

31
2ej.



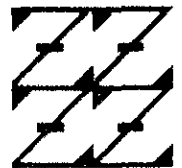
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

IDENTIFICACION Y MIGRACION DE COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES DE GASOLINA EN SUELOS ALEDAÑOS A LA REFINERIA DE TULA, HIDALGO.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
B I O L O G O
P R E S E N T A :
RUTILIO ORTIZ SALINAS

U N A M
FES
ZARAGOZA



LO NUMERO EJE
DE NUESTRA REFLEXION

DIRECTOR DE TESIS: BIOL. MARICELA ARTEAGA MEJIA.

MEXICO, D. F.

MARZO, 1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

258750



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 está 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 existir al lado de grandes seres.

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

A mis hermanos Cesar, Rolando y Karina al compartir las experiencias de una vida unida.

A mis Abuelos Rutilio, Basilio, Dolores, Hilaria y Consuelo por sus enseñanzas de amor 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.

AGRADECIMIENTOS



La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la FES Zaragoza, UNAM.

Se agradece a Fundación UNAM por la beca otorgada.

A la Biól. Maricela Arteaga, M. En C. Miguel Castillo y M. En C. Lourdes Castillo por la oportunidad de realizar este trabajo y darme su apoyo para su buen término.

Al M. En C. Manuel F. Rico por su apoyo y confianza en el desarrollo de la tesis, con todo respeto y cariño.

A la Q. Miki Otani por la revisión del escrito y sus valiosas observaciones 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 todas aquellas Personas que me han dado su confianza y ayuda sin condiciones.

INDICE

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	2
2.1 Antecedentes	2
2.2 Legislación Ambiental en Materia de Hidrocarburos	5
2.3 Características de los Hidrocarburos	8
2.4 Gasolina	9
2.4.1 Octanaje de la Gasolina	10
2.4.2 Componentes de la Gasolina	11
2.5 Hidrocarburos en el Suelo	13
2.6 Dispersión de Contaminantes en Suelo y Acuíferos	14
2.7 Problemática	24
2.8 Cromatografía de Gases	25
3. Zona de Estudio	29
3.1 Ubicación	29
3.2 Hidrología	31
3.3 Clima	31
3.4 Orografía	31
3.5 Geología	31
3.6 Clasificación y Uso de Suelo	32
3.7 Flora y Fauna	32
3.8 Desarrollo Industrial	33
4. Objetivos	35
5. Hipótesis	36
6. Método	37
6.1 Fase de Campo	37
6.2 Fase de Laboratorio	37
6.3 Fase de Gabinete	38
6.4 Zona de Muestreo	39
6.5 Material y Reactivos	42
7. Resultados	44
8. Discusión de Resultados	59
8.1 Relación de los Parámetros Físicos y Químicos del Suelo con los Compuestos Orgánicos Volátiles	59
8.1.1 Densidad Aparente, Real y Espacio Poroso	59
8.1.2 Humedad	60
8.1.3 Capacidad de Campo	61

8.1.4 Textura	63
8.1.5 Materia Orgánica	64
8.1.6 pH	66
8.1.7 Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.)	67
8.2 Descripción de Compuestos Orgánicos Volátiles Identificados	68
9. Conclusiones	76
10. Propuestas	78
11. Bibliografía	79
12. Anexos	85
12.1 Aspectos de la Legislación Ambiental	85
12.2 Comportamiento de los Hidrocarburos	87
12.3 Límites Máximos Permisibles en Suelo y Agua	90
12.4 Composición de las Gasolinas Actuales en México y Estados Unidos	92
12.5 Alternativas Tecnológicas para la Remediación de Suelos	94

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la identificación y cuantificación de compuestos orgánicos volátiles y su relación con las características edáficas como la materia orgánica, humedad, contenido de arcillas y capacidad de intercambio catiónico (CIC) así como su probable migración a zonas más profundas. Se llevó a cabo un muestreo en 9 transectos a 300 m de distancia uno de otro con puntos ubicados a 30 y 60 m a partir de la barda perimetral de la Termoeléctrica y de la Refinería de Tula, Hidalgo; tomando muestras cada 20 cm de profundidad.

Los compuestos orgánicos identificados por cromatografía de gases con FID (Detector de Ionización a la Flama) utilizando como estándar externo gasolina Nova y Magna Sin fueron el benceno, tolueno y xileno que presentaron débil migración así como el etanol, metanol, isopropanol, hexano, pentano, octano, 2,2,4-Trimetilpentano (isooctano) con irregular presencia. De los anteriores, el benceno rebasa el límite permisible establecido para el Estado de California en Estados Unidos (0.3 - 1 mg/Kg) mientras el tolueno y xileno se hallan debajo de su límite permisible, sólo en algunos casos rebasa el valor mínimo (tolueno 0.3-50 mg/Kg y xileno 1-50 mg/Kg).

La concentración total más elevada se ubica en la proximidad de las instalaciones de la refinería y en algunos terrenos de cultivo (146.665, 221.869, 598.411, 828.393, 157.078, 179.335, 109.689 y 330.167 mg/Kg); para el benceno, xileno y tolueno se detectó concentraciones a una distancia alejada de la barda mientras los otros compuestos se presentaron en su cercanía. Los valores mínimos de concentración total se localizó en terrenos de la Termoeléctrica y puntos alejados de las instalaciones (86.462, 30.568, 40.224, 37.021, 19.986, 40.245 y 22.079 mg/Kg).

Existe una irregular migración vertical de compuestos orgánicos totales como también en la concentración de estos en los horizontes en suelos muestreados. El suelo próximo a las instalaciones de la Refinería tiende a rebasar el límite permisible. Estos sitios presentan un alto contenido de arcillas, CIC alta, pH neutro a ligeramente alcalino, materia orgánica de pobre a medianamente rico y una humedad variable. Con un análisis de correlación simple aplicada a los parámetros del suelo y a los compuestos orgánicos presentes, se observó que la concentración de estos se asocia con la materia orgánica seguido del agua y contenido de arcilla.

1. INTRODUCCIÓN.

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 el 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 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. Adicionalmente se tiene que los residuos de la actividad petrolera están clasificados como residuos peligrosos y se calcula que en 1991 se generaron 5,292 miles de T/año de residuos peligrosos y se ha estimado que el 2.4% son derivados del petróleo, es decir, 130,183 T/año (González & Quintero, 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 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).

El objetivo central del trabajo es el identificar y cuantificar los compuestos orgánicos presentes para relacionar su comportamiento con las propiedades de los suelos aledaños a la refinería de Tula en el estado de Hidalgo, es importante señalar que para este sitio se carece de información del tipo de hidrocarburos existentes y su comportamiento de migración en el suelo.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 ANTECEDENTES.

En México la construcción de las refinerías se inició en 1909 con la de Minatitlán, Veracruz. A finales de los 20's se realizaron los primeros diseños para plantas de destilación primaria, con base en un crudo de una composición determinada, estaban diseñadas para trabajar con un crudo sintético o mezclas preparadas con crudo de diferentes orígenes pero que al final debían de llegar a las refinerías con una composición predeterminada. En estas condiciones se manejaron las primeras plantas de las refinerías de Azcapotzalco, Tampico, Minatitlán y Salamanca (PEMEX, 1988).

En 1930 existían tan sólo en el país dos refinerías: Tampico, Tamaulipas y Minatitlán, Veracruz, que abastecían a través de autotransportes a las terminales de distribución en la zona central de la República Mexicana.

La industria petroquímica básica apareció en México en los inicios de la década de los 50's, con la instalación de pequeñas plantas que tenían el propósito de sustituir importaciones de formaldehído, resinas plásticas y amoniaco. La década de los 60's fue importante para el crecimiento de la petroquímica estatal, en la cual se contemplaba 9 complejos (cuadro 1):

Cuadro 1. Reseña Histórica de las Refinerías de la Industria Petroquímica en México.

Refinería	Fecha de inauguración
"Gral. Lázaro Cárdenas del Río" en Minatitlán, Ver., colindando con Oaxaca, Chiapas y Tabasco	1909 y remodelada en febrero de 1956
"Ciudad Madero", Tamaulipas	1928 y el 28 de octubre de 1947 (Reinaugurada)
Azcapotzalco "18 de Marzo", México D.F.	Noviembre de 1933 y remodelada en 1945. Clausurada el 18 de Marzo de 1991.
"Ingeniero Antonio M. Amor" Salamanca, Guanajuato	30 de julio de 1950
"Poza Rica", Veracruz	Abril de 1955
"Reynosa", Tamaulipas	En 1955
"Miguel Hidalgo", Tula, Hidalgo	18 de marzo de 1976
"Cadereyta", Nuevo León	18 de marzo de 1979
"Ing. Antonio Dovali Jaime" en Salina Cruz, Oaxaca	24 de agosto de 1979

(Fuente: PEMEX, 1988).

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, tan necesarias para el país, destinándose gran parte al pago de la deuda externa. 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).

La industria petrolera, la constituye las plantas de refinería, fabricación de aceite y plantas de gas. Es una de las industrias más importante 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).

El consumo nacional de productos petroleros en 1994 fue un total de 1.75 (Millones de barriles diarios) correspondiendo al Gas Licuado 273.0, Gasolina 534.6, Turbosinas 58.5, Otros querosenos 10.6, Diesel 264.0, Combustibles 497.7, Lubricantes 6.8 y Otros 106.6.

Los principales productos petrolíferos en 1994 correspondieron a un total de 1675.9 (Miles de barriles diarios) de ellos se tiene al Gas licuado 266.9, Gasolina 509.4, Turbosina 74.3, Otros querosenos 10.6, Diesel 284.4, Gasóleo industrial 5.1, Combustible 420.0, Asfaltos 31.7, lubricantes 6.8, Parafinas 1.5, Gas seco 61.2 y Otros petrolíferos (aeroflex 1-2 coque, gasóleo de vacío a exportación, entregas netas a petroquímica y extracto furfural) 4.0 (INEGI, 1996).

Los productos de la petroquímica en México son: Acetaldehído, Acetonitrilo, Ácido cianhídrico, Ácido clorhídrico, Acrilonitrilo, Alquilarilo pesado, Amoníaco, Anhidrido carbónico, Aromáticos pesados, Aromina, Azufre, Benceno, Butadieno, Butano butileno, Butano crudo, Ciclohexano, Cloruro de vinilo, Cumeno, Diclouroetano, Dodecibenceno, Estireno, Etano, Éter metil terbutílico, Etilbenceno, etileno, Glicoles, Fluxoil, Heptano, Hexano, Hidrógeno, Isopropanol, Negro de humo, Metanol, Meta y Para xileno, Nitrógeno, Ortóxileno, Óxido de etileno, Oxígeno, Pentano, Percloroetileno, Polialquilados, Polietileno de alta densidad, Polietileno de baja densidad, Polímero petroquímico, Polipropileno, Propanopropileno, Propileno, Refinados, Sulfato de amonio, tetracloruro de carbono, Tetramero de propileno, Tolueno, etc.

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 el 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. Los resultados de monitoreo de calidad del aire en las zonas, indican que los índices reportados son satisfactorios (Viejo, 1995).

Para cumplir en las políticas nacionales de mejoramiento, se han sentado las bases para la construcción de plantas paquete para el tratamiento de aguas residuales en todo el sistema de refinación. Entre ellos destaca, como parte del proyecto ambiental de la Cuenca Lerma-Chapala, el proyecto de Tratamiento de aguas urbanas e Industriales de la Ciudad de Salamanca con una inversión de 74.3 millones de pesos, el cual tendrá una capacidad de tratamiento de 748 litros por segundo de aguas urbanas e industriales, de los cuales alrededor del 60 % se reutilizarán en la Refinería.

La adecuación de los equipos para llenado de autostanque y carrostanque por el fondo en los centros abastecedores y agencias de ventas, es una de las acciones con mejor relación costo-beneficio, ya que se reducen las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Asimismo, se ha programado la instalación de membranas flotantes en 484 tanques para almacenamiento de gasolina, reduciendo con ello hasta en un 97 %, las emisiones de hidrocarburos a la atmósfera, en comparación con los tanques convencionales de techo fijo (Viejo, 1995).

Además del mejoramiento de combustibles destinados para el Valle de México y el Altiplano, a fin de reducir las emisiones a la atmósfera de bióxido de azufre, plomo, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y otros contaminantes (PEMEX, 1988).

Los residuos generados por las actividades de esta industria como son: catalizadores gastados, lodos aceitosos, etc, 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). Asimismo se considera una inversión de alrededor de 40,000 millones de dólares para limpiar suelo, lagunas y litorales (González & Quintero, 1995).

En nuestro país, y recientemente 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 a 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).

Por otra parte se tiene que los residuos o desechos de la actividad petrolera están clasificadas 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 (Saval, 1995).

Cuadro 2. 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

2.2 LEGISLACIÓN 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 reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente". Particularmente, quedando sujetas a evaluación de impacto ambiental las siguientes obras y actividades:

- I. Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, **oleoductos, gasoductos y carboductos**;
- II. Industria del petróleo, **petroquímica**, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica;
- III. Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de las Leyes Mineras y Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear;
- IV. Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radioactivos;
- V. Aprovechamiento forestal en selvas tropicales y especies de difícil regeneración;
- VI. Plantaciones forestales;
- VII. Cambios de uso del suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas;
- VIII. Parques industriales donde se provea la realización de actividades altamente riesgosas;
- IX. Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros;
- X. Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados al mar, así como en sus litorales o zonas federales;
- XI. Obras en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación;
- XII. Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que pueden poner en peligro la preservación de una o más especies o causar daños a los ecosistemas, y;
- 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 y Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 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 en el título IV en las disposiciones generales, el integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de competencia por la Secretaría, así como el establecer los mecanismos y procedimientos necesarios, con el propósito de llevar a cabo un sólo trámite para la operación y funcionamiento de establecimientos industriales, comerciales o de servicios que requieran obtener diversos permisos, licencias o autorizaciones que deban ser otorgados por la propia dependencia (LGEEPA, 1996).

La nueva LGEEPA establece los siguientes aspectos para atender la contaminación del suelo :

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 la 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. Por lo anterior, se promoverá la adecuación de aquellos ordenamientos que inciden en la regulación del suelo para buscar una congruencia de todo el marco normativo (Ver Anexo 1), tomando en cuenta las tendencias internacionales en la materia (Poder Ejecutivo Federal, 1996).

2.3 CARACTERISTICAS DE LOS HIDROCARBUROS.

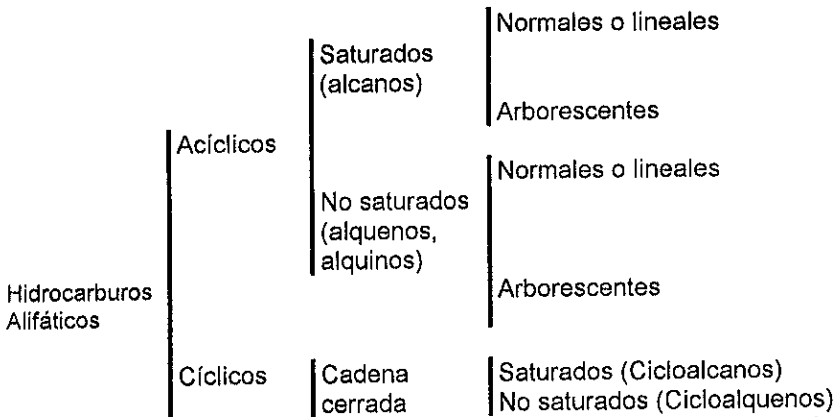
De acuerdo a Wood (1974), Chappin (1988) y PEMEX (1988), los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo.

En el presente trabajo se considera la definición de hidrocarburos elaborada por Wood (1974) como una solución líquida compleja de hidrocarburos gaseosos, líquidos y sólidos, existiendo pequeñas cantidades de mezclas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de encontrar compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales (PEMEX, 1988). Los hidrocarburos que se destilan a baja temperatura son el éter de petróleo (20-60 °C), la gasolina (30-200 °C; C₃ - C₃₁) y el queroseno (175-275 °C; C₁₁ - C₁₄).

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:



Tomado de Fessenden, 1985



Tomado de Wood, 1974.

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

Los constituyentes de los productos del Petróleo más comunes son:

Cuadro 3. Principales constituyentes de los productos del Petróleo.

Gasolina y Aceites Combustibles		Aceites Pesados y Desechos de Aceite
Benceno	1-Penteno	Benz(a)Antraceno
Etilbenceno	(o)-Xileno	Benz(a)Pireno
(n) Heptano	Tolueno	Naftaleno
Pentano	Fenol	Fenantreno
(n) Hexano		

Tomado de Preslo, Miller, Suyama, McLearn, Kosteckl & Fleischer, 1989.

2.4 GASOLINA.

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos volátiles útiles para operar en un motor de combustión interna.

La naturaleza proporciona los compuestos, casi siempre parafinas (hidrocarburos alifáticos lineales y cíclicos), diluidos con otros componentes contenidos en el petróleo crudo. En la actualidad la gasolina es un producto sintético, debido a:

1. Los crudos tienen un máximo de 25-30 % de gasolina natural con índices de octano de 40 a 60, demasiado bajo para usarse en los motores modernos de combustión interna.
2. La cantidad de gasolina primaria contenida en los crudos es insuficiente para satisfacer la gran demanda provocada por cientos de millones de vehículos.

La gasolina comercial se prepara mezclando el producto natural con diferentes porcentajes de gasolina proveniente de los procesos de polimerización, alquilación, isomerización, reformulación y desintegración, además se les agrega una serie de aditivos. Se pueden hacer mezclas de gasolina con índices de octano mayores que el iso-octano puro o sea hasta 110. lo que se logra agregando compuestos llamados antidetonantes, el más común es el tetraetilo de plomo, $Pb(C_2H_5)_4$, (TEP), que impide que haya explosión dentro de los cilindros con demasiada rapidez; además permite usar en las mezclas mayor cantidad de gasolina de menor octanaje, como es el producto natural (40-60 octanos) y alcanzar el valor requerido por las gasolinas comerciales a últimas fechas su concentración ha ido en disminución debido al grave problema de contaminación por plomo al ambiente y salud humana.

La cantidad óptima de TEP que se usa en las mezclas es de 3 mL por cada galón (aproximadamente 3.8 L). El octanaje de las mezclas aumenta cuando estas contienen mayor cantidad de hidrocarburos ramificados, proveniente del proceso de la isomerización y alquilación. Sin embargo, cuando las mezclas tienen un alto contenido de olefinas como las de la polimerización o tienen compuestos de azufre, la susceptibilidad al TEP disminuye (Chow, 1987). Actualmente la tendencia es reducir el TEP en la gasolina como se observa en el Anexo 2

Para la producción de gasolina, los químicos del petróleo han diseñado los métodos conocidos como desintegración catalítica (cracking o craqueo) y reformación catalítica para producir combustibles de mayor calidad. La desintegración catalítica consiste en tomar la fracción de keroseno (C_{11} a C_{14}), con alto punto de ebullición, y "desintegrarla" en moléculas más pequeñas susceptibles de usarse en la gasolina. El proceso se verifica sobre un catalizador de sílice y alúmina a temperaturas de 400 a 500 °C, y los productos principales son hidrocarburos ligeros, en el intervalo de C_3 a C_5 . Después estos hidrocarburos pequeños se recombinan catalíticamente para producir alcanos útiles de C_7 a C_{10} .

La reformación catalítica es un proceso por el cual los alcanos de cadena lineal presentes en la gasolina proveniente de destilación directa se convierten en moléculas aromáticas tales como benceno y tolueno. Los compuestos aromáticos tienen alto índice de octano y son por tanto componentes deseables de las gasolinas. (Fessenden, 1985).

2.4.1 OCTANAJE DE LA GASOLINA.

El índice de octano de un combustible es la medida con la cual se juzgan las propiedades antigolpeo del combustible en cuestión (explosión controlada por la chispa de una bujía antes de finalizar la compresión entre el pistón y la mezcla de aire y combustible) Cuando se usan combustibles deficientes, la combustión puede iniciarse sin control en una superficie caliente del cilindro antes de que se produzca la chispa de la bujía. Esta preignición, que se detecta como golpeteo, puede destruir rápidamente el motor ya que se crean fuerzas irregulares en el cigüeñal y se eleva la temperatura del motor (McMurry, 1994).

El heptano normal es el que genera una detonación de mala calidad asignándole un valor de cero de octanaje. El compuesto que detona y se le asigna un valor de 100 es de ocho átomos de carbono, con una cadena ramificada llamado iso octano (2,2,4-Trimetilpentano), creando los índices de octano de las gasolinas. Si determinada gasolina tiene características detonantes parecidas a las de una mezcla en 90% de iso octano y 10% de heptano normal, se les asigna un índice de octano de 90 (Chow, 1987).

La clasificación de las gasolinas por medio del octanaje indica que los valores más elevados se deben a la presencia de más hidrocarburos ramificados, no saturados y aromáticos. El octanaje de la gasolina se puede incrementar mediante procesos adicionales de refinación denominados disociación o cracking, reformación y alquilación. Las gasolinas sin plomo y de alto octanaje requieren mayores proporciones de hidrocarburos aromáticos y no saturados (Dickson, 1980).

2.4.2 COMPONENTES DE LA GASOLINA

De acuerdo a Rhodes, Olvera & León (1991), la composición de la gasolina es:

Cuadro 4. Algunos constituyentes de la Gasolina.

Metil Ter-Butil Eter	n-Octano	Metilciclopentano
3-Metilheptano	Etilbenceno	Ciclopentano
Tolueno	p-Xileno	2-Metilhexano
Propano	n-Nonano	1, 3-Dimetilciclopentano
n-Butano	Indan	3-Etilpentano
2-Metilbutano	1, 3, 5-Trimetilbenceno	Metilciclohexano
2-Metilpentano	4-Metilnonano	2,4-Dimetilhexano
n-Hexano	n-Pentano	2-Metilheptano
2,4-Dimetilpentano	1,2,3,5-Trimetilbenceno	1,3-&-1,4-Dimetilciclohexano
n-Dodecano	Ciclohexano	n-Propilciclopentano
3-Metilhexano	Benceno	m-Xileno
1, 2-Dimetilciclopentano	Etil-benceno	o-Xileno
n-Heptano	n-Butano	Propilbenceno
Etilciclopentano	n-Pentano	1-metil-4-etilbenceno
2,3,4-Trimetilpentano	Naftaleno	1-Metil-2-Etilbenceno
Isocetano (2,2,4-Trimetil Pentano)	n-Decano	t-Butilbenceno
2,6-Dimetiloctano	1,2,4-Trimetilbenceno	3-Metiloctano
1,2,4-Trimetilbenceno		

De acuerdo a Carreno (1991) en la gasolina se hallan presentes sólo tres clases de hidrocarburos: alcanos, cicloalcanos y arenos. Dentro de los alcanos, cicloalcanos y arenos que se localizan en la gasolina en mayor cantidad, se resume en el cuadro 5.

Cuadro 5. Serie de alcanos, cicloalcanos y arenos de mayor contenido en las gasolinas.

Alcanos y Cicloalcanos	Arenos
Heptano	Tolueno
Hexano	m-Xileno
Octano	1,2,4-Trimetil benceno (Seudocumeno)
Pentano	Benceno
Butano	Etilbenceno
2-Metil heptano	Cumeno
Metil ciclohexano	1,2,3-Trimetil benceno (Hemimeliteno)
2-Metil butano	Propilbenceno
3-Metil hexano	1,2,3,5-Trimetil benceno (Mesityleno)
2-Metil pentano	
1,1-Dimetil ciclohexano	
1,3-Dimetil ciclohexano	
Ciclohexano	
1,2,4-Trimetil ciclopentano	
Metil ciclopentano	
1,1,3-Trimetil ciclopentano	
1,2,3-Trimetil ciclopentano	
1,2-Dimetil ciclopentano	
1,2-Dimetil ciclohexano	
1,2,4-Trimetil ciclopentano	
2-Metil hexano	
Etil ciclohexano	

Tomado de Carreno, 1991.

Se ha determinado que pueden ser identificados más de 150 compuestos de la gasolina y estudios realizados, se enfocaron a 13 compuestos más comunes que de acuerdo a su comportamiento en el suelo se dividen en 4 grupos:

- 1) Compuestos que preferentemente son absorbidos por la estructura del suelo.
- 2) Compuestos que se volatilizan rápidamente.
- 3) Compuestos que pueden causar mayor peligro.
- 4) Compuestos que no tienen un comportamiento de migración definido (Lesser, 1995).

Los principales componentes de las gasolinas incluyen alcanos, cicloalcanos y aromáticos. Los alcanos y cicloalcanos son llamados parafinas. El porcentaje en volumen de las familias de hidrocarburos son de aproximadamente 51% alcanos, 36% cicloalcanos y 14% aromáticos. Dentro de los compuestos del petróleo, los aromáticos son los más importante desde el punto de vista ambiental por su toxicidad. El benceno, tolueno, xileno y sus isómeros presentan densidades menores a uno. El benceno es el más soluble en agua con hasta 1780 ppm a temperatura ambiente, el tolueno 515 ppm

a 20°C, por lo tanto estos compuestos son considerados de mayor interés debido a su lixiviación y ser cancerígenos a los organismos. Los componentes aromáticos BTEX (benceno, toluenos, etilbenceno y xilenos) se consideran de mayor movilidad en el suelo hacia mantos acuíferos (Lesser, 1995).

