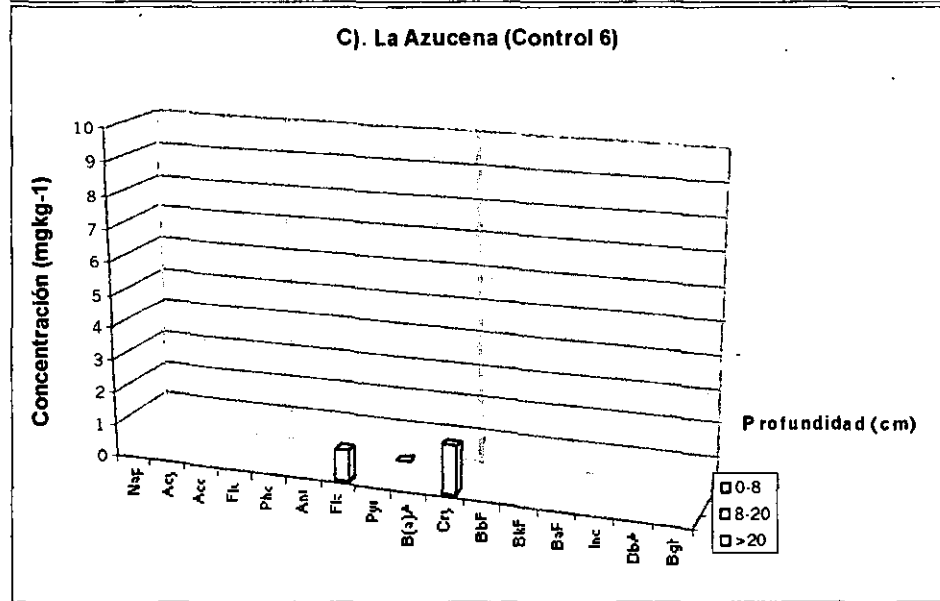
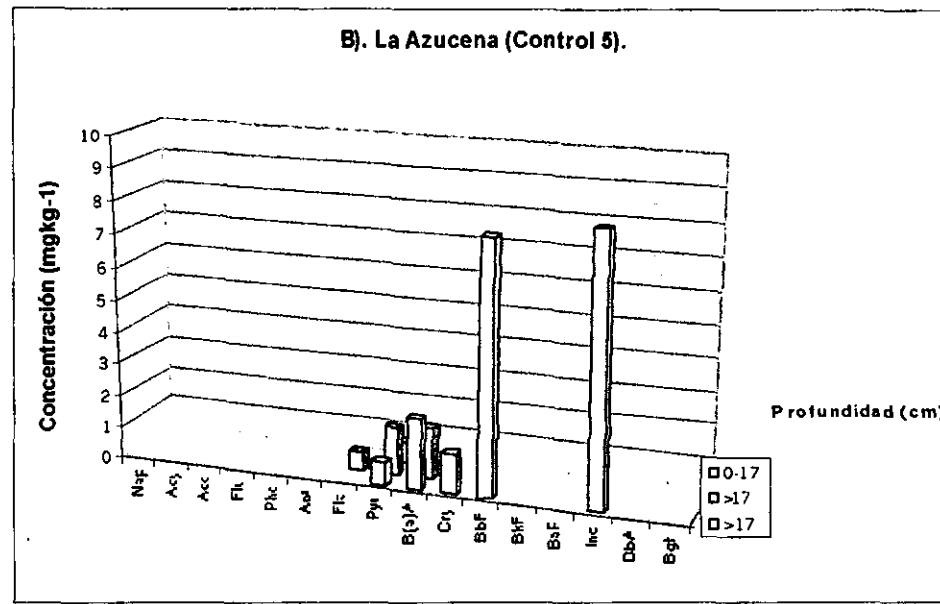
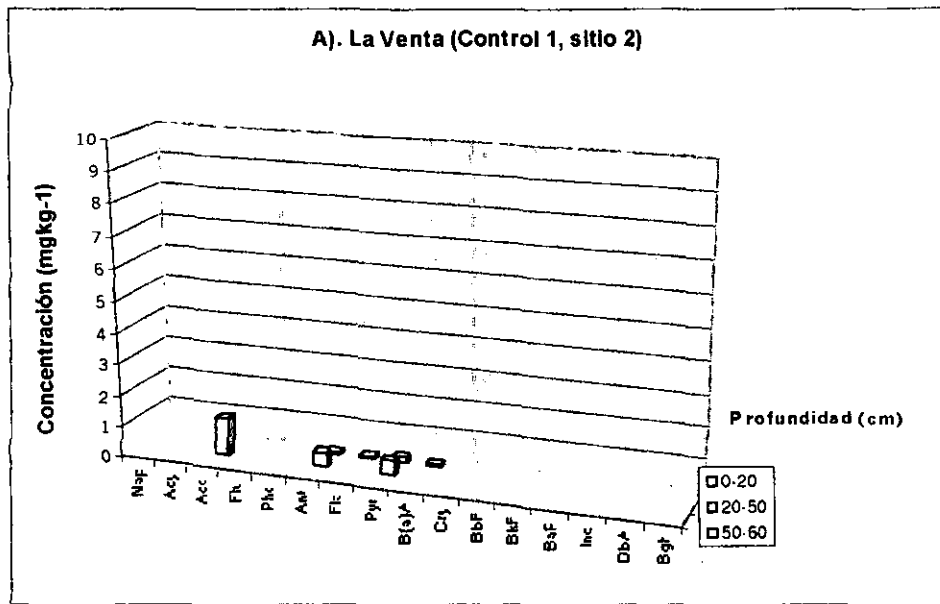


Figura 32. Concentración de compuestos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en algunos sitios control

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Agua en sitios control

HAP's: Las concentraciones de HAP's se muestran en la figura 33 y en el cuadro 13, donde se observa que en los diferentes sitios se hallan por debajo de $0.01 \mu\text{gL}^{-1}$ y en algunos puntos no se detectaron compuestos. En las muestra de agua superficial del control 1, en los puntos 1 y 2 no se detectaron HAP's; mientras que en el punto 3 se presenta una concentración mínima sin representar problema para la salud. En el control 2, en el punto 1 los contenidos están por debajo del límite de detección; mientras que los puntos 2 y 3 muestran concentraciones bajas, (naftaleno, benzo(a)antraceno y criseno). En el control 3 (Tres Bocas), en el sitio 1 con vegetación de pasto, el benzo(a)antraceno rebasa el LPC ($0.01 \mu\text{gL}^{-1}$) para agua potable con un valor detectado de $1.1 \mu\text{gL}^{-1}$; en los puntos 2 y 3 no se detecta ningún HAP. En el control 4, en los 3 puntos analizados, las concentraciones detectadas son mínimas, encontrando HAP's de bajo peso molecular principalmente asociados a la solubilidad que presentan en el agua. Para el control 5 y 6 no se logró detectar HAP's debido a su asociación con el material orgánico que llega a depositarse en los sedimentos (Vázquez, 1987), donde las concentraciones de petróleo pueden variar de acuerdo a las características propias del lugar y de la cantidad de materia orgánica disuelta. En la figura 33 se señala que la mayor concentración corresponde a los alifáticos, observando que la concentración total en Tres Bocas (control 3) es mayor a los demás sitios; mientras que los HAP's tienen una menor concentración.

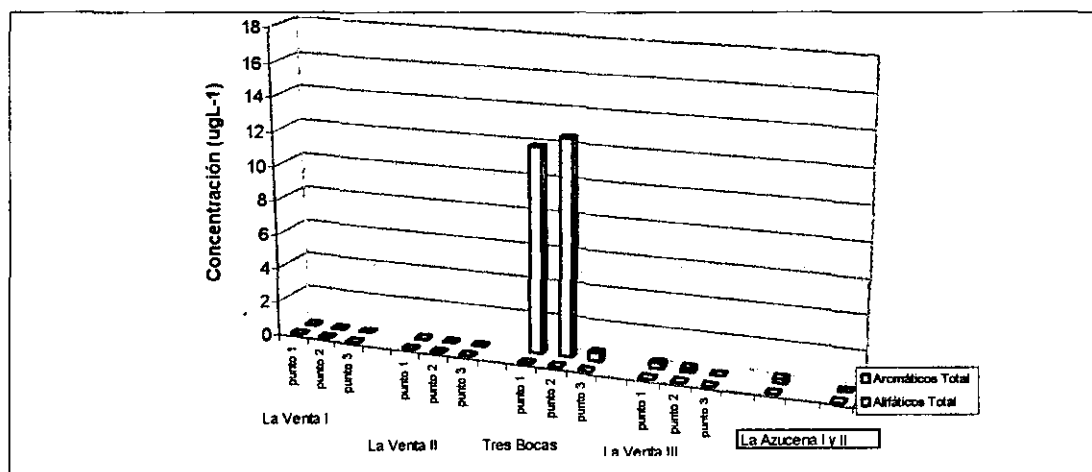


Figura 33. Concentración de HAP's y alifáticos en agua de los sitios control.

Alifáticos: Las muestras de agua en los sitios control 1 y 2 muestran concentraciones muy pequeñas en comparación al suelo; el control 3 presentó una concentración de 11.85, 12.49 y $0.49 \mu\text{gL}^{-1}$ siendo éstos los valores máximos registrados para los controles. En el control 4 y 5, la concentración total es menor $1 \mu\text{gL}^{-1}$ y, por último, en el control 6 no se detectaron alifáticos (Anexo 3, tabla 2), demostrando que el material particulado mineral u orgánico pueden adsorber a los compuestos orgánicos en la superficie evitando una movilidad hacia zonas profundas (Chiou *et al*, 1998); además, los factores ambientales tales como la temperatura ayudan a la pérdida de compuestos de bajo peso molecular por volatilización (Kostecki & Calabrese, 1992). La movilidad de algunos compuestos orgánicos siempre es

asociada con el material orgánico soluble del suelo originando su presencia en agua (Beck *et al.*, 1993).

Agua de Norias

HAP's: En el cuadro 14 se aprecia que en las muestras de agua no se presentan altas concentraciones que representen riesgo alguno para consumo humano, determinando compuestos como el fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)pireno y criseno principalmente, con valores menores a $0.01 \mu\text{gL}^{-1}$; mientras que en las muestras de sedimento existe una mayor concentración con respecto al agua, oscilando entre 0.15 a 0.39 mgkg^{-1} , que coincide con lo esperado según la solubilidad de los compuestos en el agua. La concentración en el sedimento es de 3 a 4 ordenes de magnitud más alta. Comparado con los límites permisibles del suelo, los valores están por debajo de lo establecido como: el antraceno, fluoranteno, benzo(a)pireno y criseno; es un hecho que estos compuestos tienen mayor afinidad al material particulado como la materia orgánica o partículas minerales de tamaño menor, principalmente, coincidiendo con las observaciones hechas por Gao *et al.*, (1998) quienes encontraron altas concentraciones de HAP's en los sedimentos, siendo de cuatro, cinco y seis anillos los dominantes. De acuerdo con la figura 34, las concentraciones de HAP's se hallan por debajo de $0.01 \mu\text{gL}^{-1}$ (pireno, fenantreno y benzo(a)antraceno) excepto en la muestra de Cimades 7 que presentó una concentración ligeramente mayor, de acuerdo a los compuestos (benzo(a)antraceno y criseno) con un porcentaje del 50 %, que probablemente se depositó en el agua vía atmosférica a través de la quema de pastizales cercanos al lugar (Gao *et al.*, 1998).

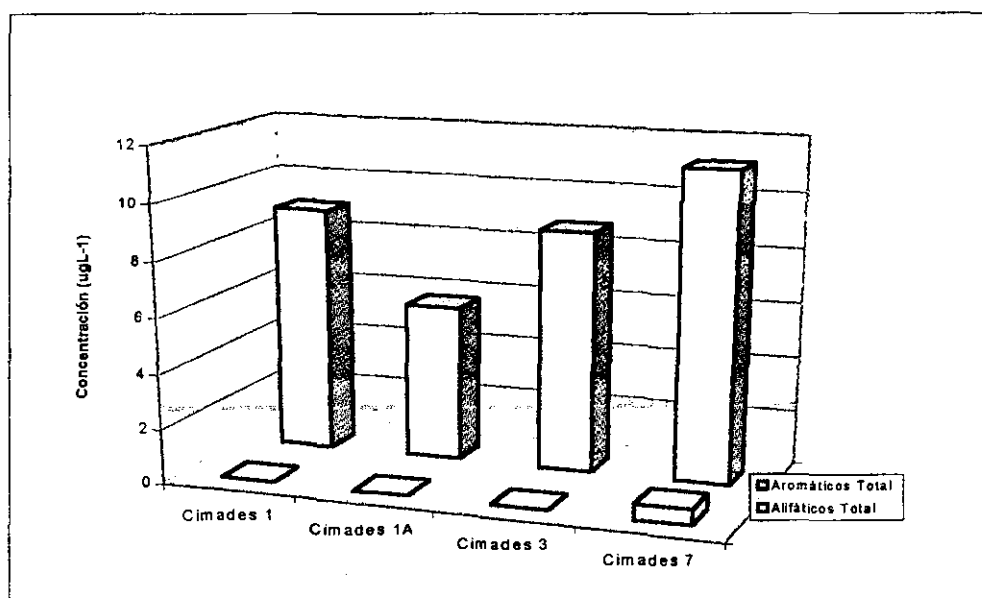


Figura 34. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en agua de norias.

Alifáticos: En las muestras de agua potable, la concentración de alifáticos totales es mínima, presentándose carbonos de peso molecular intermedio y alto, sin representar riesgo para la salud humana, mientras que el sedimento que acompañaba al agua se halló en un intervalo de 0.6 a 1.88 mgkg⁻¹, estando muy por debajo del límite permisible para sedimentos pero que concuerda con lo esperado de los compuestos orgánicos en adsorberse con el material fino como es el caso del sedimento. En la figura 34, las concentraciones de alifáticos muestran valores de 10 µgL⁻¹ para las muestras de Cimades que pueden ser de origen biosintético (Blumer & Youngblood, 1975).

El aporte de estos contaminantes orgánicos en el suelo no se debe únicamente a los derrames sufridos en la zona sino también a los aportes derivados de los incendios de los pastizales y de los procesos industriales de la petroquímica de La Venta. Esto se determinó en función de las concentraciones registradas en el control 5 (La Azucena) que al considerarse como un terreno alejado de toda instalación petrolera registró una concentración que rebasa el LPPB (20 mgkg⁻¹) y en donde se observó un incendio para dicho lugar encontrando compuestos aromáticos típicos provenientes de un incendio (Yunker *et al.*, 1999).

Otra fuente de menor proporción es el aporte de la degradación de la materia orgánica por parte de la actividad biológica (Blumer & Youngblood, 1975). La biosíntesis de compuestos de los restos vegetales y microorganismos del suelo son parte de la formación de la materia orgánica del suelo con el aporte de compuestos alifáticos y HAP's (Schnitzer & Khan, 1978) pero dadas las condiciones de inundación en la mayor parte de los lugares, las concentraciones de HAP's y alifáticos varían de un sitio a otro como lo demuestran los valores de los sitios control.

Los HAP's son formados por organismos, además del aporte de los incendios observados en los pastizales cercanos así como de los procesos de combustión generados en la petroquímica de La Venta y la acción dispersante del viento hacia zonas cercanas o lejanas en función de la velocidad del viento que contribuye a su acumulación en suelos y sedimentos recientes (Blumer & Youngblood, 1975).

Finalmente, no existe una fuente única para el distrito de Agua Dulce (Activo 5 Presidentes) estableciendo que la principal fuente de contaminación son los derrames seguido de la quema de vegetación y en menor proporción la degradación del material vegetal en suelo.

8.2 MIGRACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP's) Y ALIFÁTICOS EN SUELO

Microcuenca de La Venta

De acuerdo con la idea de observar una movilidad de hidrocarburos de partes altas hacia zonas bajas en función al flujo del agua para la Microcuenca de la Venta (Macroescala), los resultados obtenidos señalan que no existe un patrón definido, pues los sitios tienen

concentraciones variables entre unos y otros, como se observa en la figura 8 y 9 en donde se muestran las concentraciones de hidrocarburos alifáticos y HAP's a largo del perfil de los suelos.

Las máximas concentraciones se ubican únicamente en la parte superficial en los horizontes orgánicos del suelo disminuyendo drásticamente conforme a la profundidad que generalmente coincide con el horizonte arcilloso. La migración de los hidrocarburos es mínima tanto de alifáticos como de HAP's. Lo anterior indica que cada sitio tiene un comportamiento propio en función de los derrames presentes para cada lugar, siendo puntual la contaminación en esta zona de estudio.

El comportamiento de los hidrocarburos en los sitios de la microcuenca fue variable entre los sitios analizados para los alifáticos y HAP's presentándose sitios con concentraciones altas. La contaminación se limita a unos cuantos lugares, por lo que se describen a continuación que perfiles que no presentan problema de contaminación y aquellos con afectación por parte de los derrames.

Sólo algunos compuestos de bajo peso molecular muestran una movilidad a escasos centímetros de profundidad en función de su solubilidad con el agua y en otros compuestos de alto peso molecular, probablemente relacionada con la asociación con material particulado de origen orgánico que altera la solubilidad y, por tanto, ayuda a la movilidad del compuesto hacia zonas más profundas lo cual se discutirá más adelante.

Los alifáticos en el sitio de Panga Vieja en la superficie del perfil 1 mostraron una mayor concentración de compuestos de bajo peso molecular dominando los carbonos C14 y C16 llegando a detectar al C30 (Anexo 2, tabla 2), se observó el mismo comportamiento en las siguientes profundidades como se observa en la figura 35, manteniendo la concentración para cada horizonte de forma homogénea. No existe un límite permisible para cada compuesto pues sólo se considera la suma total de dichos compuestos. Es probable que esta aportación de alifáticos sea de origen natural como parte de la descomposición de la materia orgánica (Schnitzer & Khan, 1978), aunque no se puede descartar el aporte antropogénico sea por la deposición de gases que provienen del complejo petroquímico de la Venta en el suelo, o por el acarreo de contaminantes a través del sedimento depositado durante las inundaciones (Padilla, 1985).

En la Panga Vieja, se detectó la presencia de HAP's de peso molecular intermedio en la parte superficial donde hay gran cantidad de residuos vegetales y que van del fenantreno al criseno con un promedio de 0.07 mgkg^{-1} para cada uno sin rebasar el límite permisible de 1.0 mgkg^{-1} por EPA y el criterio de Profepa (Anexo 2, tabla 1). En el siguiente horizonte se determinó los mismos HAP's con una concentración menor sin rebasar el límite permisible de algunos compuestos individuales con un valor promedio de 0.05 mgkg^{-1} . En el tercer horizonte tiene mayor presencia de HAP's (acenaftileno al benzo(ghi)perileno) que se hallaron por debajo del límite permisible de 1 mgkg^{-1} ; y en el último horizonte se detectó fluoranteno y benzo(k)fluoreno (figura 36), la movilidad de compuestos de bajo peso se debe a la solubilidad frente al agua, que es el agente ambiental para este lugar que promueve la migración de los compuestos orgánicos. La descomposición de la vegetación

y/o la deposición de HAP's vía aérea son fuentes de HAP's importantes que los derrames. Las concentraciones presentes son semejantes a los de los sitios control.

En el perfil 3 (El Ralé) con un incendio reciente advertido por la humareda de la vegetación, presentó una mayor concentración de carbonos de alto peso molecular entre el C24 y C34, por los residuos generados en la combustión del material vegetal con la formación de compuestos de alto peso molecular (López, 1991); en el siguiente horizonte con la presencia de suelo mineral se presentan compuestos de alto peso como el C24 al C26, esta movilidad es atribuida a la formación de compuestos solubles con compuestos orgánicos de la materia orgánica alterando así la solubilidad de los alifáticos pesados ya que se establece que entre más aumente el peso molecular de un compuesto orgánico menor será su solubilidad al agua, así como su degradación en el suelo. De acuerdo a López (1991), Steinberg (1992) y Beck *et al.* (1993) los ácidos fúlvicos y húmicos tienen la capacidad de enlazarse con los alcanos incorporándose como parte de la estructura molecular a través del enlace de Van der Waals de los ácidos carboxílicos bencénicos y fenólicos o absorberse a la superficie de la molécula. En el horizonte Ah2 se presentó una mayor cantidad de alifáticos probablemente debido a la descomposición de la materia orgánica enterrada. Y a mayor profundidad desciende el número y concentración de alifáticos (figura 35b).

Los HAP's encontrados en el perfil 3 en el horizonte Ah1 (32-47 cm) fueron del fenantreno al pireno, rebasando el límite permisible de Canadá (LPC) (0.1 mgkg^{-1}) y por debajo del LPPB (10 mgkg^{-1}); en el siguiente horizonte, se hallaron cuatro HAP's de peso molecular intermedio que rebasan individualmente al límite anterior y, en el último horizonte se mantienen los HAP's de peso molecular intermedio que rebasan ligeramente el límite permisible, observando un comportamiento de descenso hacia zonas más profundas a causa de la arcilla y la materia orgánica (figura 36b). Un aspecto interesante es que en la superficie hubo una ausencia de HAP's, dado por la evaporación y disipación en la atmósfera para ser depositados a otros lugares lejanos como lo establecen Blumer & Youngblood (1975), quienes indican que las corrientes de aire influyen en la dispersión de los HAP's en amplias áreas. De acuerdo con Yunker (1999), a lo largo del perfil se observaron HAP's formados a partir de una combustión que son el pireno, benzo(a)antraceno y el criseno, confirmando la difusión gaseosa hacia zonas profundas, correspondiendo a un 50 y 75 % del total de compuesto presente en este horizonte.

En el perfil 4 (el Ralé), el comportamiento de los alifáticos representado en la figura 35c demuestra que el horizonte superficial del suelo registró altas concentraciones de los compuestos orgánicos a partir del C9 al C34, destacando el C30 y C34, definiendo que dicha capa de chapopote es antigua, dado por el abundante desarrollo de la vegetación encima del derrame. En este caso también se aprecia el llamado UCM indicativo de que se ha dado un proceso de degradación. En el siguiente horizonte Ah1 (38-46 cm) predominaron los compuestos de bajo peso molecular, desde el C9 al C14 atribuible a su solubilidad al agua además de ser resultado de la degradación. Y en el horizonte Ah2 (46-120 cm) se detectaron alifáticos de alto peso molecular (C25 y C26) en concentraciones bajas. En lugares con un alto porcentaje de humedad, la principal interacción de los contaminantes orgánicos no polares fue con la materia orgánica del suelo (Karimi-Lotfabad *et al.*, 1996).