2.5 HIDROCARBUROS EN EL SUELO.

Para el recurso suelo, hay diferentes vías potenciales de exposición a contaminantes como son: migración, lixiviación, volatilización de sustancias orgánicas de la atmósfera del suelo, principalmente.

La migración, retención y transformación de compuestos orgánicos en el suelo es afectado por la naturaleza de este. Las propiedades y condiciones que afectan el flujo de estos compuestos son:

- 1) Textura del suelo, la lixiviación en textura granular (suelos arenosos y grava) es más rápido que en textura finas (suelos arcillosos), que son más probables a atenuar y 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.
- 2) Los horizontes pueden retardar la migración como aquellos que presentan una heterogeneidad vertical que en horizontes uniformes del suelo.
- 3) La presencia de depresiones en los estratos son más probables a acumular elevadas cantidades de fluidos contaminados, mientras los estratos inclinados o en declive pueden llegar a pozos o brotar con los suministros de agua. La estratigrafía del suelo raramente se conoce en zonas subterráneas.
- 4) La 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.
- 5) La 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 intragregados donde los contaminantes potenciales pueden ser retenidos.
- 6) La humedad edáfica y la lluvia tienen un efecto en el patrón y migración de compuestos orgánicos en el suelo, que cohabitan en la misma red de poros y que interactúan con el agua inicial presente.

- 7) Flujo inestable, favorece la tendencia ocasional 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 vadosa y siguiendo un transporte directo de contaminantes a la capa freática (Hillel, 1989).

Un compuesto orgánico volátil dentro de la zona vadosa puede distribuirse en cada una de las tres fases a una misma concentración de equilibrio en función de la solubilidad y la volatilidad. Otros factores que se incluyen son el contenido de materia orgánica y el tamaño del poro (Crouch, 1990).

La solubilidad de la gasolina en el agua es típicamente en el intervalo de 50-150 mg/L, y vapores reportados para aceite combustible de tipo 2 o diesel, entre 0.4 y 8.0 mg/L. Pocos estudios han examinado el potencial para la solubilización y transporte de combustibles absorbidos en el suelo a través de la capa freática.

Debido a la naturaleza volátil de la gasolina (su presión de vapor oscila entre 60 y 105 kPa, dependiendo en la estación y el área geográfica de uso) tiende a una fase de vapor. La gasolina, al ser una mezcla compleja de hidrocarburos, ocasiona que las propiedades de sus vapores reflejen sustancias con presiones de vapor relativamente altas, como el butano, propano, benceno, tolueno, xileno, que preferentemente volatilizan, favoreciendo que disminuya la concentración de combustible restante en el suelo (Crouch, 1990).

Existe un serio problema en los métodos usados para determinar la concentración de contaminantes en el suelo, debido a que la gasolina y otros combustibles para motor son líquidos volátiles, muchas de las medidas de campo, demuestran concentraciones de vapores contaminantes en la superficie o dentro del suelo sin conocer el contaminante absorbido. Tales medidas de vapor son hechas por una variedad de instrumentos (indicador de gas combustible, analizador de vapor orgánico, cromatógrafo de gases portátil) con varios niveles de especificidad (Crouch, 1990).

2.6 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN SEDIMENTOS, ACUÍFEROS Y SUELO.

Dentro de los hidrocarburos presentes en los sedimentos, de acuerdo a Padilla (1989) se hallan los siguientes:

Hidrocarburos Biogénicos: Se encuentran presentes en los organismos marinos y terrestres y pueden ser biosintetizados por los mismos 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.

Hidrocarburos del Petróleo: Son aquellos que son introducidos como resultado de las actividades antropogénicas y derivados del petróleo crudo.

Estos hidrocarburos pueden sufrir varios procesos de transformación como:

1. **Evaporación** de hidrocarburos de bajo peso molecular (gases)
2. **Disolución**, depende del peso molecular, que permitirá una mayor o menor solubilidad en el agua.
3. **Sedimentación**, se produce al formarse emulsiones o residuos con densidad mayor que la del agua
4. **Oxidación**, provocada por la exposición de los hidrocarburos al oxígeno y a la luz solar en aguas superficiales.
5. **Degradación microbiana**, algunos componentes del petróleo son susceptibles a ser degradados por microorganismos, en donde la disponibilidad de nutrientes, nitrógeno y fósforo puede determinar una mayor o menor actividad microbiana.
6. **Emulsificación**, es la mezcla heterogénea del petróleo y agua.

Hidrocarburos Aromáticos: Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH's) están formados por dos o más anillos de benceno fusionados, los cuales difieren en el número y posición del anillo aromático; 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.

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.

Estos compuestos se encuentran distribuidos en el 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 y los aportes terrígenos, pero en menor grado (Padilla, 1989).

Los tiempos de residencia de los hidrocarburos fósiles en los sedimentos pueden ser de 3 a 10 años, dependiendo del tiempo de descomposición, que es menor en comparación a la columna de agua, ya que en los sedimentos se acumula en forma de una película delgada con una área superficial mucho menos efectiva, por lo que se reduce la velocidad de degradación, en consecuencia actúan como reservorios de los desechos petroleros y de otros contaminantes (Padilla, 1989).

Los hidrocarburos se pueden encontrar en diferentes formas en el suelo en tres fases: líquida, disueltos en el agua y absorbidos por el suelo (Lesser, 1995).

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).

De acuerdo a su densidad, 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. 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 migrar en dirección al flujo de agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad (Figura 1).

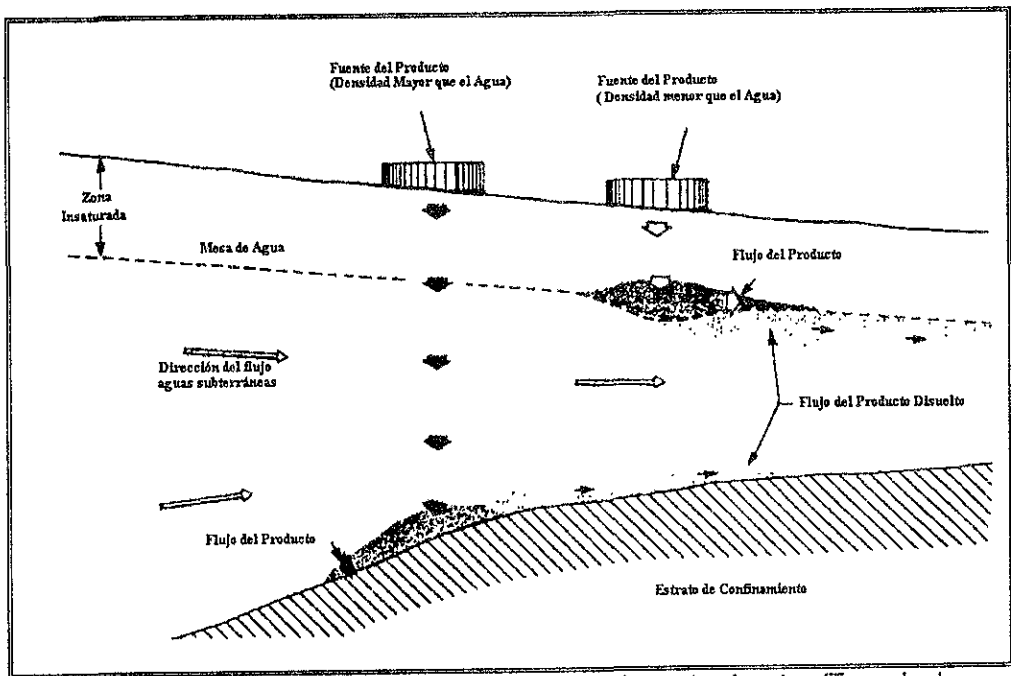


Figura 1. Efectos de la densidad en la migración de contaminantes (Tomado de Barcelona, 1990)

Los compuestos orgánicos son transportados a través del suelo como: flujo de masa disuelto en agua, difusión líquida y difusión gaseosa. De acuerdo a Jury (1989) se considera importantes las siguientes propiedades del suelo como:

Contenido de Humedad. El 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 unas pocas monocapas (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.

Porosidad. La disminución de la porosidad o aumento de la densidad generalmente disminuye el transporte de difusión líquida, gaseosa y de flujo de masa al presentar una baja permeabilidad. Sin embargo, suelos de textura fina como los arcillosos generalmente tienen una alta porosidad y baja permeabilidad que los arenosos. Con la disminución de porosidad también aumenta los sitios de adsorción orgánica causando un aumento de adsorción disminuyendo la concentración gaseosa y líquida.

Contenido de Arcilla. Es correlacionado a 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 en el contenido de arcilla y la adsorción (Jury, 1989).

Si el suelo contiene una gran cantidad de materiales de grano fino, o acumulación puede presentarse estratificado, para dificultar las direcciones de migración debido a la arquitectura de las caras, los controles estatigráficos impuestos por la depositación ambiental (cauces), orientación del material parental y las fracturas del material geológico (Testa, 1994).

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).

McBride (1994) menciona que las moléculas no polares o de baja polaridad están generalmente asociadas con una baja solubilidad en el agua y una gran tendencia de la molécula para "escapar" a la fase de solución por la condensación a las interfases, particularmente interfase coloide-agua. Teniendo las moléculas no polares o débilmente

polares 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 e ion-dipolo (ligeramente fuerte a débil).

La integración de las distintas especies de hidrocarburos dentro de las capas expandibles de los silicatos es esencialmente un proceso favorecido por el agua de la intercapa asociada con cationes intercambiables y es reemplazado por especies orgánicas. La adsorción ocurre en las superficies hidrofóbicas de la materia orgánica en el suelo donde las moléculas no polares son preferentemente adsorbidas por el agua. En algunos experimentos se sugiere que los n-alcános pueden penetrar en el espacio de las capas internas de la montmorillonita a una baja velocidad (Yong, Mohamed & Warkentin, 1992).

En experimentos realizados las moléculas aromáticas 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. Mortland & Pinnavia sugieren que el benceno es físicamente adsorbido en la arcilla y no interactúa con el cobre (Morrill, Mahilum & Mohiuddin, 1982).

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 líquida y gaseosa como también su transporte.

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 los sólidos (contenido de carbón orgánico). Muchos de los compuestos hidrofóbicos puede ser altamente retardados, de acuerdo a varios estudios de campo (Mackay, Roberts & Cherry, 1985).

Los mecanismos de enlace de hidrógeno y la interacción ion dipolo no son operativos para las moléculas no polares. De hecho, la adsorción de esas moléculas en la capa húmeda de los silicatos y los óxidos es frecuentemente bajo. La adsorción de esas moléculas puede ocurrir en la materia orgánica, aunque hay debate acerca de la naturaleza del proceso (Fränzle, 1993).

Este comportamiento es debido a las moléculas no polares que tienen una mayor atracción hacia la materia orgánica que en las superficies de los minerales esto es atribuido a la existencia de las superficies hidrofóbicas (organofílicas) o fases dentro de la matriz orgánica. El fenómeno de atracción hidrofóbica, se define como la atracción aumentada entre la superficie y el adsorbente en un disolvente debido a la interacción atractiva 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 compuesto orgánico tiene una baja afinidad por el agua que el agua misma. Las moléculas orgánicas ocupan un volumen específico en la solución acuosa, que perturba el arreglo normal del enlace de hidrógeno de las moléculas de agua. Dado que una molécula de alto peso molecular desestabiliza la solución acuosa, las moléculas grandes no polares son "oprimidas" fuera de la solución de las superficies que las pequeñas (Murray, 1994).

Profundidad de Agua Subterránea. 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 ocurriendo a la capa superficial que se ha evaporado sin ninguna entrada de agua por un periodo dado. También afecta el tiempo de viaje de un compuesto lixiviado de la superficie a aguas subterráneas. Siendo influencia indirecta en el transporte.

Retención de agua. Es una propiedad que puede influir en los procesos de transporte particularmente cuando las entradas de agua a la superficie del suelo son contadas; es la cantidad de agua retenida después de drenar, conocido como capacidad de campo, es mucho más alta en suelos de textura fina que en suelos arenosos. Su influencia en el transporte es idéntico al contenido de agua (Jury, 1989).

El contenido de humedad afecta la difusión de los contaminantes como es el caso de aquellos que son relativamente solubles en agua como son los compuestos de anillo aromático (el benceno es la estructura básica) afectando la calidad de agua; es por ello que la presencia del tolueno, xileno y benceno sea más constante en el análisis de los suelos, mientras la mayor parte de los constituyentes de la gasolina flota en la tabla de agua, y de igual forma para los alcoholes (Nyer, 1992). Además que el agua es un medio de transporte en dirección horizontal y vertical, es fácil para sustancias menos adsorbentes y más polares como es el caso de los alcoholes seguido por los aromáticos y finalmente los alifáticos (Tölgyessy, 1993).

La difusión es afectada por la adsorción del compuesto orgánico dentro de las partículas del suelo. La materia orgánica y el contenido de arcilla influyen en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles del suelo. Muchos sitios de adsorción existen en el suelo los cuales preferentemente adsorben agua, y estos pueden adsorber algunos compuestos químicos cuando el contenido de humedad es bajo. En algunos suelos relativamente secos, la superficie puede retener químicos orgánicos que pueden volatilizarse bajo condiciones relativamente húmedas (EPA, 1983).

El incremento de contenido de agua confinada disminuye significativamente la volatilización por algún tiempo. El manejo para la protección de aguas subterráneas por la minimización de entrada de agua al sitio tenderá a aumentar la pérdida de volatilización al dejar secar la capa del suelo, esto es particularmente peligroso para

revestimientos arcillosos, que pueden fracturarse y aumentar el coeficiente de difusión ascendente en la intercapa entre porciones de la matriz del suelo. El manejo óptimo para la protección simultánea de aguas subterráneas y la atmósfera puede ser aplicando suficiente agua para mantener un alto nivel de retención sin permitir cantidades sustanciales de agua en exceso de la demanda evaporativa a ocurrir (Jury, Russo, Streile & Abd, 1990).

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 estos son retenidos, el fenómeno presente es por las fuerzas de Van der Waals, predominante en las superficies de los minerales arcillosos. En los compuestos orgánicos poco polares se menciona que estos interactúan con las superficies arcillosas a través de sus electrones, como es el caso del benceno que forma complejos estables con el cobre y la arcilla; en el caso de los alcoholes en superficies arcillosas la adsorción se da por las interacciones catión-dipolo formando, de acuerdo al número de carbonos complejos de capas simples y dobles (Morrill, Mahilum & Mohiuddin, 1982).

El agua adsorbida disuelve compuestos orgánicos polares e inorgánicos permitiendo su difusión, a baja velocidad. En el caso de compuestos orgánicos menos polares, el agua es un pobre competidor para los sitios de adsorción a niveles de baja humedad. En trabajos realizados muestran que la adsorción generalmente aumenta por la eliminación del agua o el aumento de la concentración del compuesto orgánico (Morrill, Mahilum & Mohiuddin, 1982).

Las moléculas de agua en la primera capa de hidratación de cationes adsorbidos en la arcilla pueden ser desplazados por alcoholes, este desplazamiento de moléculas de agua depende del poder de polarización del catión. El otro mecanismo de adsorción de los alcoholes en la superficie arcillosa son el enlace de hidrógeno y las interacciones catión-dipolo. Muchos de los alcoholes alifáticos primarios forman complejos de una sola capa en la arcilla con su cadena alquil situado en paralelo a la superficie de la arcilla. Sin embargo, algunos alcoholes de cadena corta (menos de C_6), el catión presente determina la cantidad adsorbida y el tipo de complejo, por ejemplo, capa simple o doble. La adsorción de alcoholes en caolinita saturada de $Na^+ - Ca^{+2}$ y montmorillonita parece estar en función de la longitud de la cadena y la saturación del catión, especialmente en el caso de los alcoholes menos solubles orgánico (Morrill, Mahilum & Mohiuddin, 1982).

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 sosteniendo líquidos o cristales de hidrocarburos, agua, alcoholes, entre otros, a gases o sustancias disueltas en superficies sólidas, pueden ser resultantes de la asimetría momentánea en las nubes

de electrones sobre los átomos, fuerza dipolo y enlaces de hidrógeno. La debilidad de esas fuerzas es reflejada en la entalpía de baja absorción (la cantidad es apenas superior de 40 KJ/mol) de enlace de fisiosorción (o interespecifico). La reversibilidad es una característica de adsorción física que resulta de un equilibrio rápido. La adsorción física de gases por medios porosos tales como la silica gel, carbón y suelo frecuentemente exhibe "histeresis", una forma de irreversibilidad debido a la condensación de líquido en poros. Un fenómeno análogo ocurre las sustancias químicas enlazadas a las interfaces sólido-líquido (Fránzle, 1993).

El agua forma una monocapa sobre las superficies de los componentes del suelo a una humedad relativa del 20 % a 20 °C. La adsorción ocurre en las superficies hidrofóbicas de la materia orgánica en el suelo, donde las moléculas no polares son preferentemente adsorbidas por encima del agua. Los sitios de actividad hidrofóbica de sustancias húmicas incluyen cadenas alifáticas y derivados de la lignina con un alto contenido de carbón y pequeño número de grupos polares (Yong, Mohamed & Warkentin, 1992). La intercalación de especies de hidrocarburos dentro de los silicatos de capas expandibles es un proceso en que parte del agua intercapa asociada con los cationes intercambiables es reemplazado por especies orgánicas. Se demostró que el n-hexano fue capaz de formar una sola capa 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 interlaminar de la montmorillonita Wyoming-Ca a una velocidad muy baja (Yong, Mohamed & Warkentin, 1992).

Los hidrocarburos alifáticos (presión de vapor mayor a 1 atm) son asimilables por los suelos a bajos porcentajes de aplicación. Los compuestos volátiles temporalmente disminuyen el número y tipo de organismos presentes. Donde los hidrocarburos alifáticos volátiles son aplicados en la superficie, el mecanismo de pérdida es la volatilización, disminuyendo este con un mayor contenido de agua para los compuestos químicos no polares (tales como los hidrocarburos alifáticos) Esto puede ser debido al desplazamiento de los químicos no polares adsorbidos en la superficie del suelo por el agua. Los hidrocarburos alifáticos generalmente presentan baja solubilidad al agua (Jury, Russo, Streile & Abd, 1990).

De los parámetros ambientales se considera los siguientes:

Temperatura. La presión de vapor está en función de la temperatura; una vez que aumenta 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. La precipitación puede tener una influencia dominante debido a la fuerza de la lluvia afectando la velocidad de flujo en el suelo. Los suelos con intensa y frecuente lluvia 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. Para suelos que no reciben entradas de agua por irrigación, la lluvia menos la evapotranspiración determina la cantidad de agua lixiviada. 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).

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas (densidad, solubilidad, viscosidad, etc.), además de las características del medio como son el tipo de suelo, permeabilidad, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel del manto freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial también tienen una gran influencia (Cuadro 6). Todas las variables en su conjunto definen el tamaño y la distribución tridimensional de la pluma de contaminación en una zona específica.

Cuadro 6. Parámetros del Suelo y Ambiente que influyen en el transporte de contaminantes a través del Suelo

Parámetros del Suelo	Parámetros Ambientales
Contenido de Agua	Temperatura
Porosidad, Densidad o Permeabilidad	Precipitación
Contenido de Arcilla	Evapotranspiración
Contenido de Materia Orgánica	
profundidad de Agua Subterránea	
Retención de Humedad	

Tomado de Jury, 1989.

El principal transporte y procesos de transformación para los contaminantes orgánicos disueltos en suelo son: la advección, dispersión, adsorción y retardo y la transformación química y biológica. La migración de una fase líquida orgánica 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 acuíferos 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 turbulenta, 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 (Fränze, 1993). La mezcla mecánica resulta de las variaciones en la velocidad del agua dentro de los poros del acuífero 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, 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 (Fränze, 1993).

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

La migración vertical de BTEX llega a ser detenida en forma natural debido a los siguientes factores:

1. Los compuestos son degradados.
2. Se limita su movimiento por la presencia de una capa impermeable,
3. Alcanzan la zona de capilaridad

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 pueden transformar los químicos orgánicos que se pueden considerar para este caso:

Oxidación: Se presenta en el suelo afectando a muchos 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.

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 para 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 es explicada en estudios realizados observando la absorción de compuestos orgánicos por parte de plantas comestibles, por lo que es necesario analizar los cultivos presentes en los terrenos agrícolas aledaños a la refinería como otro medio de remoción de estos compuestos en el suelo (Fränzle, 1993).

2.7 PROBLEMÁTICA

El desarrollo petrolero y el crecimiento de la industria petroquímica ha requerido de la utilización intensiva de los energéticos fósiles para cubrir las necesidades de una sociedad más consumista, como es el caso del parque vehicular y su fuerte demanda de combustible que ha llevado a lo largo del tiempo una fuerte degradación del ambiente, principalmente el aire. En la elaboración de los combustibles desde los centros de refinación también ha contribuido a la degradación del aire, agua y suelo. Este último tiene poca atención en comparación al aire y agua referente a estudios de contaminación y más referente a la deposición atmosférica, además de las relaciones contaminante y propiedades del suelo que son pieza clave en la retención o degradación dentro del sistema. México cuenta con limitada información referente a este tema por lo que es necesario llevar a cabo estudios de inventario para saber el estado actual de los recursos cercanos a zonas industriales y urbanas indispensables para el uso adecuado y conservación de estos.

De acuerdo a SEPA (1991), las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles de las refinerías son de 10,000-15,000 T/año. Los hidrocarburos son emitidos durante la

producción ocurriendo principalmente como resultado de goteos, que vienen de tanques de bombeo y juntas de las compresoras, análisis continuos, muestreo de hidrocarburos, etc. Las principales fuentes son el área de proceso, tanques de almacenamiento y la carga y descarga de productos ligeros como la gasolina.

2.8 CROMATOGRAFIA DE GASES

La cromatografía de gases es una técnica analítica utilizada en la separación, identificación y medida de los componentes de una mezcla. Se basa en la diferencia de velocidades de migración de los componentes de una mezcla, al ser arrastrados por un gas inerte de un tubo relleno de un material adecuado (Perkin-Elmer, 1997). La cromatografía de gases es, en muchos casos, el único método que permite separar en una sola operación más de 100 componentes de una mezcla.

Cuadro 7. Clasificación de las técnicas en Cromatografía

	Sistema de Operación	Fase Estacionaria	Fase Móvil
Cromatografía	Adsorción	Sólido Sólido	Líquido Gas
	Reparto	Líquido Líquido	Líquido Gas
	Intercambio Iónico	Sólido	Líquido

Tomado de Abbott & Andrews, 1983.

	Operación	Disposición de la fase estacionaria
Cromatografía	En el espacio	Papel Capa fina columna
	En el tiempo	Columna

Tomado de Storch, 1975.

En la cromatografía de gases la fase móvil está integrada por la mezcla a resolver y, en la mayoría de los casos, por un gas no retenible o inerte para llevar en sí o para empujar la mezcla y los componentes durante la separación. Este gas inerte recibe el nombre de portador o acarreador. La fase estacionaria puede ser: a) un sólido, en cuyo caso la retención selectiva de los componentes de la mezcla a resolver se debe a fenómenos consecutivos de adsorción y desadsorción, o b) un líquido depositado sobre un soporte sólido en cuyo caso los fenómenos son de reparto. El soporte sólido puede

ser un relleno de la columna o bien la pared interior del tubo que la forma (Storch, 1975).

La separación de los componentes de la mezcla a resolver en cromatografía de gases se realiza en el tiempo, emergiendo cada componente de la columna por separado. A la salida de la columna cromatográfica se encuentra un dispositivo de análisis o uno de recolección, capaces de realizar funciones respectivas también en el tiempo.

La separación por elución es la utilizada, aquí el gas portador circula a lo largo de la columna de un modo continuo durante la operación. En un momento dado se introduce en la corriente de gas portador una muestra de la mezcla a resolver en estado de vapor. El gas portador arrastra a los componentes a lo largo de la columna, donde se producen, de forma paulatina y sucesiva, los procesos de retención y liberación de los componentes a distintas velocidades, dependientes del poder de atracción que muestra la fase estacionaria sobre cada uno de los componentes que integren la mezcla. Como resultado de los procesos antedichos, los componentes migran a lo largo de la columna a velocidades diferentes, por lo cual, dado que todos deberán recorrer la misma distancia, que es la longitud de la columna, se realiza su separación a diferentes tiempos dentro de la columna, diferenciados en el mismo.

Los componentes del cromatógrafo de gases utilizado son: 1) Fuente de gas portador (Helio), 2) Regulador de presión o Flujo del gas portador, 3) Inyector, 4) Columna capilar, 5) Horno, 6) Detector (Ionización por Flama de Hidrógeno) y 7) Detector Electrónico (Figura 2).

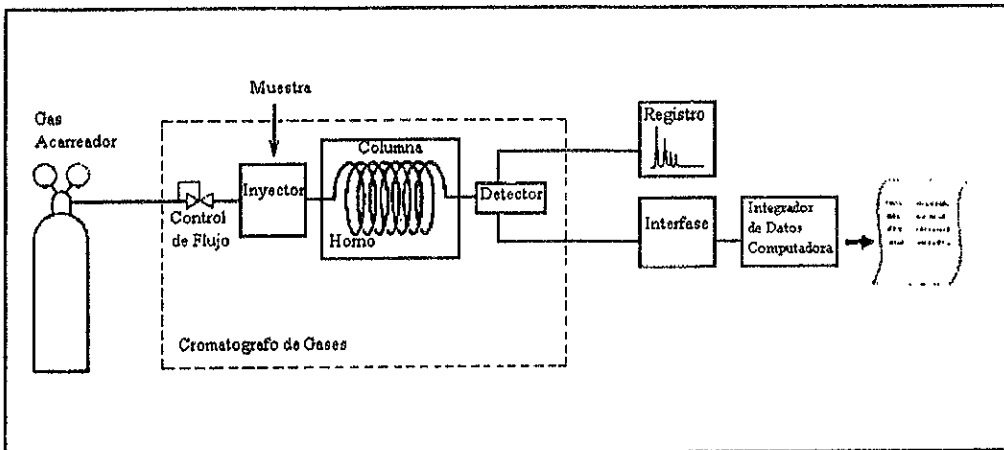


Figura 2. Componentes básicos del Cromatógrafo de Gases (Tomado de Best & Dawson, 1993)

Seleccionando las condiciones adecuadamente se logra una completa separación entre las moléculas de los componentes. A la salida de la columna, el detector nos

dará una señal indicando la presencia de una sustancia diferente al gas de arrastre, esta señal se transmite al registrador que nos proporciona la información en forma gráfica. El tiempo de análisis varía y puede ser de minutos a horas, siendo para la gran mayoría entre 5 y 15 minutos. El tamaño de la muestra también varía entre unos pocos microlitros. Se puede detectar la presencia de sustancias hasta en 10^{-12} gramos (Best & Dawson, 1993).

En un cromatograma, se definen algunos términos que son:

1. Línea base que es la línea dibujada por el registrador en ausencia de la muestra
2. Punto de Inyección es el momento en que se introduce la muestra al sistema cromatográfico.
3. Pico de aire es el tiempo que tarda un compuesto que no es retenido por la columna desde el punto de inyección hasta su paso por el detector.
4. Tiempo de retención (T_r), es el tiempo que transcurre desde la inyección de la muestra hasta el punto máximo del pico correspondiente a determinado compuesto de la mezcla.
5. Tiempo de retención corregido (T'_r), equivale al tiempo de retención menos el tiempo necesario para el pico del aire.
6. Ancho de la base (W_b), es la distancia entre las intersecciones de las tangentes a los puntos de inflexión con la línea base.
7. Altura del pico (h), es la distancia perpendicular desde la línea base y la máxima deflexión del pico (Figura 3).

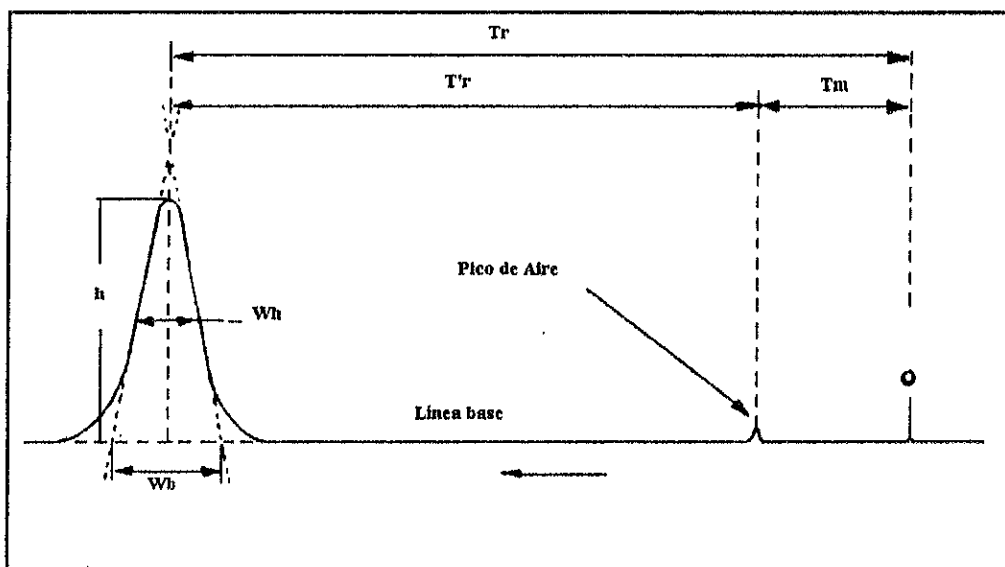


Figura 3. Términos de un Cromatograma (Tomado de Best & Dawson, 1993)

Son innumerables las aplicaciones que encuentra la cromatografía de gases en el ámbito de la investigación, tanto fundamental como aplicada, dentro de los campos de la Química física, Bioquímica, Química orgánica, etc.

Entre las aplicaciones físico químicas se encuentra la determinación de datos termodinámicos como son: coeficientes de actividad, constantes de equilibrio en adsorción, difusividades, calores, energías libres y entropías de disolución y de vaporización, constantes de formación de complejos, etc.

El análisis, tanto de las materias primas como de los productos obtenidos, impuesto por las especificaciones de calidad cada vez más estrictas de estas industrias, requiere métodos precisos, rápidos y económicos. Introduciendo a la terminología industrial el concepto de "pureza cromatográfica" como un grado de calidad superior al de "químicamente puro". Otra línea de aplicación es el análisis de efluentes y residuos, contribuyendo a la determinación de sustancias contaminantes en medios diversos (aire, agua y líquidos residuales, etc.) pone sus grandes posibilidades al servicio de las técnicas de análisis para la protección del ambiente. Es probablemente el desarrollo más acelerado en las mediciones analíticas de los contaminantes y que ha tomado lugar en la cuantificación de constituyentes orgánicos. Hoy en día el vasto intervalo de contaminantes artificiales que entran al ambiente, algunos de esos contaminantes son extremadamente tóxicos a bajas concentraciones por ejemplo, dioxinas, mientras otros son conocidos a ser persistentes y bioacumulables, hallándose en muestras por muchas décadas después de que su uso ha cesado, por ejemplo, el DDT y PCB's (Best & Dawson, 1993).

Industrias como son la de pinturas y barnices, pegamentos, disolventes, materias plásticas, colorantes, insecticidas, alimentos, bebidas, perfumería, productos farmacéuticos, gases licuados y a presión, etc., hacen uso de la cromatografía de gases en su control de calidad y de procesos. El campo industrial donde se encuentra más aplicaciones y muestra un desarrollo más pujante es la industria del petróleo, de sus derivados y la petroquímica (Storch, 1975)

5. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El área de estudio se localiza al suroeste del Estado de Hidalgo a 94 Km de la Ciudad de México, en el municipio de Tula de Allende que su nombre deriva de las raíces nahoas Tollan "Junto del tular" o "Cerca del tular". En otomí su nombre "namenhi" que significa "Lugar de mucha gente".

Esta región pertenece a Tula-Tepeji, integrado por siete municipios, se ubica geográficamente entre los paralelos 20°08' y 19°58' de Latitud Norte y 99°31' y 99°15' de Longitud Oeste, a una altitud de 2066 m.s.n.m. El municipio de Tula de Allende con cabecera municipal del mismo nombre tiene una superficie de 337.48 Km². Esta pertenece a la provincia del Eje Neovolcánico, subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (Figura 4).

En los terrenos aledaños a esta población se practica la agricultura de riego, cuya fuente de abastecimiento es el río Tula, en el cual se descargan las aguas residuales de la Ciudad de México.

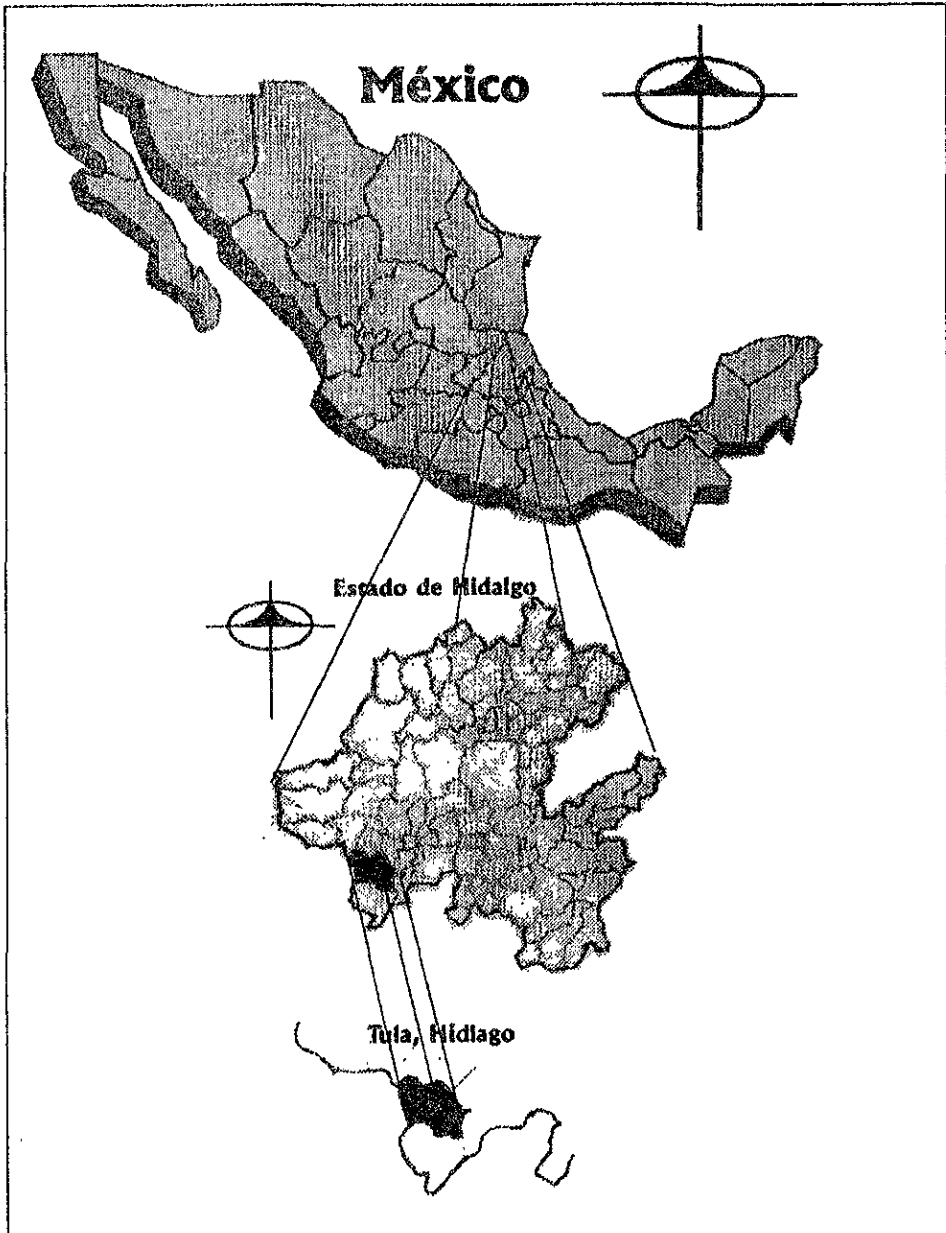


Figura 4. Ubicación del Municipio de Tula de Allende en el Estado de Hidalgo.

Hidrología: Se encuentra representada por el río Tula, afluente del Moctezuma, el cual tiene como tributarios más importantes a los ríos Tepeji, El Salto, Tlautla (o Coscomate), Rosas y el Salado. El río Tula recibe los desagües de la cuenca del Valle de México y fertiliza una importante zona al suroeste del Estado en la región conocida como el Valle del Mezquital (Martínez, 1982). Cuenta con los ríos de Tula, Rosas y Arroyo Grande, además de la presa de Endhó y Requena (Secretaría de Gobernación y Gobierno del Estado de Hidalgo, 1988).

Clima: En la zona se encuentran dos climas: seco estepario (BS) y templado con lluvias en verano (Cw) con temperaturas medias de 16.6 °C y oscilaciones térmicas de 6.7 °C, entre enero y mayo, siendo los meses más fríos y calientes, respectivamente, registrándose de marzo a noviembre niveles superiores a los 15 °C. La temperatura mínima varía de 3.3 °C en enero a 11.8° C en junio y agosto (Martínez, 1982). Tiene un clima templado-frío de la Sierra Madre y Eje Volcánico, registra una temperatura media anual de 17.6 °C (INEGI, 1992). Las precipitaciones se manifiestan principalmente de Mayo a Octubre, con niveles superiores a los 56 mm registrándose como promedio anual de 600 a 700 mm, pero debido a que la evaporación total es bastante fuerte el nivel freático desciende considerablemente, lo que ocasiona que el clima sea semiseco, con otoño y primavera secos. Este régimen pluvial incierto e insuficiente hace que los cultivos sujetos a temporal se desarrollen con bajos rendimientos y ocasionalmente nulos.

En la planicie de Tula son frecuentes las heladas, observándose hasta 82 días en un período que se extiende generalmente de Septiembre a Mayo (Martínez, 1982).

Orografía: El relieve del municipio corresponde a una planicie descendiendo ligeramente hasta el noroeste hasta llegar a 1,990 metros de altitud en el municipio de Mixquiahuala; naturalmente en los alrededores de Tula se observan lugares más elevados, sin embargo no existen elevaciones de importancia contando únicamente con el Cerro Grande (Martínez, 1982).

Geología: Existen materiales de acarreo del cenozoico superior como arenas, gravas, limos, los que han dado origen a los dos principales tipos de suelo: el aluvial y residual (Martínez, 1982) Para el municipio de Tula de Allende cuenta con rocas sedimentarias y volcanosedimentarias pertenecientes al Cenozoico con material volcánoclastico (origen continental constituido por la alternancia de tobas, arenas y paleosuelos; depositados en cuencas lacustres) y lutitas (origen

continental, las cuales son masivas y presentan algunas intercalaciones de areniscas, limonitas y tobas); y Mesozoico con material calizo. Además de presentar rocas ígneas del Cenozoico contando con basalto, dacita, andesita-brecha y volcánica intermedia.

Clasificación y Uso de Suelo: Tiene un suelo terciario, cuaternario y mesozoico, de tipo semidesértico, rico en materia orgánica y nutrientes. En cuanto al uso de suelo los agostaderos ocupan el primer lugar, el segundo lugar el agrícola y por último a otros usos. En tenencia de la tierra el 94.4% es ejidal, le sigue con 3.2% comunal y por último con el 2.4% la pequeña propiedad. En las llanuras presentan fases dúricas y petrocalcicas, llegan a tener menos de 50 cm o entre 50 cm y 1 m de profundidad. Los suelos son negros o pardos oscuros con una capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes llamados Feozem háplicos; pero los hay también con una capa de acumulación de arcilla denominados Feozem lúvicos, o los que contienen cal en todos sus horizontes, Feozem calcáricos. Los Feozem háplicos se encuentran asociados a otros suelos negros denominados Vertisoles pélicos y Planosoles mólicos que se encuentran en la caldera de Huichapan, localizada en lo alto de un antiguo aparato volcánico. Tienen fertilidad alta los Vertisoles y Feozem son altamente productivos y están dedicados a labores agrícolas de temporal y actividades pecuarias.

Los Vertisoles pélicos son suelos de color negro o gris oscuro son muy arcillosos, lodosos y adhesivos por presentar arcillas expandibles de tipo montmorillonita (expandibles en época de lluvia y con fuerte agretamiento, con dureza y masivos en época de secas). Las Rendzinas se concentran al centro de la zona en un corredor orientado burdamente noreste-suroeste que va desde Mixquiahuala hasta Tula de Allende y en la sierra de Tecozautla. Son suelos que se caracterizan por tener una capa superficial rica en humus y muy fértil, que descansa sobre roca caliza o sobre un material rico en cal. En las partes planas está asociado a Vertisol pélico y Feozem calcáreo, limitados por fase petrocálica (INEGI, 1992).

El suelo ubicado en la termoeléctrica es clasificado como Feozem calcáreo mientras en la refinería el suelo es de tipo Vertisol pélico, en ambos lugares la fase física es de tipo petrocálico (INEGI, 1983).

Flora y Fauna: La vegetación natural de la zona está muy alterada debido a que ha sido sustituida por la agricultura, no obstante aún es posible encontrar especies representativas en laderas y serranías circundantes como Opuntia, características del Matorral Crasicaule: cardón (*Lemaireocereus weberi*), garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) y viejitos (*Cephalocereus senilis*);

Matorral Desértico micrófilo en el que domina la *Karwinskia sp*, Bosque natural latifoliado de encino arbustivo (extinto) y *Juniperus* y Pastizales en sus tres tipos: natural, cultivado e inducido, resultado de un excesivo pastoreo (Martínez, 1982). La fauna es integrada por conejo, liebre, ardilla, camaleón, correcaminos y coyote (INEGI, 1983).

Desarrollo Industrial: En este municipio se desarrollan las industrias de la transformación, extractivas, construcción y maquiladoras. Siendo las más importante la Termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad a lado de la Refinería de Tula, y las fábricas de cemento Cruz Azul y Tolteca, entre otros (INEGI, 1988).

La Refinería de Tula cuenta con un área aproximada de 700 ha al oriente de la población, y a una distancia aproximada de 75 km. de la Cd. de México (Figura 5). En el año de 1972 se inició la construcción de la Refinería Miguel Hidalgo. Fue proyectada para procesar el crudo procedente de los campos del sur de los Estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas (Manzanilla, 1976).

La refinería fue inaugurada el 18 de marzo de 1976. Los productos que ahí se refinan son: Propano, Isobutano, Isopentano, Gas Licuado, Gasolvente, Gasolina, Gas nafta, Turbosina, Diáfano, Diesel nacional, Diesel especial, Combustóleo y Azufre. Dejando de producir Gasolina Nova (Duran, 1986).

Actualmente está en marcha el paquete ecológico dado por el Gobierno Federal para el mejoramiento de los combustibles como es el caso de gasolina y el diesel para reducir el contenido de azufre y la producción de aromáticos contando con las siguientes plantas para la refinería de Tula, Hidalgo (Viejo, 1995) :

- * Desintegración catalítica
- * Planta de Alquilación
- * Hidrodesulfuradora de Diesel (HDD)
- * Hidrodesintegradora de Residuales (HDR)

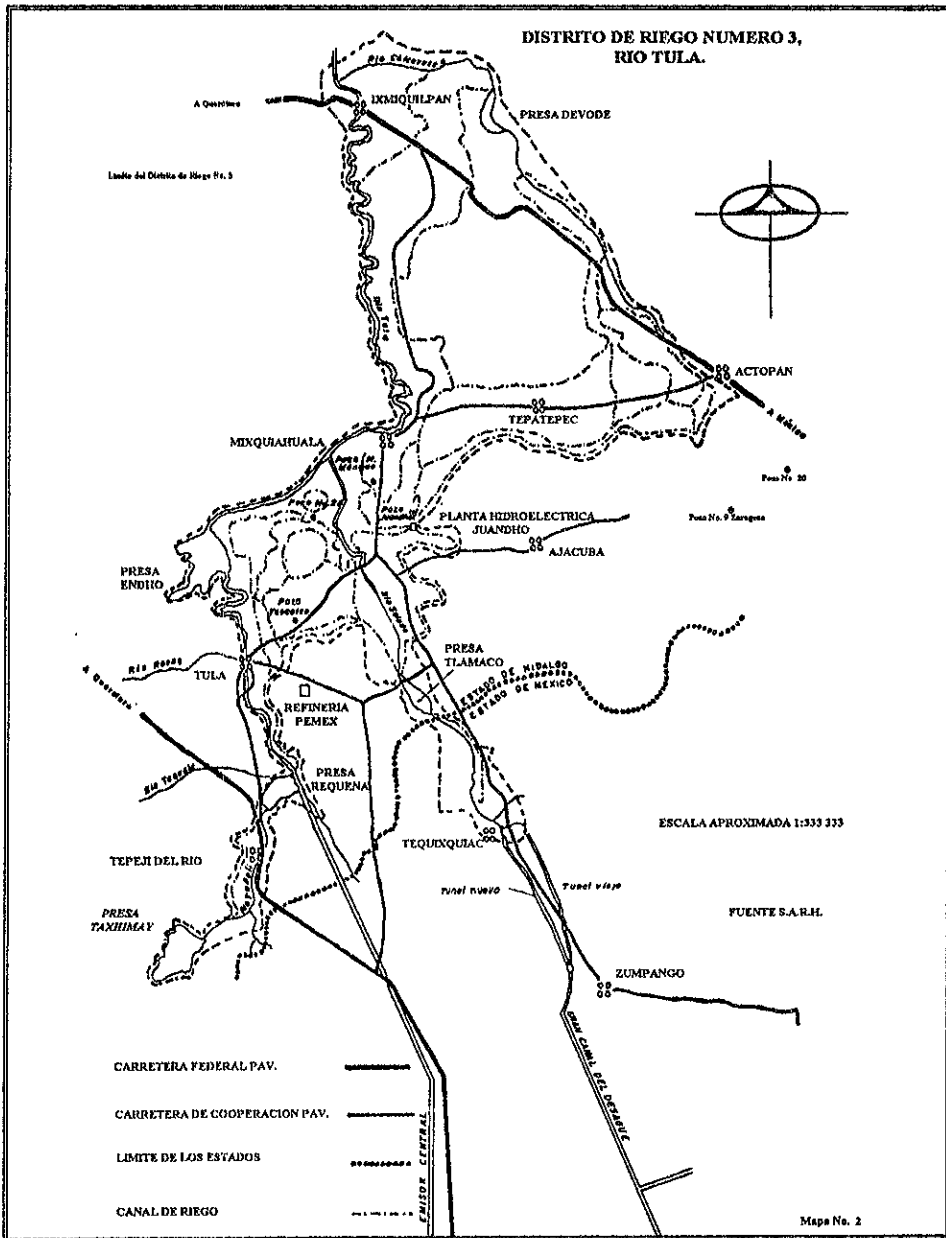


Figura 5. Ubicación de la Refinería de Tula en el Estado de Hidalgo, México.

3. OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar la presencia de los compuestos orgánicos de la gasolina en terrenos adyacentes a la Refinería Miguel Hidalgo en Tula de Allende, Estado de Hidalgo, así como la interrelación con las propiedades físicas y químicas del suelo y la probable migración de dichos compuestos.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- Determinar las siguientes propiedades: pH, Humedad, Textura, CIC y Materia Orgánica en suelos adyacentes a la refinería Miguel Hidalgo.
- Identificar y Cuantificar los compuestos orgánicos de las gasolinas en suelos adyacentes a la refinería, mediante la técnica de cromatografía de gases empleando el detector de ionización por flama (FID).
- Identificar la probable migración de dichos hidrocarburos en suelos.
- De acuerdo al tipo y concentración de hidrocarburos analizar su probable comportamiento de migración.

4. HIPÓTESIS:

La migración vertical de los compuestos orgánicos volátiles de la gasolina dependerá de las propiedades físicas y químicas del suelo, además de las condiciones ambientales que determinan su permanencia temporal o indefinida, lo que permitirá establecer el nivel de contaminación del suelo y definir las alternativas de solución, tratamiento y recuperación.

6. MÉTODO

El desarrollo del presente trabajo está dividido en tres fases: Campo, Laboratorio y Gabinete, cuyas actividades se mencionan a continuación.

Fase de Campo:

- 1) Se limitó la zona de trabajo de acuerdo a la periferia de las instalaciones de la refinería y realizar transectos con puntos localizados cada 30 m alejados de la barda perimetral y con una distancia entre transectos de 300 m.
- 2) Se realizó un muestreo estratificado, cada 20 cm de profundidad.
- 3) Las muestras se colectaron en frascos de vidrio color ámbar con su etiqueta de datos correspondiente.
- 4) Antes de la colección de la muestra se adicionó disulfuro de carbono al frasco para evitar la volatilización de los hidrocarburos
- 5) Las muestras fueron refrigeradas a 4°C, para su transporte al laboratorio.
- 6) Se colectó muestras de suelo para las determinaciones físicas y químicas en laboratorio perfectamente etiquetadas.