En la superficie del perfil 4, se lograron detectar los HAP's (fenantreno al benzo(a)antraceno) en cantidades que rebasan el límite permisible de Canadá (0.1 mgkg^{-1}) y están por debajo del CLP (0.8 mgkg^{-1}) y el LPPB (5 mgkg^{-1}), dichas concentraciones se hallan ligadas a la capa de chapopote; en el segundo horizonte se hallaron compuestos de peso molecular intermedio a partir del fenantreno al criseno, con una concentración semejante al anterior, rebasando también el límite permisible; el tercer horizonte muestra un mayor número de HAP's de bajo y alto peso molecular (acenaftileno al benzo(ghi)perileno) con un valor ligeramente superior a 0.1 mgkg^{-1} probable a una alteración de solubilidad (Jury, 1989) (figura 36c).

El perfil 8 (El Paraíso) correspondiente a un terreno de uso agrícola, presentó en la superficie, hidrocarburos alifáticos de alto peso molecular principalmente del C26 al C34, dicha presencia es probablemente el resultado de una combustión incompleta del material vegetal constituido principalmente por platanillo por causa de un incendio dejando residuos de alto peso molecular (López, 1991). En el siguiente horizonte Hf2 (48-59 cm) se mantienen los mismos alifáticos con las mismas concentraciones a las de la superficie; en el tercer horizonte Hh1 (59-69 cm) hay un considerable aumento de las concentraciones y presencia de compuestos de bajo y alto peso molecular (C14-C30) esto probablemente debido a una contaminación anterior, presentando el cromatograma de esta muestra también el característico UCM. Las concentraciones disminuyen en la siguiente (figura 35d), expresando así la movilidad de los compuestos a través del suelo por la humedad y las partículas orgánicas que los atrapan; en el último horizonte, Cr (100-120 cm), las concentraciones de los carbonos de alto peso molecular disminuyen bastante. En general, se observa que la materia orgánica es un factor decisivo en la movilidad o retención de los contaminantes orgánicos en el suelo más que la presencia de la arcilla. De acuerdo con Block *et al.* (1993), los suelos que tienen un alto porcentaje de materia orgánica pueden adsorber contaminantes haciendo difícil su remoción, por lo que la biorremediación puede ser impráctica.

La presencia de HAP's en este perfil 8 se limita a un solo compuesto que es el criseno en la parte superficial, que rebasa el LPPB, además de ser un compuesto representativo de combustión (Yunker, 1999), que podría ser la explicación debido a claras señales de vegetación quemada. En la profundidad de 59 a 69 cm (horizonte Hh1) se halló un mayor número de HAP's dominando el benzo(ghi)perileno con un valor de 285.35 mgkg^{-1} , para el cual no existe un límite permisible pero que por su número de anillos aromáticos es probable que cause algún efecto tóxico; su presencia es probable a una contaminación anterior por alguna sustancia sepultada. En las siguientes profundidades se presentan algunos HAP's de peso molecular bajo e intermedio, con bajas concentraciones. En el último horizonte, se observó un mayor número de compuestos (acenafteno, fluoreno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoreno, benzo(k)fluoreno y benzo(a)pireno), el benzo(a)antraceno que rebasan ligeramente el LPC (0.1 mgkg^{-1}), sin rebasar el CLP (0.8 mgkg^{-1}) (figura 36d), siendo la presencia de coloides orgánicos los que alteren la solubilidad de los HAP's, y promuevan su movilidad aumentando la concentración en zonas más profundas que las predichas a la solubilidad de cada compuesto aromático (McGroddy & Farrington, 1995).

Para los restantes perfiles de la zona la presencia de hidrocarburos alifáticos y HAP's se puede explicar como parte de la descomposición de la materia orgánica y con ello la formación de compuestos aromáticos y alifáticos de bajo peso molecular conforme al tiempo, los compuestos pueden ser condensados para dar lugar a sustancias de mayor peso molecular como lo explican Schnitzer & Khan (1978) y Blumer & Youngblood (1975). Otra manera de explicarlo es por deposición de compuestos por vía aérea dado por los incendios provocados y del proceso de combustión en varias fuentes entre ellos la petroquímica de La Venta. McBride (1994) establece que la quema de la capa orgánica resulta en una vaporización de algunos hidrocarburos los cuales son traslocados hacia abajo para formar capas repelentes al agua donde se condensan. La degradación y la deposición pueden ocurrir al mismo tiempo en función a las concentraciones encontradas como lo marcan los perfiles 1, 2, 5, 6 y 9 para alifáticos y HAP's como se observa en las figuras 8 y 9.

Con respecto a la importancia de los parámetros del suelo se realizó una correlación con la humedad para ambas fracciones, resultando que los perfiles 2 y 4 presentaron un valor de asociación alta. La asociación del contenido de materia orgánica y los HAP's sólo se manifestaron en los perfiles 4 y 9 mientras los alifáticos en los perfiles 2, 3, 4 y 6.

Y la asociación del pH con ambas fracciones orgánicas no se realizó de acuerdo a Fränze (1992) debido que no existe una relación directa entre el pH del suelo y los hidrocarburos como el petróleo, keroseno, diesel y combustibles ligero, quedando este parámetro como importante para la población microbiana en la degradación de tales compuestos (EPA, 1983; Block *et al.*, 1993 & Huesemann, 1994). Los valores en los Histosoles mostraron una tendencia de ácida, donde existe una oxidación lenta de la materia orgánica debida a la lenta difusión del oxígeno por el agua estancada y a las bajas concentraciones de nutrimentos minerales. La baja disponibilidad de O₂ está acompañada de elevadas presiones parciales de CO₂ en la mayoría de los suelos y sedimentos, existiendo un equilibrio ácido carbónico-bicarbonato que tiende a controlar la acidez del suelo a un pH aproximado de 6. Cuando la actividad microbiana disminuye y la difusión del CO₂, eleva la presión parcial del CO₂, el pH se vuelve más ácido si es que se generan ácidos orgánicos, o más, alcalino si la solución contiene concentraciones elevadas de Na⁺ (Bohn *et al.*, 1993)

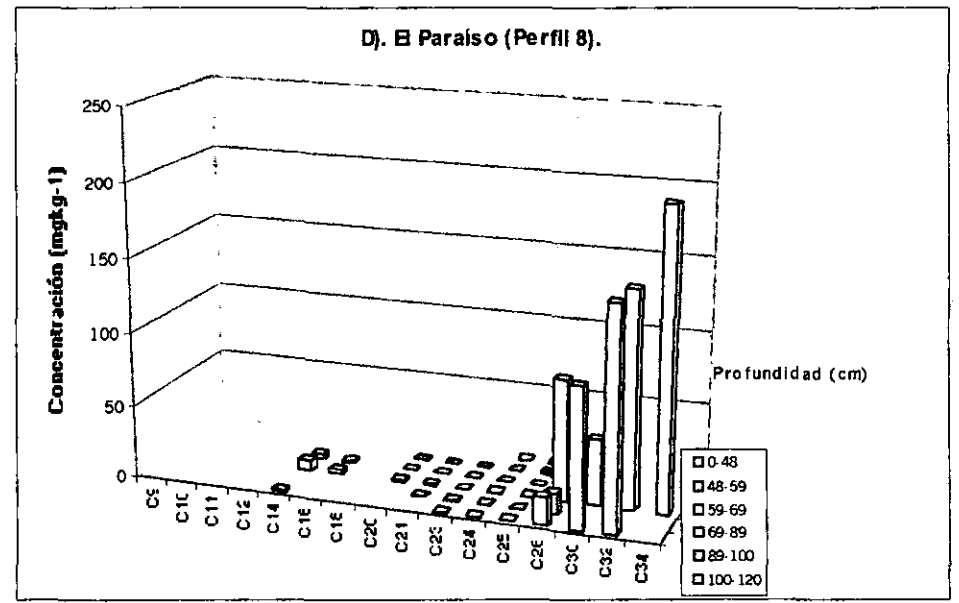
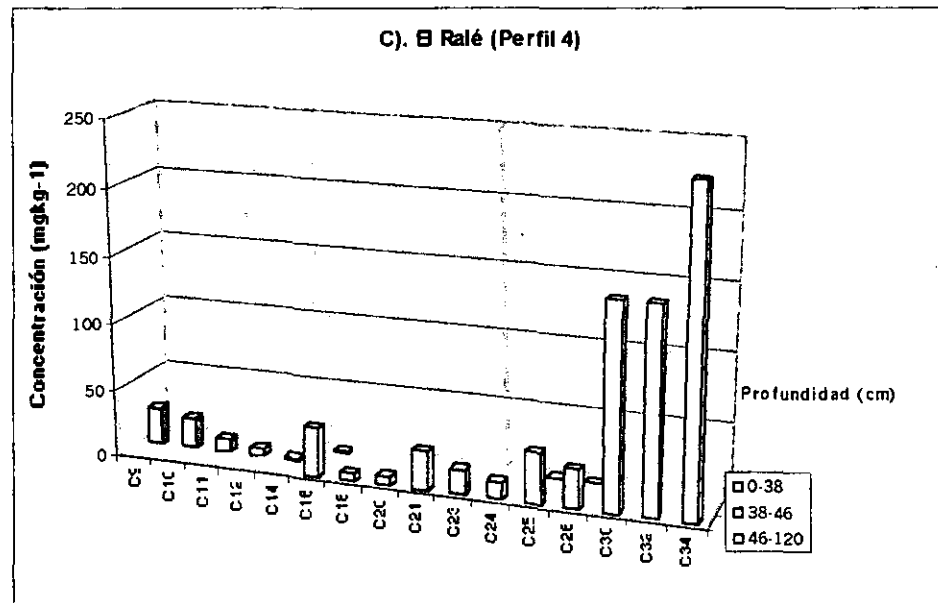
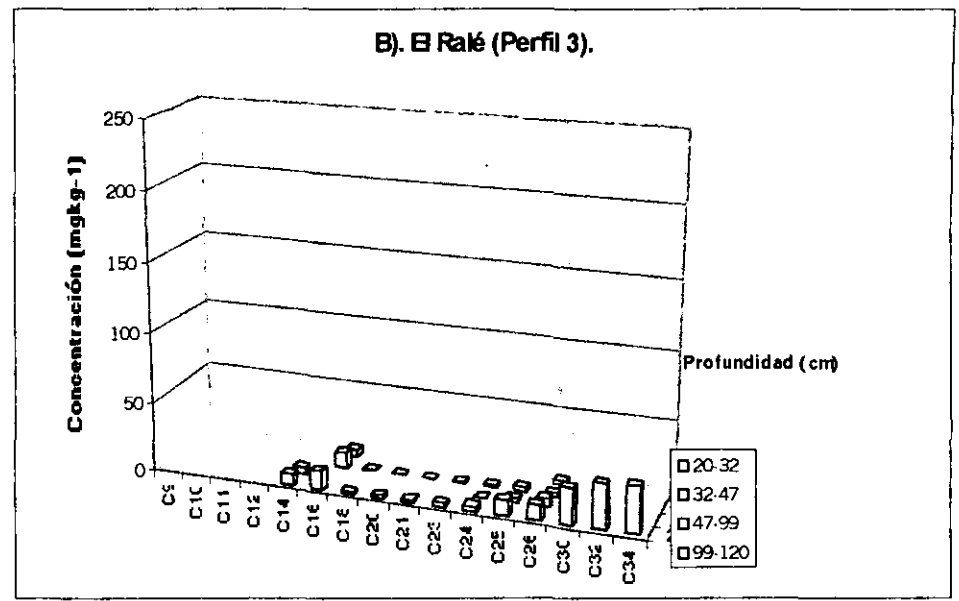
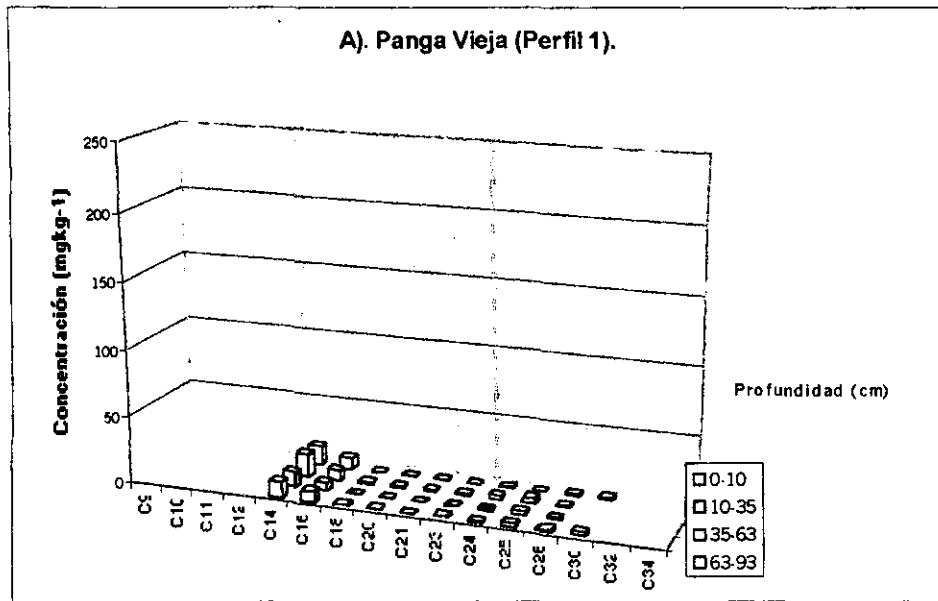


Figura 35. Concentración de hidrocarburos alifáticos en algunos sitios de la Microcuenca de La Venta, Tabasco.

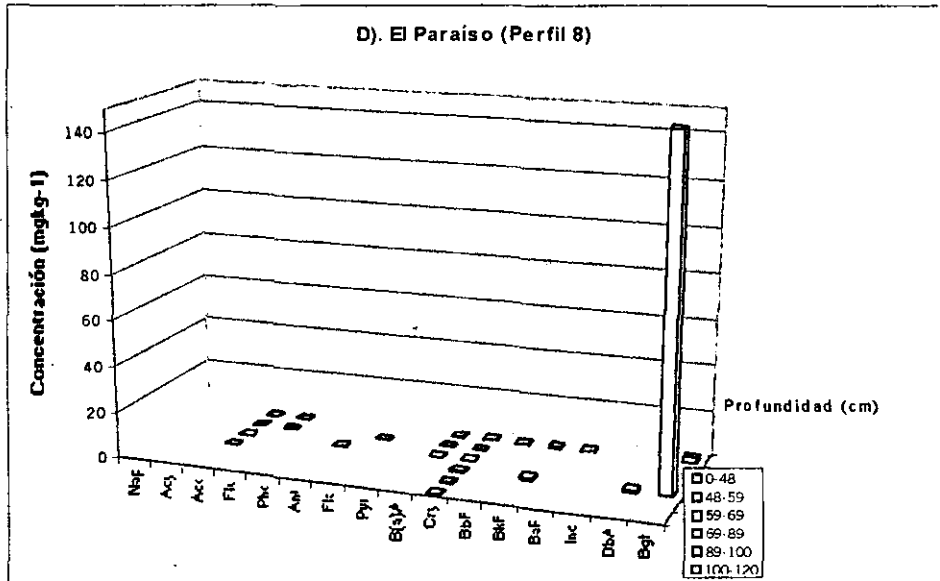
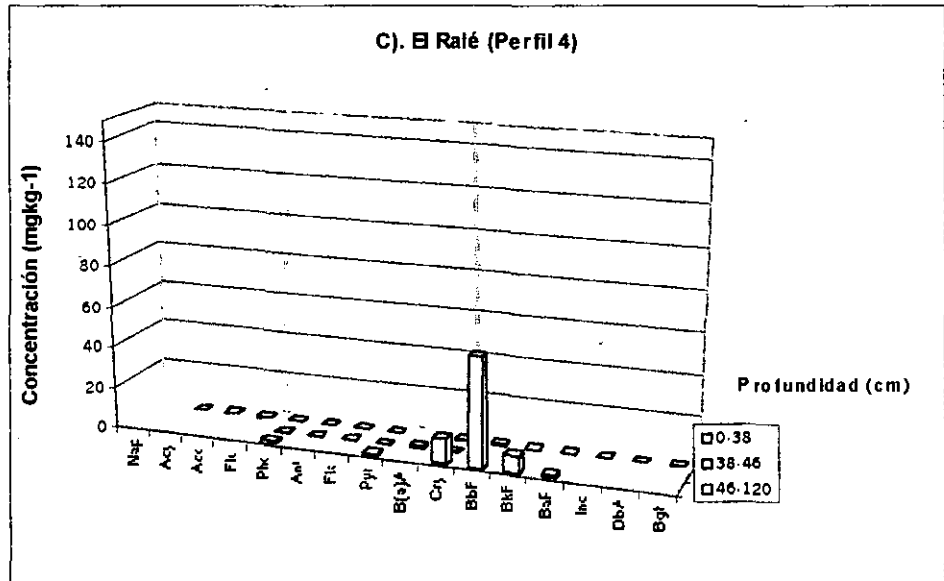
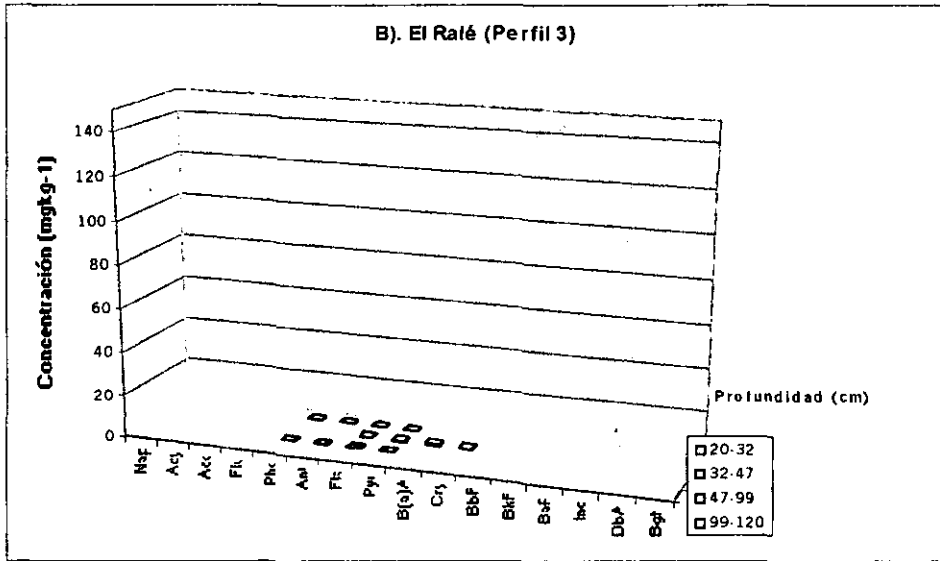
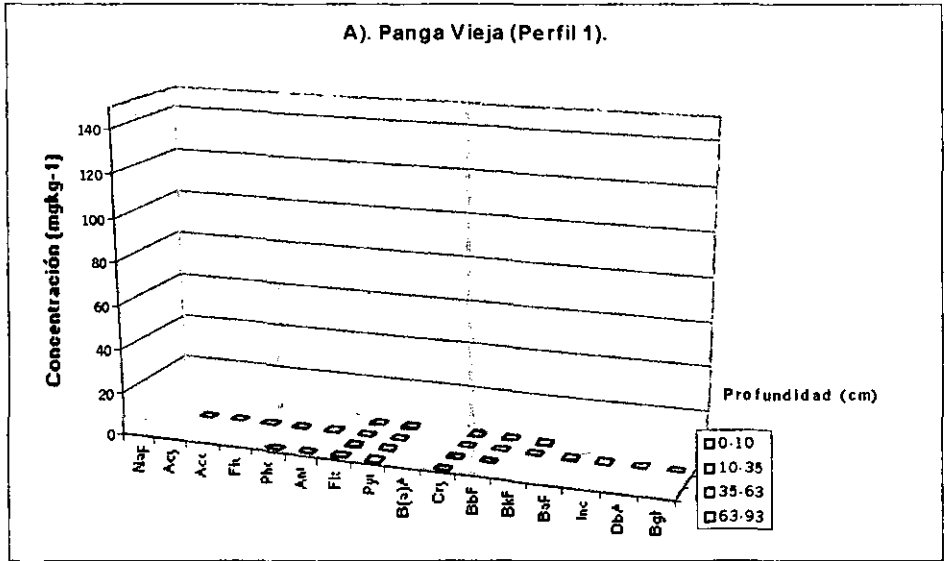


Figura 36. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos en algunos sitios de la Microcuenca de La Venta.

Agua de la microcuenca de La Venta:

HAP's : Para la microcuenca de la Venta, en el perfil 1 la concentración total es baja con un valor de $0.006 \mu\text{gL}^{-1}$, debido al alto porcentaje de arcilla que actúa como capa impermeable protegiendo la capa freática, de acuerdo a la EPA (1983) los suelos arcillosos pueden limitar la movilidad en virtud de su alto número de pequeños poros presentes, resultando en una baja permeabilidad, además de la volatilización de algunos compuestos por la temperatura de la zona (Weber & Miller, 1989). En el perfil 2, la concentración es baja con respecto al anterior lo cual es debido a la presencia de una gran cantidad de materia vegetal en proceso de descomposición propio del popal que sirve como barrera de retención de los contaminantes orgánicos del suelo, o por la afinidad hacia la materia orgánica. En el perfil 3, la muestra de agua freática muestra un ligero aumento a causa de los incendios así sucedidos, y de acuerdo a Jury (1989), López (1991), y Weber & Miller (1989) hay mayor formación de HAP's (fluoreno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno benzo(b)fluoreno, benzo(k)fluoreno, benzo(a)perileno, indeno y benzo(ghi)perileno) por las altas temperaturas alcanzadas durante la combustión, favoreciendo la difusión de los gases en los poros del suelo, además de observar incendios pasados por la presencia de ceniza enterrada. En el perfil 5, correspondiente al terreno de pasto, hay una baja concentración de HAP's observando una gruesa capa de raíces y, con ello, de materia orgánica; mientras que en el perfil 6, de uso ganadero carente de materia orgánica y cercano a un manglar, existe una baja concentración. En el perfil 7, con vegetación de popal y enredadera, con gran espesor de material orgánico, presentó el valor de mayor concentración de HAP's en agua, como se observa en el figura 37, probablemente a la descomposición de la materia orgánica, y la movilidad de los compuestos por el material orgánico formado a través de la descomposición. El agua colectada en los pozos del perfil 8 mostró concentraciones bajas, pues el terreno agrícola está dominado por un alto contenido de arcilla que limita el movimiento de los contaminantes hacia zonas más profundas. En el perfil 9, lugar de abundante vegetación hidrófila, muestra un bajo contenido de HAP's totales en agua, esto debido a un alto contenido de materia orgánica que sirve de absorbente.