Fase de Laboratorio:

- 1) Al material empleado para la cromatografía de gases se le realizó un lavado previo con jabón y agua para después ser enjuagados con metanol secándolos a una temperatura de 105 °C durante una hora.
- 2) Se realizaron pruebas preliminares en el Cromatógrafo de Gases Perkin Elmer Autosystem con Detector de Ionización con Flama CG-FID para alcanzar las condiciones adecuadas para la separación de los compuestos orgánicos en el suelo.
- 3) El instrumento se calibró con muestras patrón de gasolina MAGNA SIN y NOVA para la cuantificación de los compuestos orgánicos presentes (Parr, Walters & Hoffman, 1991).
- 4) Las muestras se prepararon por agitación de 30 a 40 min. en un agitador mecánico con disulfuro de carbono.
- 5) La muestra se filtró en pipetas Pasteur y una alícuota se colocó en un vial para cromatografía de gases para su inmediata determinación.
- 6) Se introdujo el extracto de suelo al CG-FID, con el empleo de una microjeringa de 1 microlitro (μL) inyectando una alícuota de 0.5 μL con las siguientes condiciones de trabajo: Horno programado a temperaturas de 30, 80 y 120 °C y un tiempo inicial de 2.0, 2.0 y 5.5 min. de duración con una

rampa de temperatura de 10 y 5 °C/min. La temperatura del inyector fue de 180 °C y el detector a 200 °C. Presión del gas de arrastre a 10 psi.

- 7) Se obtuvieron los cromatogramas correspondientes de las muestras para su identificación y cuantificación de los componentes.
- 8) Se determinaron las siguientes propiedades físicas y químicas del suelo :

PARÁMETRO	MÉTODO	FUENTE
Densidad Aparente	De la probeta	Chapman, 1979
Densidad Real	Del picnómetro	Chapman, 1979
pH activo	Relación 1:2.5 H ₂ O	Marshall, 1939
pH real	Relación 1:2.5 KCl 1M	Marshall, 1939
Humedad	Secado al Horno a 105 °C y Gravimétrico	Robinson, 1945
% Materia Orgánica	Walkley & Black	Walkley-Black, 1934
Textura	Hidrómetro de Bouyoucos	Bouyoucos, 1962
Conductividad Eléctrica	Pasta de saturación	Scofield, 1932
Capacidad de Intercambio Catiónico.	Del Versenato	Jackson & Truog, 1940

Fase de Gabinete:

1. Se realizó una revisión bibliográfica
2. Se interpretaron los datos obtenidos en el cromatograma.
3. Las concentraciones de los hidrocarburos totales detectados en suelo fueron cuantificados.
4. Se analizó la interrelación de las propiedades del suelo con la presencia y dinámica de compuestos orgánicos de la gasolina en los suelos aledaños de la refinería.

ZONA DE MUESTREO

En el siguiente esquema se indica la ubicación de los puntos de muestreo.

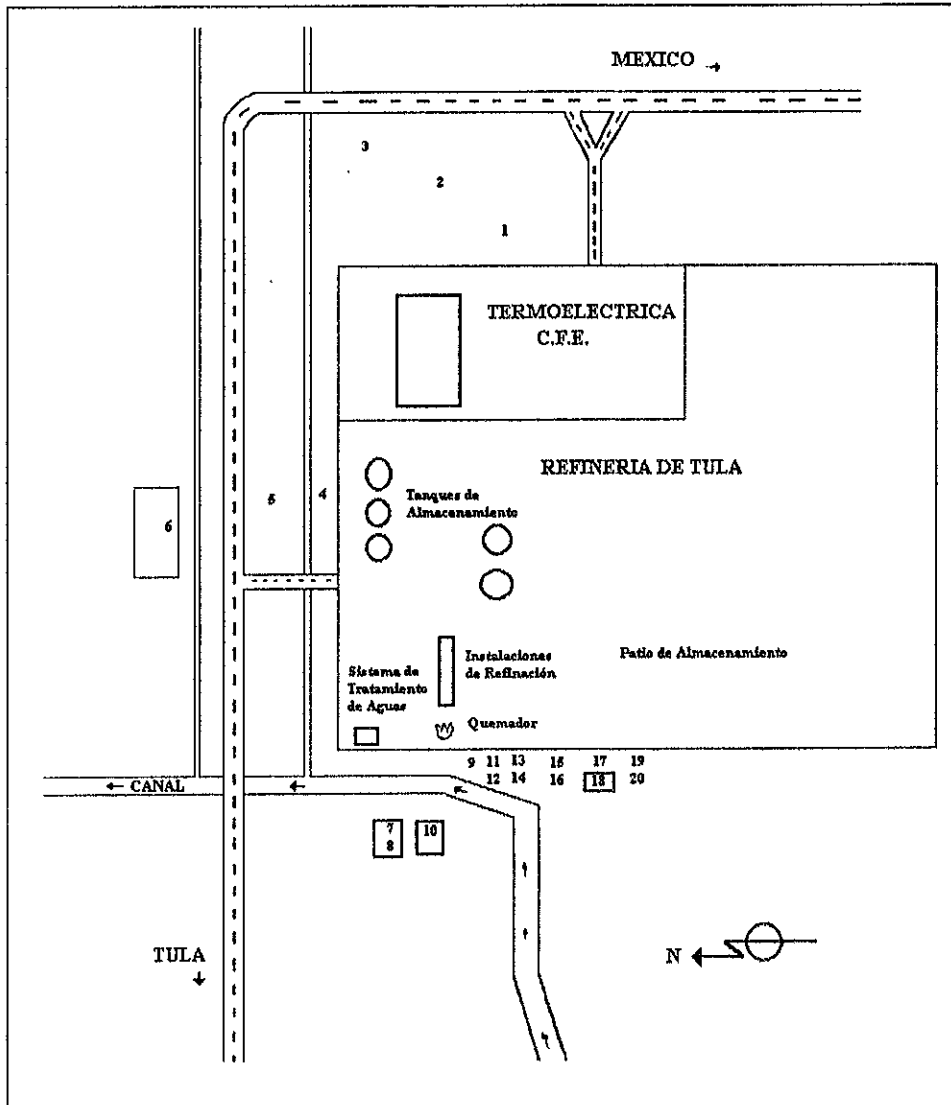


Figura 6. Sitios de muestreo de la Refinería de Tula, Hidalgo.

TRANSECTO 1

El sitio 1 se ubica a una distancia aproximada de 30 m de la barda perimetral de la termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad, el sitio 2 se tomó a una distancia aproximada de 60 m tomando como se observa en el mapa a dicha instalación. En ambos sitios se observó el volteo de material con maquinaria pesada, de la capa superficial de color oscuro, la vegetación presente del lugar son pastos. El sitio 3 es ubicado a una distancia de 30 m con respecto al anterior con presencia de pastos.

TRANSECTO 2

El sitio 4 se ubica a una distancia de 60 m de distancia a la barda de la refinería presentando una profundidad de 25 cm, y el sitio 5 se tomó a una distancia de 120 m de la barda con una profundidad de 25 cm, la vegetación del lugar son pastos y se observó predominancia del material parental calizo.

El sitio 6 se ubica en una parcela con cultivo de maíz a una distancia de la barda de la refinería de 150 m con una profundidad aproximada de 1 m, observándose a lo largo del perfil humedad debido a la presencia de un canal de riego a 3 m del lugar, además de presentar compactación conforme aumentaba la profundidad del suelo, en las cercanías de este terreno había un cultivo de alfalfa.

TRANSECTO 3

El sitio 7 se ubica en un terreno de cultivo, sobre un camino de terracería, a una distancia de las instalaciones de refinación de 60 m, debido a la presencia del canal de aguas residuales, el suelo presentó una profundidad aproximada de 1 m, de color oscuro y con bastante humedad. El sitio 8 se ubica en la misma dirección a una distancia de 30 m con un suelo profundo con las mismas características de humedad y color.

TRANSECTO 4

El punto 9 se ubica cercano al quemador de la Refinería, a una distancia de la barda de 30 m con escasa vegetación de pasto con una profundidad cerca de 40 cm. El punto 10 es un terreno de cultivo con la misma dirección que se halla cruzando el canal de aguas residuales a una distancia de 60 m presentando una buena profundidad y una buena humedad debido al aporte de agua de riego.

TRANSECTO 5

El punto 11 se ubica cerca del quemador alejado del transecto 4 a una distancia de 300 m y alejado 30 m con respecto a la barda, soporta una vegetación de pasto con una profundidad de aproximadamente 80 cm. El punto 12 con una misma dirección a una distancia de 60 m con una profundidad semejante a la anterior, con vegetación de pasto seco y con humedad en ambos lugares

TRANSECTO 6

Este transecto está ubicado a unos 300 m del anterior y cercano al quemador y el punto 13 a una distancia de 30 m de la barda con buena profundidad de 80 cm con vegetación de pasto verde con buena humedad. El sitio 14 se ubica a 30 m del anterior, presenta una profundidad cercana a un metro y soporta árboles y pastos verdes con buena humedad.

TRANSECTO 7

El sitio 15 localizado enfrente del patio de almacenamiento de la Refinería, con distancia de 30 m de la barda presentando un suelo de 80 cm de profundidad y vegetación de pasto seco. El punto 16 con una profundidad de 80 cm con pasto seco y una baja humedad en ambos lugares

TRANSECTO 8

El sitio 17 se encuentra a una distancia de 30 m de la barda, enfrente del patio de almacenamiento con una profundidad de 20 cm y vegetación de pasto verde y seco. El sitio 18 alejado 30 m del anterior, con profundidad de 20 cm, dentro de un terreno de trigo listo para su cosecha con escasa humedad.

TRANSECTO 9

Localizando el sitio 19 a una distancia de 30 m de la barda presenta una profundidad de 60 cm con vegetación de pasto, parcialmente seco y el sitio 20 dentro de la misma dirección a una distancia del punto anterior de 30 m, de menor profundidad con 40 cm, vegetación de pasto seco en terreno pedregoso de tipo calizo y material parental cementado.

MATERIAL Y REACTIVOS

A continuación se menciona un listado de los materiales, equipos e instrumentos del laboratorio, así como los reactivos utilizados.

Material:

* Probetas de 10 mL	* Picnómetros
* Vasos de precipitados de 100 mL	* Parrillas de calentamiento
* Microjeringas	* Vasos de precipitados de 1,000 mL
* Probetas de 1,000 mL	* Frascos de plástico de 100 mL
* Cápsulas de porcelana	* Matracas Erlenmeyer de 250 mL
* Pipetas graduadas de 5 y 10 mL	* Soportes Universales
* Pinzas de tres dedos	* Bureta de 50 mL
* Embudos de tallo corto	* Anillos metálicos
* Frascos de polietileno de 40 mL	* Papel filtro
* Tamiz de 2 mm	

Reactivos:

* Buffer 4 y 7	* Cloruro de calcio
* Peróxido de hidrógeno	* Carbonato de sodio
* Oxalato de sodio	* Agua destilada
* Dicromato de potasio	* Sulfato ferroso hepta-hidratado
* Ácido sulfúrico	* Ácido fosfórico
* Alcohol etílico	* Cloruro de sodio
* Cloruro de potasio	* EDTA
* Cloruro de magnesio 6 H ₂ O	* Cloruro de amonio
* Clorhidrato de hidroxilamina	* Hidróxido de amonio
* Cianuro de potasio	* Negro de eriocromo
* Indicador bario sulfonato de difenilamina	* Disulfuro de carbono
* Gasolina MAGNA SIN	* Benceno
* Gasolina NOVA	* Tolueno
* Isopropanol	* Xileno
* Metanol	* 2,2,4 - Trimetilpentano
* Pentano	* Octano
* Hexano	* Etanol

Equipo:

* Estufa	* Baño María
* Termómetro	* Centrífuga
* Agitador mecánico	* Densímetro

Instrumentos:

* Balanza Digital
* Potenciómetro
* Cromatógrafo de gases con Detector de Ionización con Flama Perkin Elmer, Autosystem.

7. RESULTADOS.

Tabla 1. Resultados de las características del suelo en la Zonas de Muestreo bajo influencia de la Termoelectrónica.

Sitios de Muestreo	D. Aparente (g/cc)	D. Real (g/cc)	Espacio Poroso (%)	Humedad de Campo (%)	Retención de Humedad (%)	pH Real H ₂ O 1:2.5	pH Pot. KCl 1N 1:2.5	C.I.C. meq/100 g ss	M. O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural
1a	0.93	2.17	57.14	10.66	64.61	7.38	6.70	20.01	2.28	28.16	28.00	43.84	Arcilloso
1b	0.93	2.50	62.00	16.42	53.90	7.90	7.05	20.01	1.82	38.24	28.00	33.76	Mig.-arcilloso
2a	0.93	1.92	51.56	12.42	70.19	7.65	7.05	26.39	3.74	39.60	35.28	25.12	Mig.-Arcilloso
2b	0.96	1.92	50.00	13.07	67.44	7.82	7.11	23.20	2.64	46.88	20.00	33.12	Mig.-Arcilloso
3a	0.98	2.27	56.82	14.51	70.67	7.93	7.14	20.01	2.19	38.24	27.64	34.12	Mig.-Arcilloso
3b	0.92	2.08	55.76	17.70	48.52	8.10	7.29	18.56	1.73	36.72	23.64	35.12	Mig.-Arcilloso
3c	0.87	2.27	61.67	18.94	56.08	8.26	7.26	15.37	1.61	29.02	24.73	46.25	Arcilloso
Valor mínimo	0.84	1.92	50.00	10.66	48.52	7.38	6.70	15.37	1.61	28.16	20.00	25.12	
Valor máximo	0.98	2.50	62.00	18.94	70.19	8.26	7.29	26.39	3.74	46.88	35.28	46.25	
Valor medio	0.92	2.21	56.00	14.80	59.35	7.82	6.99	20.88	2.67	37.52	27.64	35.68	

Nota: a= 0 a 20 cm, b= 20 a 40 cm y c= 40 a 60 cm de profundidad.

Tabla 2. Resultados de las características de los suelos de la Zona Agrícola.

Sitios de Muestreo	D. Aparente (g/cc)	D. Real (g/cc)	Espacio Poroso (%)	Humedad de Campo (%)	Retención de Humedad (%)	pH Real H ₂ O 1:2.5	pH Pot. KCl 1N 1:2.5	C.I.C. meq/100 g ss	M. O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural
6a	0.90	2.17	58.52	24.49	61.93	7.23	6.14	23.20	1.51	32.24	32.64	35.12	Mig.-Arcilloso
6b	1.01	2.00	49.50	26.08	63.66	8.09	6.78	22.04	1.80	31.24	14.00	54.76	Arcilloso
6c	0.96	1.92	50.00	25.54	55.31	8.02	6.54	21.17	2.25	31.42	28.82	39.76	Mig.-arcilloso
7a	0.84	2.22	62.16	18.76	96.16	6.96	6.26	39.58	0.94	41.44	27.28	31.28	Mig.-arcilloso
7b	1.08	2.00	46.00	11.98	88.93	7.38	6.64	37.26	1.55	39.44	28.28	32.28	Mig.-arcilloso
7c	1.13	2.22	49.09	16.41	91.40	7.06	6.23	33.35	1.89	39.44	27.28	33.28	Mig.-arcilloso
8a	0.98	2.00	51.00	28.04	81.88	6.96	6.20	29.72	0.51	35.44	31.28	33.28	Mig.-arcilloso
8b	1.05	2.00	47.00	23.76	89.12	7.60	6.30	31.03	1.98	39.44	23.28	37.28	Mig.-arcilloso
8c	0.89	2.00	55.50	28.04	96.78	7.73	6.63	32.48	2.07	39.44	41.28	19.28	Migajón
10a	1.09	2.00	45.50	13.50	85.30	6.62	6.16	40.16	3.79	40.72	28.00	31.28	Mig.-arcilloso
10b	1.05	2.22	52.70	17.92	93.71	7.42	6.66	43.21	2.07	34.72	26.00	39.28	Mig.-arcilloso
10c	1.08	2.00	46.00	18.76	92.14	7.49	6.88	39.73	1.72	32.72	28.00	39.28	Mig.-arcilloso
18a	0.92	2.08	55.76	19.85	70.57	7.85	7.17	31.90	2.55	29.19	36.08	34.73	Mig.-Arcilloso
Valor mínimo	0.84	1.92	45.50	11.98	55.31	6.62	6.14	21.17	0.51	31.24	14.00	19.28	
Valor máximo	1.13	2.22	62.16	28.04	96.78	8.09	7.17	43.21	3.79	41.44	41.28	54.76	
Valor medio	0.98	2.07	53.83	20.01	76.04	7.35	6.65	32.19	2.15	36.34	27.64	37.02	

Nota: a= 0 a 20 cm, b= 20 a 40 cm y c= 40 a 60 cm de profundidad.

Tabla 3. Resultados de las características del suelo en la Zona de influencia de la Refinería.

Sitios de Muestreo	D Aparente (g/cc)	D. Real (g/cc)	Espacio Poroso (%)	Humedad de Campo (%)	Retención de Humedad (%)	pH Real H ₂ O 1:2.5	pH Pot KCl 1:1 1:2.5	C.I.C. mg/100 g ss	M. O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural
4a	1.08	2.08	55.76	6.25	54.17	8.01	7.24	22.62	1.89	50.52	21.46	28.12	Mig.-arc.-aren.
5a	1.03	2.08	50.48	12.04	59.38	7.84	7.19	20.30	1.43	44.16	24.00	31.84	Mig.-arcilloso
9a	1.15	2.27	49.33	14.15	88.11	7.21	6.89	30.16	1.89	47.00	18.28	34.72	Mig.-arc.-aren.
9b	1.02	2.12	51.88	20.33	82.51	7.45	7.09	34.36	1.07	42.00	21.28	36.72	Mig.-arcilloso
11a	1.17	2.50	53.20	11.23	83.61	7.59	6.15	30.46	1.15	53.00	20.28	26.72	Mig.-arc.-aren.
11b	1.17	2.20	47.29	8.81	76.55	7.55	6.10	46.69	1.07	54.00	20.00	26.00	Mig.-arc.-aren.
12a	1.05	2.77	62.09	13.76	73.91	8.99	6.19	30.01	1.50	45.00	25.00	30.00	Mig.-arcilloso
12b	1.11	2.77	59.92	10.61	83.57	6.98	6.19	38.28	1.59	40.72	26.00	33.28	Mig.-arcilloso
12c	1.21	2.63	53.99	9.17	76.41	7.18	6.62	39.15	1.15	51.72	19.00	29.28	Mig.-arc.-aren.
13a	1.05	2.50	58.00	16.41	86.50	6.28	5.56	27.26	3.23	40.00	19.44	40.56	Arcilloso
13b	1.00	2.17	53.91	13.50	93.19	7.21	6.08	33.06	1.93	39.44	24.28	36.28	Mig.-arcilloso
13c	1.06	2.27	46.91	14.81	97.05	7.10	6.04	35.96	2.11	39.44	23.28	38.28	Mig.-arcilloso
14a	1.07	2.17	50.69	11.35	84.07	6.57	5.69	29.14	2.14	34.72	25.28	40.00	Arcilloso
14b	0.94	2.27	56.28	12.48	91.81	7.45	6.35	30.59	2.02	30.00	24.28	45.72	Arcilloso
14c	0.95	2.08	54.32	13.12	99.64	6.17	6.08	37.35	2.11	34.00	23.28	42.72	Arcilloso
15a	0.88	2.08	57.69	24.42	68.85	6.67	5.52	25.23	1.73	28.24	25.64	46.12	Arcilloso
15b	0.72	2.08	65.88	27.72	62.07	6.86	5.95	23.20	1.82	13.60	27.28	59.12	Arcilloso
15c	0.89	1.78	50.00	30.07	75.68	6.95	6.03	17.69	2.63	15.80	23.64	60.56	Arcilloso
16a	0.98	2.27	56.82	13.59	58.80	7.38	6.61	21.17	2.54	40.24	19.64	41.12	Arcilloso
16b	1.00	1.92	47.91	16.13	53.25	7.87	7.02	15.66	1.06	34.22	27.64	38.12	Mig.-Arcilloso
16c	1.00	1.92	47.92	21.27	54.61	7.82	7.15	24.36	1.60	30.71	33.88	35.90	Mig.-Arcilloso
17a	1.01	2.27	65.50	11.41	64.77	7.39	6.51	33.35	1.82	36.24	27.00	36.76	Mig.-Arcilloso
19a	1.07	2.00	46.50	13.26	94.18	6.27	6.16	35.96	3.27	50.72	20.00	29.28	Mig.-arc.-aren.
19b	1.10	2.22	50.45	10.61	80.06	6.96	6.36	38.57	1.72	44.72	24.00	31.28	Mig.-arcilloso
19c	1.22	2.22	45.04	9.17	96.72	7.05	6.94	34.65	2.41	48.72	28.00	23.28	Mig.-arc.-aren.
20a	1.06	2.00	47.00	16.95	92.29	6.89	6.16	36.68	3.96	36.72	27.00	36.28	Mig.-arcilloso
20b	1.12	2.00	44.00	17.50	93.69	6.77	6.20	45.09	1.38	34.72	26.00	39.28	Mig.-arcilloso
Valor mínimo	0.72	1.78	45.04	6.25	53.25	6.17	5.56	15.66	1.06	13.60	18.28	23.28	
Valor máximo	1.22	2.77	65.88	30.07	99.64	8.01	7.24	46.69	3.96	54.00	33.88	60.56	
Valor medio	0.97	2.27	55.46	18.16	76.44	7.09	6.24	31.17	2.51	33.80	26.08	41.92	

Nota: a= 0 a 20 cm, b= 20 a 40 cm y c= 40 a 60 cm de profundidad.

Tabla 4. Compuestos Orgánicos Volátiles localizados en Suelo Adyacentes a la Refinería de Tula, Hidalgo.

Sitio de muestreo y profundidad	Tiempo de Retención (RT, min)	Nombre del Compuesto Identificado	Concentración en el Suelo (mg/Kg)
1a (0-20 cm)	2.977	Tolueno	0.745
	3.525	N. I. *	12.464
	4.405	N. I.	5.644
	4.995	N. I.	27.770
Compuestos Orgánicos Totales			46.623
1b (20-40 cm)	3.202	N. I.	12.761
	3.782	Benceno	7.804
	4.010	N. I.	14.730
	4.800	N. I.	4.412
	5.870	N. I.	0.142
Compuestos Orgánicos Totales			39.839
2a (0-20 cm)	2.988	Tolueno	12.893
	3.797	Benceno	2.934
	4.820	N. I.	14.741
Compuestos Orgánicos Totales			30.568
2b (20-40 cm)	2.192	N. I.	3.08×10^{-6}
Compuestos Orgánicos Totales			3.08×10^{-6}
3a (0-20 cm)	2.193	N. I.	0.048
	3.810	Xileno	1.952
	4.040	N. I.	11.618
Compuestos Orgánicos Totales			13.618
3b (20-40 cm)	3.508	N. I.	6.170
	3.820	Xileno	1.163
	4.050	N. I.	3.333
	4.860	N. I.	0.858
Compuestos Orgánicos Totales			11.524
3c (40-60 cm)	3.822	N. I.	3.245
	4.053	N. I.	3.701
	8.136	Xileno	8.136
Compuestos Orgánicos Totales			15.082

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

4a (0-20 cm)	2.212	Hexano	5.211
	2.963	Tolueno	53.079
	3.840	Xileno	4.779
	3.910	N. I.	12.783
	3.937	N. I.	0.683
	4.065	N. I.	13.953
	4.090	N. I.	2.812
4.913	N. I.	2.342	
Compuestos Orgánicos Totales			95.642
5a (0-20 cm)	4.057	N. I.	5.654
	4.095	N. I.	1.238
	4.912	N. I.	1.744
	5.428	N. I.	11.350
Compuestos Orgánicos Totales			19.986
6a (0-20 cm)	2.227	Hexano	0.900
	3.845	Xileno	1.054
	4.085	N. I.	0.512
	4.898	N. I.	0.578
Compuestos Orgánicos Totales			3.044
6b (20-40 cm)	2.292		7.349
	3.845	Xileno	3.519
	4.112	N. I.	3.681
	4.918	N. I.	2.719
Compuestos Orgánicos Totales			17.268
6c (40-60 cm)	1.395	Pentano	89.193
	3.842	Xileno	43.357
	3.857	N. I.	1.415
	4.095	N. I.	1.794
	4.908	N. I.	1.007
Compuestos Orgánicos Totales			136.766
7a (0-20 cm)	1.349	N. I.	2.676
	4.019	Benceno	4.003
	6.038	Tolueno	1.890
	8.194	Xileno	2.899
	8.768	N. I.	0.509
	8.868	N. I.	1.198
	15.928	N. I.	25.440
	16.534	N. I.	41.275
	16.961	N. I.	25.469
	17.694	N. I.	18.553
Compuestos Orgánicos Totales			123.912

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

7b (20-40 cm)	1.318	N. I.	0.425
	1.359	N. I.	1.872
	4.013	Benceno	1.502
	6.036	Tolueno	0.722
	8.196	Xileno	0.672
	15.869	N. I.	14.052
Compuestos Orgánicos Totales			19.245
7c (40-60 cm)	4.036	Benceno	0.780
	6.063	Tolueno	0.510
	8.223	Xileno	0.403
	8.903	N. I.	0.176
	15.829	N. I.	4.003
	16.523	N. I.	19.764
	17.696	N. I.	10.542
Compuestos Orgánicos Totales			36.178
8a (0-20 cm)	4.209	Benceno	1.591
	6.059	Tolueno	1.735
	8.219	Xileno	2.839
	8.799	N. I.	0.214
	8.906	N. I.	1.230
Compuestos Orgánicos Totales			7.609
8b (20-40 cm)	3.996	Benceno	0.605
	6.039	Tolueno	0.505
	8.209	Xileno	0.201
	8.783	N. I.	0.043
Compuestos Orgánicos Totales			1.354
8c (40-60 cm)	3.973	Benceno	0.332
	6.029	Tolueno	0.848
	8.206	Xileno	1.102
	16.486	N. I.	25.058
Compuestos Orgánicos Totales			28.058
9a (0-20 cm)	1.605	Isopropanol	0.931
	8.217	Xileno	2.668
	8.890	N. I.	1.282
	8.790	N. I.	0.077
	15.570	N. I.	3.049
	17.977	N. I.	3.049
	20.550	N. I.	16.379
Compuestos Orgánicos Totales			27.435

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

9b (20-40 cm)	1.604	Isopropanol	0.117
	3.298	N. I.	1.003
	4.048	N. I.	20.052
	6.711	Octano	0.457
	6.928	N. I.	0.039
	8.217	Xileno	0.005
	15.544	N. I.	76.381
	17.978	N. I.	4.036
	20.671	N. I.	17.140
Compuestos Orgánicos Totales			119.230
10a (0-20 cm)	1.358	Etanol	7.901
	8.406	N. I.	8.647
	11.099	N. I.	13.400
	12.773	N. I.	7.062
	13.573	N. I.	2.307
	13.973	N. I.	2.645
	14.626	N. I.	25.068
	17.746	N. I.	5.953
17.893	N. I.	11.749	
Compuestos Orgánicos Totales			84.732
10b (20-40 cm)	1.308	Etanol	3.083
	1.351	N. I.	7.347
	3.926	Benceno	1.534
	5.976	N. I.	4.010
	7.936	N. I.	0.890
	8.136	Xileno	0.541
8.703	N. I.	3.659	
Compuestos Orgánicos Totales			21.064
10c (40-60 cm)	1.379	Etanol	2.081
	3.974	Benceno	1.228
	8.176	Xileno	0.334
	8.846	N. I.	0.250
Compuestos Orgánicos Totales			3.893

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

11a (0-20 cm)	1.112	Metanol	0.218
	2.650	N. I.	2.773
	2.995	Hexano	1.047
	3.227	N. I.	0.801
	3.402	N. I.	0.172
	3.988	Benceno	0.812
	6.015	Tolueno	1.462
	6.888	Octano	0.367
	8.168	Xileno	2.553
	8.835	N. I.	1.119
	17.988	N. I.	4.801
	20.462	N. I.	15.166
Compuestos Orgánicos Totales			31.291
11b (20-40 cm)	1.312	Etanol	2.679
	3.246	N. I.	0.305
	3.413	N. I.	0.129
	4.008	Benceno	1.499
	6.024	Tolueno	0.684
	8.181	Xileno	1.378
	8.854	N. I.	0.532
	8.754	N. I.	0.824
	17.954	N. I.	8.510
	18.454	N. I.	3.688
20.428	N. I.	11.786	
Compuestos Orgánicos Totales			29.783
12a (0-20 cm)	1.367	Etanol	2.679
	1.589	Isopropanol	0.269
	2.864	Hexano	2.078
	3.268	N. I.	1.188
	3.441	N. I.	0.600
	4.024	Benceno	2.958
	4.521	N. I.	0.233
	5.451	N. I.	0.120
	5.831	N. I.	0.386
	6.041	Tolueno	2.316
	6.921	N. I.	0.245
	7.998	N. I.	0.727
	8.204	Xileno	3.977
	8.778	N. I.	3.279
	8.873	N. I.	15.874
	14.766	N. I.	0.967
	15.533	N. I.	0.831
17.953	N. I.	1.870	
18.479	N. I.	0.624	
Compuestos Orgánicos Totales			41.221

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

12b (20-40 cm)	1.599	N. I.	0.981
	1.683	Pentano	0.477
	3.279	N. I.	0.005
	4.032	Benceno	2.665
	6.049	Tolueno	0.045
	6.919	N. I.	0.179
	7.999	N. I.	0.085
	8.206	Xileno	0.265
	8.779	N. I.	0.674
	8.873	N. I.	9.841
	14.766	N. I.	0.599
	15.533	N. I.	0.515
	17.953	N. I.	1.163
18.479	N. I.	0.386	
Compuestos Orgánicos Totales			17.880
12c (40-60 cm)	3.283	N. I.	0.323
	3.440	N. I.	0.248
	4.032	Benceno	1.340
	6.046	Tolueno	0.354
	6.183	N. I.	0.306
	6.923	N. I.	0.317
	8.006	N. I.	0.139
	8.206	Xileno	1.108
	8.779	N. I.	24.329
8.879	N. I.	0.075	
Compuestos Orgánicos Totales			28.539
13a (0-20 cm)	3.338	N. I.	1.031
	6.122	Tolueno	1.265
	6.863	Octano	0.108
	8.736	N. I.	4.383
	8.839	N. I.	13.887
	9.109	N. I.	1.224
	12.819	N. I.	47.321
14.333	N. I.	14.134	
Compuestos Orgánicos Totales			83.353

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

13b (20-40 cm)	1.391	Etanol	0.611
	1.458	N. I.	0.499
	1.692	Pentano	28.440
	2.876	Hexano	0.807
	3.231	N. I.	0.706
	3.397	N. I.	0.025
	4.506	Isooctano	0.417
	5.821	N. I.	0.220
	6.037	Tolueno	2.784
	6.168	N. I.	0.528
	8.771	N. I.	2.498
	15.318	N. I.	4.746
	16.551	N. I.	4.371
18.338	N. I.	18.062	
Compuestos Orgánicos Totales			64.714
13c (40-60 cm)	1.597	Isopropanol	0.892
	3.295	N. I.	0.359
	3.462	N. I.	0.717
	8.215	Xileno	0.872
	14.788	N. I.	4.000
	15.575	N. I.	5.127
	17.462	N. I.	2.334
	18.942	N. I.	59.501
Compuestos Orgánicos Totales			73.802
14a (0-20 cm)	1.369	Etanol	1.493
	1.591	Isopropanol	0.238
	3.279	N. I.	0.475
	3.449	N. I.	0.578
	8.049	N. I.	2.653
	8.209	Xileno	3.401
	8.889	N. I.	1.543
	12.963	N. I.	39.465
	19.609	N. I.	22.557
Compuestos Orgánicos Totales			72.408
14b (20-40 cm)	1.718	Pentano	15.380
	3.273	N. I.	0.358
	3.439	N. I.	0.055
	6.049	Tolueno	3.829
	8.206	Xileno	0.940
	8.889	N. I.	366.115
	15.513	N. I.	3.610
	17.966	N. I.	5.498
	19.799	N. I.	37.434
Compuestos Orgánicos Totales			453.219

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

14c (40-60 cm)	3.293	N. I.	0.301
	15.529	N. I.	3.477
	17.943	N. I.	4.877
	20.509	N. I.	64.129
Compuestos Orgánicos Totales			72.784
15a (0-20 cm)	1.358	Pentano	265.518
	2.300	Hexano	26.217
	4.117	N. I.	15.686
Compuestos Orgánicos Totales			307.421
15b (20-40 cm)	1.445	Pentano	508.511
	2.233	Hexano	5.527
	3.855	Xileno	0.431
	4.098	N. I.	1.192
	4.915	N. I.	0.574
	5.625	N. I.	1.051
	5.998	N. I.	1.627
Compuestos Orgánicos Totales			518.913
15c (40-60 cm)	3.957	Xileno	1.338
	4.093	N. I.	0.721
Compuestos Orgánicos Totales			2.059
16a (0-20 cm)	1.307	Pentano	311.429
	2.233	Hexano	0.350
	3.978	Xileno	2.110
	4.117	N. I.	9.005
	5.497	N. I.	2.112
Compuestos Orgánicos Totales			325.006
16b (20-40 cm)	1.373	Pentano	49.025
	2.240	Hexano	2.543
	3.863	Xileno	1.551
	4.106	N. I.	2.207
	4.927	N. I.	1.203
6.010	N. I.	5.433	
Compuestos Orgánicos Totales			61.962
16c (40-60 cm)	2.303	Hexano	11.054
	3.890	Xileno	4.187
	4.127	N. I.	4.624
Compuestos Orgánicos Totales			19.865

N. I. = No identificado.

Tabla 4. Continuación

17a (0-20 cm)	1.390	Pentano	61.801
	3.855	Xileno	1.601
	3.952	N. I.	3.337
	4.085	N. I.	2.085
	4.908	N. I.	1.161
	5.615	N. I.	1.532
Compuestos Orgánicos Totales			81.517
18a (0-20 cm)	1.278	Pentano	155.615
	2.902	Tolueno	137.949
	3.842	Xileno	7.975
	3.960	N. I.	1.302
	3.973	N. I.	24.004
	4.093	N. I.	1.665
	4.913	N. I.	1.757
Compuestos Orgánicos Totales			330.167
18a (0-20 cm)	3.293	N. I.	0.310
	3.459	N. I.	0.063
	4.049	Benceno	1.445
	6.059	Tolueno	0.523
	6.216	N. I.	3.676
	6.929	N. I.	0.185
	8.896	N. I.	0.411
	14.176	N. I.	7.417
Compuestos Orgánicos Totales			14.020
19b (20-40 cm)	3.445	N. I.	0.207
	4.032	Benceno	2.061
	6.052	Tolueno	0.632
	8.002	N. I.	0.214
	8.208	Xileno	1.013
	8.788	N. I.	1.519
	8.888	N. I.	0.303
16.842	N. I.	1.210	
Compuestos Orgánicos Totales			7.159
19c (40-60 cm)	3.449	N. I.	0.033
	4.039	Benceno	1.227
	6.063	Tolueno	0.116
	8.012	N. I.	0.332
	8.219	Xileno	0.557
	8.793	N. I.	1.036
	8.899	N. I.	0.222
	10.419	N. I.	0.317
	12.019	N. I.	1.454
	14.766	N. I.	0.824
	16.506	N. I.	2.844
19.206	N. I.	10.104	
Compuestos Orgánicos Totales			19.066

N. I. = No Identificado.

Tabla 4. Continuación

20a (0-20 cm)	1.691	Pentano	0.636
	3.304	N. I.	0.683
	4.064	Benceno	0.924
	6.071	Tolueno	0.226
	8.018	N. I.	0.090
	8.224	Xileno	2.216
	8.797	N. I.	0.930
	8.898	N. I. (Magna 6)	0.290
16.544	N. I.	3.591	
			9.586
20b (20-40 cm)	1.800	Pentano	0.919
	3.306	N. I.	1.006
	4.056	Benceno	1.081
	6.059	Tolueno	0.346
	8.016	N. I.	0.128
	8.223	Xileno	0.573
	8.896	N. I.	0.174
	16.496	N. I.	7.207
17.736	N. I.	1.059	
Compuestos Orgánicos Totales			12.493

N. I. = No Identificado.

Tabla 5. Compuestos Orgánicos Totales por Zonas de Estudio

Sitio de muestreo	Concentración (mg/Kg)
Zona de la Termoeléctrica	
1a	46.623
1b	39.839
	Total = 86.462
2a	30.568
2b	3.08×10^{-5}
	Total = 30.5683
3a	13.618
3b	11.524
3c	15.082
	Total = 40.224

Sitio de muestreo	Concentración (mg/Kg)
Zona Agrícola	
6a	3.044
6b	17.268
6c	136.766
	Total = 157.078
7a	123.912
7b	19.245
7c	36.178
	Total = 179.335
8a	7.609
8b	1.354
8c	28.058
	Total = 37.021
10a	84.732
10b	21.064
10c	3.893
	Total = 109.689
18a	Total = 330.167

Tabla 5. Continuación

Sitio de muestreo	Concentración (mg/Kg)
Zona de la Refinería	
4a	95.642
5a	19.986
9a	27.435
9b	119.230
	Total = 146.665
11a	31.291
11b	29.783
	Total = 61.074
12a	41.221
12b	17.880
12c	28.539
	Total = 87.640
13a	83.353
13b	64.714
13c	73.802
	Total = 221.869
14a	72.408
14b	453.219
14c	72.784
	Total = 598.411
15a	307.421
15b	518.913
15c	2.059
	Total = 828.393
16a	325.006
16b	61.962
16c	19.865
	Total = 406.833
17a	61.517
19a	14.020
19b	7.159
19c	19.066
	Total = 40.245
20a	9.586
20b	12.493
	Total = 22.079

8. ANALISIS DE RESULTADOS.

8.1 RELACION DE LOS PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS DEL SUELO CON LOS COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES.

8.1.1 DENSIDAD APARENTE, REAL Y ESPACIO POROSO.

La densidad aparente para los suelos cercanos a la termoelectrónica (puntos 1, 2 y 3) van de 0.87 a 0.98, asociado a una textura fina, presencia de materia orgánica, por la abundancia de pastos y el movimiento de materiales en el sitio. Buckman & Brady (1991) y Thompson (1982) señalan que una baja densidad aparente se debe a una buena granulación y a la materia orgánica que es mucho más ligero que los materiales minerales. En caso del punto 3 la densidad aparente disminuye conforme a la profundidad, a causa de una remoción mecánica de la capa superficial del suelo. En cuanto a la densidad real tiene valores de 1.92 a 2.50 g/cc, que de acuerdo a Gaucher (1971) corresponden a suelos de constitución mediana (2.5 a 2.6 g/cc), suelos calcáreos (2.45 g/cc), esta disminución se debe principalmente por la presencia de la materia orgánica más que por la composición mineral del suelo. Thompson (1982) menciona que es la media de materiales sólidos presentes y constituye un reflejo de las densidades de los minerales más abundantes del suelo y rocas, mencionando al caso de los silicatos con 2.0 a 2.7 g/cc y los hidróxidos de hierro y aluminio con 2.4 a 4.3 g/cc.

La porosidad presente en este lugar varía de 50 a 62%, que según la clasificación de Gaucher (1971) corresponde a suelos arcillosos (55-60%) y suelos limosos (50-56%). El comportamiento a lo largo del perfil se mantiene de manera más o menos homogéneo sólo con un ligero aumento, pero sin variar drásticamente. Foth (1980) establece que los suelos de textura fina tienen mayor espacio poroso y la mayor proporción está compuesto por poros pequeños, resultando un suelo con mayor retención de agua, donde junto con el aire se mueven lentamente, debido a la poca cantidad de poros grandes.

En la parte de la zona agrícola correspondientes a los puntos 6, 7, 8, 10 y 18, los valores van de 0.84 a 1.13, en el punto 7 la densidad aparente aumenta conforme a la profundidad mientras en el resto el comportamiento es inverso, para el sitio 7 sólo una parte tiene un laboreo agrícola, de mayor profundidad mayor densidad aparente por la compactación de los materiales, la baja cantidad de materia orgánica y la poca penetración de las raíces, disminuyendo así la densidad (Thompson, 1982). Para la densidad real de estos suelos tienen valores de 1.92 a 2.22 g/cc, en la mayoría de los sitios se mantiene constante a lo largo del perfil existiendo pequeñas variaciones en algunos horizontes por la presencia de la materia orgánica.

Para la zona de cultivos la porosidad tienen valores de 45.50 a 62.16%, entrando a la clasificación descrita por Gaucher (1971), en los sitios 6, 7, 8 y 10 el comportamiento es de mayor a menor solo hasta al estrato de 20-40 cm y en el tercero hay un aumento con respecto al segundo obedeciendo a la cantidad de materia orgánica trasladada de

la superficie a partes más profundas; en 18 presenta una adecuada porosidad para el desarrollo de las plantas (EPA, 1983).

Los suelos aledaños a la refinería correspondientes a los puntos 4, 5, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19 y 20; el intervalo de densidad aparente van de 0.72 a 1.22 correspondiendo a lo establecido por Foth (1980) que suelos de textura arcillosa presentan una densidad de 1.0 a 1.3 g/cc. A pesar de ser suelos no laborables a las actividades agrícolas presentan variaciones al existir una ligera disminución de densidad aparente en relación a la profundidad a causa de la presencia de materia orgánica en los últimos estratos. La densidad real tiene valores de 1.78 a 2.77 g/cc, el comportamiento para aquellos sitios de mayor profundidad tienen una tendencia a la disminución.

De los suelos cercanos a la refinería la porosidad se presenta de 45.04 a 65.88%, para el caso de valores menores a 50 es fundamentado por la cercanía al material parental y a la escasa materia orgánica; en los puntos 11, 12, 13, 16 y 20 se adecua a la regla general de la disminución de porosidad con el aumento de profundidad dado por la compactación de los horizontes, baja granulación del suelo por la falta de materia orgánica. Para los puntos 14, 15 y 19 se comporta de menor a mayor porosidad por la presencia de pastos dado la penetración de pequeñas raíces.

Con el aumento de la densidad aparente generalmente disminuye el transporte químico para el caso de la difusión del líquido o gas, la disminución de la porosidad generalmente reduce el área disponible seccional para el flujo e incrementa la vía de extensión por localizar más partículas sólidas por unidad de volumen en la dirección de la difusión del fluido.

8.1.2 HUMEDAD

La humedad de campo en la zona de la termoeléctrica va de 10.66 a 18.94% correspondiente a los sitios 1, 2 y 3, el comportamiento es de menor a mayor al aumentar la profundidad, debido a que en la parte superficial existió un movimiento mecánico del material presentando una mayor evaporación del agua, teniendo un mayor contenido en partes más profundas. La humedad registrada es aceptable para el soporte de la vida vegetal superior (EPA, 1983).

En los suelos agrícolas los valores son de 11.98 a 28.04%, debido a la presencia de canales de riego cercanos. El comportamiento es de mayor a menor en la parte superficial en los puntos 6, 7, 8 y 10 como resultado de la capilaridad. Gaucher (1971) menciona que para un suelo limoso, el agua sube de 1 a 1.20 m, mientras para un suelo arcilloso aumenta de 1.20 a 1.50 m aunado con la higroscopicidad, pues con una textura fina hay una mayor fijación, fenómeno esencialmente unido a las acciones de

superficie, establecido por los coloides orgánicos que absorben por gramo 0.2 a 0.3 de agua higroscópica, y los coloides arcillosos 0.3.

Los suelos de la refinería presentan una humedad de 6.25 a 30.07 %, el menor valor es para el punto 4 que tiene un suelo muy somero; el comportamiento es de mayor a menor al aumentar la profundidad para los puntos 11, 12, 13 y 19, por tener una cobertura de gramíneas, que ayuda a retener mayor cantidad evitando la pérdida por evaporación. Para los puntos 9, 14, 15, 16 y 20 el comportamiento es inverso, la humedad aumenta con la profundidad por efecto de mayor evaporación en la parte superficial al carecer o tener una baja cubierta vegetal existiendo un efecto de capilaridad. En 5 y 17 la humedad es aceptable a pesar de ser suelos someros al tener vegetación que resguarda dicha agua evitando su evaporación.

La presencia de un alto contenido humedad influye en la capacidad de adsorción, que juegan un papel muy importante en el transporte y el destino de los contaminantes orgánicos en los sistemas del subsuelo (Lin, Little & Nazaroff, 1994) como se observa en los suelos agrícolas con alta humedad, el agua se mantiene en todo el perfil del suelo soportando la vida vegetal y con ello una vida microbiana adecuada (EPA, 1983).

De acuerdo a Loehr (1991) la degradación aeróbica de los compuestos orgánicos en el suelo está en función de la humedad disponible. Varios autores han citado intervalos óptimos a la biodegradación, indicando que del 30 al 90 % de capacidad de campo es necesaria. Otros mencionan que el 50 al 80 % es un intervalo bueno. A niveles debajo del 30 o 40 % la actividad se restringe debido a las bajas concentraciones de agua y por el contrario alta humedad reduce el metabolismo aeróbico microbiano, porque los poros del suelo están cerca de la saturación e inhibe la transferencia de oxígeno.

La correlación realizada en las tres zonas de estudio se observó lo siguiente: En la zona de la termoeléctrica presentó un valor negativo ($r = -0.369$), del mismo modo para la zona agrícola ($r = -0.124$) y la zona de la refinería es de valor positivo ($r = 0.342$) siendo un parámetro de mayor importancia después de la arcilla siendo este el medio de transporte a zonas profundas debido a la presencia de más compuestos orgánicos volátiles.

La EPA (1983) menciona que es necesario mantener un nivel óptimo de humedad para la actividad biológica del suelo a fin de que se lleve a cabo el proceso de degradación.

8.1.3 CAPACIDAD DE CAMPO.

En la zona de la termoeléctrica los valores son de 46.52 a 70.19%, manteniendo una mayor retención en la parte superficial en los puntos 1, 2 y 3, por el material orgánico presente que sirve como almacén de agua junto con las partículas finas como el limo y

la arcilla al tener una elevada capacidad de retención, debido a su gran superficie específica y a su elevado volumen de microporos (Thompson, 1982).

Para la zona agrícola, la retención es de 35.31 a 96.78 %; el comportamiento en los puntos 6, 7 y 8 se hallan en función del contenido de la materia orgánica de manera proporcional. Se menciona que esta puede retener un peso de agua superior al de su peso (Thompson, 1982); para el punto 10 la retención aumenta con la profundidad, debido a una gran cantidad de microporos de ciertos minerales que presentan mayor superficie a las moléculas de agua como es el caso de los granos de caliza muy porosos (Gaucher, 1971). El punto 18 tiene una gran retención por la textura y materia orgánica presente. Los subsuelos son más bajos en contenido orgánico y tienen la tendencia a ser más compactos, así como a contener mayor porcentaje de microporos. Esto conduce a un mayor porcentaje de minerales, agua y un contenido menor de materia orgánica (Buckman & Brady, 1991).

En los suelos de la refinería los valores van de 53.25 a 99.64%; el comportamiento para los sitios 9, 11, 12, 15, 16, 19 y 20 se halla ligado a la materia orgánica presente de manera proporcional, es decir, su aumento favorece una mayor retención de agua. Para los puntos 13 y 14 influye más la composición mineral, al aumentar el contenido de agua con la profundidad. Y en los puntos 4, 5 y 17 tienen buena retención con un valor por arriba del 50% por el tipo textural presente.

De acuerdo a Huesemann (1994) menciona una humedad óptima para la actividad de biodegradación microbiana entre el 50 y 80% a capacidad de campo del suelo, situación que es favorecida por las condiciones climáticas del lugar que abarca la temporada de sequía.

El bajo porcentaje de humedad es indicador de hallar compuestos orgánicos en el suelo sin ser degradados por los microorganismos, o con una degradación muy lenta en la parte superficial por no infiltrarse rápidamente a capas más profundas (Huesemann, 1994).

En los sitios de mayor humedad los hidrocarburos ligeros se infiltran en el subsuelo y tienden a avanzar hasta el nivel estático, donde por presentar una menor densidad que el agua, flotan sobre de ella. Parte de estos hidrocarburos se volatilizan ocupando espacios porosos o fracturas arriba del nivel estático. Cuando el hidrocarburo es más pesado, tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia las partes inferiores del acuífero o permanece absorbido por retención molecular en las partículas del suelo. Una porción del hidrocarburo llega a ser diluida por el agua como lo explica Lesser (1995).

8.1.4 TEXTURA

En la termoeléctrica el intervalo de valores para la arena (28.16 a 46.88%), limo (20.00 a 35.28%) y arcilla (25.12 a 46.25%), corresponden en su mayoría al tipo textural de migajón-arcilloso considerado como suelos moderadamente pesados, presentándose en dos horizontes una textura arcillosa considerada como suelos pesados en la superficie del sitio 1 y en 40-60 cm del punto 3, que puede ser por traslocación de arcilla de la superficie a la profundidad (Foth, 1980) o por la intemperización del material parental que presenta características de material fino.

En la zona agrícola sus valores son para la arena (31.24 a 41.44%), limo (14.00 a 41.28%) y arcilla (19.28 a 54.75%). La textura dominante es de migajón-arcilloso siendo un suelo moderadamente pesado y pesado en los arcillosos para 6b donde es arcilloso probable a una migración de arcilla a zonas más profundas, por el agrietamiento de la superficie o por movimiento de agua de percolación (Foth, 1980) y en 8 por la influencia del material parental de tipo limoso. En esta zona coexisten dos tipos de suelos que son el Vertisol presenta las siguientes características: una desecación estacional de los suelos, una reacción básica (alcalina), los materiales originales incluyen rocas sedimentarias calcáreas, topografía gilgai, colores oscuros de tonalidades bajas (Buol, Hole & McCracken, 1991). y el Feozem (tierra parda) su característica principal es una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, son de alto rendimiento si se les cuida de la erosión (Martínez, 1982), donde el material basal tiene diferente grado de composición y se le considera de una textura fina (INEGI, 1992).