En las muestras de agua correspondientes a los perfiles 13, 15 y 16 las concentraciones son mínimas en HAP's totales, estando por debajo del límite permisible para consumo humano, por tanto, sin representar riesgo para la salud, contando con la presencia del acenaftileno, antraceno y pireno; en los perfiles 10, 11 y 12 no se detectaron HAP's (Cuadro 12). Las concentraciones detectadas no rebasan el LPC para agua potable.

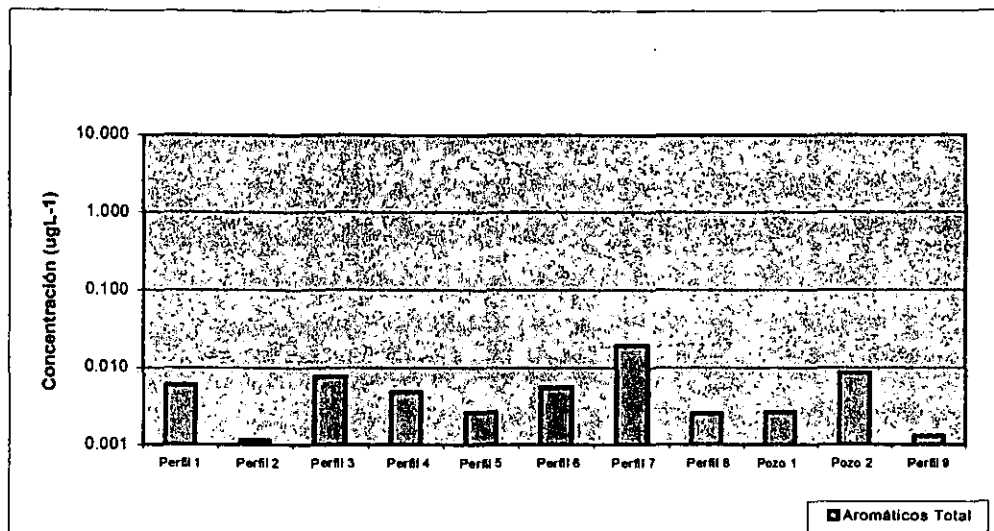


Figura 37. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en el agua del manto freático de los sitios analizados en la Microcuenca de La Venta.

Alifáticos: Solo se analizaron los perfiles 12 al 16 con respecto a su contenido de alifáticos y estas muestran una baja concentración de alifáticos totales estando muy por debajo del límite permisible, observando la máxima concentración en el perfil 13 con un valor de $1.18 \mu\text{gL}^{-1}$, apoyando con esto la baja movilidad de los hidrocarburos hacia zonas profundas por la gran cantidad de arcilla presente que limita el movimiento de los compuestos orgánicos, observando la presencia de carbonos de bajo y alto peso molecular con una dominancia de carbonos pesados.

Derrames Antiguos

Los derrames antiguos analizados presentan un comportamiento variable en las concentraciones de los alifáticos y HAP's individuales. El derrame de 5 Presidentes batería 4 se considera representativo debido a las altas concentraciones de ambas fracciones y a la extensión del derrame. En el punto del derrame se encontró una capa de chapopote en la superficie y en el horizonte Hh1 (1-10 cm), los alifáticos detectados fueron a partir del C14 al C34, destacando los compuestos del C12 al C20; en el siguiente horizonte Hh2 (10 a 20 cm), la concentración de los compuestos detectados en la superficie aumenta ligeramente, con mayor presencia de alifáticos de bajo peso molecular, demostrando una movilidad por efecto de gravedad y del agua dentro de este horizonte orgánico dominado por raíces de la vegetación. De acuerdo a López (1991) una vez superada la capacidad de retención es posible la migración hacia zonas más profundas. En 20 a 25 cm se localizó una capa de chapopote enterrada obteniendo concentraciones semejantes a la superficie en alifáticos de peso molecular bajo e intermedio. Y a mayor profundidad las concentraciones disminuyen (figura 38a). Es importante señalar que en los diferentes horizontes orgánicos existe la participación de la materia orgánica con capacidad de retener los contaminantes orgánicos que está en función del grado de evolución de la estructura del material orgánico en el suelo expresado por su aromaticidad (Gao *et al.*, 1998).

Los HAP's (fluoranteno al benzo(ghi)perileno) detectados en la superficie del derrame rebasan el LPPB, con una mayor presencia de HAP's de bajo peso molecular, demostrando la capacidad de la materia orgánica del suelo en la retención de los contaminantes orgánicos. A mayor profundidad se detectó compuestos de peso molecular bajo e intermedio (acenaftileno y benzo(b)fluoranteno) (figura 39a). En este derrame de petróleo en el suelo, los productos de alto peso molecular penetran más lentamente, mientras que los bajo peso molecular tienen una migración hacia zonas más profundas muchas veces mayor (Toledo, 1988). Además, la mayor presencia de compuestos en la superficie es dada por la combinación de los residuos pesados del petróleo y de la biodegradación que sufre el derrame por los microorganismos.

En el punto a 10 m de distancia la concentración horizontal disminuye, registrando en la superficie alifáticos a partir del C14 al C34, con mayor concentración de los compuestos de alto peso molecular. En las siguientes profundidades se detectaron de bajo y alto peso molecular, suponiendo una migración de estos contaminantes orgánicos por medio del agua y la asociación con la materia orgánica soluble (figura 38b).

Para el caso de los HAP's, en la superficie se presentó una gran variedad de aromáticos (fluoranteno al benzo(ghi)perileno) donde el pireno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno y el dibenzo(a,h)antraceno rebasan el LPC (0.1 mgkg^{-1}). Existiendo la tendencia de descenso de concentración pero en el horizonte Hh (12-30 cm) presentó un mayor número de compuestos de peso molecular bajo y alto, con una mayor concentración en comparación a la superficie rebasando el LPC, demostrando una movilidad por la solubilidad de algunos compuestos al agua (Toledo, 1988) además de ser una zona de descomposición con el aporte de HAP's provenientes de la vegetación y del derrame del petróleo. En los horizontes orgánicos hay una mayor retención de contaminantes pues en la parte mineral, sólo se detectó al pireno que rebasa ligeramente el CLP, apoyando este argumento con lo descrito por Chiou *et al.* (1998) que en sistemas suelo/materia orgánica en altos porcentajes, la sorción de los contaminantes no polares ocurre principalmente por partición (disolución) dentro de la materia orgánica (figura 39b).

La concentración superficial de los alifáticos a 30 m de distancia presentó los mismos compuestos al punto anterior, y una disminución de concentración en forma horizontal del derrame. En los siguientes horizontes, la concentración disminuye de forma notoria manteniendo la tendencia de alifáticos de peso molecular intermedio y alto probable a la asociación de la materia orgánica del suelo (figura 38c).

En la superficie de este sitio se detectaron HAP's por arriba de los cuatro anillos (pireno al indeno) que rebasan el LPC como es el caso del pireno. En las siguientes horizontes se reduce el número y concentración de HAP's (figura 39c).

Finalmente, en el punto a 90 m de distancia del derrame, la concentración de alifáticos disminuye notablemente en forma horizontal. En la superficie presentó una baja concentración de alifáticos así como el número de compuestos, presentando una tendencia de descenso pero en el horizonte (Hh) se encontraron los mismos alifáticos de la superficie

pero con mayor concentración para cada uno de los compuestos (figura 38d). Sin embargo, tales valores no representan riesgo alguno de contaminación en forma total.

Con respecto a los HAP's no se registró alguna concentración que indicara movilidad horizontal, pues sólo se detectó la presencia de un compuesto (benzo(ghi)perileno) en la superficie, debido a un lavado de los anteriores sitios. En el siguiente horizonte (Hf2) no se observó la presencia de algún HAP. Sólo el horizonte (Hh) se registró al benzo(a)pireno que rebasó el LPC (figura 39d).

Se observó una correlación entre el agua y los alifáticos en el derrame de La Venta a 10, 25 y 75 m de distancia, en 5 Presidentes sólo a 90 m de distancia y para Aquiles Serdán fue a una distancia de 50 m. Para los HAP's la asociación con el agua se demostró en La Venta a 75 m de distancia; en 5 Presidentes sólo en 90 m de distancia y finalmente en Aquiles Serdán fue a 50 m de distancia.

Se observó una correlación entre el contenido de materia orgánica y los alifáticos en La Venta a 10, 25 y 75 m de distancia; en 5 Presidentes fue a 90 m de distancia y en Aquiles Serdán a 50 m de distancia. Para el caso de los HAP's en La Venta sólo existió una correlación a 75 m de distancia; en 5 Presidentes a 30 m de distancia y en Aquiles Serdán únicamente a 50 m de distancia.

Las concentraciones individuales de los alifáticos en los derrames analizados presentaron una amplia variedad de compuestos de bajo y alto peso molecular a partir del C14 al C34 con una concentración semejante, excepto en 5 Presidentes en el punto de origen y Aquiles Serdán en el punto del derrame donde predominan los compuestos de bajo peso molecular.

En el caso de los HAP's en La Venta, los compuestos catalogados como carcinogénicos rebasan el LPC para uso de suelo agrícola (0.1 mgkg^{-1}); en 5 Presidentes los compuestos rebasan el LPC para uso de suelos residencial (1.0 mgkg^{-1}) e industrial (10 mgkg^{-1}). Y en Aquiles Serdán, los compuestos rebasan únicamente el LPC de uso de suelo agrícola. Se observa que existe un riesgo potencial de estos contaminantes hacia la salud humana debido a sus efectos carcinogénicos.

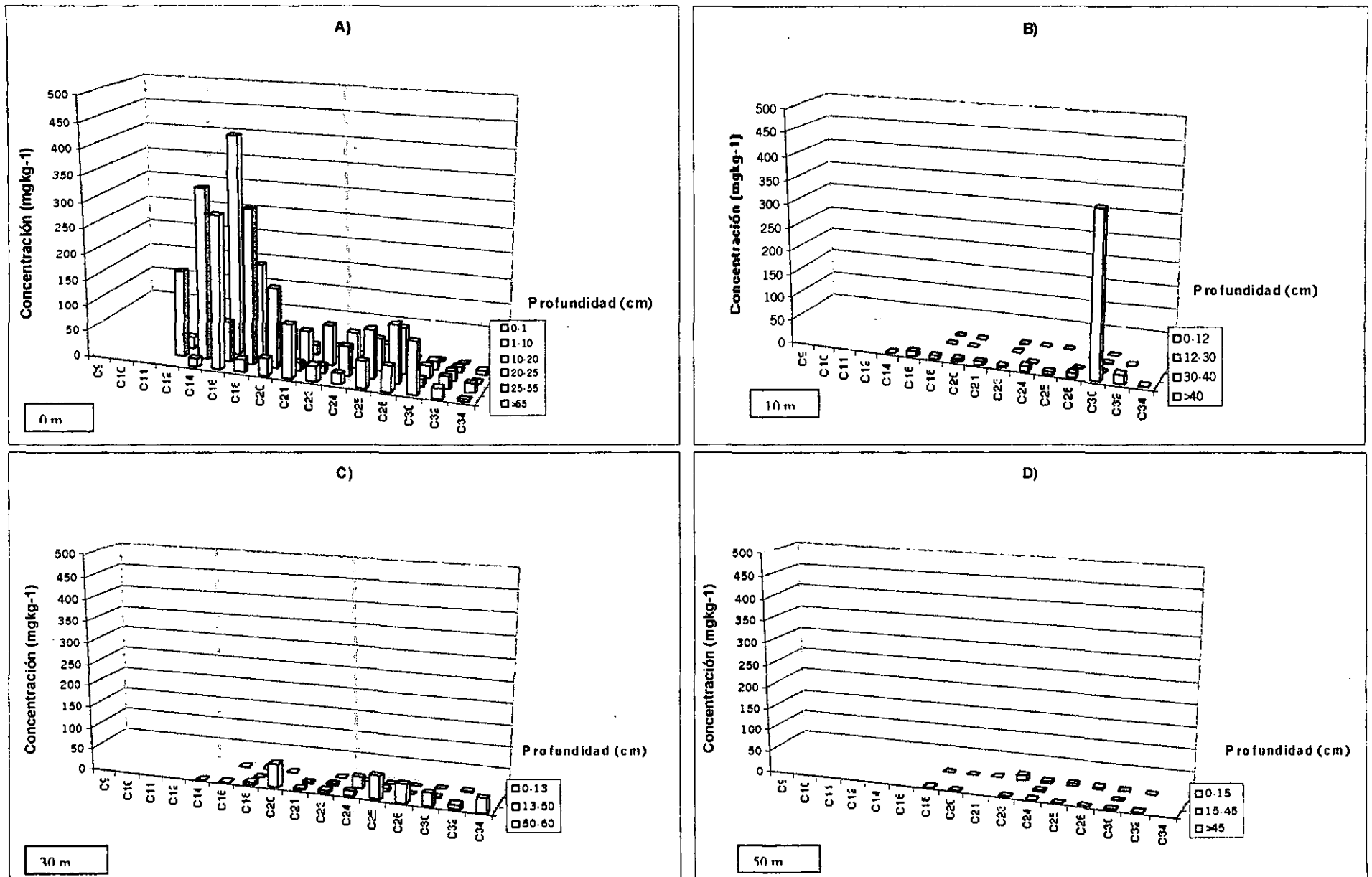


Figura 38. Concentración de hidrocarburos alifáticos en 5 Presidentes, derrame antiguo del Distrito de Agua Dulce.

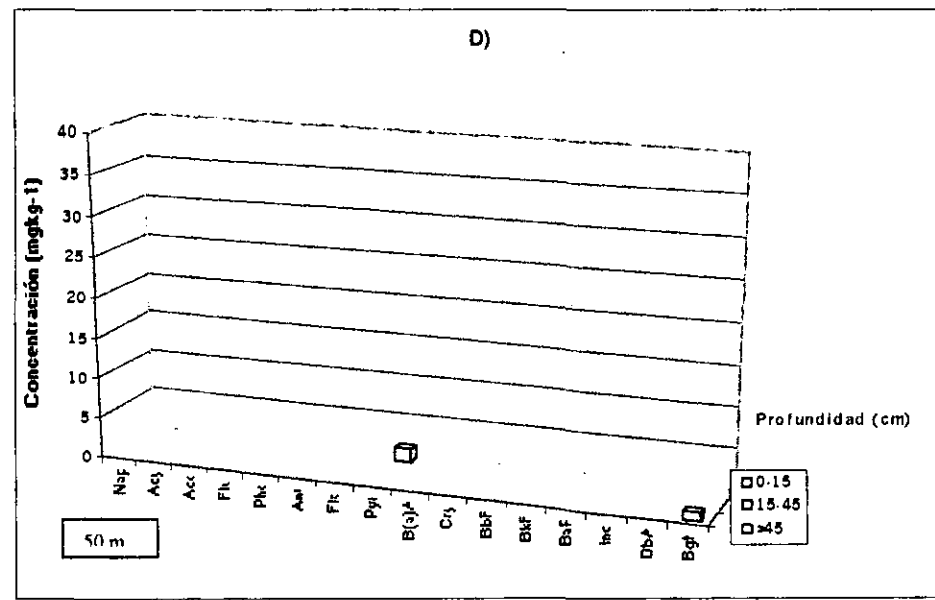
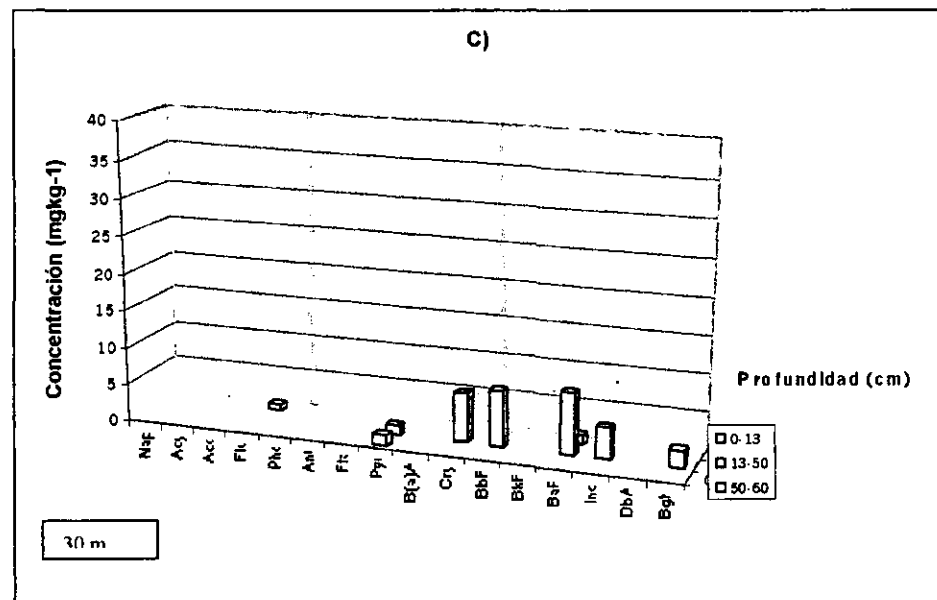
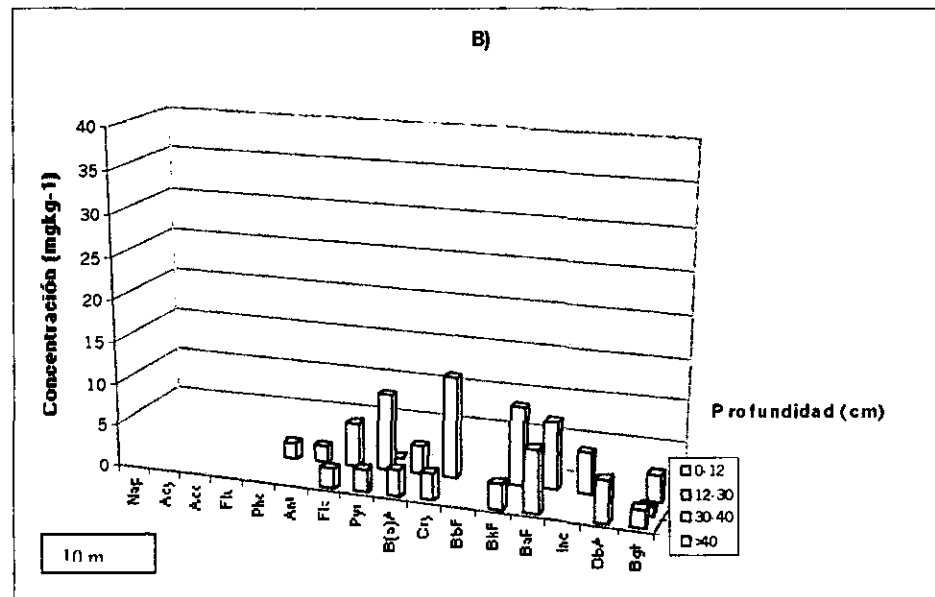
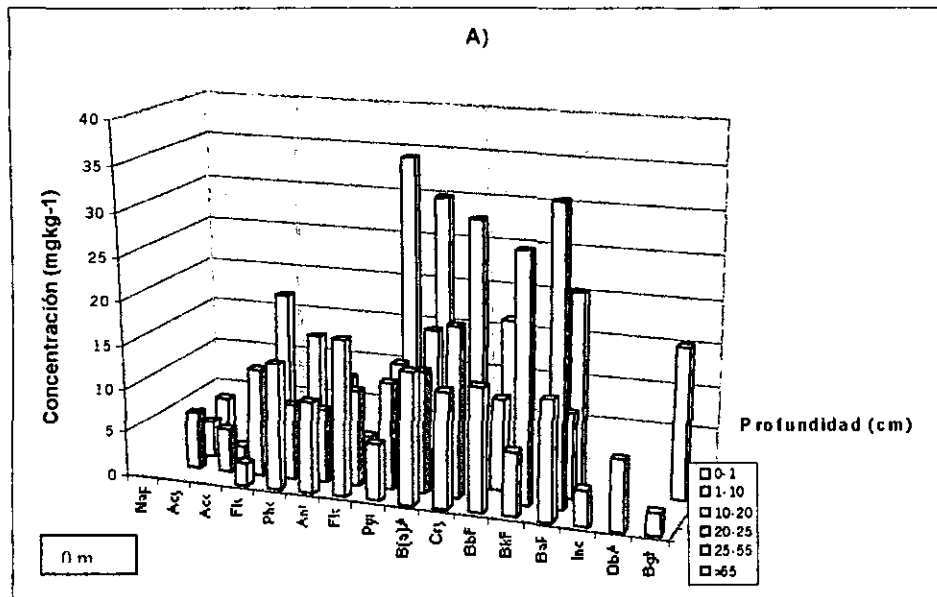


Figura 39. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en 5 Presidentes, derrame antiguo.

Agua en los Derrames Antiguos

HAP's: En las muestras de agua pertenecientes a derrames antiguos, en la Venta (DA), y en los diferentes puntos de muestreo, no se detectó ningún HAP al igual que en el agua obtenida a través de la perforación (0.6 – 0.7 y 10.0 – 10.8 m de profundidad); en el último se halló una concentración mínima de naftaleno y benzo(a)pireno. En el derrame de 5 Presidentes (DA2, ver anexo 3) en todos los puntos se hallaron HAP's a partir del naftaleno al benzo(k)fluoranteno sin rebasar el LPC ($0.01 \mu\text{gL}^{-1}$). El derrame de Aquiles Serdán (DA3) en los tres puntos del transecto, la concentración es más alta que en los anteriores sitios, debido a una mayor presencia de HAP's de naftaleno al benzo(k)fluoranteno pero sin rebasar el LPC. En la figura 40 se observa la concentración de HAP's y alifáticos en todos sitios, dicha presencia es probablemente debido a la migración de los HAP's con sustancias orgánicas solubles por el fenómeno de la sorción en la superficie de esta materia (Chiou *et al.*, 1998).

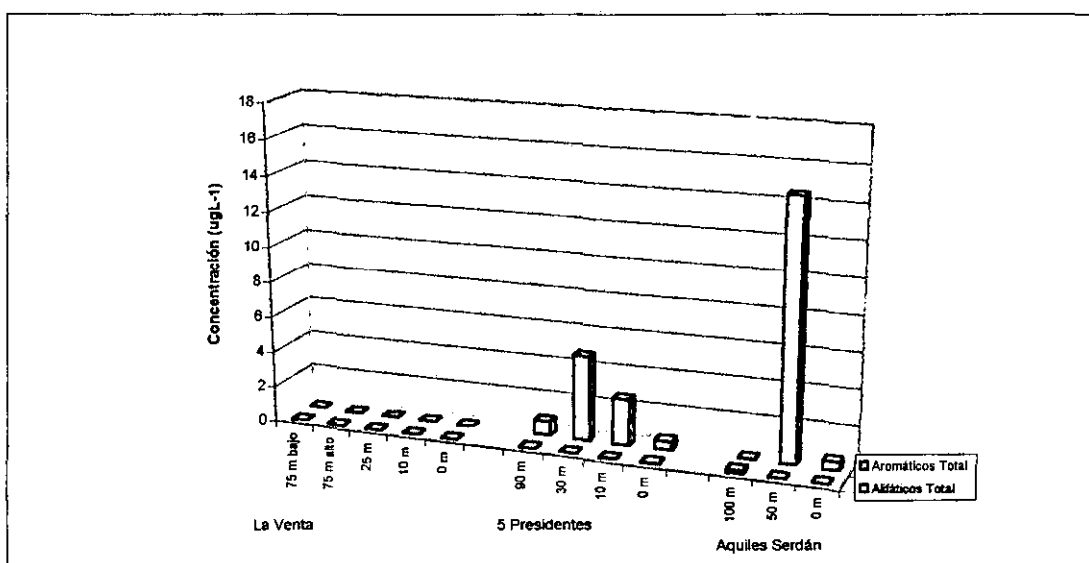


Figura 40. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en agua de los derrames antiguos.