En la parte de la zona de la Refinería el intervalo de valores son para la arena (13.60 a 54.00%), limo (18.28 a 33.88%) y arcilla (23.28 a 60.56%). El tipo textural es variable presentándose el arcilloso en 14 y 15 en todo el perfil, en 13 y 16 solo en la superficie; migajón-arcilloso en 5, 17 y 20 en todo el perfil, en las capas superiores se presenta en 12 y en estratos inferiores de 9, 13 y 16 como resultado de la influencia del material parental; la textura migajón-arcillo-arenosa se presenta en los puntos 4 y 11, y en algunos estratos del punto 9, en el sitio 12 cerca del material parental y en 19 se ubica en la superficie, pues en medio de estas capas el horizonte es de tipo arcilloso, en este caso puede explicarse como una migración de arcillas superficiales.

La correlación realizada al contenido de arcilla y concentración de hidrocarburos presentes en el suelo, se presentó de la siguiente forma: En la zona de la termoeléctrica tiene un valor positivo ($r = 0.162$), en la zona agrícola tiene un valor negativo ($r = - 0.080$) y finalmente en la zona de la refinería con un valor positivo ($r = 0.576$). De los parámetros comparados la arcilla en la zona de la refinería tiene mayor influencia en el contenido de hidrocarburos debido que en algunos sitios la densidad aparente aumenta, y con ello las partículas del suelo se compactan, además de ser un lugar que no presenta alteraciones provocadas por el hombre en comparación a la zona agrícola y a la termoeléctrica que sufrió una alteración de la capa superficial.

Las arcillas presentan una permeabilidad reducida que las hace que funcionen como un acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita la salida por retención molecular), su presencia limita y retarda el movimiento del agua y contaminantes (Tahmane, 1978; Buckman & Brady, 1991).

Los suelos arcillosos pueden limitar la lixiviación debido a su alta CIC, alto contenido de arcillas y a un alto número de poros pequeños resultando una baja permeabilidad (EPA, 1983) así como la fracción recalcitrante asociado con moléculas atrapadas en los microporos o dentro de la materia orgánica (sustancias húmicas) (Steinberg et al., 1994). Resultando con ello que las superficies de mayor absorción (algunas fracciones de arcilla y materia orgánica) limitan la disponibilidad de hidrocarburos a los microorganismos del suelo y para su extracción llegando a ser una fracción más concentrada después de la lixiviación, volatilización y biodegradación (Steinberg, 1992). Las condiciones ambientales de Tula favorece condiciones de "fuerte intemperización" donde los contaminantes tienen tiempo para migrar dentro de los microporos que pueden ser menos accesibles al ataque microbiano (Huesemann, 1994).

Por lo que la textura del suelo tiene un gran significado en la biorremediación; los suelos con un alto porcentaje de arcillas generalmente biodegradan más lentamente los mismos contaminantes que en suelos con bajas concentraciones de arcillas. Apareciendo diferentes razones para esto:

- ✓ Los contaminantes son adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo o en la materia orgánica, difundidos dentro de las partículas o atrapados por la tensión superficial dentro de ellas.
- ✓ Las arenas y limos generalmente son esféricos y tienen menos área superficial que las arcillas, por lo que el potencial de contaminación por adsorción o difusión es menor en suelos arenosos que en los arcillosos.
- ✓ El éxito de la remediación de los suelos con un alto contenido de arcillas depende de la defloculación en las partículas para reducir los efectos de la tensión superficial y la neutralización del campo electronegativo de las superficies arcillosas (Block, Stroo & Sweff, 1993).

8.1.5 MATERIA ORGÁNICA (M. O.)

Los suelos de la Termoeléctrica presentan un contenido de M. O. de 1.61 a 3.74 %, su distribución a lo largo del perfil es descendente. De acuerdo a la clasificación de Velasco (1985), el sitio 1 es de tipo medio, el 2 medianamente rico y el 3 en la superficie va de medio a medianamente pobre.

Para la zona agrícola los valores son de 0.51 a 3.74 %, aquí el comportamiento es inverso al caso anterior, pues la materia orgánica aumenta con respecto a la profundidad a causa del empleo de aguas residuales, aportando nutrimentos y promoviendo su lavado a zonas profundas; el sitio 6 es medianamente pobre (0 a 40 cm) a medio (40 a 60 cm), 7 es pobre (0 a 20 cm), medianamente pobre (20 a 40 cm) a medio (40 a 60 cm) y 8 es pobre (0 a 20 cm), medio (20 a 60 cm). En el sitio 10 el contenido de materia orgánica es de mayor a menor dado por la descomposición de rastrojo y la reciente incorporación de aguas residuales siendo rico (0 a 20 cm), medio (20 a 40 cm) y medianamente pobre (40 a 60 cm), y en 18 la cantidad es de medianamente rico su aporte es el rastrojo de cultivo.

En la zona de la refinería el intervalo es 1.06 a 3.96 %, el comportamiento es de orden descendente en los puntos: 9 donde es de medio a pobre, la mayor cantidad de M.O. se debe a su deposición sobre una ligera pendiente a causa de la erosión y escorrentía; el punto 11 es pobre a lo largo del perfil; 20 es de rico a medianamente pobre. De modo inverso es en el sitio 15 que al aumentar la profundidad aumenta la M.O., clasificado como medianamente pobre, por la lixiviación o por la caída a causa del agrietamiento de la parte superficial de este material. Para los sitios de un solo horizonte se definen de la siguiente forma, en 4 es medio, 5 medianamente pobre y el 17 como medio, favorecido por el arrastre de materia vegetal. En los sitios 12 aumenta hasta 20 cm., disminuyendo hasta medianamente pobre en los primeros y en el último como pobre. En 13 la clasificación es de en la superficie rico, medio en el segundo y tercer horizonte, 14 es de medio a lo largo del perfil, 16 como medianamente rico, pobre y medianamente pobre y 19 es de rico, medianamente pobre y medianamente rico; la mayor cantidad se observa en la superficie y el estrato cercano al material parental.

La correlación de la materia orgánica y los hidrocarburos en las zonas de estudio fue el siguiente: En la zona de la termoeléctrica con un valor positivo ($r = 0.162$); la zona agrícola con un valor de $r = 0.340$ y en la zona de la refinería presentó un valor positivo ($r = 0.010$). En la zona de la refinería la asociación es muy bajo que en los dos primeros que se comportan de manera proporcional. En general se presenta en un comportamiento directamente proporcional en los tres sitios en comparación a los demás parámetros.

La absorción de los contaminantes por la materia orgánica también afecta la biodegradación. Muchos sitios industriales tienen suelos con altas concentraciones de materia orgánica, la cual puede absorber los contaminantes. Es difícil remover los contaminantes de la materia orgánica y la biorremediación puede ser impráctica. La absorción de los contaminantes dentro de la materia orgánica es probablemente la explicación de la caracterización ocasional de la biorremediación a remover otros contaminantes biodegradables (Block, Stroo & Swett, 1993).

8.1.6 pH

En la zona de la termoeléctrica, el pH real es de 7.38 a 8.26. El comportamiento de los sitios 1, 2 y 3 muestra un aumento con la profundidad, siguiendo la escala propuesta por Thompson (1982) y el Manual de Suelo y Fertilización (SEP, 1992), para el sitio 1 tiende de neutro en la superficie a ligeramente alcalino a estratos más profundos, en 2 y 3 son ligeramente alcalinos. Aumentando su valor con respecto a la profundidad en los sitios de muestreo dado por la lixiviación de sales. Este comportamiento es semejante en el pH potencial, llegando a ser neutro para todos los sitios de muestreo por la presencia del material calizo principalmente, que confiere este comportamiento alcalino al suelo.

En la zona agrícola el pH real es de 6.62 a 8.09, el sitio 8 y 10 aumenta con la profundidad por el material parental o una lixiviación de sales, en 8 tiende de neutro a ligeramente alcalino al aumento de profundidad; en 10 todo el perfil es definido como neutro. Manteniendo el comportamiento el valor en aumento a mayor profundidad. El pH potencial mantiene la misma relación, en 8 y 10 es de ligeramente ácida a neutro, En 18 se clasifica como ligeramente alcalino en el pH potencial es de neutro. En el sitio 6 y 7 el valor de pH aumenta en los 40 cm mientras en el tercero hay una ligera disminución, clasificándose ambos como neutros. En el pH potencial mantiene la misma relación, clasificándose para 6 y 7 en ligeramente ácido a neutro a mayor profundidad.

Para la zona de la refinería los valores se encuentran entre 6.17 a 8.01, en los puntos 9, 12, 15, 16, 19 y 20, refleja un aumento con la profundidad; en 9, 12 y 15 es definido como neutro; en 16 tiende de neutro a ligeramente alcalino. El pH potencial sigue el mismo comportamiento para el 9 es neutro; en 12 es ligeramente ácida en los dos primeros horizontes y en tercero como neutro; en 15 es ligeramente ácida en todo el perfil; el 16 llega a ser neutro en todo el perfil. El pH real de 19 se considera como *ligeramente ácido a neutro en sus estratos y 20 es ligeramente ácido; su pH potencial de 19 se mantienen con el mismo comportamiento.* Hay una disminución del pH con la profundidad en los sitios 11 por efecto de un posible ascenso de sales por capilaridad siendo ligeramente alcalino, su pH potencial llega a ser ligeramente ácido.

En 13 el comportamiento es de ligeramente ácido a neutro y 14 de neutro a ligeramente ácido probable a la materia orgánica; el pH potencial de 13 y 14 es definido como ligeramente ácido en todo el perfil. En los sitios 4, 5 y 17 son definidos como neutros; su pH potencial es de neutro para 4, 5 y 17.

Entre este parámetro y la concentración de hidrocarburos presentes se le encontró una correlación para la zona de la termoeléctrica presenta un valor negativo ($r = -0.612$) y en la zona agrícola presenta un valor positivo ($r = 0.214$); para la zona de la refinería no hay correlación ($r = 0$). De acuerdo a EPA el pH tiene importancia en la movilidad de ácidos orgánicos, con el aumento de este valor aumenta la movilidad, existiendo como aniones.

De acuerdo a Fränze (1992) no existe una relación entre el pH del suelo y los hidrocarburos como el benceno, tolueno, xileno, petróleo, keroseno, diesel y combustibles ligeros quedando este parámetro como importante para la población microbiana en la degradación de tales compuestos como lo establece (EPA, 1983; Block, Stoo & Swett, 1993; Huesemann, 1994; Zhou & Crawford, 1995) sin mencionar así alguna relación directa en el comportamiento de los hidrocarburos.

Los valores de pH aumentan con la profundidad, debido a una ligera lixiviación de sales. La alcalinidad es el resultado de: 1) la meteorización de las rocas de las cuales pueden producir bicarbonatos de sodio, calcio y magnesio; 2) el uso de aguas subterráneas a través de pozos profundos que contienen bicarbonato de sodio pueden entrar en el suelo y acumularse (NaCl y fosfatos de sodio presentes en los detergentes).

Los valores de pH entre 6 y 8 son ideales para la actividad biológica, que afectan la disponibilidad de los nutrientes. Los resultados obtenidos se hallan en un intervalo de 6.67 a 8.20 que indican una buena disponibilidad de nutrientes, EPA (1983) menciona que hay una biodegradación altamente significativa para los residuos de aceite a un pH de 7.0 a 7.8 además que el pH óptimo es de 6 a 7.

8.1.7 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (C.I.C.)

En la zona de la termoeléctrica se tienen valores de 15.37 a 26 meq/100 g de suelo, esta propiedad se halla relacionada principalmente por la materia orgánica, disminuyendo con el aumento de la profundidad para los puntos 1, 2 y 3. Teniendo la siguiente clasificación de Cottenie (1988) como alto en los dos primeros horizontes, el segundo como alto en los dos horizontes y el tercer sitio como alto, medio para los dos últimos estratos (20 a 60 cm).

En la zona agrícola se hallan en 21.17 a 43.21 meq/ 100 g de suelo, disminuyendo su valor con la profundidad en los sitios 6 y 7 sin guardar relación con la materia orgánica y la poca cantidad de arcillas que aumenta gradualmente, clasificándose en ambos como alto en los estratos. En 8 y 10 aumenta con la profundidad, excepto en 10 que disminuye cerca del material parental; denominado como alto en los tres horizontes de 8 y en 10 muy alto a alto conforme a la profundidad correspondiendo al aumento de la materia orgánica a lo largo del perfil. En 18 es clasificado como alto influenciado por la materia orgánica y el mineral del material parental.

Para la zona de la refinería el intervalo es de 15.66 a 46.69 meq/ 100 g de suelo, en el punto 15 disminuye con la profundidad siendo clasificado como alto a medio sin tener relación con la materia orgánica y la arcilla. En los sitios 9, 11, 12, 13, 14 y 20 es inverso al anterior hay un aumento a lo largo del perfil, quedando de la siguiente

manera alto y muy alto en 11; 12, 13 y 14 como alto en todos los estratos y muy alto para 20 sin correspondencia aparente con la materia orgánica y arcilla. En el sitio 16 este parámetro se comporta igual que la materia orgánica con la clasificación de alta, media y alta existiendo una migración de constituyentes orgánicos e inorgánicos, además que la superficie es receptora de material del punto 15. En 19 no existe correspondencia con la materia orgánica pero sí con la textura, pues en el horizonte 20 a 40 cm hay un mayor valor con respecto a la superficie y al cercano al material parental, quedando como alta en todo el perfil. El punto 4, 5 y 17 tiene una clasificación de alta con correspondencia a la materia orgánica. El sitio 9 tiene un valor alto debido a la presencia de minerales arcillosos.

Y ligado a este parámetro, la CIC fue también asociada con la presencia de los hidrocarburos quedando de la siguiente forma: En la zona de Termoeléctrica su valor es el más bajo ($r = 0.086$), en la zona agrícola tiene un valor negativo siendo el de menor valor ($r = -0.028$) y por último en la zona de la refinería tiene un comportamiento inversamente proporcional bajo ($r = -0.316$) este se realizó para verificar una posible sustitución de algunos elementos por hidrocarburos, observándose una mínima relación en las dos primeras zonas, en la correspondiente a la refinería existe una relación inversamente proporcional existiendo una probable sustitución de elementos donde Ortego, Kowalska & Cocke (1991) mencionan que el metanol, etanol, n-propanol, benceno, tolueno, o-xileno, pentano, hexano, heptano, ciclohexano pueden sustituirse por el catión Na^+ , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Ru^{3+} , propil-, dodecil-, dodecildiamonio, tetrametilamonio y tetrametil-, tetraetil-, tert-octil-, miristiltri-, metilamonio.

De acuerdo a EPA (1983) el comportamiento de los compuestos orgánicos volátiles en los sitios de intercambio se halla influido por fuerzas electrostáticas que son relaciones de atracción débiles y disminuye cuando el pH es bajo debido a que los sitios activos de la Materia Orgánica, proporcionada por los grupos carboxilo, metoxilo, etc., quedan estabilizados al enlazar covalentemente al hidrógeno, asimismo a pH bajo los iones Al^{+3} , AlOH^{+2} y $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$ ocupan los sitios de intercambio de las arcillas 2:1, y sólo hasta que aumenta el pH y se forma el $\text{Al}(\text{OH})_3$ precipita dejando libres los sitios de intercambio. De este modo los sitios de intercambio del material coloidal, tanto orgánico como mineral se ven afectados a pH bajo.

8.2 DESCRIPCION DE COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES IDENTIFICADOS

En los lugares de estudio se identificaron con relación a su tiempo de retención (RT) los siguientes compuestos: el tolueno, xileno, benceno, octano, pentano, hexano, etanol, metanol, isopropanol, 2,2,2-trimetilpentano y otros compuestos orgánicos volátiles (COV's)

Zona de la Termoeléctrica:

En la identificación de los COV's se hallaron los siguientes; Tolueno que apareció en la parte superficial del suelo en los puntos 1 y 2 sin presentarse en el sitio 3, la concentración es de 0.745 y 12.893 mg/Kg observando un aumento con la distancia, estos valores se hallan por debajo de los límites permisibles del suelo establecidos en varios estados de la Unión Americana excepto para California donde el intervalo es de 0.3 a 50 mg/Kg (Saval, 1995).

El Benceno se presentó a una profundidad (20 a 40 cm) del punto 1, en la parte superficial de 2, hallándose en mayor cantidad en el primer punto con una concentración de 7.804 mg/Kg y en el segundo con 2.934 mg/Kg. Esta concentración rebasa al de California que establece un valor de 0.3 a 1.0 mg/Kg.

El Xileno se localiza a mayor distancia de la barda que es en el sitio 3 a lo largo del perfil, con un mayor aumento en la profundidad, existiendo aquí una migración de dicho compuesto al subsuelo con las siguientes concentraciones (1.952, 1.163 y 8.136 mg/Kg) de acuerdo a lo reportado en los límites permisibles de contaminantes estos se hallan dentro o por debajo del límite para California sin alcanzar un nivel alarmante.

Zona Agrícola:

El Tolueno se presenta en el sitio 7 principalmente en mayor concentración disminuyendo conforme a la profundidad (1.890, 0.722 y 0.510 mg/Kg); para el sitio 8 la concentración es mayor en la superficie (1.735 mg/Kg) y disminuyendo con la profundidad (0.505 y 0.848 mg/Kg) rebasando este valor mínimo al intervalo establecido para el estado de California. En el sitio 18 la concentración es mucho mayor a la anterior con 137.949 mg/Kg ubicado en las proximidades de las instalaciones de la refinería que mantenía un cultivo de trigo listo para su cosecha, probablemente a la dirección del viento observado por la flama del quemador de la refinería y con ello el viaje de los vapores. Se halla ausente en el sitio 6 y 10.

Para Benceno, el comportamiento es una disminución de concentración con respecto a la profundidad para los sitios 7 y 8; en 7 los valores son más altos en comparación de 8 de la siguiente forma (4.003, 1.502 y 0.780 mg/Kg) y (1.591, 0.605 y 0.332 mg/Kg) respectivamente. Hallándose nuevamente en 10 sólo que no existe en la superficie apareciendo en el subsuelo (segundo y tercer horizonte) con los valores de 1.534 y 1.228 mg/Kg disminuyendo con la profundidad, rebasando el límite para California y estando ausente en 6 y 18 probable a la degradación microbiana.

El Xileno en el sitio 6, la concentración aumenta con la profundidad de 1.054, 3.519 y 43.357 mg/Kg, en este último el valor rebasa lo permitido al estado de California, estableciendo así una probable migración vertical debido a la presencia de agua como medio de difusión. En caso contrario para los sitios 7 y 8 donde la concentración disminuye en la cercanía del material parental, a mayor distancia la concentración

aumenta ligeramente de la siguiente forma para 7 es de 2.899, 0.672 y 0.403 mg/Kg, en 8 es 2.839, 0.201 y 1.102 mg/Kg estos valores se hallan dentro del nivel de limpieza. El sitio 10 se presentó en el segundo y tercer estrato observando un descenso de la concentración 0.541 a 0.334 mg/Kg manteniéndose dentro del intervalo de limpieza. Por último en 18 el valor es de 7.975 mg/Kg ubicado enfrente del patio de almacenamiento, es mayor en comparación a 7, 8 y 10 al estar del mismo lado dado por la dirección de los vientos y su concentración se encuentra dentro del valor de limpieza.

El etanol sólo se presenta en el sitio 10 con una disminución de concentración a través del perfil siendo 7.901, 3.083 y 2.081 mg/Kg para este compuesto no existe un estándar de limpieza en el suelo, es probable que parte sea un producto de la descomposición microbiana presente en el suelo.

El hexano se presenta sólo en los primeros horizontes de 6 (0 a 40 cm) con un valor de 0.900 a 7.349 mg/Kg, igual no existe algún criterio de limpieza en el suelo, en el tercer horizonte se localiza el pentano con un valor de 89.193 mg/Kg también para este compuesto no existe criterio de limpieza en el suelo además de localizarlo en la superficie del sitio 18 con un valor de 155.615 mg/Kg.

En relación a los COV's considerados sólo por su RT, se halló un compuesto al minuto 8.8 presente en la superficie del punto 7 (1.198 mg/Kg) y en 10 cerca del material parental con valor de 0.250 mg/Kg, hallando más en el sitio 7 influenciado por la dirección del viento. Otros con un RT de 15.8 y 16.5 min. que aparecieron en el mismo perfil hallándose en la cercanía del material parental con una concentración de 4.003 y 19.764 mg/Kg respectivamente.

Zona de la Refinería

El Xileno en el sitio 4 presentó una concentración de 4.779 mg/Kg, ubicado dentro del límite de limpieza. Del lado de las instalaciones, el más cercano al quemador y las instalaciones es el punto 9 con una disminución de concentración conforme a la profundidad siendo 2.668 a 0.005 mg/Kg sin representar un problema de limpieza; en 11 se presenta de igual manera con 2.553 y 1.378 mg/Kg, el sitio 12 disminuye la concentración conforme a la profundidad donde es más marcada en el estrato 20 - 40 cm de la siguiente forma 3.977, 0.265 y 1.108 mg/Kg. En 13 se presenta en el tercer horizonte con una concentración de 0.872 mg/Kg estando dentro del parámetro de limpieza y 14 disminuye con la profundidad llegando hasta los 40 cm, con una concentración de 3.401 a 0.940 mg/Kg sin representar problema alguno. En el sitio 15 la concentración aumenta con la profundidad ligeramente siendo 0.431 a 1.338 mg/Kg, y en 16 presenta mayor concentración a 15 conforme se aleja de la barda con una tendencia a mayor concentración en el material parental, el estrato 20-40 cm disminuye como se indica a continuación de 2.110, 1.551 y 4.187 mg/Kg estando dentro del criterio de limpieza de California. En 17 se presenta con un valor de 1.601 mg/Kg

estando dentro del límite. Para 19 sólo se presenta a partir de 20 a 60 cm de manera constante con 1.013 a 0.557 mg/Kg en la misma dirección el sitio 20 la concentración disminuye con la profundidad siendo 2.216 y 0.573 mg/Kg quedando ambos sitios dentro del intervalo de limpieza. En general se presenta una mayor concentración en la cercanía de las instalaciones de refinación.

Para el Benceno en el sitio 11 su concentración aumenta a mayor profundidad de 0.812 a 1.499 mg/Kg, en 12 disminuye su concentración con valores de 2.958, 2.665 y 1.340 mg/Kg, excediendo el límite de limpieza permisible del estado de California. En el sitio 19 se tiende a disminuir a partes profundas, existiendo una acumulación en 20-40 cm con 1.445, 2.061 y 1.227 mg/Kg, caso contrario en el sitio 20 donde la concentración aumenta con la profundidad de 0.924 a 1.081 mg/Kg rebasando el límite de California (0.3-1 mg/Kg). Presentado una mayor concentración en la cercanía de las instalaciones de refinación.

Para el Tolueno, en el sitio 4 se presentó con una concentración de 53.079 mg/Kg rebasando el límite permisible de California. En el sitio 11 este desciende con la profundidad con los siguientes valores 1.462 a 0.684 mg/Kg y en 12 con el mismo comportamiento siendo 2.316, 0.045 y 0.354 mg/Kg quedando la concentración en lo permitido pero cercano a sus límites. En el siguiente punto 13 aparece en los dos primeros horizontes con un aumento en la profundidad con 1.265 y 2.784 mg/Kg y en el sitio 14 solo se encuentra en 20-40 cm con 3.829 mg/Kg ubicándose dentro del límite. En el sitio 19 la concentración disminuye con la profundidad siendo 0.523, 0.632 y 0.116 mg/Kg, en 20 la concentración aumenta con la profundidad de 0.226 a 0.346 mg/Kg. Hay una mayor concentración en la cercanía de las instalaciones de refinación.

Con referencia a la presencia de los alcoholes en el suelo, se encontró isopropanol en el sitio 9 disminuyendo su concentración con la profundidad de 0.931 a 0.117 mg/Kg. Los sitios 12 y 14 se halla sólo en la parte superficial con 0.269 y 0.238 mg/Kg respectivamente. En 13 solo se encuentra en el horizonte cercano al material parental con 0.892 mg/Kg. El etanol se presentó en el segundo estrato de 11 con 0.448 mg/Kg, 12 en la parte superficial con 2.679 mg/Kg, 13 se presenta en el segundo horizonte con 0.611 mg/Kg y el sitio 14 se presenta en la superficie con 1.493 mg/Kg aumentando la concentración con el alejamiento a la barda. El metanol es detectado en la superficie del sitio 11 con una concentración de 0.218 mg/Kg únicamente. La presencia de los alcoholes es dado por la depositación de estos vapores de los procesos de refinación como constituyentes de la gasolina sin plomo en los suelos cercanos a estas instalaciones favorecido por las condiciones de temperatura (SEPA, 1991).

Posiblemente parte de los alcoholes es debido a la degradación microbiana en los compuestos orgánicos presentes en el suelo, los alcanos de cadena corta y larga son oxidados a sus alcoholes correspondientes, aldehídos y entonces a sus ácidos. El alcohol primario derivado del alcano es oxidado a un aldehído por un alcohol deshidrogenasa, y la oxidación del aldehído a el ácido por una deshidrogenasa aldehído. Los ácidos grasos resultantes de los alcanos se obtienen a través de una

oxidación por un sistema de β oxidación al nivel de acetato para alcanos de cadena lineal y resultando alcanos de cadena fragmentada (Yuan & Krishnamurthy, 1995).

El hexano solo se presentó en el sitio 4 con 5.211 mg/Kg cercano a la entrada de la refinería. Del lado de las instalaciones de refinación el sitio 11 se detectó en la parte superficial con 1.047 mg/Kg inferior al sitio 4; en 13 en la parte de 20-40 cm con 0.807 mg/Kg, en 15 se presenta en los dos primeros estratos descendiendo su concentración de 26.217 a 5.527 mg/Kg superando al punto 4 dado por la dirección del viento y en la misma dirección el sitio 16 la concentración aumenta con la profundidad 0.350, 2.543 y 11.054 mg/Kg.

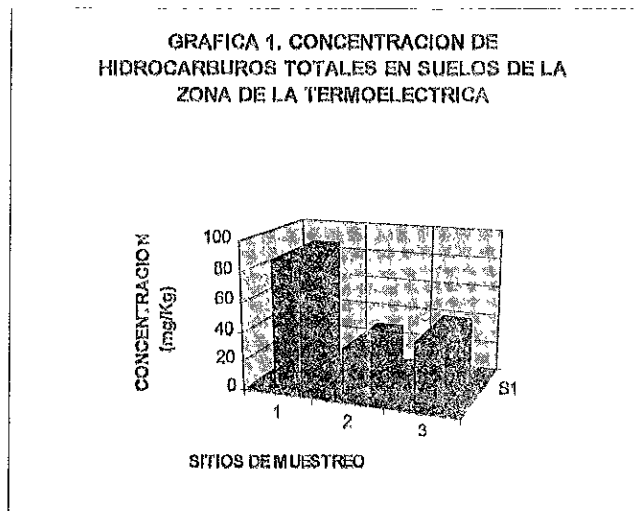
El pentano ubicado en los puntos 12, 13 y 14 se presenta en el segundo horizonte con 0.477 28.440 y 15.380 mg/Kg. En los sitios 15 y 16 se presentan en los primeros 40 cm, en el primer caso aumenta la concentración de 265.518 a 508.511 mg/Kg, y caso contrario en 16 donde disminuye de 311.429 a 49.025 mg/Kg. En el sitio 17 se presenta una concentración de 51.801 mg/Kg, y finalmente en el sitio 20 aumenta con la profundidad con un valor de 0.636 a 0.919 mg/Kg. Se observa que la concentración aumenta alejándose de las instalaciones por lo que puede existir un efecto de sombra por la baja concentración hallada cerca de la barda.

Con los compuestos orgánicos no identificados se utilizó su RT, apareciendo de la siguiente forma: RT (2.650) únicamente en la superficie de 11 (2.773 mg/Kg). RT (3.402) en el sitio 11 que disminuye su concentración ligeramente de 0.172 a 0.129 mg/Kg y en el sitio 12 aparece en la superficie con mayor valor al anterior de 0.600 mg/Kg y cerca del material parental con 0.248 mg/Kg. En 13 aparece en los dos últimos horizontes (20-60 cm) aumentando con la profundidad de 0.025 a 0.717 mg/Kg y en 14 que es de la misma dirección, aparece en los dos primeros horizontes con una disminución de 0.578 a 0.055 mg/Kg observando el efecto sombra para el sitio 13 por una baja concentración. Y por último en el punto 19 hay un aumento de la superficie al siguiente horizonte para disminuir más que en la superficie quedando en 0.053, 0.207 y 0.033 mg/Kg de igual modo esta baja concentración es asociada a la presencia de la barda. El RT (5.451) se ubica en la superficie del sitio 12 con 0.120 mg/Kg. De igual modo es con el RT (5.831) que se localiza en el mismo lugar con una concentración de 0.386 mg/Kg y en el sitio 13 (horizonte 20-40 cm) con 0.220 mg/Kg. El comportamiento general es de mayor concentración a estar más distante de la barda de la refinería.

La RT (8.854) aparece en el punto 9 con una concentración en la parte superficial de 1.282 mg/Kg, en el sitio 11 el valor desciende con la profundidad de 1.119 a 0.532 mg/Kg, y en el punto 12 se ubica en el segundo y tercer estrato con igual comportamiento pero con una mayor concentración de 9.841 a 0.075 mg/Kg. En el punto 13 sólo se ubica en la superficie con un valor de 13.887 mg/Kg, para el sitio 14 se halla en los primeros horizontes (0-40 cm) aumentando drásticamente de la siguiente forma 1.548 a 386.115 mg/Kg. En el sitio 19 la concentración disminuye con la profundidad siendo sus valores de 0.411, 0.303 a 0.222 mg/Kg; manera semejante al punto 20 con menor concentración en comparación al anterior con un valor de 0.290 a

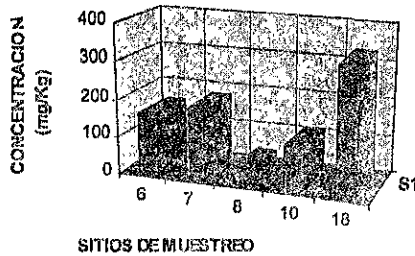
0.174 mg/Kg. Por último el RT (12.019) se ubica únicamente en 19 cerca del material parental con 1.454 mg/Kg.

Otros compuestos identificados fueron el octano ubicado en el sitio 9 horizonte 20-40 cm con un valor de 0.457 mg/Kg, en el sitio 11 se detectó en la parte superficial con un valor de 0.367 mg/Kg; en 13 disminuye su concentración de acuerdo a la distancia con 0.108 mg/Kg. Finalmente el 2,2,4-Trimetilpentano se detectó en el punto 13 en el horizonte 20-40 cm con un valor de 0.417 mg/Kg, para este caso con anteriores compuestos orgánicos no se cuenta con datos de limpieza en el suelo por la carencia de información y de investigación.



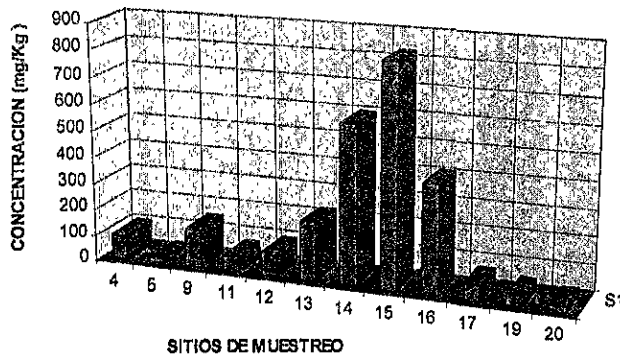
En la gráfica 1 se observa el comportamiento de los hidrocarburos totales para la zona de la termoeléctrica, donde el sitio más próximo a la barda muestra mayor concentración (86 mg/Kg) en el siguiente la concentración disminuye a 30 mg/Kg y para el último el valor es de 40 mg/Kg. Este tiene un descenso conforme a la lejanía de la instalación, presentando una menor concentración en el sitio 2 por el recién volteo del suelo efectuado provocando una pérdida de estos compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera. De acuerdo a los límites permisibles para hidrocarburos totales para Arkansas (HTP 100-1000 mg/Kg) estos valores se hallan por debajo de éste sin representar algún problema.

**GRAFICA 2. CONCENTRACION TOTAL DE
HIDROCARBUROS EN LA ZONA AGRICOLA**



En la gráfica 2 se representan los hidrocarburos totales para la zona agrícola, donde el sitio 6 tiene una mayor concentración (157.078 mg/Kg) a los sitios ubicados enfrente de las esferas de almacenamiento; los sitios 7, 8 y 10 ubicados enfrente a las instalaciones de refinación presentan también altas concentraciones (179.335 y 109.689 mg/Kg) excepto el sitio 8 que disminuye drásticamente con la distancia (37.021 mg/Kg) indicando también una disminución de hidrocarburos con el alejamiento de las instalaciones. Para 10 y 18 que son sitios donde las concentraciones aumentan (109.689 y 330.167 mg/Kg) con la distancia con un probable efecto sombra debido a la dirección de los vientos; ambos sitios rebasan el límite permisible para Arkansas (HTP 100-1000 mg/Kg), representando un problema de limpieza siendo el punto 18 el más afectado.

**GRAFICA 3. CONCENTRACION TOTAL DE
HIDROCARBUROS EN SUELOS DE LA ZONA DE LA
REFINERIA**



En la gráfica 3 se presentan las concentraciones totales de hidrocarburos en la zona de la refinería, para los sitios 4 y 5 ubicados enfrente de las esferas de almacenamiento los valores de hidrocarburos disminuye con la distancia (95.642 y 19.986 mg/Kg) sin rebasar el límite mínimo permisible de Arkansas mientras los otros puntos ubicados en la cercanía de las instalaciones de refinación presenta una menor concentración de acuerdo a mayor distancia a dichas actividades para los sitios 11 y 12 sus valores son bajos (61.074 y 87.640 mg/Kg) sin exceder el límite permisible donde parecerían ser el centro de una campana en cuyos extremos las concentraciones aumentan como es el caso de la zona agrícola; en el sitio 9 excede el límite (146.665 mg/Kg), las mayores concentraciones se hallan en los sitios 13, 14, 15 y 16 (221.869, 598.411, 828.393 y 406.333 mg/Kg) así también en 18, presentando un descenso en 17, 19 y 20 (64.517, 40.245 y 22.079 mg/Kg); para el caso de los puntos 11 - 12, 13 - 14 y 17 - 18 se presenta el efecto sombra. Estableciendo que el mayor problema de limpieza se presenta en los suelos cercanos a las instalaciones de refinación.

Jernigan, Bass & Paustenbach (1991) mencionan que los riesgos de los compuestos volátiles en el suelo es la inhalación debido a la vaporización e ingestión de partículas que constituyen las fuentes primarias de exposición, para el caso de la Refinería de Tula, la contaminación de los suelos daña particularmente a los trabajadores agrícolas y a los habitantes cercanos a estas instalaciones representando una amenaza por la volatilización de dichos orgánicos a la atmósfera. Ocasionalmente cuando la contaminación llega por infiltración a aguas subterráneas y estas a su vez al suministro de agua potable, donde su ingestión puede representar un riesgo de salud pública, dado por el material parental poroso. La segunda ruta más importante de exposición humana es el contacto dermal dado por la vida media del compuesto en el ambiente, pues muchos sitios industriales contaminan con químicos orgánicos volátiles que pueden tener una alta movilidad en el suelo; los volátiles raramente entran en la cadena trófica.

9. CONCLUSIONES.

Los compuestos orgánicos volátiles identificados en los suelos aledaños a la refinería fueron los siguientes: Metanol, Isopropanol, Etanol, Pentano, Hexano, Octano, 2,2,4 - Trimetilpentano (Isooctano), Tolueno, Xileno y Benceno. Siendo los tres últimos los más constantes en los sitios de muestreo.

Las concentraciones detectadas para el caso del tolueno rebasa el límite mínimo permisible (0.3 - 50 mg/Kg) para California; el xileno sus valores rebasan en la mayoría de los casos el límite mínimo permisible (1 - 50 mg/Kg). Mientras el benceno rebasa el límite establecido (0.3 - 1 mg/Kg) en los puntos de muestreo detectados.

Para el caso del metanol, isopropanol, etanol, pentano, hexano, octano e isooctano no existen aún valores límites permisibles en suelo pues algunos de ellos presentan altos valores como es el caso del pentano en los puntos 15, 16, y 18, principalmente.

La mayor concentración de tolueno es localizado en el sitio 18, 4 y 2, el xileno en el sitio 6 y 3 y el benceno la mayor concentración se ubica en el sitio 1 y 7.

Hay un "efecto de sombra" para el tolueno para los sitios 11 - 12, 13 - 14 y 19 - 20 en la zona de la refinería en la termoeléctrica existe en 1 - 2. El xileno correspondiente a los sitios 11 - 12, 13 - 14, 15 - 16 y 19 - 20 en la zona de la refinería de igual modo en la zona de la termoeléctrica en el sitio 3 - 4. En el caso del benceno se presenta en el sitio 11 - 12.

Existe una distribución irregular del tolueno, xileno y benceno presentes en los sitios de muestreo, así como en la concentración total de compuestos orgánicos volátiles por factores que la determinan como son: Clima, Humedad, Vientos, Temperatura entre otros.

La mayor concentración de compuestos orgánicos volátiles presente para la zona de la Termoelectrica se ubica en el sitio 1 (86.462 mg/Kg); en la Agrícola en el punto 18 (330.167 mg/Kg) y en la Refinería en el sitio 15 (598.411 mg/Kg).

Los suelos cercanos a las instalaciones de refinación presentan las más altas concentraciones de la zona de estudio y por el material parental calizo pueden actuar como una fuente de contaminación hacia aguas subterráneas.

En los suelos agrícolas con altas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles totales, existe una probable fuente potencial de contaminación a los cultivos que comienzan a crecer.

Existe una baja correlación entre los parámetros del suelo y la concentración de compuestos orgánicos en las zonas de la Termoeléctrica, Agrícola y de la Refinería.

En la zona de la Termoeléctrica se presentó una correlación positiva para la materia orgánica, contenido de arcilla y CIC, y negativo para el pH y humedad de campo.

En la zona agrícola la correlación positiva es para la materia orgánica y pH; negativa a la humedad, arcilla y CIC.

Para la zona de la refinería los parámetros con correlación positiva son la arcilla, humedad y materia orgánica, y negativa únicamente a la CIC.

La materia orgánica se presenta en las tres zonas de estudio con una correlación positiva.

10. PROPUESTAS

Realizar estudios complementarios para determinar otros parámetros para el suelo como es la conductividad hidráulica, profundidad de la capa de agua subterránea, calidad de aguas subterráneas y monitoreo de los suelos en forma periódica, además de la identificación de organismos presentes que tengan influencia en la degradación de los compuestos orgánicos volátiles contaminantes.

La obtención de mapas y diagramas son absolutamente necesarios para el seguimiento de los contaminantes y el hacer uso de una serie de técnicas modernas (imágenes vía satélite, espectrogramas) que permitan hacer una identificación previa de contaminación en el suelo.

Para predecir el efecto de la contaminación en sitios complejos (zonas industriales y sitios de disposición) se debe tener una descripción detallada de cada fuente, incluyendo la masa, volumen, periodo y área probable de afectación. Así como las actividades humanas cercanas a estos lugares que contribuyan a facilitar una mayor comprensión de la contaminación.

Es necesario realizar experimentos de columnas en laboratorio para definir qué procesos de transformación y transporte influyen principalmente en los compuestos orgánicos volátiles en suelos adyacentes a la Refinería.

No todos los procesos generadores de residuos contaminantes pueden ser reemplazados con alternativas limpias. La contaminación puede ser controlada desde su fuente generadora, y en un derrame la pluma contaminante después del incidente.

11. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Abbott, D. & R. S. Andrews. 1983. Introducción a la Cromatografía. Alhambra. España.
- 2) Ayllon T. T. & J. F. Chavez. 1994. México: sus recursos naturales y su población. Segunda Edición. Limusa. México.
- 3) Azuela, A. 1995. La Distribución de Competencias en la Regulación de los Usos del Suelo. PEMEX: Ambiente y Energía Los retos del futuro. Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM-PEMEX, pp 13-34. México
- 4) Barcelona, M.; A. Wehrmann; J. F. Keely & W. A. Pettyjohn. 1990. Contamination of Groundwater Prevention Assesment, Restoration. Noyes Data Corporation. New Jersey.
- 5) Best A. G. & P. Dawson. 1993. Environmental analysis using gas chromatography. Gas Chromatography. Edited P. J. Baugh. Oxford University Press. New York.
- 6) Block, R.; H. Stroo & G. H. Swett. 1993. Bioremediation-Why doesn't it Work Sometimes Chemical Engineering Progress. August: 44-50.
- 7) 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.
- 8) Bonazountas, M. & D. Kallidromitou. 1993. Mathematical Hydrocarbon Fate Modeling in Soil Systems. Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils. Lewis Publishers. USA.
- 9) Buckman, H. O. & N. C. Brady. 1991. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. Limusa. México
- 10) Buol, S. W.; F. D. Hole & R. J. McCracken. 1991. Génesis y Clasificación de Suelos. Trillas. México.
- 11) Carreno, A. G. 1991. Formulación de Contaminantes Atmosféricos Generados por la Combustión de Gasolinas Combustibles y sus Efectos Tóxicos. Tesis de Licenciatura. ESIQIE. IPN
- 12) Chappin, R. G. & L. R. Summerlin. 1988. Química. Publicaciones Cultural. México.
- 13) Chow, P. S. 1987. Petroquímica y Sociedad. Fondo de Cultura Económica. México.
- 14) Crouch, S. M. 1990. Check Soil Contamination Easily. Chemical Engineering Progress. September: 41-45.
- 15) 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. pp 35-55. México.
- 16) Dickson, T. R. 1980. Química, Enfoque Ecológico. Limusa. México.

- 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) Dragun, J.; S. A. Mason & J. A. Barkach. 1989. What do We Really Know About the Risk of Diesel Fuel in Soil System. Hydrocarbon Contaminated Soils. Lewis Publishers. USA.
- 19) Duran, H. F. 1986. Sistema de Protección contra Incendio para la Planta combinada de la Refinería de Tula, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Fac. de Química. UNAM.
- 20) Duggan, J. W.; C. J. Bruell & D. K. Ryan. 1994. In situ Emulsification and Mobilization of Gasoline Range Hydrocarbons Using Surfactants. Journal of Soil Contamination. Vol. 3 (2): 159-182.
- 21) Elías, M. R. L. & G. O. Valencia. 1996. Remediación de Suelos Afectados con Hidrocarburos. Departamento de Remediación e Impacto Ambiental. "Simposium Internacional de Geología Ambiental, Confinamiento de Residuos y Contaminación de Suelo y Subsuelo". Instituto Mexicano del Petróleo. México.
- 22) EPA. 1983. Hazardous Waste Land Treatment. Municipal Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development. U.S.A. Cincinnati, Ohio.
- 23) 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 Vol. 45:453-460.
- 24) Fessenden, R. J. & J. S. Fessenden. 1985. Química Orgánica. Iberoamericana, México.
- 25) Foth, H. D & L. M. Turk. 1980. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Continental. México.
- 26) Fränze, O. 1993. Contaminants in Terrestrial Environments. Springer-Verlog. Berlin Heidelberg. Germany.
- 27) Fuh, T. L.; J. C. Little & W. W. Nazaroff. 1985. Transport and Organic Contaminants in Groundwater. Environmental Science Technology. Vol. 19 (5): 384-392.
- 28) Gaucher, G. 1971. El Suelo y sus Características Agronómicas. Omega. Barcelona, España.
- 29) 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.
- 30) Gutiérrez, E. M. 1990. Los Residuos Sólidos Peligrosos: ¿ Un Riesgo sin Solución?. Ciencias. Octubre. No. 20 UNAM.
- 31) Hansen, A. M. & L. A. Z. Morales. 1995. Contaminación de los Sedimentos de la Presa de Silva Guanajuato y Alternativas para su Rehabilitación. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.

- 32) Hilliel, D. 1989. Movement and Retention of Organics in Soil: A Review and a Critique of Modeling. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater. Lewis Publishers. USA.
- 33) Huesemann, M. H. 1994. Guidelines for Land-Treating Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils. Journal of Soil Contamination. Vol. 3 (3):299-318.
- 34) INEGI. 1992. Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. México.
- 35) INEGI. 1996. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 1995. Aguascalientes, México.
- 36) Jackson, L. M. 1985. Análisis Químico de Suelos. Omega. Barcelona, España
- 37) Jernigan, J. D.; R. Bass & D. J. Paustenbach. 1991. A Cost Effective Approach to Regulating Contaminated Soil: Set of Minimis Concentrations for Eight Different Exposure Scenarios. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater. Lewis Publishers. USA.
- 38) Jury, W. A. 1989. Chemical Movement Through Soil. Vadose Zone Modeling of Organic Pollutants. Edited Stephen C. Hern, susan M. Melancon. Lewis Publishers Inc. USA.
- 39) 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. Vol. 26(1): 13-20.
- 40) Krishnayya, A. V.; D. R. Williams; J. G. Agar & M. J. O'Connor. 1994. Significance of Organic Chemical Adsorption in Soil and Groundwater Remediation. Journal of Soil Contamination. Vol. 3(2):191-201. USA.
- 41) Lesser, I. J. M. 1995. Prospección de Contaminación de Acuíferos por Hidrocarburos. Geólogos. Vol. 1(6):5-8.
- 42) Lin, T. F.; J. C. Little & W. W. Nazaroff. 1994. Transport and Sorption of Volatile Organic Compounds and Water Vapor within Dry Soil Grains. Environmental Science Technology. Vol. 28(2): 322-330.
- 43) Loehr, R. C. 1991. Bioremediation of PAH Compounds in Contaminated Soil. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater. Lewis Publishers. USA.
- 44) Mackay, M. D.; P. V. Roberts & J. A. Cherry. 1985. Transport of Organic Contaminants in groundwater. Environmental Science & Technology. Vol.19(5): 384-392.
- 45) Mackay, M. D. & J. A. Cherry. 1989. Groundwater Contamination: Pump and Treat Remediation. Environmental Science & Technology. Vol. 23(6): 630-636.
- 46) Manzanilla, F. S. 1976. Refinería de Tula: Una realización de Ingeniería y Tecnología Mexicanas. Revista del Instituto del Petróleo. Abril Vol. VII (2);
- 47) Martínez. R. G. 1982. Efectos Ambientales Ocasionados por la Contaminación del Agua en el Municipio de Tula de Allende, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Fac. Filosofía y Letras-Colegio de Geografía. UNAM.

- 48) McBride, M. B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. New York Oxford. USA.
- 49) McMurry, J. 1994. Química Orgánica. Iberoamericana. México.
- 50) Molina, B. A. 1982. La Contaminación del Suelo. Tesis de Licenciatura. Fac. de Derecho. UNAM.
- 51) Morrill, L. G.; B. C. Mahilum & S. H. Mohiuddin. 1982. Organic Compounds in Soils: Sorption, degradation and Persistence. Ann Arbor science Publishers. Michigan.
- 52) Morrison, R. T. & R. N. Boyd. 1976. Química Orgánica. Fondo Educativa Interamericano. España.
- 53) Mota, G. E. 1986. Aspectos Jurídicos de la Contaminación originada por los Hidrocarburos. Tesis de Licenciatura. Fac. de Derecho. UNAM.
- 54) Murray, B. McB. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press. USA.
- 55) Nyer, K. E. 1992. Groundwater treatment Technology. Second edition. Van Nostrand Reinhold. New York.
- 56) Ortego, J. D., M. Kowalska & D. L. Cocks. 1991. Interactions of Montmorillonite with Organic Compounds - Adsorptive and Catalytic Properties. Chemosphere. Vol. 22(8): 769-798.
- 57) 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. Fac. de Ciencias. UNAM.
- 58) 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.
- 59) PEMEX. 1988. El Petróleo. Gerencia de Información y Relaciones Públicas. México.
- 60) Poder Ejecutivo Federal. 1996. Programa Forestal y de Suelo 1995 - 2000. Dirección General de Comunicación Social de la Semarnap. México.
- 61) 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.
- 62) Quadri, T. G. 1994. Industria y Política Ambiental. El Nacional. Sábado 18 de Junio de 1994. México.
- 63) Quintanilla, J. & M. Bauer. 1995. Los Grandes Retos de PEMEX en Materia Ambiental PEMEX: Ambiente y Energía Los retos del Futuro. Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM-PEMEX. pp: 213-258. México.
- 64) Rhodes, A. L. Y.; R. Z. Olvera & J. A. León. 1991. Determination of Gasoline Range Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) and Approximate Boiling Point Distribution in Soil by Gas Chromatography. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater. Vol. 1. Lewis Publishers. USA.

- 65) Rulkens, W. H. & A. Honders. 1996. Clean - up of Contaminated Sites: Experiences in the Netherlands. *Water Science Technology*. Vol. 34(7 - 8): 293 - 301.
- 66) Sanders, F. P. 1995. Calculation of Soil cleanup criteria for Volatile Organic Compounds as Controlled by the Soil to Groundwater Pathway: Comparison of four Unsaturated Soil Zone Leaching Models. *Journal of Soil Contamination*. Vol. 4(1): 1-24.
- 67) Saval, B. S. 1995. Acciones para la Remedación de Suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- 68) Saval, B. S. 1995. Remedación y Restauración. PEMEX Ambiente y Energía Los retos del futuro. Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM-PEMEX. Pp:151-189. México.
- 69) Secretaría de Gobernación y Gobierno del Estado de Hidalgo. 1988. Los Municipios de Hidalgo. Colección Enciclopédica de los Municipios de México. México.
- 70) SEP. 1992. Manual de Suelo y Fertilización. Trillas. México.
- 71) Swedish Environmental Protection Agency. 1991. Strategy for Volatile Organic Compounds (VOC) Emissions, Effects, Control measures. Report 3897.
- 72) Steinberg, M. S. 1992. Persistence of Several Volatile Aromatic and Halogenated Hydrocarbons in a Low Organic Carbon Calcareous Soil. *Chemosphere*. Vol. 24(9): 1301-1315.
- 73) 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*. Vol. 3 (3): 249-264.
- 74) Storch, G. A. J. 1975. Fundamentos de la Cromatografía de Gases. Segunda Edición. Alhambra. España.
- 75) Testa, M. S. 1994. Geological Aspects of Hazardous Waste Management. Lewis Publishers. USA.
- 76) Thamane, R. V.; D. P. Motiramani & Y. P. Bali. 1978. Suelos; su Química y Fertilidad en Zonas Tropicales. Diana. México.
- 77) Thompson, L. M. & F. R. Troch. 1982. Los Suelos y su Fertilidad. Cuarta edición. Reverte. España.
- 78) Tölgyessy, J. 1993. Chemistry and biology of Water, Air and Soil Environmental Aspects. Elsevier. Czechoslovakia.
- 79) Tsair- Fuh L.; J. C. Little & W. W. Nazaroff. 1994. transport and Sorption of Volatile Organic Compounds and Water Vapor within Dry Soil Grains. *Environmental Science & Technology*. Vol. 28(2): 322-330.
- 80) Viejo, Z. M. 1995. El Paquete Ecológico de PEMEX. Internalización de Costos Ambientales. Programa Universitario de Energía. México.
- 81) Wood, H. J.; C. W. Keenan & W. E. Bull. 1974. Química General. Harla. México.