Alifáticos: En las muestras de agua correspondientes a los derrames antiguos, las concentraciones en la primera de ellas son muy pequeñas, mientras que en el derrame de 5 Presidentes y Aquiles Serdán, la concentración aumenta a valores cercanos a la unidad con presencia de carbonos de bajo y alto peso molecular (Anexo 3, tabla 2). En la figura 40 se observa una mayor concentración en 5 Presidentes y en Aquiles Serdán probable a la asociación con la materia orgánica soluble. En el caso de la Venta donde las concentraciones son menores, es probable que se deban al lavado frecuente a causa de las inundaciones que impiden una movilidad a través del suelo.

Derrames Recientes:

Los derrames recientes estudiados en la zona del Distrito de Agua Dulce en general presentan altas concentraciones de alifáticos y HAP's en la superficie. Además, no presentan una gran movilidad ambas fracciones a través del suelo, debido al corto tiempo del derrame en el suelo. De los tres derrames analizados se describe a continuación el derrame de Aquiles Serdán por presentar altas concentraciones en ambas fracciones y tener una mayor extensión en la superficie del terreno.

En la capa del chapopote se detectaron los alifáticos (C11 al C34). Los compuestos de peso molecular intermedio tienen altos valores de concentración destacando el C16 con un valor por arriba de 3500 mgkg^{-1} . En los siguientes horizontes, la concentración y el número de compuestos disminuyen drásticamente (figura 41a).

La distribución de HAP's (figura 42a) en suelo, se observa que en el punto del derrame en los horizontes superficiales (0-14 cm) se hallan presentes un gran número de HAP's de bajo (69 %) y alto (31 %) peso molecular. Las concentraciones (Flu, Ant, Pyr, B(a)A, Cry, B(b)F, B(k)F y B(a)P) rebasan el CLP y el LPEPA. En las siguientes profundidades se reduce el número y concentración de HAP's. De acuerdo a lo anterior, el horizonte orgánico tiene el papel de gran adsorbente de hidrocarburos para los suelos de Tabasco.

A los 50 m de distancia del derrame, la superficie registró solo alifáticos del C18 al C32 presentando una baja concentración comparada al punto del derrame demostrando una nula movilidad en forma horizontal. En los siguientes horizontes existe la tendencia de descenso en el número y concentración de alifáticos. La presencia de compuestos de bajo y alto peso molecular, es probablemente debido a la solubilidad al agua y a la asociación con la materia orgánica, (figura 41b).

A 50 m, los HAP's no se detectaron en los horizontes superficiales del perfil, sólo en el horizonte Crg1 (22-27 cm) se identificó al pireno que rebasó el LPC (0.1 mgkg^{-1}). La migración horizontal y vertical es casi nula como se observa en la figura 42b.

A 125 m de distancia del derrame, en los tres primeros horizontes superficiales de 0 a 40 cm (Aa, Ah1 y Ah2) se identificaron alifáticos a partir del C14 al C34. En estas profundidades del suelo se mantuvo una misma concentración. La suma total de estos compuestos rebasa ligeramente el LPEPA (100 mgkg^{-1}) y está por debajo del CLP (1000 mgkg^{-1}), pero sin representar un riesgo de contaminación severa en el suelo, lo que hace suponer que sea un resto de un derrame muy antiguo (figura 41c). El factor de movilidad es determinado por la combinación de la gravedad, humedad y la asociación de la materia orgánica para este perfil (Profepa, 1998).

A 125 m del derrame, en el horizonte superficial se detectaron varios HAP's (fluoranteno al indeno) que rebasan el CLP, como es el caso del criseno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno (Ver Cuadro 3), así como el LPPB y del LPC (Ver Cuadro 3). En los siguientes horizontes se mantienen los compuestos con la misma concentración para los HAP's de bajo peso molecular, variando la concentración de los

HAP's de alto peso molecular que determina que la concentración total sea menor o mayor a la propuesta por los Países Bajos (20 mgkg^{-1}) rebasando el CLP y LPC. En la figura 42c se observa el comportamiento de los HAP's en las diferentes profundidades, siendo superior la concentración en la superficie que en los siguientes horizontes, apoyando la idea de un resto de un antiguo derrame.

A 200 m de distancia, de acuerdo a la figura 41d, sólo el horizonte Hf (0-8 cm) presentó alifáticos a partir del C14 al C34, con una ligera tendencia de mayor concentración de los carbonos de bajo peso molecular debido a la degradación biológica del derrame, además, la materia orgánica superficial retiene gran parte de este derrame que sirve como adsorbente. En los siguientes horizontes, se mantienen los mismos compuestos pero con una reducción de concentración, existiendo una movilidad vertical a través de la solubilidad de algunos de ellos con respecto al agua, así como la asociación con la materia orgánica soluble que permite la migración hacia zonas profundas en bajas concentraciones y con ello aportar contaminantes al agua subterránea utilizando como vías de comunicación a los microporos presentes en el suelo.

A los 200 m, en la superficie se detectó del fluoreno al benzo(ghi)perileno, con una tendencia de mayor concentración para los HAP's de bajo peso molecular correspondiente al horizonte Hf, observando aquí una mayor concentración con respecto a los siguientes horizontes. En los horizontes Aa, Cr1 y Cr2, se presentan HAP's de bajo peso molecular (fenantreno al fluoranteno) que se hallan por debajo del CLP y el LPPB, como se ilustra en la figura 42d. La movilidad hacia zonas más profundas se presenta en compuestos de bajo peso molecular principalmente asociados a su solubilidad al agua.

Es importante señalar que las condiciones ambientales que prevalecen en el lugar influyen en la descomposición y movilidad de los contaminantes orgánicos (Jury, 1989).

Una correlación se observó entre el agua y los HAP's en Ogarrio en el punto del derrame; Aquiles Serdán en el punto del derrame, a 30 y 70 m de distancia, y en 5 Presidentes en el punto de origen, a 10 y 70 m de distancia notando que existe una mayor asociación de estos compuestos en comparación a los derrames antiguos, sitios control y la microcuenca. En la correlación de los alifáticos, en Ogarrio en el punto de origen; Aquiles Serdán en el punto del derrame y a 70 m de distancia y en 5 Presidentes a 10 m de distancia. Se observó una correlación del contenido de materia orgánica con los HAP's en Aquiles Serdán en el punto del derrame, a 30 y 70 m de distancia y en 5 Presidentes en el punto del derrame y a 30 m de distancia.

Los compuestos de alifáticos analizados muestran una distribución de contaminantes de bajo y alto peso molecular entre el C10 al C34, existe una ligera tendencia de mayor concentración en compuestos de bajo peso molecular como se observa en Aquiles Serdán en la parte superficial en 100 m de distancia y en 5 Presidentes en la parte superficial del punto del derrame (Ver Anexo 2, tabla 8). Para la parte individual de estos compuestos no existe un límite permisible que defina algún valor de riesgo.

Para los HAP's en los derrames analizados existe una ligera tendencia de compuestos de bajo peso molecular y en algunos casos se distribuyen de forma uniforme compuestos de

bajo y alto peso molecular. En Ogarrío, las concentraciones individuales rebasan el LPC para uso agrícola (0.1 mgkg^{-1}) y en algunos compuestos individuales rebasan el LPC para uso residencial (1.0 mgkg^{-1}). El derrame de Aquiles Serdán, en el punto de origen y a 100 m de distancia, las concentraciones de los compuestos rebasan el LPC para uso industrial (10 mgkg^{-1}) y en las siguientes distancias se hallan compuestos que rebasan el LPC para uso agrícola y residencial. Y en 5 Presidentes únicamente se detectó una mayor cantidad de HAP's que rebasan el LPC para uso industrial del suelo. Existiendo el riesgo potencial a la salud humana principalmente por los efectos cancerígenos por parte de los HAP's.

Finalmente, la migración tanto horizontal como vertical es mínima a causa del alto porcentaje de arcilla y materia orgánica en los derrames antiguos y recientes, siendo un notorio que el movimiento sea en aquellos sitios sujetos a inundación en la parte superficial. En la mayor parte se cumple la regla de disminución de los HAP's conforme a la profundidad, apoyado por Gao *et al.* (1998), quienes establecen, además, que este comportamiento es indicativo de adsorción por partículas de la superficie y escasamente lixiviado al horizonte inferior. El tiempo y tamaño del mismo derrame en el suelo, es una variable importante en la extensión de la contaminación (SEMARNAP, 1998).

Los HAP's tienen una naturaleza hidrofóbica y la adsorción es importante en la determinación de su destino en la superficie por parte de la materia orgánica, así como del fenómeno de la partición, mecanismo propio de compuestos de naturaleza hidrofóbica (Dragun, 1998). La concentración acuosa, el transporte y los procesos de degradación biológica y química asociada a los HAP's son altamente dependientes del equilibrio adsorción/desorción con los sorbentes como es el caso de las sustancias húmicas. En particular, la partición del líquido a la fase sólida puede jugar un papel significativo en el fenómeno de adsorción en sustancias húmicas (Beck *et al.*, 1993). Es necesario considerar la naturaleza de la materia orgánica que es significativa en el control de los compuestos hidrofóbicos, pues en varios estudios, dichos compuestos son degradados por microorganismos hasta una concentración residual que no disminuye mucho con el tiempo o que disminuye muy lentamente en años con un tratamiento continuo (Luthy *et al.*, 1997).

De acuerdo con Karimi-Lottabad *et al.* (1996), el agua tiene un papel importante en la competencia de los compuestos orgánicos no polares por los sitios activos debido a que en un terreno saturado de agua, la principal interacción de dichos compuestos es la partición dentro de la materia orgánica

La humedad registrada en la mayor parte de los perfiles rebasa el 80 %, lo que puede crear dificultad en la degradación de los hidrocarburos a causa de la saturación de los poros y la transferencia de oxígeno, indicando la participación de organismos anaerobios y aerobios, o bien los facultativos. En los sitios de mayor humedad, se observó que los compuestos de mayor peso molecular migran hacia horizontes profundos, por lo que tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia zonas inferiores o quedar atrapado por retención molecular de las partículas del suelo, materia orgánica móvil o por un efecto de dilución (Lesser, 1995). Además, McGroddy & Farrington (1995), mencionan que los HAP's pueden aumentar su solubilidad al asociarse con los coloides orgánicos del suelo y aumentar su concentración en los poros del suelo y, con ello, su presencia en zonas profundas del suelo.

De acuerdo con la historia geológica, la zona es dominada por sedimentos procedentes del arrastre de partículas finas de las zonas altas. La textura fina causa problemas para el laboreo agrícola, siendo el mayor uso de estos suelos el de pastizal, además de estar sujeto a inundaciones, asociado con una baja conductividad hidráulica y una baja permeabilidad. Por lo tanto, la textura es un factor que limita la movilidad del agua así como de los contaminantes orgánicos (petróleo), además de las prácticas de biorremediación del sitio (Block *et al.*, 1993; Ortiz, 1998).

Los suelos arcillosos pueden limitar la lixiviación debido a su alta CIC, alto contenido de arcillas y a un alto número de poros pequeños (EPA, 1983) y, con ello, la fracción recalitrante de los contaminantes queda atrapada en los microporos o dentro de la materia orgánica (sustancias húmicas) (Steinberg *et al.*, 1994).

En general, todos los sitios son definidos como extremadamente ricos en el contenido de materia orgánica por la abundante vegetación propia del lugar mostrando capacidad de crecer a pesar de los derrames observados, sólo existen porcentajes muy bajos en Aquiles Serdán debido al retiro del material orgánico dejando descubierta la parte mineral. La variación del contenido orgánico superficial está en función de la vegetación y condición del terreno sujeto a inundaciones. Para aquellos sitios que sufrieron algún incendio, quedan pequeños residuos de material chamuscado que se incorpora en la capa superior del suelo, cuando los fragmentos son pequeños se les puede confundir con magnetita, ilmenita y bióxido de manganeso como ocurrió en los perfiles 3, 5 y 8, principalmente (Toledo, 1987).

Según Block *et al.* (1993), la absorción de los contaminantes por la materia orgánica afecta la biodegradación, pues se observó que muchos sitios industriales que tenían altos contenidos de materia orgánica retienen o absorben los contaminantes, siendo difícil de removerlos y la biorremediación puede ser impráctica.

De acuerdo con Beck *et al.* (1993), los compuestos orgánicos hidrofóbicos se pueden describir en procesos de partición entre el suelo-agua y en la fase orgánica del suelo. Para la fase orgánica se establece el modelo del tamiz molecular, en donde hay una adsorción, absorción o quedan retenidos los compuestos hidrofóbicos en los poros internos de la estructura macromolecular del humus a manera de tamiz, a través de enlaces físicos y químicos de las sustancias húmicas, las cadenas alifáticas o con porciones de lípidos y derivados de lignina aromática.

Los componentes de bajo peso molecular del petróleo derramado, empiezan inmediatamente a evaporarse a la atmósfera o se difunden en el agua.

El aporte atmosférico es muy importante ya que pueden penetrar al suelo por las lluvias o por las interacciones aire-suelo, como es el caso de las instalaciones fijas de petróleo, y el proceso industrial de la petroquímica de la Venta, por la quema y evaporación de productos del petróleo.

Para las condiciones climáticas que presenta el sitio de muestreo, la velocidad de degradación debe ser mucho mayor por la presencia de nutrimentos, luz, temperatura, oxígeno en los primeros centímetros de profundidad del sustrato, propiciando un ambiente

de fuerte intemperización (Ortiz, 1998), lo cual permite altas tasas de biodegradación por bacterias y oxidación fotoquímica pero las condiciones de inundación limitan dicha degradación. La presencia de microorganismos es de relevante importancia debido a la degradación selectiva de los hidrocarburos saturados y, en menor proporción, de HAP's.

Para los sitios analizados donde el petróleo fue derramado en zonas inundadas o sujetos a inundación, tiende a esparcirse sobre la superficie formando una capa continua y delgada. Esta tendencia a difundirse es el resultado de dos fuerzas físicas que actúan al mismo tiempo: la fuerza de gravedad, que ocasiona que el aceite se difunda horizontalmente y la tensión superficial del agua, que es generalmente más grande que la capa de aceite que se encuentra flotando sobre ella. La gravedad y la tensión superficial propician que el petróleo se difunda en aguas tranquilas, mientras que, la inercia y la viscosidad la retardan. El movimiento del hidrocarburo estará influenciado por los movimientos del agua ocasionados por corrientes y por el viento, y será semejante a la dispersión tridimensional de una columna de humo (Toledo, 1987).

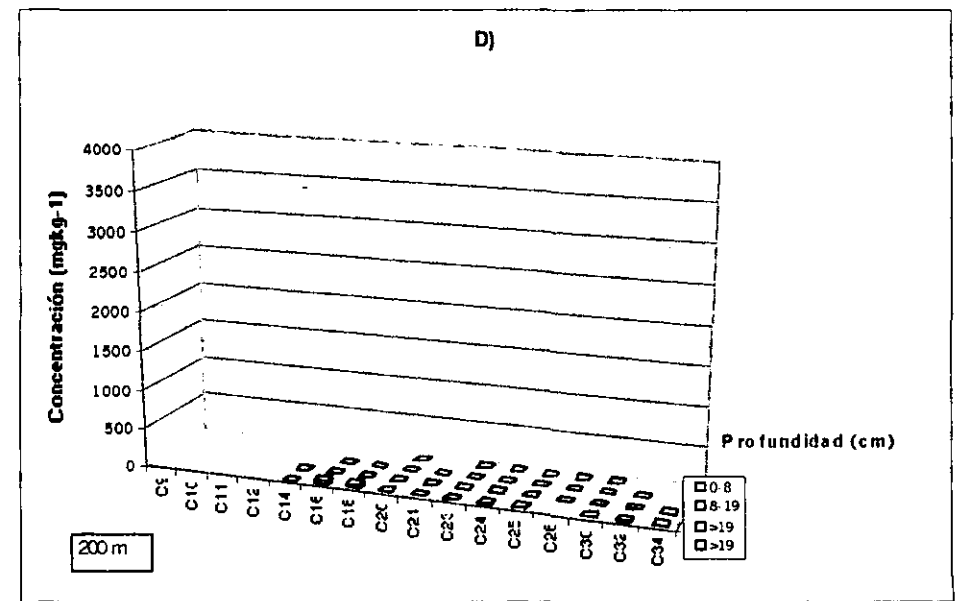
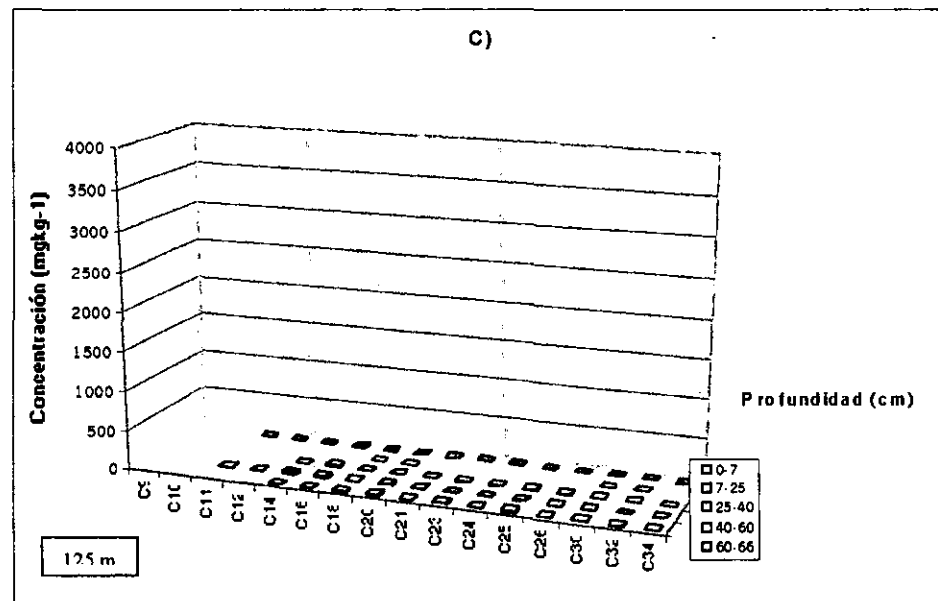
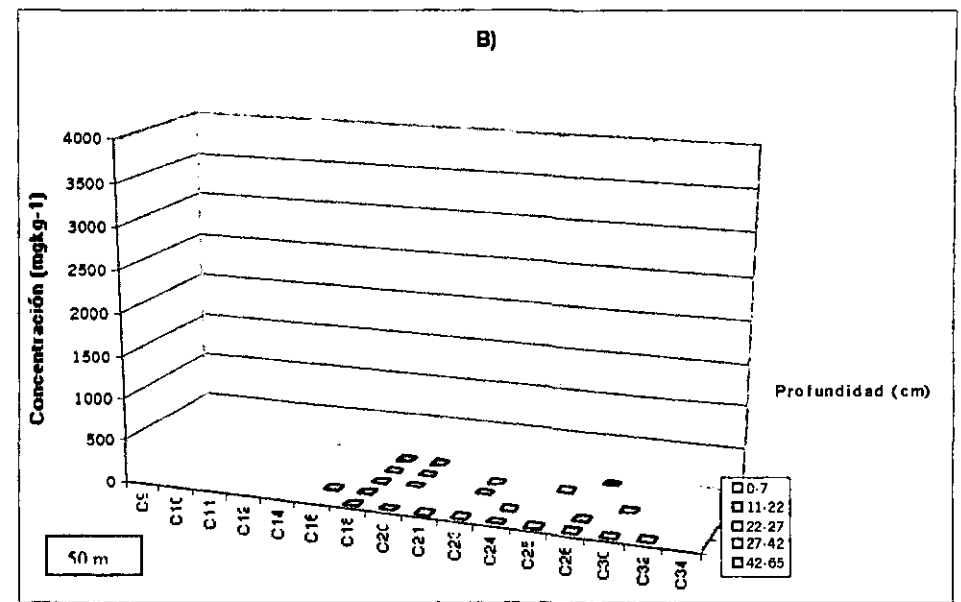
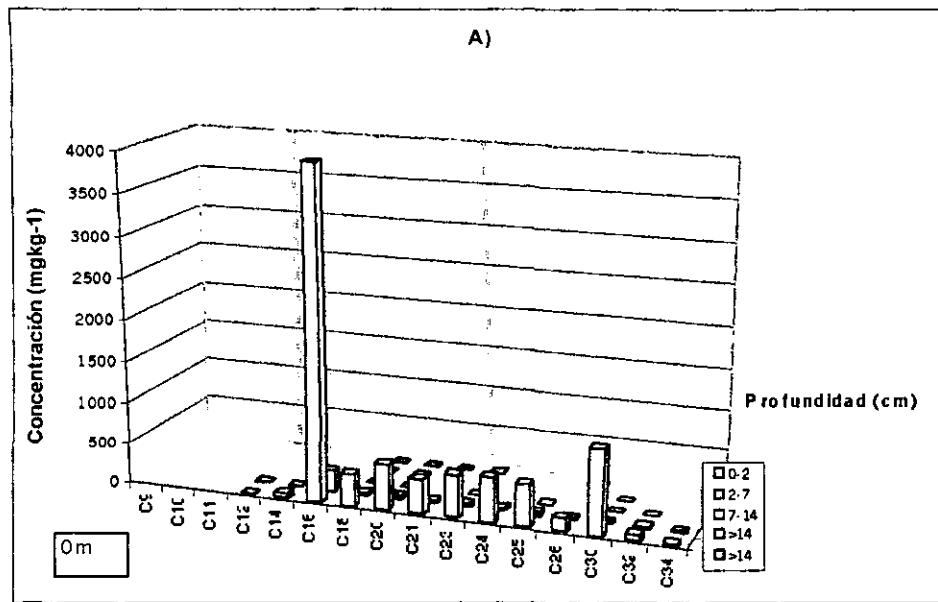


Figura 41. Concentración de hidrocarburos alifáticos en Aquiles Serdán, derrame reciente del Distrito de Agua Dulce.

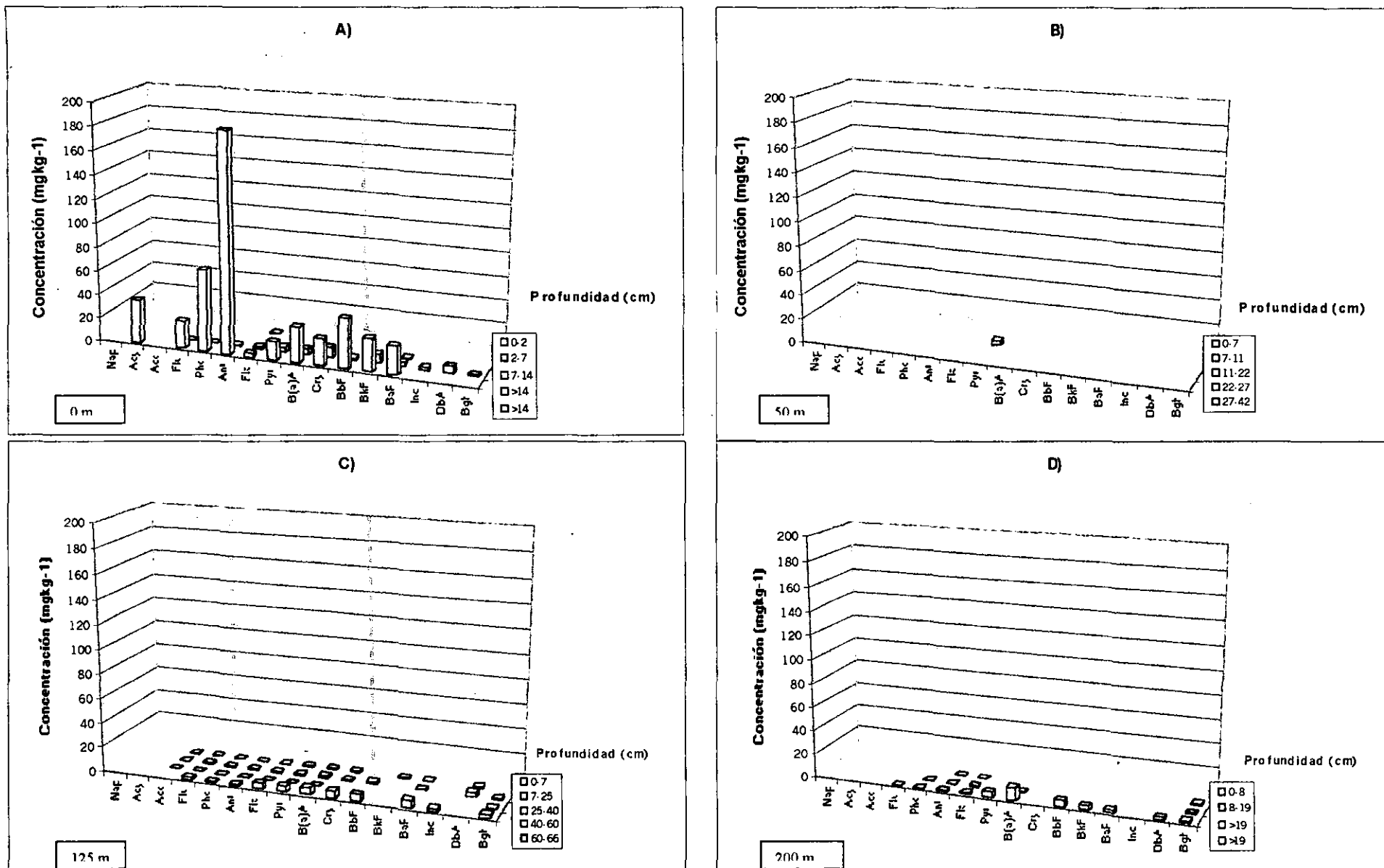


Figura 42. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en Aquiles Serdán, derrame reciente.

Agua en Derrames Recientes

HAP's: En la figura 43 y cuadro 16 se observa el comportamiento de mayor concentración en 5 Presidentes y Aquiles Serdán. En los derrames recientes particularmente, en Ogarrio (DR, ver anexo 3, tabla 1) no se detectan concentraciones de HAP's en los puntos del transecto a 10 y 30 m de distancia. En el derrame de Aquiles Serdán (DR2), en los puntos del transecto se detectaron HAP's estando por debajo del LPC, sin representar riesgo para la salud humana. En el derrame de 5 Presidentes (DR3), el benzo(a)pireno presentó un valor de $1.0 \mu\text{gL}^{-1}$ rebasando de manera excesiva el LPC ($0.01 \mu\text{gL}^{-1}$), en el punto del derrame y agua de noria se encontró mayor cantidad de HAP's pero sin rebasar el LPC. La presencia de HAP's en el manto freático es probablemente debido a la migración de pequeñas cantidades de material orgánico, como es el caso del ácido fúlvico que por su estructura tiene la capacidad de absorber y adsorber compuestos inorgánicos y orgánicos explicando estas bajas concentraciones detectadas (Schnitzer & Khan, 1972).

En forma general se observó que no hay una migración de HAP's hacia manto freático dado el alto contenido de materia orgánica en las capas superiores del suelo y la gran cantidad de arcilla que sirve de barrera impermeable que evitan este proceso, por lo tanto, la mayor concentración queda atrapada en dicho absorbente natural en función del material orgánico, contenido de aromáticos y polaridad que ayudan en la adsorción de los compuestos orgánicos hidrofóbicos (Luthy *et al.*, 1997).

La presencia de algunos HAP's de alto peso molecular en agua es debida probablemente al "efecto de solubilización" por material orgánico, indicando que la composición y concentración de HAP's no son controladas por su propia solubilidad como compuesto individual (Gao *et al.*, 1998).

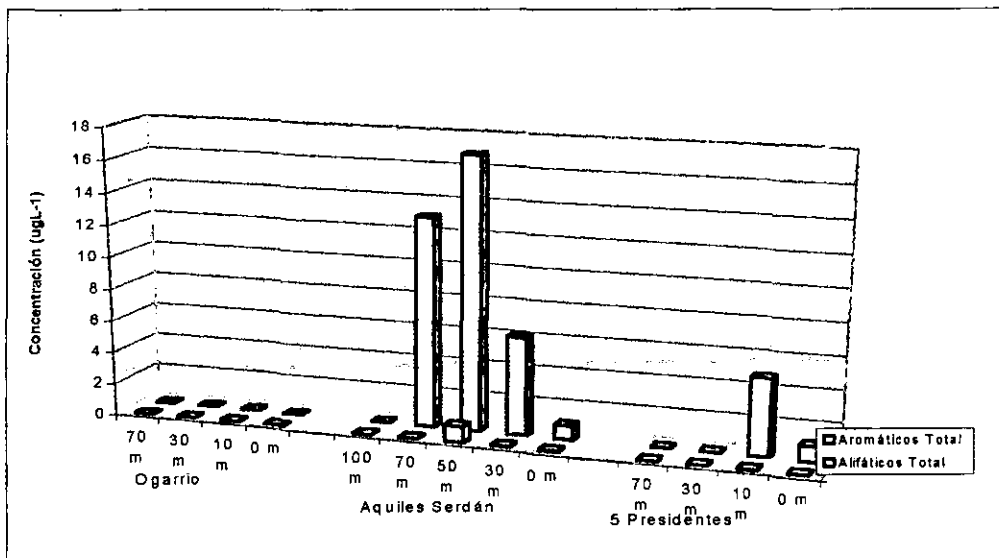


Figura 43. Concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y alifáticos en agua de los Derrames Recientes.

Alifáticos: En la figura 43 y cuadro 16 se observa que en Aquiles Serdán y 5 Presidentes se registraron las mayores concentraciones de alifáticos correspondiendo a las altas concentraciones detectadas en suelo, mientras que en Ogarrio su valor es mínimo lo cual puede ser explicado por la dilución o el lavado debido a ser un terreno inundado. Las muestras de agua freática de los derrames recientes, manifiestan el mismo comportamiento de los derrames antiguos. En Ogarrio, las concentraciones son muy pequeñas, sin embargo, en los siguientes derrames las concentraciones aumentan a valores cercanos a la unidad, incluso alcanzando una concentración de $5 \mu\text{gL}^{-1}$ con presencia de carbonos de bajo y alto peso molecular, definiendo así una movilidad mínima a pesar de los frecuentes derrames en la zona de estudio

De acuerdo con Beck *et al.*, (1993) puede ocurrir que las sustancias húmicas tengan un efecto competitivo en la adsorción de químicos orgánicos en agua, definiendo su presencia en este medio y, con ello, un comportamiento reversible o totalmente irreversible.

8.3 COMPARACIÓN DE LOS DERRAMES ANTIGUOS Y RECIENTES EN EL DISTRITO DE AGUA DULCE (ACTIVO 5 PRESIDENTES).

De acuerdo a la bibliografía consultada se esperaba encontrar en los derrames antiguos (> 30 años) compuestos de alto peso molecular y en los derrames recientes (< 6 meses) compuestos de bajo peso molecular en forma predominante, respectivamente, pero los resultados obtenidos muestran en general la amplia presencia de compuestos de bajo y alto peso molecular tanto de alifáticos como de HAP's en los sitios con derrames antiguos.

Las concentraciones de alifáticos en los derrames antiguos y recientes varían de un sitio a otro, notando que hay una mayor concentración total en los derrames recientes principalmente en el punto del derrame en la capa de petróleo de la superficie del suelo por arriba de los 5000 mgkg^{-1} rebasando el CLP (1000 mgkg^{-1}). En los tres derrames recientes analizados, las concentraciones se hallan distribuidas en compuestos de bajo y alto peso molecular (C12 al C32).

Los HAP's en estos sitios presentaron una distribución muy variada de un lugar a otro principalmente en el punto de origen con presencia de compuestos de bajo y alto peso molecular (acenaftileno al benzo(ghi)perileno), sin observar un predominio de compuestos de alto peso molecular.

Para el caso de los derrames antiguos en el punto de origen en la parte superficial se hallan los alifáticos por debajo de los 1500 mgkg^{-1} excepto en el derrame de Aquiles Serdán en el horizonte Hh (3282 mgkg^{-1}) debajo de la capa de chapopote enterrada como se observa en el cuadro 10. En los tres derrames analizados se observa una mayor presencia de los alifáticos a partir del C10 al C20. De igual modo, los HAP's presentan un comportamiento semejante a los derrames antiguos distribuido a partir del acenaftileno al benzo(ghi)perileno, sin observar un predominio de compuestos de bajo peso molecular.

De los cromatogramas resultantes se observa la característica del UCM que define la degradación de estos contaminantes por parte de la actividad biológica en función del tiempo del derrame. Los cromatogramas obtenidos de las muestras de suelo se observa la falta del UCM en los derrames recientes debido a la nula o baja participación de la degradación biológica.

El cambio en la composición química y la biodegradación son dos factores importantes a considerar en estudios de intemperización especialmente si ha transcurrido un periodo largo de los hidrocarburos al ambiente. Un crudo ligeramente degradado se identifica por la desaparición parcial de los n-alcenos. En uno moderadamente degradado han desaparecido casi todos los n-alcenos y desaparecido parcialmente los HAP's de bajo peso molecular. Y en un crudo altamente degradado se identifica por la pérdida total de n-alcenos y casi total de HAP's (Wang & Fingas, 1997).

En 5 Presidentes (figura 44), se observa la presencia de alifáticos de bajo peso molecular característico de un derrame reciente y la presencia de compuestos de alto peso molecular con una mayor concentración aunque también se encontraron compuesto de bajo peso molecular.

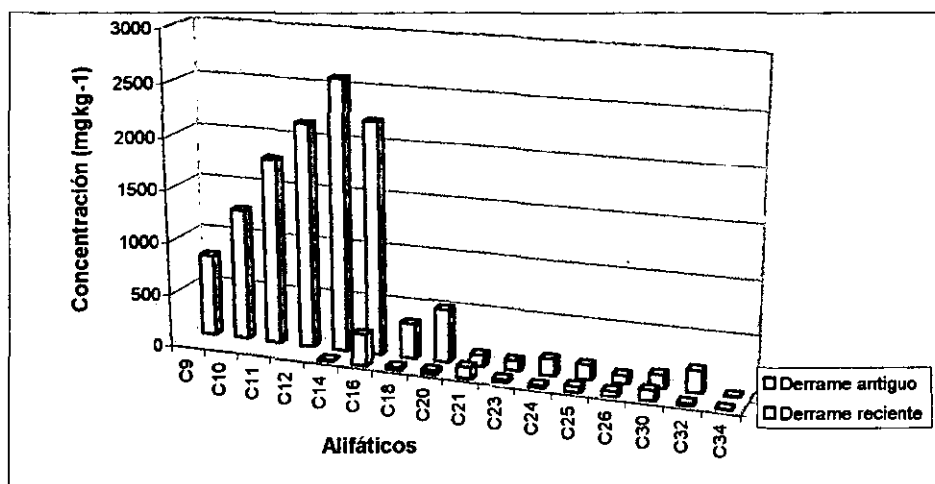


Figura 44. Comparación de compuestos alifáticos de un derrame antiguo y reciente de 5 Presidentes en el punto del derrame, Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

9. CONCLUSIONES

- La contaminación se ubica principalmente, en la cercanía de las instalaciones petroleras (líneas de conducción, baterías, deshidratadoras, en la petroquímica de la Venta) y terrenos con capas de chapopote enterradas, estableciendo puntos específicos de afectación. En los demás sitios se hallaron concentraciones por debajo del nivel de fondo calculado para la zona.
- Otra fuente de aporte de hidrocarburos alifáticos y HAP's es la combustión producida por los procesos industriales cercanos y la quema de vegetación que facilitan la dispersión de los contaminantes orgánicos a otros sitios distantes.
- La concentración de hidrocarburos alifáticos y HAP's es mayor en las muestras de suelo que en agua de pozo y del manto freático, y los procesos de retención, partición y degradación se efectúan en la parte superficial del suelo principalmente, en los horizontes orgánicos.
- El proceso de migración de los hidrocarburos alifáticos y HAP's en el suelo en forma vertical es mínimo, debido a los altos contenidos de materia orgánica y arcilla en el suelo, los cuales actúan como una barrera de retención para tales contaminantes orgánicos.
- La migración horizontal de hidrocarburos alifáticos y HAP's en el suelo está limitada a distancias cortas a partir del punto de derrame; en sitios sujetos a períodos de inundación y sequedad, el agua tiende a dispersar el derrame, como se observó en 5 Presidentes (derrame antiguo).
- En el caso de los sitios control, los niveles de fondo para los alifáticos fue de 50 mgkg^{-1} y de los HAP's de 8 mgkg^{-1} , definiendo así las concentraciones propias de la zona.
- El sitio control con vegetación quemada presentó 20 mgkg^{-1} de HAP's que rebasan el límite permisible de los Países Bajos.
- En los sitios control, el pireno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno e indeno rebasan el límite permisible para uso agrícola y en algunos puntos del sitio control en Tres Bocas, La Venta-Benito Juárez y La Azucena manglar quemado el límite permisible para uso residencial/recreativo.
- La mayor concentración de alifáticos totales en la microcuenca de La Venta se localizó en los perfiles 3 (El Ralé), 4 (detrás de la Petroquímica), 7 (El Paraíso) en el tercer horizonte, 8 (El Paraíso) en la superficie y tercer horizonte, y 12 y 14, donde se rebasa el criterio de 100 mgkg^{-1} propuesto por EPA.
- Para la microcuenca de La Venta en algunos sitios, los HAP's (pireno, benzo(a)antraceno, fluoranteno y criseno) en suelo: rebasan el límite permisible para

uso agrícola de acuerdo al criterio de limpieza de Profepa y al límite permisible de Canadá y Países Bajos.

- La mayor concentración en el sitio del derrame de hidrocarburos alifáticos en los derrames antiguos siempre se observó en los sitios donde ocurrió el derrame. Los derrames muestreados en las distintas localidades mostraron el siguiente orden: 5 Presidentes > Aquiles Serdán > La Venta rebasando el límite permisible de EPA y el criterio de limpieza de Profepa. Para los HAP's este orden fue de: Aquiles Serdán > 5 Presidentes > La Venta rebasando el límite permisible de los Países Bajos.
- La extensión de los contaminantes orgánicos en la parte superficial en los derrames antiguos fue: 5 Presidentes > Aquiles Serdán > La Venta.
- En los derrames antiguos existe una migración de hidrocarburos alifáticos y HAP's dentro de los primeros 20 cm de profundidad, presentando altas concentraciones en puntos próximos al derrame.
- En los derrames antiguos se observó lo siguiente: 1) En la Venta el pireno y fenantreno rebasan el criterio de limpieza en los sitios a 0 y 75 m (parte baja) de distancia; 2) 5 Presidentes en la batería 4: el fenantreno, pireno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno rebasan el criterio de uso residencial/recreativo en la mayor parte de los sitios analizados y 3) Aquiles Serdán, el pireno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno y el benzo(b)fluoreno rebasan el criterio agrícola y de uso residencial en el punto del derrame y a 50 m de distancia de acuerdo a Profepa y la norma Canadiense.
- También en los derrames recientes se encontraron las mayores concentraciones en los sitios donde ocurrió el derrame, tanto de hidrocarburos alifáticos como de HAP's, en el siguiente orden: 5 Presidentes > Aquiles Serdán > La Venta rebasando el criterio de limpieza de Profepa y el límite permisible de los Países Bajos respectivamente.
- La extensión de los contaminantes orgánicos en la parte superficial en los derrames recientes fue: Aquiles Serdán > Ogarrio > 5 Presidentes.
- En los derrames recientes no existe migración de hidrocarburos alifáticos y HAP's, pues, sólo se hallan en el horizonte superficial con altas concentraciones principalmente en el punto del derrame.
- En los derrames recientes se observó lo siguiente: 1) En Ogarrio en los sitios del derrame y a 10 y 30 m de distancia del mismo se rebasa el límite permisible de limpieza de uso agrícola y residencial/recreativo para el pireno, fenantreno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno; 2) En Aquiles Serdán en el derrame y a 50, 125 y 200 m de distancia del mismo se rebasa el límite permisible de limpieza para uso industrial para el fenantreno, pireno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno; y 3) 5 Presidentes en el derrame y a los 10, 30 y 70 m de distancia, del mismo se rebasa el límite permisible de limpieza para uso

industrial para el pireno, fenantreno, benzo(a)antraceno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno.

- El sedimento del agua presentó una mayor concentración de HAP's sin rebasar el límite permisible. Y el agua de perforación, agua potable y freática presentan concentraciones muy inferiores al sedimento, sin representar riesgo para la salud humana. Excepto el benzo(a)antraceno que rebasa el límite permisible Canadiense para agua potable en el control de Tres Bocas, sitio 1 con un valor de $1.1 \mu\text{gL}^{-1}$; y el derrame reciente en Aquiles Serdán, punto 2 con un valor de $1.0 \mu\text{gL}^{-1}$.
- De igual forma, los alifáticos en agua en la mayoría de los sitios tuvieron bajas concentraciones, sólo en el sitio control de Tres Bocas se registraron los valores más altos de 11.85 y $12.49 \mu\text{gL}^{-1}$ en los sitios 1 y 2, respectivamente.
- La presencia de los compuestos alifáticos y HAP's en algunos sitios en agua freática se debe probablemente a la solubilidad al agua y a la asociación de éstos con ácidos orgánicos favoreciendo su movilidad a través del suelo hasta alcanzar el agua freática, como se ha encontrado en estudios previos realizados por otros autores.
- Es necesario establecer límites de limpieza definitivos para nuestro país de acuerdo a las experiencias realizadas para evitar, con ello, el considerar límites de limpieza ajenos a las condiciones de México.
- Los suelos analizados presentan horizontes orgánicos en los primeros centímetros de la superficie, encontrando capas de fermentación seguidas de capas de humificación y de la capa mineral, A o C definiendo a los suelos como Histsoles asociados con Gleysoles y, en dos casos, como Gleysoles.
- El pH en la mayoría de los perfiles tienden a ser de ligeramente ácidos a ácidos en los Histsoles, mientras que en los Gleysoles muestran una tendencia ácida.
- El porcentaje de materia orgánica en la mayor parte de los sitios analizados es definido como extremadamente rico (>4.21) por la gran cantidad de material vegetal presente, que desciende conforme aumenta la profundidad.
- El contenido de materia orgánica es un factor decisivo en la retención de los contaminantes orgánicos (alifáticos y HAP's), limitando la lixiviación de dichos contaminantes.
- La textura predominante es la arcillosa y/o franco arcillosa con una estructura masiva en el horizonte C, lo cual limita el movimiento vertical del agua y de contaminantes.
- La humedad registrada rebasa la capacidad de campo a causa del manto freático somero, del alto contenido de arcilla y el alto porcentaje de materia orgánica, que retienen un mayor volumen de agua.

10. BIBLIOGRAFIA

1. American Petroleum Institute. 1987. Manual of Sampling and Analytical Methods for Petroleum Hydrocarbons in Groundwater and Soil. API Publication No. 4449 Health and Environmental Sciences Department. Meryl Kane. USA.
2. Ayllon T. T. & J. F. Chavez. 1994. México: sus recursos naturales y su población. Segunda Edición. Limusa. México.
3. Barcelona, M.; A. Wehrmann; J. F. Keely & W. A. Pettyjohn. 1990. Contamination of Groundwater Prevention Assessment, Restoration. Noyes Data Corporation. New Jersey.
4. Beck, A. J., K. C. Jones, M. H. D. Hayes & V. Mingel. 1993. Organic Substances in Soil and Water. Royal Chemical Society. United Kingdom.
5. Bedair, H. M. & 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.
6. Best A. G. & P. Dawson. 1993. Environmental Analysis Using Gas Chromatography. Gas Chromatography. P. J. Baugh. Oxford University Press. New York.
7. Bohn, H. L.; B. L. McNeal & G. A. O'Connor. 1993. Química del Suelo. Limusa. México.
8. Block, R., H. Stroo & G. H. Swett. 1993. Bioremediation –Why doesn't it Work Sometimes. Chemical Engineering Progress. August: 44-50.
9. Blumer, M. & W. W. Youngblood. 1975. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Recent Sediments. Science. 188: 53-55.
10. Bidleman, T. F.; A. A. Castleberry; W. T. Foreman; M. T. Zaransk & 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.
11. Bock, S. Y. 1996. Efectos de Hidrocarburos sobre la Producción Agrícola en Cunduacan, Tabasco. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Puebla-Puebla.
12. Bojorquez, T. L. A. & O. García. 1995. Aspectos Metodológicos de la Auditoría Ambiental. PEMEX: Ambiente y Energía Los retos del futuro. Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM-PEMEX. pp 59-72.
13. Bonazountas, M. & D. Kallidromitou. 1993. Mathematical Hydrocarbon Fate Modelling in Soil Systems. Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils. Lewis Publishers. USA.
14. Crouch, S. M. 1990. Check Soil Contamination Easily. Chemical Engineering Progress. September: 41-45.
15. Chappin, R. G. & L. R. Summerlin. 1988. Química. Publicaciones Cultural. México.
16. Chiou, C. T.; S. E. McGroddy & D. E. Kile. 1998. Partition Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Soils and Sediments. Environmental Science Technology. Vol. 32(2):264 – 269.
17. Diario Oficial de la Federación. 1996. Decreto que reforma, adiciona y deroga diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Viernes 13 de Diciembre: 5-36.