- 82) Yong, R. N.; A. M. O. Mohamed & B. P. Warkentin. 1992 Principles of Contaminant transport in Soils. Elsevier Science Publishers. Netherlands.
- 83) Zhou, E. & R. Crawford. 1995. Effectes of oxygen, nitrogen and temperature on gasoline biodegradation in soil. Biodegradation. Vol. 6: 127-140.

12. ANEXOS

ANEXO 1 ASPECTOS DE LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL.

Dentro de la Legislación Ambiental se tiene a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, seis leyes de carácter reglamentario, normas oficiales mexicanas y acuerdos para el control de la contaminación del agua y de la atmósfera. Asimismo, se tienen normas para el control de recursos naturales y de residuos peligrosos, de la calidad de agua, de observancia específica en sistemas ecológicos. Adicionalmente se tienen dos listados de sustancias y actividades altamente peligrosas (Quintanilla & Bauer, 1995).

En el aspecto reglamentario se tienen los siguientes:

- a) Reglamento en materia de impacto ambiental.
- b) Reglamento para el control de la contaminación de la atmósfera.
- c) Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.
- d) Reglamento para la protección al ambiente por la emisión de ruido.
- e) Reglamento en materia de residuos peligrosos.
- f) Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos.

En cuanto a las normas ecológicas se han emitido 79 a la fecha. El análisis efectuado conduce a concluir que 34 de ellas tiene un impacto directo sobre las actividades de PEMEX. Aún cuando muchas de las normas restantes se aplican a actividades industriales, de transporte y otras, se debe tener en cuenta que estas normas afectan de manera indirecta a PEMEX, a través de los productos y calidad de los mismos que la industria petrolera aporta. Clasificadas por áreas, las normas que se consideró afectaban las actividades de PEMEX son las siguientes:

Descargas de aguas residuales: NOM-001-ECOL-1996
 NOM-031-ECOL-1993

Emisiones a la atmósfera:

NOM-034-ECOL-1993	NOM-039-ECOL-1993	NOM-086-ECOL-1994
NOM-035-ECOL-1993	NOM-043-ECOL-1993	NTE-CCAT-005/88
NOM-036-ECOL-1993	NOM-046-ECOL-1993	NTE-CCAT-007/88
NOM-037-ECOL-1993	NOM-051-ECOL-1993	NTE-CCAT-008/88
NOM-038-ECOL-1993	NOM-085-ECOL-1994	NOM-CCAT-019-ECOL/1993

Residuos peligrosos: NOM-052-ECOL-1993 NOM-058-ECOL-1993
 NOM-053-ECOL-1993 NOM-054-ECOL-1993
 NOM-055-ECOL-1993 NOM-056-ECOL-1993
 NOM-057-ECOL-1993

Ruido: NOM-081-ECOL-1994

De observancia específica: CE-OESE-002/88 CCAT-FF-001-A
CE-OESE-003/89 CCAT-FF-002
CCAT-FF-001

Acuerdos: NOM-PA-CCAT-019/93 NOM-PA-CCAT-023/93
NOM-PA-CCAT-022/93

ANEXO 2 COMPORTAMIENTO DE LOS HIDROCARBUROS.

Cuadro 1. Promedio de vida de algunos compuestos orgánicos en suelo

Químico	Solubilidad al agua (mg/l)	Vida Media en el Suelo (días)
Acetona	Miscible	7
Benceno	1,780	16
Bromoformo	3,033	180
Tetracloruro de carbono	1,160	360
Clorobenceno	500	150
Cloroformo	7,900	180
Clorometano	5,350	28
1,2-Diclorobenceno	145	180
1,3-Diclorobenceno	123	180
1,4-Diclorobenceno	80	180
1,1-Dicloetano	5,100	154
1,2-Dicloroetano	8,700	180
1,1-Dicloroetano	400	180
1,2-Dicloroetano (trans)	6,300	180
1,2-Dicloroetano (cis)	3,500	180
Etilbenceno	167	10
Cloruro de metileno	19,400	28
1,1,1,2-Tetracloroetano	1,100	66
1,1,2,2-Tetracloroetano	3,000	44
Tetracloroetano	180	360
Tolueno	522	22
1,1,1-Tricloroetano	720	273
1,1,2-Tricloroetano	4,420	365
Tricloroetano (TCE)	1,100	360
o-Xileno	186	28
m-Xileno	162	28
p-Xileno	179	28

Tomado de Sanders, 1995.

Cuadro 2. Capacidad de absorción, volatilización y solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas.

Compuestos de las gasolinas	Absorción por el suelo (%)	Volatilización (%)	Solubilidad (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a) Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	100	0	0
Naftaleno	61	8	31
Fenantreno	88	2	10
1-Pentano	0.1	99.8	0.1
Fenol	9	0.01	91
Tolueno	3	77	20
Xileno	15	54	31

Tomado de Preslo, Miller, Suyama, McLearn, Kosteci & Fleischer, 1989

IMPACTO DE HIDROCARBUROS EN SUELO EN LA POBLACIÓN MICROBIANA

Cuadro 3. Nivel de Dosis Crítico del Suelo (NDCS) para Cuatro Disolventes Alifáticos

Solvente Alifático	Presión de mm H ₂ O 25°C	Vapor psi 80°F	NDCS (ppm)	Tiempo para la Recuperación de la Población Microbiana (Días)
Heptano	---	0.9	10,000	24 - 63
Ciclohexano	99	2.0	840	< 38
Hexano	144	3.3	430	< 20
Pentano	509	---	7,200	30 - 53

Tomado de EPA, 1983.

Cuadro 4. Solubilidad de Hidrocarburos y Derivados

Grupo de Hidrocarburo	Hidrocarburo Representativo	Solubilidad en agua (mg/l)
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
Monoaromaticos		
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

ANEXO 3. LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN SUELO Y AGUA.

En nuestro país no existen normas por lo que se ha recurrido a referencias establecidos por la EPA en los Estados Unidos, donde los gobiernos estatales han creado sus propios límites permisibles, es decir, no existe un listado único de normas, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. Para un mismo parámetro existe una gran discrepancia como se muestra en el siguiente cuadro.

Estado	Tipo de Contaminante	Parámetro Indicador	Límite Permisible (nivel de limpieza)		Método Analítico	
			Suelo (mg/kg)	Agua subterránea (µg/l)	Suelo	Agua subterránea
Alabama	Gasolina	benceno		5		EPA 602.624
		tolueno		1000		EPA 602.624
		etilbenceno		700		EPA 602.624
		xilenos		10,000		EPA 602.624
	Gasolina diesel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071 EPA 418.1	
Arizona	Gasolina	HTP		1		EPA 418.1
		benceno	0.13	5	EPA 8020	EPA 502.2
		tolueno	200	1000	EPA 8020	EPA 502.2
		etilbenceno	68	700	EPA 8020	EPA 502.2
		xilenos	44	10,000	EPA 8020	EPA 502.2
Arkansas	Gasolina diesel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
		BTEX	0-400		EPA 8020	
California	Gasolina	benceno	0.3-1		EPA 8020	
		tolueno	0.3-50		EPA 8020	
		etilbenceno	1-50		EPA 8020	
		xilenos	1-50		EPA 8020	
Delaware	Gasolina diesel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
		BTEX	10		EPA 3010+ 8020	
Florida	Gasolina	benceno		1		EPA 602
		BTEX		50		EPA 602
		diesel	naftalenos	100		EPA 610
Idaho	Gasolina	benceno		5		EPA 8020
		tolueno		1000		EPA 8020
		etilbenceno		700		EPA 8020
		xilenos		10,000		EPA 8020
	diesel	HTP	40-200		EPA 9015	
HTP		100-2000		EPA 8015		
HTP		100		EPA 418.1		

Continuación del Anexo 3.

Georgia	Gasolina	benceno		5-71		EPA 8020
		tolueno		1000-200,000		EPA 8020
		etilbenceno		700-28,718		EPA 8020
		xilenos		10,000		EPA 8020
		BTEX	20-100			EPA 8020
	Gasolina diesel aceite gastado diesel	HTP	100-500			California M
		benzopireno		0.03-0.2		EPA 650 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	benceno	1.4	5		EPA 602.2
		tolueno				EPA 602.2
		etilbenceno				EPA 602.2
		xilenos		440		EPA 202.2
	Gasolina diesel aceite gastado diesel	HTP	100			
		naftaleno		143		
Kentucky	Gasolina	BTEX(c/u)	1	5	EPA 8240	EPA 8240
Louisiana	Gasolina	BTEX	100		EPA 8020	
Michigan	Gasolina	benceno	24	1	EPA 8020	EPA 8020
		tolueno	16,000	790	EPA 8020	EPA 8020
		etilbenceno	1500	74	EPA 8020	EPA 8020
		xilenos	5600	280	EPA 8020	EPA 8020
Missouri	Gasolina	HTP	50-500	5-10	EPA 418.M	EPA 418.1
Montana	Gasolina diesel	HTP	100			
Nebraska	Gasolina diesel	benceno	0.005-50	5	EPA 8021	EPA 8021
		BTEX	1-10,000		EPA 8021	
Nevada	Gasolina diesel	HTP	100		EPA 8015	
New Jersey	Gasolina	benceno	3-13	0.2	EPA SW 846	EPA SW 846
		tolueno	1000	1000	EPA SW 846	EPA SW 846
		etilbenceno	1000	700	EPA SW 846	EPA SW 846
		xileno	110-1000	40	EPA SW 846	EPA SW 846
		antraceno	10,000	2000	EPA SW 846	EPA SW 846
		naftaleno	230-240		EPA SW 846	EPA SW 846

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

ANEXO 4. COMPOSICIÓN DE LAS GASOLINAS ACTUALES EN MÉXICO Y EN ESTADOS UNIDOS.

En 1986 para el mejoramiento de su calidad y buscando disminuir la contaminación ambiental aparece la Nova Plus y Extra Plus, en la primera una reducción de TEP de 3.5 ml a un rango de 0.5 a 1 ml para el área metropolitana y en la segunda una disminución en el contenido de plomo de 0.1 a 0.05 g/gal máximo. Para 1998 dejará de existir la gasolina NOVA para utilizar únicamente MAGNA y PREMIUM en la zona metropolitana.

A partir de la última temporada invernal del año 1990 distribuyeron gasolinas oxigenadas mediante una mezcla de MTBE (metil terbutil éter) que mejora la combustión en los automotores a la altura de la Ciudad de México, logrando disminuir la emisión de hidrocarburos no quemados en 38,000 T/año y monóxido de carbono.

A partir de septiembre de 1990, PEMEX dispuso de una nueva gasolina sin plomo al mercado denominada Magna Sin, destinada a vehículos modelo 1991 equipados con convertidor catalítico con lo que disminuirá la emisión de gases tóxicos, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados que se envían a la atmósfera. Esta gasolina es equivalente a la gasolina de Estados Unidos con el nombre de "Regular Unleaded" de 87 octanos, con otras características siguientes:

- * 0.01 g de plomo por galón como máximo
- * De 7 a 9.5 libras de presión de vapor Reid
- * Índice de octano (RON + MON)/ 2 de 87
- * Color verde, contiene un aditivo dispersante de la segunda generación capaz de evitar depósitos en los carburadores y válvulas de admisión.
- * Calidad certificada en cada tanque preparado.

Tipos de Gasolinas en México

Nombre	Vigencia	ml TEP/GAL	RON
Nova	73/86	3.5	81
Nova Plus	86/90	0.5/0.1 g Pb/Gal	81
Extra	73/86	0.1	92
Magna Sin	90/	0.01	82
Premium	96/	---	---

Tomado de Carreno, 1991.

Composición de la gasolina regular de los Estados Unidos.
Cuadro 1. Composición y propiedades de la Gasolina Regular Fresca.

Nombre	P.M.	P.V.	F. M.	P. E.	S.	K _{ow}	D.
Propano	44.1	8.50	0.0001	-42	62	0.0460	0.5005
Isobutano	58.1	2.93	0.0122	-12	49	0.5490	0.5490
n-Butano	58.1	2.11	0.0629	-1	61	0.5960	0.5788
Trans-2-Buteno	56.1	1.97	0.0007	1	430	0.1265	0.6042
3-Metil-1-buteno	70.1	0.96	0.0006	21	130	0.4460	0.6272
Isopentano	72.2	0.78	0.1049	28	48	1.1731	0.6200
n-Pentano	72.2	0.57	0.0586	36	40	1.5819	0.6262
2-Metil-2-buteno	70.1	0.51	0.0044	38	155	0.3308	0.6023
3,3-Dimetil-1-buteno	84.2	0.47	0.0049	41	23	0.8505	0.6529
2,3-Dimetilbutano	86.2	0.26	0.0730	57	20	3.0152	0.6616
2-Metilpentano	86.2	0.21	0.0283	60	14	4.0679	0.6532
n-Hexano	86.2	0.16	0.0283	69	13	5.4873	0.6603
2,2-Dimetilpentano	100.2	0.11	0.0128	79	4.4	10.4580	0.6739
Benceno	78.1	0.10	0.0076	80	1780	0.0850	0.8765
2,3-Dimetilpentano	100.2	0.072	0.0390	90	5.3	10.4580	0.6951
2,2,4-Trimetilpentano	114.2	0.051	0.0121	99	2.2	26.8745	0.6919
n-Heptano	100.2	0.046	0.0063	98	3	18.9000	0.6837
2,2-Dimetilhexano	114.2	0.035	0.0055	107	1.5	36.2527	0.6953
Tolueno	92.1	0.029	0.0550	111	615	0.3087	0.6670
2,3,4-Trimetilpentano	114.2	0.028	0.0121	114	1.8	26.8745	0.7191
2-Metilheptano	114.2	0.021	0.0155	116	0.9	48.9038	0.6980
n-Octano	114.2	0.014	0.0013	126	0.7	65.9610	0.7025
2,4,4-Trimetilhexano	128.3	0.013	0.0087	131	1.4	93.1839	0.7072
p-Xileno	106.2	0.0086	0.0957	138	198	0.8902	0.6610
3,3,4-Trimetilhexano	128.3	0.0073	0.0281	140	1.4	93.1839	0.7072
2,2,4-Trimetilheptano	142.3	0.013	0.0087	131	0.8	245.07	0.7300
n-Propilbenceno	120.2	0.0033	0.0841	159	60	3.0152	0.6610
1,3,5-Trimetilbenceno	120.2	0.0024	0.0411	165	73	8.1163	0.7072
1,2,4-Trimetilbenceno	120.2	0.0019	0.0213	169	57	8.1163	0.8759
Metilpropilbenceno	134.2	0.0010	0.0351	182	6.8	21.3469	0.6610
Dimetiletilbenceno	134.2	0.0007	0.0307	190	21	28.1403	0.8745
1,2,4,5-Tetra-metilbenceno	134.2	0.00046	0.0133	196	3.5	8.1163	0.6500
1,2,3,4-Tetrametilbenceno	134.2	0.00033	0.0128	205	21	8.1163	0.9052
1,2,4-Trimetil-5-etilbenceno	148.2	0.00029	0.0405	210	7	126.52	1.0000
n-Dodecano	170.3	0.00040	0.0230	216	0.004	9450.00	0.7487
Naftaleno	128.2	0.00014	0.0045	218	33	1.0949	1.0263
Metilnaftaleno	142.2	0.000054	0.0023	241	27	5.0041	1.0056

Nota: P.M. peso molecular (g); P. V. presión de vapor a 20°C (atm); F. M. fracción de masa; P. E. punto de ebullición (°C); S. solubilidad en agua a 20°C (mg/l); K_{ow} coeficiente de partición orgánica (m³/Kg); D. densidad (g/cm³) a 20°C. Tomado de Krishnappa, Williams, Agar & O'Connor, 1994.

ANEXO 6, ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REMEDIACION DE SUELOS.

El desarrollo de tecnologías se inicio en los países más industrializados hace 10 años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados como peligrosos en concentraciones que sobrepasan los límites permitidos.

Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de los países desarrollados establecieron como una actividad prioritaria, la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos. Existen en el mercado mundial, diversas tecnologías para remediación que ya se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas las tecnologías son aplicables a todos los casos. Para estar seguro de esto se deben realizar estudios de tratabilidad a nivel laboratorio y de ser posible pruebas en campo (Saval, 1995).

Las tres principales tipos de remoción de contaminantes son: Remoción física, seguida por la concentración de contaminantes; Biodegradación y Destrucción termal/química (Rulkens & Honders, 1996). Una técnica de limpieza no siempre se basa en un sólo principio, frecuentemente más de uno es involucrado en un proceso de tratamiento.

Las tecnologías in situ ó ex situ, generalmente las tecnologías in situ se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar el bulbo de contaminación se extienda en todo el acuífero. Las tecnologías ex situ se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la aporte superficial del suelo o bien en la zona no saturada hasta donde la maquinaria pesada permita la extracción del material (Saval, 1995).

A continuación se analiza, de manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación en sitios contaminados con hidrocarburos.

1. Biorremediación

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es la base de las tecnologías de biorremediación, que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solo se transfieren de lugar (Saval, 1995).

Tecnología	Base de funcionamiento
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Bioaumentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad para degradar los contaminantes.
Bioventeo	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular y se revuelve periódicamente.

En general, las ventajas de las tecnologías de biorremediación son:

- los contaminantes son realmente transformados y algunos completamente biodegradados;
- se utilizan bacterias cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir otras potencialmente peligrosas;
- es una tecnología segura y económica;
- el suelo puede ser reutilizado;
- las bacterias mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan.

Entre las desventajas de la biorremediación están:

- que las bacterias pueden inhibirse por la presencia de tóxicos o altas concentraciones de contaminantes;
- el proceso no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad;
- algunos aditivos como los surfactantes pueden tener efecto adverso en aplicaciones in situ;
- requiere largos periodos de tiempo;
- no es aplicable en sitios con muy altas concentraciones de hidrocarburos altamente halogenados, metales y desechos radioactivos.

Para los procesos ex situ se prefiere utilizar aditivos con actividad de superficie conocidos como surfactantes, su función es favorecer la solubilidad de los hidrocarburos del petróleo y hacerlos más susceptibles de ser degradados por los microorganismos. Estos pueden ser de origen sintético o biológico siendo este de mayor preferencia debido a la susceptibilidad a la biodegradación (Saval, 1995).

Para la realización de este proceso requiere de una optimización de los parámetros para dar las condiciones necesarias de la degradación que son, la temperatura, humedad del suelo, pH, potencial redox, concentración de oxígeno, tipo de electrón aceptor, presencia de organismos deseables y la biodisponibilidad del contaminante para los microorganismos (Rulkens & Honders, 1996).

Puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas, la degradación de hidrocarburos clorados, frecuentemente es una combinación de etapas de tratamiento anaeróbico y aeróbico requerido para una completa mineralización de los contaminantes. Los costos de tratamiento para los países bajos es estimado a 30 - 60 US \$/ T (Rulkens & Monders, 1996).

2. Arrastre por Aire.

Se aplica a contaminantes volátiles presentes en el agua subterránea. El aire se inyecta a profundidad y la recuperación de los contaminantes se realiza en una torre empacada o en un tanque de aereación y requiere acoplarse a otro tipo de proceso para recuperar o destruir los contaminantes retirados del sitio. Esta tecnología es muy empleada por su efectividad y tiene la ventaja de tener un bajo costo de operación (Saval, 1995). Las desventajas son:

- uso limitado a compuestos volátiles;
- generación de ruido;
- los contaminantes no se destruyen por lo que requiere acoplarse a otro tipo de tecnologías.

3. Extracción al Vacío.

Se aplica solamente para la extracción de compuestos volátiles, por lo que no es una opción recomendable para la remediación de suelos contaminados con petróleo, pero si es atractiva para manchas superficiales de gasolinas. Sobre la zona afectada se colocan cubiertas que permiten captar los gases extraídos. Requiere ser acoplado a otro para eliminar los contaminantes o bien recuperarlos y reciclarlos (Saval, 1995).

4. Solidificación/estabilización

Estas son empleadas para la inmovilización de contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados, como es el caso de los compuestos inorgánicos (Saval, 1995).

En la solidificación se refiere a las mezclas de suelo y cemento y se han empleado para mejorar la capacidad de soporte de carga de un terreno, no son recomendables para suelos con un alto contenido de grasas y aceites ni a suelos contaminados por hidrocarburos. En la estabilización se emplean productos químicos inertes que microencapsulan a los compuestos contaminantes, el suelo contaminado debe mezclarse perfectamente para lograr que los contaminantes

queden retenidos permanentemente, el material resultante puede emplearse con tierra no contaminada para permitir el desarrollo de especies vegetales. Un aspecto que debe cuidarse es la composición química de los aditivos empleados los cuales pueden representar algunos riesgos a la salud a concentraciones elevadas. Es aplicable al propio sitio y requerir de tiempos cortos de tratamiento, aunque se emplean solamente para manchas de contaminación superficiales (Saval, 1995).

5. Lavado de Suelo.

Para procesos ex situ. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos, puede permitir la recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto el solvente como los hidrocarburos pueden reciclarse pero implica un gasto importante de solventes, un costo de separación y un alto riesgo de explosión (Saval, 1995).

6. Desorción térmica.

Proceso ex situ, el suelo se introduce en un tornillo sin fin y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera similar a una destilación. Tiene un menor costo que la incineración, el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante y tiene la ventaja de que el suelo puede ser reutilizado. No es recomendable para suelos contaminados con petróleo ya que conforme se va aumentando la temperatura el manejo se hace más difícil y no se logran a recuperar los contaminantes (Saval, 1995).

La descontaminación generalmente se comprende varias etapas de tratamiento, lo primero es intentar a evaporar los contaminantes del suelo, esto ocurre a temperaturas entre 150 y 650°C, donde las sustancias del suelo pueden ser destruidas y volatilizadas. Este tratamiento es rentable para remover todo tipo de contaminantes y puede ser aplicado a todo tipo de suelos. El costo del tratamiento comercial es de un intervalo de 50 - 80 US \$/ T (Rulkens & Honders, 1996).

7. Arrastre de Vapor.

Se basa de manera semejante al arrastre con aire, la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desorberse del suelo son los que se recuperan, pueden reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso para que puedan ser destruidos. No es recomendable para suelos contaminados con petróleo (Saval, 1995).

La extracción de vapor puede ser aplicada para compuestos orgánicos volátiles tales como petrol, tricloroetileno, percloroetileno, benceno, tolueno, xileno, y etilbenceno. Puede ser aplicado solo a suelos arenosos, debido que los suelos arcillosos son insuficientemente permeables; sus costos para los países bajos se hallan por debajo de 50 - 80 US \$/T (Rulkens & Honders, 1996).

8. Incineración.

Es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva para suelos con altas concentraciones de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándose a bióxido de carbono el cual se descarga a la atmósfera, generando además altas concentraciones de partículas suspendidas. El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles (basados en normas extranjeras). Cuando esto sucede debe enviarse a confinamiento. Esto implica un alto costo, que esta influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento (Saval, 1995).

9. Confinamiento.

No es una opción de remediación, se recomienda para residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acopladas a otros procesos como la incineración. Debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el de transporte al sitio de confinamiento. En México no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras opciones antes de pensar en el confinamiento (Saval, 1995).

10. Vitrificación.

Consiste en introducir electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una alta carga eléctrica para lograr la vitrificación de los contaminantes. Solo opera en la zona no saturada, es más costosa que la incineración.

De lo anterior las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo son la biorremediación, algunas técnicas de estabilización y la incineración. Para asegurar cual es la más idónea, es indispensable realizar pruebas preliminares de tratabilidad en laboratorio, donde deben simularse las condiciones que prevalecen en campo, lo más recomendable es realizar pruebas de demostración en campo a escala piloto, sin embargo tiene un alto costo por lo que muchas empresas prefieren no hacerlo (Saval, 1995).