18. Díaz, D. M. 1995. El Régimen Jurídico Ambiental del Subsuelo en México. PEMEX: Ambiente y Energía Los retos del futuro Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM-PEMEX. México. pp 35-55.
19. Dragun, J. 1998. The Soil Chemistry of Hazardous Material. Second Edition. Amherst Scientific Publishers. Massachussetts.
20. EPA. 1983. Hazardous Waste Land Treatment. Municipal Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development. U.S.A. Cincinnati, Ohio.
21. Fan, Chi-Yuan & S. Krishnamurthy. 1995. Enzymes for Enhancing Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soils: A Brief Review. Journal of the Air & Waste Management Association. June 45:453-460.
22. Fessenden, R. J. & J. S. Fessenden. 1982. Química Orgánica. Iberoamericana. México.
23. Fränzle, O. 1993. Contaminants in Terrestrial Environments. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Germany.
24. Fuh, T. L.; J. C. Little & W. W. Nazaroff. 1985. Transport and Organic Contaminants in Groundwater. Environmental Science Technology. 19 (5): 384-392.
25. Gao, J. P., J. Maguhn, P. Spitzauer & A. Kettrup. 1998. Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH's) in Pore Water and Sediment of a Small Aquatic Ecosystem. 69 (3): 227-242.
26. Gauthier, T. D., E. C. Shane, W. F. Guerin, W. R. Seitz & C. L. Grant. 1986. Fluorescence Quenching Method for Determining Equilibrium Constants for Polycyclic Hydrocarbons Binding to Dissolved Humic Materials. Environmental Science Technology. 20(11): 1162 – 1166.
27. González, A. R. L. & R. R. Quintero. 1995. La Biotecnología Ambiental en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.
28. Gutiérrez, E. M. 1990. Los Residuos Sólidos Peligrosos: ¿ Un Riesgo sin Solución?. Ciencias. No. 20 UNAM.
29. INEGI. 1987. Los Municipios de Tabasco. Enciclopedia de los Municipios de México. México.
30. INEGI. 1988. Síntesis Geográfica del Estado de Tabasco. México.
31. Iturbe, R. & I. Navarro. 1997. Lineamientos para la Evaluación y Saneamiento de Sitios Contaminados por Hidrocarburos en México. In Memoria En el Marco del Programa de Cooperación Técnica México-Japón. Seminario Internacional sobre Restauración de Sitios Contaminados. pp 73 – 82.
32. Jury, W. A. 1989. Chemical Movement through Soil. Vadose Zone Modeling of Organic Pollutants. Stephen C. Hern, Susan M. Melancon. Lewis Publishers Inc. USA.
33. Jury, W. A.; D. Russo; G. Streile & H. E. Abd. 1990. Evaluation of Volatilization by Organic Chemicals Residing Below the Soil Surface. Water Resources Research. 26(1): 13-20.
34. Karimi-Lottabad, S., M. A. Pickard & M. R. Gray. 1996. Reactions of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons on Soils. Environmental Science & Technology. 30 (4): 1145-1151.
35. Kostecki, & Calabrese. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel contamination. Lewis Publishers. USA.

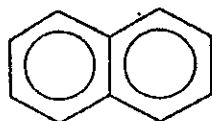
36. Lesser, I. J. M. 1995. Prospección de Contaminación de Acuíferos por Hidrocarburos. *Geólogos*. 1(6):5-8.
37. López, M. A. 1991. Causas, Procesos y Consecuencias de la Contaminación del Suelo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
38. Luthy, R. G., G. R. Aiken, M. L. Brusseau, S. D. Cunningham, P. M. Gschwend, J. J. Pignatello, M. Reinhard, S. J. Traina, W. J. Weber Jr. & J. C. Westall. 1997. Sequestration of Hydrophobic Organic Contaminants by Geosorbents. *Environmental Science & Technology*. 31:3341-3347.
39. Mackay, M. D.; P. V. Roberts & J. A. Cherry. 1985. Transport of Organic Contaminants in Groundwater. *Environmental Science & Technology*. 19(5): 384-392.
40. McBride, M. B. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. New York Oxford. USA.
41. McGroddy, S. E. & J. W. Farrington. 1995. Sediment Porewater Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Three Cores from Boston, Massachusetts. *Environmental Science & Technology*. 29(6): 1542-1550.
42. Menzie, C. A.; B. B. Potocki & J. Santodonato. 1992. Exposure to Carcinogenic Polycyclic Hydrocarbons in the Environment. *Environmental Science & Technology*. 26:1278-1284.
43. Morrill, L. G.; B. C. Mahilum & S. H. Mohiuddin. 1982. *Organic Compounds in Soils: Sorption, Degradation and Persistence*. Ann Arbor Science Publishers. Michigan.
44. Murray, B. McB. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press. USA.
45. Ney, R. 1990. *Fate and Transport of Organic Chemicals in the Environment*. Govern. Inst. Maryland.
46. Nyer, K. E. 1992. *Groundwater Treatment Technology*. Second Edition. Van Nostrand Reinhold. New York.
47. Ortiz, S. R. 1998. Identificación y Migración de Compuestos Orgánicos Volátiles de Gasolina en Suelos Aledaños a la Refinería de Tula, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM. México.
48. 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.
49. Parr, J. L.; G. Walters & M. Hoffman. 1991. *Sampling and Analysis of Soils for Gasoline Range Organics. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwaters: Analysis Fate Environmental and Public Health Effects Remediation*. Volume 1. Lewis Publishers. USA.
50. PEMEX. 1988. *El Petróleo. Gerencia de Información y Relaciones Públicas*. México
51. PEMEX. 1999. *Informe 1999: Seguridad, Salud y Medio Ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental. México
52. PEMEX. 2000. *Boletines de Prensa. Pemex. Boletín No. 75/2000*. México.
53. PROFEPA. 1999. *Restauración de Suelos Contaminados. Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados*. Pagina web. México.
54. Poder Ejecutivo Federal. 1996. *programa Forestal y de Suelo 1995 - 2000*. Dirección General de Comunicación Social de la Semarnap. México.

55. Preslo, L.; M. Miller; W. Suyama; M. Mclearn; P. Kosteci & E. Fleischer. 1989. Available Remedial Technologies for Petroleum Contaminated Soils. Vol. 1. Lewis Publishers. USA.
56. Quadri, T. G. 1994. Industria y Política Ambiental. El Nacional. Sábado 18 de Junio. México.
57. 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.
58. SEMARNAP. 1996. Los Suelos de Tabasco Restauración, Conservación y Uso. Gobierno Constitucional del Estado de Tabasco
59. Schnitzer, M. & S. U. Khan. 1978. Soil Organic Matter Developments in Soil Science 8. Elsevier.
60. Steinberg, M. S. 1992. Persistence of Several Volatile Aromatic and Halogenated Hydrocarbons in a Low Organic Carbon Calcareous Soil. Chemosphere. 24(9):1301-1315.
61. Steinberg, S.; J. P. Fairley, Jr. & D. K. Kreamer. 1994. Slow Vapor Phase Desorption of Toluene from Several Ion-Exchanged Montmorillonites. Journal of Soil Contamination. 3(3):249-264.
62. Testa, M. S. 1994. Geological Aspects of Hazardous Waste Management. Lewis Publishers. USA.
63. Toledo, A. 1987. Petróleo y Medio Ambiente: una visión global. Centro de Ecodesarrollo. México.
64. Tölgyessy, J. 1993. Chemistry and Biology of Water, Air and Soil Environmental Aspects. Elsevier. Czechoslovakia.
65. Vázquez, B. A. & F. Páez. 1987. El problema crucial: la contaminación. Centro de Ecodesarrollo. México.
66. Viejo, Z. M. 1995. El Paquete Ecológico de PEMEX. Internalización de Costos Ambientales. Programa Universitario de Energía. México.
67. Wang, Z. & M. Fingas. 1997. Developments in the analysis of petroleum products and oil spill related environmental samples by gas chromatography. Journal of Chromatography A. 774:51-78.
68. Wanga, Z., M. Fingas & D. S. Page. 1999. Oil spill identification. Journal Chromatography A. 843: 369-411.
69. Yong, R. N.; A. M. O. Mohamed & B. P. Warkentin. 1992. Principles of Contaminant Transport in Soils. Elsevier Science Publishers. Netherlands.
70. Yunker, M. B. R. W. Macdonald, D. Goyette, D. W. Paton, B. R. Fowler, D. Sullivan & J. Boyd. 1999. Natural and Anthropogenic Inputs of Hydrocarbons to the Strait of Georgia. The Science of the Total Environment. 225:181-209.
71. Zavala, C. J., A. Ruiz & D. J. Palma. 1996-1997. Contaminación por Metales Pesados en las Tierras del Campo Petrolero Samaria, Tabasco. La Investigación Edafológica en México. México.

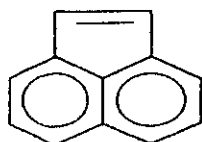
11. ANEXOS

ANEXO 1. ESTRUCTURAS QUIMICAS DE HIDROCARBUROS AROMATICOS POLINUCLEARES

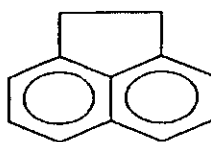
Naftaleno



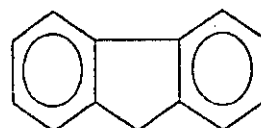
Acenaftileno



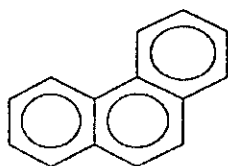
Acenafteno



Fluoreno



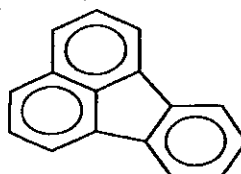
Fenantreno



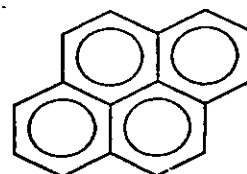
Antraceno



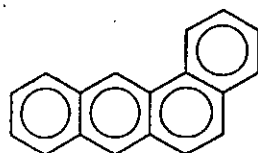
Fluoranteno



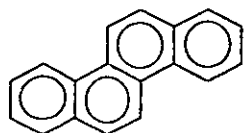
Pireno



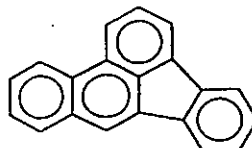
Benzo(a)antraceno



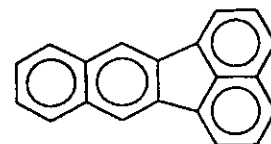
Criseno



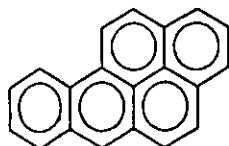
Benzo(b)fluoranteno



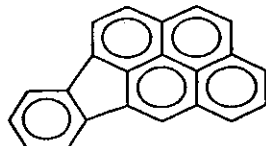
Benzo(k)fluoranteno



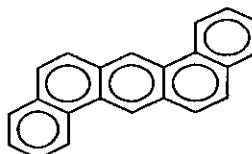
Benzo(a)pireno



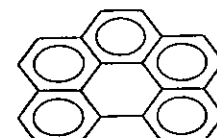
Indeno(1,2,3-cd)pireno



Dibenzo(a,h)antraceno



Benzo(ghi)perileno



ANEXO 2. CONTENIDO DE HIDROCARBUROS AROMATICOS Y ALIFATICOS EN SUELOS DEL DISTRITO DE AGUA DULCE, TABASCO.

Tabla 1. Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en suelo de la Microcuenca de la Venta, Tabasco.

Sitio campo	Horizonte (cm)	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs total
(mgkg ⁻¹)																		
Panga vieja, P1	0-10					0.07	0.10	0.10	0.05		0.04							0.36
	10-35							0.07	0.03		0.05	0.04						0.20
	35-63		0.02	0.04	0.08	0.05	0.14	0.06	0.06		0.09	0.11	0.07	0.05	0.13	0.06	0.05	1.01
El Ralé, P2	63-93							0.06	0.04		0.05	0.13	0.04					0.33
	30-59							0.26	0.12		0.85	2.54	0.22	0.36				4.35
	59-77	0.20	0.13	0.33	0.86	0.16	0.18	0.26	0.20	1.30			0.21					3.82
El Ralé, P3	77-85			0.19	0.34	0.18		0.14	0.26	0.56			0.43					2.10
	85-120		0.05	0.06	0.29	0.28	0.33	0.72	0.07		0.29							2.10
	20-32																	
El Ralé, P4	32-47					0.09	0.22	0.21	0.30									0.81
	47-99							0.13	0.10	0.46	0.09							0.78
	99-120					0.05	0.17	0.18	0.22									0.62
El Ralé, P5	0-38					1.55			1.09		12.05	52.68	8.47	1.49				77.33
	38-46					0.09	0.16	0.17	0.08	0.71	0.14							1.36
	46-120		0.06	0.06	0.05	0.14	0.26	0.22	0.08		0.16	0.18	0.09	0.14	0.08	0.21	0.06	1.78
El Ralé, P6	0-30			0.41	0.25		0.25	1.28	0.56		0.69	6.81	0.55	1.20	0.26	4.03	1.13	17.43
	30-40							0.16	0.12		0.35							0.63
	40-53		0.07	0.22	0.10	0.08	0.33	0.16	0.09		0.12							1.17
El Ralé, P7	53-76			0.10	0.06						0.10	0.22	0.13	0.17				0.78
	76-109		0.05	0.06	0.09	0.09	0.30	0.10	0.10	0.24	0.15	0.15	0.12	0.34	0.09	0.13		2.01
	0-34							0.22	0.20		0.22	0.30	0.21	0.27				1.41
El Paraíso, P8	34-40									0.02	0.08	0.14	0.10	0.09				0.43
	40-74		0.05	0.05	0.17	0.10	0.26	0.11	0.19									0.93
	0-26			0.18	0.19			0.16	0.06		0.33	2.16	1.04	0.91	0.56	2.84	0.99	9.42
El Paraíso, P9	26-37			0.18	0.23		0.02	0.17		0.20	0.05							0.85
	37-54			0.23	0.23	0.02	0.08	0.04		0.02	0.02	1.38	1.33	1.32	0.54	0.67	0.33	6.18
	54-80			0.18	0.22	0.07	0.02	0.04										0.53
El Paraíso, P10	80-95										0.10							0.10
	0-48										0.26							0.26
	48-59										0.03							0.03
Panga Vieja, P9	59-69			0.16							0.18		1.03			0.69	285.35	287.41
	69-89			0.05			0.05			0.07	0.10							0.27
	89-100			0.09	0.08			0.01		0.01	0.08							0.26
Panga Vieja, P9	100-120			0.17	0.13					0.14	0.12	0.18	0.49	0.10			2.27	3.61
	45-59			0.05				0.24	0.11	0.15	0.72	0.60	4.04	1.57				7.49
	59-69			0.00	0.02		0.01		0.07	0.09	0.16							0.34
Panga Vieja, P9	69-95							0.13	0.24			0.12	0.58	0.12	0.13	0.78	0.10	2.20

Sitio	Horizonte	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs total	
campo	(cm)	(mgkg ⁻¹)																	
Bateria de la Venta, P10	20-40																		
La Venta, P11	0-10																		
	10-20																		
	20-30							0.20											0.20
	30-40							0.19											0.19
petróleo	40-50																	1.02	1.02
				3.90			3.28												7.19
Sn. Ramón, P12	0-20								0.08			0.09		0.15					0.32
	110																		sin muestra
Sn. Ramón, P13	30-40			0.54															0.54
	110																		sin muestra
Ogarrio, P14																			sin muestra
	110																		sin muestra
Ogarrio, P15	0-35			0.43															0.43
	110																		sin muestra
La Venta, P16	0-18			0.18															0.18
	18-29			0.15															0.15
	29-39			0.14		0.10													0.24
	39-69																		sin muestra

Nota:

Nap = Naftaleno.

Acy = Acenaftileno

Ace = Acenafteno

Flu = Fluoreno

Phe = Fenantreno

Ant = Antraceno

Fla = Fluoranteno

Pyr = Pireno

B(a)A = Benzo(a)antraceno

Cry = Criseno

BbF = Benzo(b)fluoranteno

BkF = Benzo(k)fluoranteno

BaP = Benzo(a)pireno

DbA = Dibenzo(ah)antraceno

Bgh = Benzo(ghi)perileno

Ind = Indeno(1, 2, 3-cd)pireno

Tabla 2. Descripción de Hidrocarburos alifáticos (C9-C34) en suelos de la Microcuenca la Venta, Tabasco.

Sitio campo	Horizonte (cm)	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20 (mgkg ⁻¹)	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	Alifáticos total
Panga vieja, P1	0-10					11.8	8.0	0.6	0.7	0.3	1.3	0.7	2.7	1.7	3.3			31.0
	10-35					11.1	6.7	0.4	0.5	0.2	0.7	0.5	2.6	1.1				23.9
	35-63	1.5	2.1			16.3	7.5	0.6	0.8	0.6	1.2	2.2	3.7	1.4				37.9
El Ralé, P2	63-93					15.1	8.2	0.6	0.6	0.3	0.6	1.0	0.5	1.4	2.0			30.2
	30-59					31.1	13.0	1.1	1.3	0.6	1.5	2.7	5.7	2.4	5.8	7.1	17.6	90.0
	59-77					11.5	11.7	1.1	1.3	0.6	3.3	4.1	10.1	3.5	6.0			53.3
El Ralé, P3	77-85						17.9	1.6	2.2	0.9	3.0	2.4	9.9	4.5	9.0			51.5
	85-120											0.7	0.5	4.4				5.6
	20-32					7.7	13.5	1.7	1.9	1.8	3.0	3.5	11.2	10.4	26.5	32.7	33.6	147.3
El Ralé, P4	32-47					4.2						1.0	3.1	6.0				14.3
	47-99						10.6	0.8	0.9	0.5	0.8	1.2	2.7	2.1				19.5
	99-120						5.3							2.4				7.7
El Ralé, P5	0-38						37.5	6.0	7.0	29.3	18.4	13.0	37.8	29.0	150.4	150.9	235.2	714.6
	38-46	27.8	23.1	9.9	5.9	1.5												68.3
	46-120						1.1						0.2	0.3				1.7
El Ralé, P6	0-30					6.4	4.2			0.9	0.6	0.0	0.7	1.3	2.7	2.7	3.1	22.5
	30-40					10.5	8.2	0.6	1.0	1.3	4.6	6.6	9.9	7.1	14.1	1.8	2.1	68.0
	40-53		6.9								0.4	0.5	1.0	0.7	0.0	2.7		12.2
El Ralé, P7	53-76							0.4										0.4
	76-109	10.0	6.1	1.5	1.8	14.4	4.7	0.3	0.2	0.2	0.4	0.9	1.7	0.4				42.6
	0-34					3.3							1.2	1.8	12.0			18.3
El Paraiso, P8	34-40					1.6								1.6				3.1
	40-74					2.1					0.4	0.5	1.4	0.8				5.3
	0-26										0.5	0.5	2.5	2.6	13.2	18.5	46.0	83.9
El Paraiso, P9	26-37								0.5	0.5	1.5	1.6	4.4	4.8	21.8	31.5	28.4	95.0
	37-54		12.0			3.4			0.2	0.2	0.5			77.5	76.9	184.3	203.1	558.1
	54-80						0.6	0.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	17.4				19.0
El Paraiso, P10	80-95						0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	24.3				25.5
	0-48					0.9					0.2	0.2	0.3	19.4	95.2	149.6		265.8
	48-59									0.2	0.2	0.2	0.2	14.0				14.8
El Paraiso, P11	59-69					6.5	2.5		0.9	0.8	0.1	0.5	0.6	83.5	45.6	147.2	203.1	491.3
	69-89					3.4	1.4	0.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	22.3	27.8			55.7
	89-100								0.1	0.1	0.1	0.3	0.9	0.5				2.0
Panga Vieja, P9	100-120										0.0	0.1	0.1	0.2				0.5
	45-59	3.9	3.8			9.7	3.2	0.2	0.2	0.1	0.4	0.6	1.7	2.7	2.8	5.5	8.8	43.3
	59-69	2.6	5.7	0.0	5.3	9.2	2.8	0.1			0.3	0.2	0.7	0.6				27.4
Bateria de la Venta, P10	69-95					9.0	3.6	0.2	0.1	0.1	0.7	0.1	2.3	0.9	2.5	3.0		22.6
	20-40																	
	0-10		8.4	4.0	15.9	15.2	79.7	33.7	5.7	4.6	4.5	10.9	4.7	3.4	7.9	3.9	2.3	204.8
La Venta, P11	10-20					4.8	14.7	55.4	0.2	2.4	1.0	2.7		0.2	7.3	0.5		89.2
	20-30	6.7	36.4		53.9	153.9	271.3	674.7	9.3	39.0	23.1	14.6	5.3	8.6	7.5	9.4	1.3	1315.1
	30-40	927.6	525.0	2339.8	1057.7	779.5	1113.3	5692.5	144.0	120.1	225.7	31.3	197.7	128.7	51.2	14.5	4.2	13352.6

Sitio campo	Horizonte (cm)	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20 (mgkg ⁻¹)	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	Alifáticos total
	40-50						1.6	17.1	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5		21.3
petróleo		1726.9	2397.1	3077.5	2037.0	1845.2	4423.4	8186.7	86.8	281.9	186.6	223.6	389.7	250.8	140.5	91.3	53.1	25398.0
San Ramón, P12	0-20	3.4				2.9	9.4	102.9	3.0	0.4	0.9	0.2	0.1	1.4	0.8	0.9	1.7	128.2
	110																	sin muestra
San Ramón, P13	30-40						0.8	38.4	2.3	0.6	1.8	6.5	3.4	0.9	6.3	2.9	1.3	65.3
	110																	sin muestra
Ogarrio, P14	0-20					17.4	27.0	490.4	10.4	2.5	2.0	12.8	25.9	3.4	7.8	9.9	2.3	611.6
	110																	sin muestra
Ogarrio, P15	0-35										0.7	0.8	0.4	0.7	4.7	5.7	1.4	14.4
	110																	sin muestra
La Venta, P16	0-18						0.2		0.2	0.0	0.2		0.4	0.8	4.0	15.8	5.3	26.8
	18-29						0.3	2.9	0.3	0.5	0.4	1.1	1.3	1.2	6.5	4.7	12.9	32.2
	29-39										0.12	0.70	0.21	1.00	1.92	0.00	15.69	19.63
	39-69																	sin muestra

Tabla 3. Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en suelo de los Sitios Control en el Distrito de Agua Dulce.

Sitio en Campo (cm)	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs total
[mgkg ⁻¹]																	
Sitio control 1 (rancho Isidro Brocas, camino La Venta-Cinco Presidentes)																	
1 (0-30)																	ND
1 (30-40)							0.06	0.06	0.04	0.03							0.18
1 (40-60)																	ND
2 (0-20)																	ND
2 (20-50)			1.21			0.41		0.43									2.06
2 (50-60)						0.10	0.11	0.21	0.10								0.52
3 (0-30)																	ND
3 (30-40)						0.20		0.55	0.60								1.35
3 (40-60)			0.05				0.16	0.08		0.05							0.34
Sitio control 2, rancho Juan Gómez Córdoba, camino La Venta-Benito Juárez																	
Hojas																	ND
1 (0-10)		0.09	0.14	0.16	0.16	0.23	0.19	0.19	0.22	0.16	2.72	0.21	0.48		0.97	0.62	6.52
1 (10-14)																	ND
1 (14-22)					0.07		0.12	0.12									0.31
1 (22-30)																	ND
2 (0-15)		0.15				0.18											0.33
2 (15-35)							0.31	0.30	0.58	0.25							1.43
2 (35-45)																	ND
3 (0-10)																	ND
3 (10-15)								0.28	0.57	0.44							1.29
3 (15-25)																	ND
Sitio control 3, Ranchería Tres Bocas																	
1 (0-15)																	ND
1 (15-30)																	ND
1 (>30)																	
2 (0-5)							0.50										0.50
2 (5-35)								0.13					1.35				1.48
2 (35-60)																	ND
2 (60-75)																	ND
3 (0-5)				0.17	0.16	0.16		0.14					0.28	0.58		3.88	5.37
3 (5-19)						0.03										0.35	0.38
3 (19-35)				0.13					0.45								0.58
3 (35-70)																	ND
3 (70-100)																	ND
3 (100-140)																	ND
3 (140-160)																	ND
3 (160-180)					0.12	0.11	1.16		0.48							0.62	2.49
Sitio control 4, La Venta - B. Juárez																	
1 (0-20)																	ND
1 (20-60)								0.18									0.18
1 (>60)								0.28									0.28
2 (0-20)								0.77									0.77

Sitio en	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs
Campo (cm)																	total
2 (20-40)																	ND
2 (>40)																	ND
3 (0-13)								0.08									0.08
3 (13-26)								0.14		2.15	2.98		1.33	1.14			7.74
3 (26-40)								0.12									0.12
3 (40-60)																	ND
3 (60-70)								0.96									0.96
Sitio control 5, La Azucena, manglar quemado																	
0-17								0.72	2.21	1.26	7.78			8.27			20.24
							0.54	1.45	1.54								3.53
								0.65								1.30	1.95
																	ND
																	ND
Sitio control 6, La Azucena, manglar																	
0-8							0.95			1.49							2.44
8-20																	ND
>20	celdas en blanco inferiores al limite de detección (0.01µg-g ⁻¹)							0.03									0.03
																	ND

Nota:

Nap: Naftaleno

Acy: Acenaftileno

Ace: Acenafteno

Flu: Fluoreno

Phe: Fenantreno

Ant: Antraceno

Fla: Fluoranteno

Pyr: Pireno

B(a)A: Benzo(a)antraceno

Cry: Criseno

BbF: Benzo(b)fluoranteno

BkF: Benzo(k)fluoranteno

BaP: Benzo(a)pireno

Ind: Indeno(1,2,3-cd)pireno

DbA: Dibenzo(a,h)antraceno

Bgh: Benzo(ghi)perileno

Tabla 4. Contenido de hidrocarburos alifáticos(C9-C34) en suelo de los Sitios Control en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Sitio en	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
Sitio control 1 (rancho Isidro Brocas, camino La Venta-Cinco Presidentes)																	
1 (0-30)							0.3	0.2	0.2	0.3	0.2		0.2	1.0	0.8		3.0
1 (30-40)							0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.5	0.5		2.0
1 (40-60)										0.0	0.1	0.1	0.1		0.2		0.5
2 (0-20)							0.0				0.1	0.1	0.1	0.5	1.6		2.4
2 (20-50)					3.6	3.0	0.2	0.7	0.4	1.3	0.5		1.9	3.0	4.5	1.3	20.3
2 (50-60)							0.0			0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.4		0.7
3 (0-30)										0.1	0.1	0.0	0.3	1.4	3.3		5.1
3 (30-40)						0.9			0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.6	1.1		3.1
3 (40-60)								0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3		1.0
Sitio control 2, rancho Juan Gómez Córdoba, camino La Venta-Benito Juárez																	
Hojas							0.1		0.1	1.8		0.8	0.9		3.7	1.1	8.3
1 (0-10)							0.1			0.9	0.2	1.0	1.1	4.6	1.5	0.4	9.8
1 (10-14)								0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	1.3	1.1	4.4
1 (14-22)						0.3											0.3
1 (22-30)								0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.8	0.6		2.1
2 (0-15)										0.0	0.1						0.2
2 (15-35)						0.8	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1		0.1	0.4	0.2		2.1
2 (35-45)							0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2			0.8
3 (0-10)							0.1			0.069	0.041	0.111		0.544			0.9
3 (10-15)																	ND
3 (15-25)							0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2			0.9
Sitio control 3, Ranchería Tres Bocas																	
1 (0-15)							3.68	0.40	7.56	8.85	8.42	7.54	9.84	0.11			46.4
1 (15-30)							2.11	6.36	8.91	5.68	4.43	4.12	3.91	0.20			35.7
1 (>30)							0.09	0.07	0.03	1.65	1.32	0.42	1.07	0.05	0.12		4.8
										0.60		1.60		1.56			3.8
2 (0-5)								1.89	0.50	1.13	0.95	2.50	1.78	1.18	5.34		15.3
2 (5-35)							0.39	0.24	0.07	0.14	0.17	0.19		0.52			1.7
2 (35-60)							0.15	0.18	0.00	0.07	0.08	0.23		0.19			0.9
2 (60-75)						0.20	1.17	2.67	2.50	2.53	1.24	1.89	1.64	0.03			13.9
3 (0-5)					0.19	0.22	0.12	0.04	0.06	0.16				0.02	0.07	0.12	1.0
3 (5-19)							0.04	0.03		0.63		0.02		0.11	0.14		1.0
3 (19-35)							0.04	0.03	0.01	1.55	0.29		0.01	0.03			2.0
3 (35-70)						0.21	0.05	0.03	0.01	0.05	0.05			0.03			0.4
3 (70-100)						0.21	0.06	0.12	0.06	0.07				0.09	0.10		0.7
3 (100-140)							0.01	0.04		0.00		0.08	0.01	0.04			0.2
3 (140-160)							0.21	0.07	0.04	0.07				0.05			0.4
3 (160-180)						0.45	0.15	0.09		0.31	0.03		0.04	0.09			1.2
Sitio control 4, La Venta - B. Juárez																	
1 (0-20)							0.53			10.26	9.44	5.31	4.04	0.10	0.08		29.8
1 (20-60)																	ND
1 (>60)							0.04	0.05		0.05	0.04	0.04	0.06	0.10	0.08		0.5
2 (0-20)																	ND

Sitio en	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos
Campo (cm)	(mgkg ⁻¹)																
	total																
2 (20-40)							0.07	0.06				0.13	0.02	0.23	0.85		1.4
2 (>40)												0.03					0.0
3 (0-13)							0.24		0.00			0.26	0.15	0.40	0.36		1.4
3 (13-26)							0.42			6.76	4.68	0.02		0.40	0.25		12.5
3 (26-40)							0.32		0.01			0.10	0.05	0.15	0.03		0.7
3 (40-60)							0.43					0.38	0.21				1.0
3 (60-70)							0.32			0.84		0.10	0.05	0.15	0.03		1.5
Sitio control 5, La Azucena, manglar quemado																	
0-17							0.11		0.32	1.45	0.27	1.47	2.42	1.01	8.54	3.56	19.1
							0.12					0.08	0.00	0.25	1.61		2.1
							0.22		0.02	0.01		0.01			1.24		1.5
																	ND
																	ND
Sitio control 6, La Azucena, manglar																	
0-8							0.28			0.09	3.69	0.16	0.38	6.89	1.19		12.7
8-20							0.12			0.12	0.28	0.05	0.01	0.42			1.0
>20						0.23	0.13	0.19	0.27	0.07	0.07	0.01	0.06	0.30	0.03	0.09	1.4

Tabla 5. Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelo de los Derrames Antiguos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Sitio en Campo (cm)	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs total
[mgkg ⁻¹]																	
Derrame antiguo 1, quemado, La Venta																	
0 m Chapo (0-18)									1.00	0.31							1.32
0 m (18-27)																	ND
0 m (>27)						0.08		0.17	0.09								0.34
0 m (>27)							0.12	0.11									0.23
10 m parte alta (0-30)																	0.00
10 m parte alta (30-50)																	0.00
10 m parte alta (50-60)		0.13		0.15													0.28
10 m parte alta (60-80)		0.10	0.05			0.10	0.09	0.14									0.48
25 m parte alta (hojas)																	ND
25 m parte alta (0-23)				0.09													0.09
25 m parte alta (23-33)								0.16									0.16
25 m parte alta (33-40)																	
75 m parte baja (hojas)								0.27	0.72	0.23							1.21
75 m parte baja (0-5)								0.21	0.95	0.54	0.91	0.44					3.05
75 m parte baja																	ND
75 m parte baja																	ND
75 m parte baja			0.08	0.18	0.13												0.39
75 m, parte alta (hojas)																	ND
75 m parte alta (0-24)							0.21				0.33	0.23	0.17				0.94
75 m parte alta (24-35)		0.07				0.09	0.18	0.20	0.27		0.18	0.13					1.11
75 m parte alta (35-60)																	ND
75 m parte baja (hojas)								0.27	0.72	0.23							1.21
Derrame antiguo 2, 5 Presidentes-Bat.4																	
0 m Chapo (0-1)				2.47	14.40	10.49	17.71	6.40	15.04	13.21	14.11	7.25	13.60	4.05	7.87	2.49	129.09
0 m (1-10)		6.56	4.81	12.29	8.63	8.56	11.07	12.23	13.91	19.31		28.10	33.61				159.08
0 m (10-20)		4.30	1.74	1.98	5.93	4.70	4.48	13.44	17.52		10.58		9.82				74.49
0 m (20-25)		6.00		18.94	14.48	10.00		35.65	31.45	29.33	18.38		22.26			17.19	203.68
0 m (25-55)								0.46									0.46
0 m (55-70)								1.15									1.15
10 m (0-12)							2.38	2.69	3.19	3.19		3.02	7.44		4.98	2.12	29.01
10 m (12-30)																1.02	1.02
10 m (30-40)					1.85	1.86	5.18	9.24	3.36	12.24		9.27	7.97	4.95		3.25	59.17
10 (>40)								0.17									0.17
30 m (0-13)								1.29		6.61	7.37		8.28	4.28		2.25	30.08
30 m (13-50)																	ND
30 m (50-60)				0.66									1.27				1.93
90 m (0-15)																1.12	1.12
90 m (15-45)																	ND
90 m (>45)								1.56									1.56
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán																	
0 m (0-9)																	ND
0 m (9-11)		1.77		5.46	9.60	9.08	19.01	16.82	22.27	24.36	16.93	27.60	19.53	7.83	20.37	8.31	208.94
0 m (11-25)	0.75	4.06	2.88	7.34		7.01	15.47	8.14	12.06	15.10	12.52		7.12				92.45

Sitio en	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
0 m (25-35)								0.19									0.19
0 m (35-50)							0.22						0.33				0.55
0 m (>50)				0.12	0.12			0.36	0.19								0.79
50 m (0-21)								0.45	3.20	1.50	2.85		3.08	1.28		1.10	13.46
50 m (21-30)																	ND
50 m (30-47)						0.13											0.13
50 m (>47)																	ND
100 m (0-10)								6.01									6.01
100 m (10-26)																	ND
100 m (26-33)							0.21										0.21
100 m (33-45)	0.13		0.13	0.29	0.18	0.73	0.43	0.76					0.48				3.13
100 m (>45)							0.36			0.22			0.24				0.82

Nota:

Nap: Naftaleno

Acy: Acenaftileno

Ace: Acenafteno

Flu: Fluoreno

Phe: Fenantreno

Ant: Antraceno

Fla: Fluoranteno

Pyr: Pireno

B(a)A: Benzo(a)antraceno

Cry: Criseno

BbF: Benzo(b)fluoranteno

BkF: Benzo(k)fluoranteno

BaP: Benzo(a)pireno

Ind: Indeno(1,2,3-cd)pireno

DbA: Dibenzo(a,h)antraceno

Bgh: Benzo(ghi)perileno

Tabla 6. Contenido de hidrocarburos alifáticos (C9-C34) en suelo de los Derrames Antiguos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Sitio en	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
Derrame antiguo, quemado, La Venta																	
0 m Chapo (0-18)										0.2	0.0				0.5		0.7
0 m (18-27)						0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0		0.1	0.2	0.2		1.5
0 m (>27)							0.1	0.0		0.0	0.1		0.1	0.2			0.5
0 m (>27)						0.5	0.5	0.0			0.0		0.3	0.7	0.6		2.8
10 m parte alta (0-30)							0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				0.7
10 m parte alta (30-50)							0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1				0.8
10 m parte alta (50-60)							0.0			0.0	0.0		0.0	0.3	0.4		0.8
10 m parte alta (>60)	5.8	2.1		1.9	2.7	3.5	20.6	6.9	30.4	45.6	20.8		21.4	36.5	16.5	2.9	217.4
25 m parte alta (hojas)					4.2	16.5	11.2	57.7	9.2	33.5	39.9	33.9	17.6	101.2	21.4	5.7	352.0
25 m parte alta (0-23)						0.6	0.3	0.4	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3	1.6	3.4	6.6	15.1
25 m parte alta (23-33)						1.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4				3.1
25 m parte alta (33-40)					0.6	6.2	2.7	7.9	3.8	1.8	4.4		3.7	7.4	6.3	5.2	50.2
75 m parte baja (hojas)						0.9	0.4	0.4	0.6	0.9	1.6	1.0	0.1	0.4	0.5	0.7	7.4
75 m parte baja (0-5)	1.0	2.9	4.9	4.0	4.3	25.0	14.9	41.1	32.6	4.6	20.6	14.4	10.3	15.9	24.3	1.6	222.2
75 m parte baja							0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5				2.5
75 m parte baja							0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4		1.3
75 m parte baja							0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.3		0.9
75 m parte baja						1.2	0.7	0.9	0.5	1.5	1.0	1.6	0.7	7.6	0.7	0.2	16.7
75 m parte alta (hojas)						1.1	0.4	2.5	2.4	1.3	2.3	2.1	3.9	2.3	4.1	0.5	22.7
75 m parte alta (0-24)								0.2	0.5	1.0	11.0	0.8	3.1	5.8	3.1	1.6	27.1
75 m parte alta (24-35)						0.9	0.0			0.1	0.3		0.2				1.5
75 m parte alta (35-60)						0.4	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				1.1
Derrame antiguo 2, 5 Presidentes-Bat.4																	
0 m Chapo (0-1)					16.40	295.14	25.80	33.01	103.63	29.95	21.02	51.24	48.71	98.30	18.56	4.55	746.3
0 m (1-10)	47.42			167.60	332.76	77.87	299.42	153.58	15.99	14.75	56.41	94.66	110.44	12.93	23.41	16.84	1424.1
0 m (10-20)		85.47		21.35	157.84	423.88	179.93	37.21	60.31	76.04	67.54	63.30	90.04	22.78	17.12	1.48	1304.3
0 m (20-25)	2.91			2.28	6.03	67.64	11.71	40.52	16.95	20.84	10.50	37.27	32.28	16.44	9.83	8.65	283.8
0 m (25-55)					1.34	0.82	0.05						0.11	1.64	0.42		4.4
0 m (55-70)																	ND
10 m (0-12)					2.97	11.34	7.28	6.64	6.82	5.08	9.79	4.80	8.01	347.51	20.10	2.24	432.6
10 m (12-30)											0.38		0.04	0.44			0.9
10 m (30-40)							0.32	0.23		0.04			0.43	2.76			3.8
10 (>40)							0.01	0.04		1.21	0.03	0.17		0.17			1.6
30 m (0-13)					0.82	1.54	7.80	56.11	5.43	6.42	11.28	55.69	44.29	28.93	10.04	31.84	260.2
30 m (13-50)							0.08		1.95	4.88	27.66	7.57	0.53	0.24			42.9
30 m (50-60)						0.84	0.97	0.24		0.52	0.47	0.70	0.14	0.72	1.38		6.0
90 m (0-15)							0.72	0.19		0.33	0.35	0.03	0.63	1.02	0.39		3.7
90 m (15-45)											1.56			0.76			2.3
90 m (>45)							0.01	0.15	1.78	12.79	3.33	5.61	4.11	2.23	0.34		30.4
Derrame antiguo 3, Aquiles Serdán																	
0 m (0-9)							0.09	0.31		0.22	0.37	0.78	1.62	1.90	1.05		6.3
0 m (9-11)	6.66	1.31		8.96	111.76	296.09	25.07	37.91	24.09	39.56	44.60	22.45	27.80	43.29	7.72	3.05	700.3

Sitio en	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alfáticos
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
0 m (11-25)	68.82			272.69	1507.7	564.00	78.21	235.44	84.73	100.01	117.39	159.23	22.12	41.76	20.69	9.19	3282.0
0 m (25-35)					5.27	9.10	7.62	2.18	1.20	1.50	1.30	3.69	0.98	1.83	7.20	0.16	42.0
0 m (35-50)																	ND
0 m (>50)						0.38	0.23	0.11	0.31	0.23	0.08	0.09	0.13	0.08	0.10		1.7
50 m (0-21)					1.05	11.40	2.09	1.73	0.86	0.33	2.20	1.79	1.36	2.36	0.93	0.31	26.4
50 m (21-30)							0.18	0.02	0.11			0.01					0.3
50 m (30-47)																	ND
50 m (>47)																	ND
100 m (0-10)																	ND
100 m (10-26)							0.03					0.05			0.04		0.1
100 m (26-33)							0.15					0.09	0.04				0.3
100 m (33-45)							0.23					0.04					0.3
100 m (>45)																	ND

Tabla 7. Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en suelo de los Derrames Recientes del Distrito de Agua Dulce.

Sitio en.	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
Derrame reciente 1, sin quemar, Campo Ogarrio, rancho de Tranquilino de la Cruz, ejido Luis Cabrera, pozo 1247																	
0 m (1-30)		0.84	0.27	0.43					1.21	0.30	0.52	0.33	0.48				4.38
0 m (120)																	
0 m (150)		0.06						0.10									0.16
0 m Chapo (0-1)																	ND
Vegetación quemada (1-5)																	
10 m (0-20)							0.63	0.58	1.72	0.60	1.17						4.70
10 m (20-30)																	ND
10 m (120)							0.89	0.68	0.88								2.45
10 m (150-160)								0.13		0.14							0.27
Sedimento (1000)																	
30 m (0-25)								0.69	1.17	0.69							2.55
30 m (120-130)				0.19	0.55	1.00	0.37	0.28	0.39	0.46	0.30	0.21	0.36	9.91			14.03
30 m (130-140)																	0.00
70 m (0-60)																	0.00
70 m (60-70)																	ND
Derrame reciente 2, Aquiles Serdán																	
0 m Chapo (0-2)		36.82		22.94	68.76	183.54	3.43	15.11	30.29	22.92	42.20	28.17	24.20				478.38
0 m (2-7)					0.49	0.90	1.90	4.32	5.25	8.49	2.07	8.00	4.13	2.18	5.72	1.08	44.53
0 m (7-14)													0.21				0.21
0 m (>14)							0.15										0.15
0 m (>14)																	ND
25 m (0-7/11)																	ND
25 m (7/11-22)								3.86									3.86
25 m (22-27)																	ND
25 m (27-42)																	ND
25 m (42-65)		0.21				0.16										0.23	0.60
50 m (0-7)				1.73	1.09	1.29	4.71	4.74	5.81	5.51	5.25		6.70	2.33		3.32	42.48
50 m (7-25)			0.06	0.17	0.11	0.06	0.42	0.28	0.45							0.26	1.81
50 m (25-40)			0.15	0.51	0.81	0.46	0.61	1.30	1.41	1.10	1.49		0.79		3.21	0.92	12.76
50 m (40-60)			0.18	0.33	0.23	0.36	0.70	1.42	0.98	1.05		1.37	0.84		0.85		8.31
50 m (60-66)																	ND
70 m (0-8)				0.45	0.72	1.43	1.78	5.25	10.93		5.42	3.38	2.73		1.75	1.54	35.38
70 m (8-19)					0.06	0.06	0.52		0.54							0.51	1.69
70 m (>19)						0.03	0.10									1.17	1.30
70 m (>19)																	ND
100 m (0-6)								1.94									1.94
100 m (6-15)																2.63	2.63
100 m (15-30)		10.37	2.93	6.99	7.77	6.39	17.45	17.09	2.96	11.24							83.19
100 m (30-42)																	ND
100 m (42-58)				0.12				0.11									0.23
100 m (58-73)																	ND
100 m (>80)						0.01	0.65										0.66
Sitio Remediado (0-20)				0.28	0.50	0.33	0.72	1.09	1.13	1.58		1.39	0.90	0.86		0.24	9.02

Sitio en.	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																
Derrame reciente 3, 5 Presidentes																	
0 m (0-5)		43.76	65.04	44.76	24.16	53.68	87.09	83.05	27.31	70.61		37.80	27.72		16.48	6.53	587.99
0 m (5-20)		11.52	8.89	14.41	15.24	12.71	29.13	42.94	24.08	34.81	29.25		18.36		7.42	3.62	252.38
0 m (>20)							1.76	1.54		4.25							7.55
10 m (0-5)							0.88									9.05	9.93
10 m (5-20)									1.66	1.58						7.60	10.84
10 m (>20)																	ND
30 m (0-5)																1.37	1.37
30 m (5-25)																1.76	1.76
30 m (>25)							0.62									0.82	1.44
70 m (0-10)																	ND
70 m (10-50)								0.28									0.28
70 m (>50)																0.68	0.68

Nota:

Nap: Naftaleno

Acy: Acenaftileno

Ace: Acenafteno

Flu: Fluoreno

Phe: Fenantreno

Ant: Antraceno

Fla: Fluoranteno

Pyr: Pireno

B(a)A: Benzo(a)antraceno

Cry: Criseno

BbF: Benzo(b)fluoranteno

BkF: Benzo(k)fluoranteno

BaP: Benzo(a)pireno

Ind: Indeno(1,2,3-cd)pireno

DbA: Dibenzo(a,h)antraceno

Bgh: Benzo(ghi)perileno

Tabla 8. Contenido de hidrocarburos alifáticos (C9-C34) en suelo de los Derrames Recientes del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Sitio en.	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
Derrame reciente 1, sin quemar, Campo Ogarrio, rancho de Tranquilino de la Cruz, ejido Luis Cabrera, pozo 1247																	
0 m Chapo (0-1)	23.0	54.9	54.4	561.3	3380.2	8394.8	605.9	399.6	248.8	243.2	669.4		191.0	811.5	493.5	9.4	16141.0
0 m (1-30)						4.4	0.4	2.3	1.4	0.2			1.0	2.1	3.0	2.3	17.1
0 m (120)										0.2	0.9		0.4	0.4	1.0	2.0	5.1
0 m (150)							0.1		0.0	0.0							0.1
Vegetación quemada							0.2			0.5	0.6	0.7	0.6				2.6
10 m (0-20)					6.5	7.2	6.8	2.9	1.4	1.9	2.9	0.6	0.1	4.9	6.9	8.0	49.9
10 m (20-30)							20.4	6.3	7.0	2.0		17.4	2.7	19.8			75.6
10 m (120)									0.1		0.5	1.6	1.5	5.0	4.2	4.9	17.8
10 m (150-160)						0.7	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5		2.7
Sedimento (1000)							0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3			1.5
30 m (0-25)								0.8	0.8	1.3	1.8	1.7	1.6	2.0			9.9
30 m (120-130)												0.2					0.2
30 m (130-140)							0.0			0.0		0.1	0.2	0.4	0.2		1.0
70 m (0-60)										0.0	0.1		0.1	0.1	1.3		1.6
70 m (60-70)							0.2	0.1									0.3
Derrame reciente 2, Aquiles Serdán																	
0 m Chapo (0-2)		16.18		6.02	58.93	4767.13	371.08	549.70	415.26	511.56	534.64	502.80	163.07	1017.37	75.01	11.60	9000.3
0 m (2-7)		0.52		0.31	6.67	235.55	21.42	35.62	26.63	39.63	35.27	40.11	18.63	21.14	18.63	15.24	515.4
0 m (7-14)							0.25	0.04		0.06		0.01		0.09	0.08		0.5
0 m (>14)							0.05	0.03		0.79				0.06			0.9
0 m (>14)							0.05	0.03	0.45	1.69			0.01				2.2
25 m (0-7/11)							0.78	0.45	1.37	1.92	2.04	0.87	1.86	0.97	0.13		10.4
25 m (7/11-22)						0.16	0.03		0.00		0.01		0.08				0.3
25 m (22-27)							0.17	0.04		0.04				0.11			0.4
25 m (27-42)							0.06	0.03		0.21		0.02					0.3
25 m (42-65)							0.06	0.04		0.00	0.00		0.01	0.00			0.1
50 m (0-7)					11.06	15.23	6.64	23.78	7.30	15.30	12.41	20.14	3.30	9.92	2.43	4.18	131.7
50 m (7-25)		0.55	2.26	1.13	12.66	17.57	5.76	12.65	5.47	3.98	4.01	8.42	3.74	8.59	4.28	0.94	92.0
50 m (25-40)					12.97	30.81	5.91	12.64	1.31	10.02	9.94	4.08	4.66	6.04	4.75	5.65	108.8
50 m (40-60)							0.13	0.14						0.03	0.14		0.4
50 m (60-66)		0.31	1.58	0.86	3.55	9.30	1.15	1.27	0.32	1.10	0.33	0.60	1.14	0.36	0.23	0.04	22.2
70 m (0-8)					1.45	53.25	37.16	8.34	5.65	5.11	5.40	9.53		10.07	9.68	1.68	147.3
70 m (8-19)					0.30	0.87	0.78	0.45	0.14	0.38	0.63	0.31	0.34	0.64	1.44	0.15	6.4
70 m (>19)						0.22	0.18	0.50	0.16	0.09	0.54	0.12	0.10	0.04	0.11		2.1
70 m (>19)								0.03		0.01	0.03	0.12	0.08	0.03			0.3
100 m (0-6)						1.24	0.69	0.32	0.01	0.05	0.06	0.04					2.4
100 m (6-15)						12.14	0.19	4.33	1.67	5.75	3.05	10.81	0.25	0.25	16.34	0.28	55.1
100 m (15-30)		98.40		113.75	2793.35	984.66	178.21	37.21	60.31	134.48	273.13	112.69	56.64	84.54	75.34	8.57	5011.3
100 m (30-42)						0.21		0.19	0.18	0.25	0.17		0.12	0.08	0.17		1.4
100 m (42-58)						0.16	0.09	0.05	0.15	1.66	1.40	0.61	0.21	0.07			4.4
100 m (58-73)							0.12	0.06		1.79	0.97	0.17	0.01	0.01			3.1
100 m (>80)							0.02	0.03		0.00	0.00		0.00	0.01			0.1
Sitio Remediado (0-20)				0.58	11.68	37.40	4.50	9.96	3.02	3.50	8.03	3.70	8.90	6.72	36.85	0.97	135.8

Sitio en.	nC9	nC10	nC11	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos
Campo (cm)	[mgkg ⁻¹]																total
Derrame reciente 3, 5 Presidentes																	
0 m (0-5)	777.56	1239.70	1765.53	2137.69	2576.49	2203.28	327.39	496.59	106.31	91.91	155.09	138.08	80.70	125.32	204.84	4.64	12431.1
0 m (5-20)	409.24	160.77	192.85	2279.35	2804.07	1590.69	152.63	232.58	116.94	86.12	120.85	80.87	1275.30	708.25	51.67	14.96	10277.1
0 m (>20)				1.87	5.08	9.00	0.73	1.82	2.17	1.76	0.30	2.01	1.03	0.13	0.95	1.07	27.9
10 m (0-5)												2.00	0.11	3.48	16.18	1.15	22.9
10 m (5-20)					1.52	5.13	2.45	10.02	1.67	4.93	3.57	12.24	3.11	8.24	15.93	0.87	69.7
10 m (>20)							0.74	0.07						0.21	0.02		1.0
30 m (0-5)							1.06	0.42	0.33		1.24	0.94	0.50	1.04	0.09		5.6
30 m (5-25)							3.28		0.26			0.83	0.33		0.09		4.8
30 m (>25)																	ND
70 m (0-10)																	ND
70 m (10-50)							0.21				0.28		0.11				0.6
70 m (>50)																	ND

ANEXO 3. CONTENIDO DE HIDROCARBUROS AROMATICOS Y ALIFATICOS EN AGUA DEL DISTRITO DE AGUA DULCE, TABASCO.

Tabla 1. Contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) en agua para la Microcuenca, Sitios Control, Derrames Antiguos y Derrames Recientes en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Clave	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs total
(µg/L ¹)																	
Control-1																	
Control 1																	
Control 1	9.5E-05										9.5E-05						1.9E-04
Perfor.	4.8E-05		4.8E-05														9.6E-05
DA 75b																	
DA 75 ^a																	
DA 25 ^a																	
DA10a																	
DA 0																	
Perf. DA																	
Perf. DA	4.9E-05								4.9E-05								9.7E-05
Noria DA																	
Pozo																	
Deshid.																	
Control 2																	
Control 2	1.1E-04										1.1E-04						2.1E-04
Control 2	8.6E-05								4.9E-05	3.7E-05							1.7E-04
DR 70	4.1E-05									4.1E-05							8.3E-05
DR 30																	
DR 10																	
DR 0	4.0E-03					3.7E-05			4.0E-03								8.0E-03
Perf. DR	4.5E-03		4.8E-05			3.7E-05			4.1E-03	7.8E-05	2.0E-04						8.9E-03
Control 3				1.8E-01					#####	1.7E-01							1.4E+00
Control 3																	
Control 3																	
DR2 100			2.1E-04	2.8E-04													4.9E-04
DR2 70																	
DR2 50									#####								1.0E+00
DR2 25	9.7E-04		4.2E-03	7.6E-04	2.0E-04			2.7E-04	5.9E-03	1.8E-03		2.8E-03			2.7E-02	4.5E-03	4.8E-02
DR2 0	2.7E-03		5.2E-03	9.1E-03			3.4E-02	2.5E-03	5.5E-03			1.9E-03			1.3E-02		7.3E-02
DA2 90	3.3E-03		5.7E-04	1.6E-04					1.8E-03	4.1E-03	5.1E-06	2.3E-03	1.9E-03				1.4E-02
DA2 30	5.2E-04		2.1E-03	4.9E-03	9.5E-05		2.6E-03		1.3E-03	1.1E-03	2.1E-06	1.2E-03	4.9E-04				1.4E-02
DA2 10	2.6E-03		9.8E-03						5.3E-04	2.5E-03	3.5E-06						1.5E-02
DA2 0	2.6E-03		4.4E-03	1.7E-03	4.2E-04		2.5E-03		9.6E-04	9.5E-04	1.9E-06	5.8E-04	1.2E-03			7.1E-03	2.2E-02
Control 4			1.7E-03		5.8E-05		3.3E-04										2.1E-03
Control 4			8.9E-04				4.0E-04		8.9E-04	8.3E-05	1.1E-06					8.9E-03	1.1E-02
Control 4	8.2E-05						1.7E-04										2.5E-04
DR3 70	8.4E-04		3.2E-03	1.0E-03			9.4E-04		3.0E-04								6.3E-03
DR3 30	1.2E-04		3.8E-04				1.4E-04										6.4E-04
DR3 10	4.1E-03		4.8E-03	2.5E-03			2.4E-03		7.5E-04	5.0E-03	6.0E-06	1.8E-03	1.3E-03				2.3E-02

Clave	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	B(a)A	Cry	BbF	BkF	BaP	Ind	DbA	Bgh	HAPs total
DR3 0	5.6E-03		1.7E-03	5.5E-03			5.8E-03		3.0E-03	1.3E-02	1.4E-05	3.5E-03	1.7E-03				3.9E-02
DA2 100	7.2E-04		3.9E-04	4.3E-03		6.5E-02	6.5E-05	1.1E-01	1.8E-03	9.9E-04	2.0E-06	8.2E-04					1.8E-01
DA3 50	7.7E-04		1.0E-02	8.1E-03	7.8E-04		6.4E-03		2.7E-03				1.1E-03				3.0E-02
DA3 0	2.6E-03		3.1E-03	8.7E-03					1.2E-03				1.3E-03				1.7E-02
Control 5																	0.0E+00
Control 6																	0.0E+00
Noria Cim			1.2E-03														1.2E-03
Noria Cim												7.4E-04					7.4E-04
Noria Cim					3.6E-05							6.4E-04					6.7E-04
Noria Cim				4.6E-05	6.8E-05			1.9E-02		1.6E-02	1.7E-05	2.9E-03			5.0E-01	1.5E-02	5.6E-01
Panga V.		4.0E-04			3.4E-04	3.4E-04	1.0E-03	3.3E-04		7.9E-04	7.3E-04	1.3E-03	7.6E-04				6.0E-03
Curva P2		3.4E-04		2.1E-04					6.0E-04								1.1E-03
Curva P3		1.1E-03	5.1E-04	3.1E-04	3.2E-04	3.0E-04	7.7E-04	5.4E-04	9.1E-04	1.4E-03	8.1E-04		7.1E-04				7.6E-03
Ralé P4		1.2E-03	2.4E-04	4.0E-04	4.1E-04		6.1E-04	3.6E-04	1.0E-03	5.8E-04							4.8E-03
Ralé P5							9.2E-04	8.0E-04	9.1E-04								2.6E-03
Ralé P6							2.7E-04	5.5E-04	1.4E-03	1.4E-03	9.2E-04	2.3E-04	6.6E-04				5.5E-03
Paraiso, P7			1.9E-04	2.6E-04	7.1E-04	1.7E-04	6.9E-04	2.4E-04	3.5E-04	1.6E-03	2.3E-03	3.2E-03	3.2E-03	####	3.0E-03	7.1E-04	1.9E-02
Paraiso, P8							4.5E-04	2.9E-04	1.1E-03	4.6E-04	2.6E-04						2.5E-03
Paraiso, Pozo							6.3E-04	6.5E-04	1.0E-03	3.5E-04							2.6E-03
Paraiso, Pozo			1.2E-04	5.6E-04	7.5E-04	7.5E-04	3.2E-04	2.4E-04	4.0E-03	1.8E-03							8.5E-03
Panga Vieja, P9							3.5E-04	2.1E-04	4.5E-04		3.0E-04						1.3E-03
Bateria																	
Curva	3.5E-03	4.7E-03	1.4E-03	2.3E-03	1.5E-03	4.0E-04	7.3E-04	9.3E-04									1.5E-02
Sn Ramón																	
Sn Ramón			4.4E-04			4.2E-04		2.3E-04									1.1E-03
Ogarrio																	
Ogarrio			2.3E-04			1.6E-04											3.9E-04
Curva			1.4E-04			2.3E-04		1.3E-04									5.1E-04
Cim1 sed																	
Cim1 sed						0.02	0.15	0.00	0.04	0.03							0.24
Cim3 sed						0.00	0.14										0.15
Cim3 sed							0.13		0.06	0.03							0.23
Cim7 sed							0.11			0.28							0.39
Cim1 agua																	
Cim3 agua					5.1E-05	2.6E-02	6.2E-05	4.1E-06	3.3E-05								2.6E-02
Cim7 agua			3.8E-05				5.9E-05	1.5E-04	4.1E-05	1.2E-03							1.4E-03
Cim7 agua					8.9E-05	1.3E-04	5.2E-05	1.2E-04									3.9E-04
Cim1 agua							1.1E-04	5.7E-06	4.7E-05	3.2E-05							2.0E-04

Nota:

Nap = Naftaleno.
Acy = Acenaftileno
Ace = Acenafteno
Flu = Fluoreno

Phe = Fenantreno
Ant = Antraceno
Fla = Fluoranteno
Pyr = Pireno

B(a)A = Benzo(a)antraceno
Cry = Criseno
BbF = Benzo(b)fluoranteno
BkF = Benzo(k)fluoranteno

BaP = Benzo(a)pireno
DbA = Dibenzo(ah)antraceno
Bgh = Benzo(ghi)perileno
Ind = Indeno(1, 2, 3-cd)pireno

Tabla 2. Contenido de hidrocarburos alifáticos (C9-C34) en agua para la Microcuenca, Sitios Control, Derrames Antiguos y Derrames Recientes en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Clave	nC9	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos total
(μgL^{-1})															
Control-1						1.48E-05	1.04E-05	3.71E-05	8.43E-06						7.07E-05
Control-1					7.17E-06	1.82E-06		9.78E-05	1.30E-04		1.88E-05				2.56E-04
Control-1	2.9E-04							7.58E-05	9.85E-05	1.42E-04	2.34E-04	9.51E-05			6.45E-04
Perf.	1.4E-04														ND
DA 75b					5.54E-04	1.42E-04	6.03E-05	1.32E-04	2.94E-04	3.14E-04	2.84E-05	1.01E-04	1.45E-04		1.77E-03
DA 75 ^a					1.16E-06			4.19E-05	1.95E-05	1.33E-05	1.51E-05				9.10E-05
DA 25 ^a							8.17E-07	6.32E-05	5.08E-05	3.99E-05	2.40E-04				3.95E-04
DA 10 ^a							2.30E-06								2.30E-06
DA 0							2.64E-06								2.64E-06
Perf. DA					6.33E-02					4.42E-02					1.08E-01
Perf. Da	1.5E-04				6.16E-05		6.94E-06								6.85E-05
Noria DA						3.12E-05	9.89E-06	7.07E-05	4.27E-05	8.07E-05	1.71E-05				2.52E-04
Pozo prof.								4.71E-05	2.99E-05	4.93E-05	7.93E-05	1.26E-04	3.18E-05		3.63E-04
Deshid.		4.47E-04	2.15E-03	4.22E-03	1.72E-04	4.47E-04	4.13E-04	7.35E-05	3.17E-04	2.14E-04	1.67E-04	5.51E-05	2.42E-05	1.72E-04	8.87E-03
Control 2					7.51E-05	4.99E-05	3.39E-05	3.97E-05	4.58E-06						2.03E-04
Control 2	3.2E-04							8.15E-05	5.54E-05						1.37E-04
Control 2	2.6E-04				2.16E-04	9.11E-06	6.10E-06	1.43E-04	7.07E-05	5.64E-05	3.97E-05				5.41E-04
DR 70	1.2E-04		4.59E-04	4.84E-04	1.09E-05	7.88E-06	5.46E-05	6.21E-05			3.88E-05				1.12E-03
DR 30					3.38E-05	2.05E-05	2.77E-05	1.01E-04	1.36E-04						3.19E-04
DR 10					7.05E-05	1.17E-05	3.44E-05	9.61E-05		1.24E-05	1.35E-05				2.39E-04
DR 0	1.2E-02		1.08E-03	1.23E-03	2.22E-05	9.99E-05	1.29E-04	4.86E-05	1.63E-05		2.30E-04	7.91E-05	6.90E-05	1.17E-04	3.12E-03
Perf. DR	1.3E-02	4.47E-04	3.69E-03	6.22E-03	6.47E-02	9.88E-04	8.77E-04	1.46E-03	1.44E-03	4.52E-02	2.30E-03	4.86E-04	2.77E-04	2.89E-04	1.28E-01
Control 3						0.04	3.74	2.30	1.72	0.68	1.91	1.38	0.09		11.85
Control 3				0.56	1.58	0.51	3.24	2.18	1.68	0.84	1.82	0.07	0.00		12.49
Control 3					0.13	0.06		0.06		0.01	0.16	0.04			0.48
DR2 100															ND
DR2 70					0.43	2.95	1.83	2.44	2.01	0.93	2.02	0.31	0.10		13.01
DR2 50					0.43	2.34	4.79	2.96	2.36	1.14	2.29	0.46	0.14		16.89
DR2 25					0.07	0.07	0.80	2.01	1.72	0.55	0.68		0.08	0.08	6.06
DR2 0										0.01		0.02	0.33	0.50	0.87
DA2 90					0.13	0.09		0.50	0.02	0.02		0.01			0.77
DA2 30				0.35	0.09		4.27	0.01							4.72
DA2 10					0.90	0.19	0.12	0.24	0.23		0.17	0.25	0.47		2.57
DA2 0					0.09	0.15		0.01	0.04	0.17	0.02				0.48
Control 4					0.09			0.14		0.02	0.03	0.03			0.31
Control 4					0.08					0.01		0.04	0.10		0.23
Control 4											0.00	0.01			0.01
DR3 70								0.01	0.01			0.00			0.02
DR3 30											0.01				0.01
DR3 10					0.44	0.19	0.00	2.42	1.43	0.22	0.08	0.01			4.79

Clave	nC9	nC12	nC14	nC16	nC18	nC20	nC21	nC23	nC24	nC25	nC26	nC30	nC32	nC34	alifáticos total
								($\mu\text{g L}^{-1}$)							
DR3 0					0.23	0.13		0.05	0.07		0.02	0.12	0.33		0.95
DA3 100					0.03										0.03
DA3 50					0.38	0.71	2.80	3.02	2.58	1.51	2.56	0.77	0.14		14.46
DA3 0					0.24	0.16	0.01			0.03	0.01				0.45
Control 5					0.13	0.09	0.01	0.02							0.24
Control 6															ND
Noria					0.22	0.50	3.48	1.93	1.33	0.68	0.76		0.09		8.98
Noria					0.35	0.22	0.01	3.53	1.24		0.15		0.20		5.69
Noria					0.21	0.11	0.87	2.09	1.67	3.05	0.75	0.00			8.76
Noria				0.00	1.41	1.90	2.13	2.85	2.09	0.28	0.17	0.04	0.23	0.11	11.21
Batería					0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.05
Curva	0.04	0.46	0.01	0.02	0.36	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	1.18
Sn Ramón						0.0001	0.0003	0.0005	0.0015	0.0028	0.0012	0.0051	0.0053	0.0153	0.0322
Sn Ramón			0.0014	0.0018	0.0190	0.0015	0.0016	0.0010	0.0034	0.0024	0.0031	0.0061	0.0000	0.0185	0.0598
Ogarrio				0.0029	0.0273	0.0016	0.0025	0.0014	0.0002	0.0012	0.0007	0.0014	0.0013	0.0017	0.0422
Ogarrio						0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0003	0.0018			0.0025
Curva							0.0000	0.0001	0.0002	0.0001	0.0003	0.0015	0.0000	0.0072	0.0094
Cim1 sed										0.24			0.65		0.88
Cim1 sed							0.02						0.58		0.60
Cim3 sed													0.79		0.79
Cim3 sed					0.01				0.02	1.12			0.73		1.88
Cim7 sed					0.08		0.02	0.02					1.61		1.74
Cim1 agua						1.3E-03	1.2E-03	5.7E-04	1.8E-03	1.8E-02	1.1E-03	7.7E-03	1.2E-02		4.3E-02
Cim3 agua						6.5E-05	7.1E-05	1.3E-04	1.2E-04	4.9E-03	4.0E-04	3.7E-04			6.0E-03
Cim7 agua				9.2E-05		1.2E-04	1.3E-04	2.1E-04	1.6E-04	1.5E-03	1.5E-07	5.4E-04	2.8E-03		5.6E-03
Cim7 agua						1.6E-04	1.2E-04	1.4E-04	2.8E-04	1.1E-03	4.4E-04		2.7E-04		2.5E-03
Cim1 agua				6.3E-05	1.2E-04	3.6E-04	1.0E-04	4.8E-04	1.2E-04	2.4E-03	2.4E-04	3.5E-04	2.6E-03		6.8E-03

Nota:

DA = Derrame antiguo La Venta

DA2 = Derrame Antiguo 5 Presidentes

DA3 = Derrame Antiguo Aquiles Serdán

DR = Derrame reciente

DR2 = Derrame reciente Aquiles Serdán

DR3 = Derrame reciente 5 Presidentes

Control 1 = Camino La Venta – 5 Presidentes

Control 2 = Camino La Venta – Benito Juárez

Control 3 = Tres Bocas

Control 4 = La Venta – Benito Juárez

Control 5 = La Azucena, manglar quemado

Control 6 = La Azucena, manglar sin quema

Cim = Cimades