



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA
CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR
DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

M A E S T R O E N I N G E N I E R Í A

Ingeniería Ambiental

P R E S E N T A

Ing. Lilita Marrufo Vázquez

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Ana Elisa Silva Martínez

2007



JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Aguilar Márquez Armando

Secretario: M.I. Silva Martínez Ana Elisa

Vocal: M. en C. García Gómez Rolando Salvador

1er. Suplente: Dra. Cram Heydrich Silke

2do. Suplente: Dra. Iturbe Argüelles Rosario

Lugar o lugares donde se realizo la tesis

Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS

M.I. Ana Elisa Silva Martínez

AGRADECIMIENTOS

Sorprendernos por algo es el primer paso de la mente hacia el descubrimiento
Louis Pasteur

Cada texto es único y, simultáneamente, es la traducción de otro texto. Ningún texto es enteramente original porque el lenguaje mismo, en su esencia, es ya una traducción: primero, del mundo no-verbal y, después, porque cada signo y cada frase es la traducción de otro signo y de otra frase. Pero ese razonamiento puede invertirse sin perder validez: todos los textos son originales porque cada traducción es distinta. Cada traducción es, hasta cierto punto, una invención y así constituye un texto único.

Octavio Paz

(Extraído de **N. de T.**, sitio de, por y para traductores)

Quiero agradecer a mis padres Teresa Vázquez Santos y José Dolores Marrufo Ortiz y a mí hermana Flor Patricia Marrufo Vázquez por siempre apoyarme en mis proyectos y sueños, por siempre estar ahí cuando más los he necesitado pero sobretodo por siempre darme amor. A mí esposo Jesús Sergio Rivera Cruz por siempre estar conmigo en las buenas y en las malas, por ayudarme a realizar este proyecto tan importante, pero además por darme su amor y apoyo incondicional.

Le agradezco a la M.I. Ana Elisa Silva Martínez por a haberme aceptado en su equipo de trabajo y apoyado a realizar esta tesis, la cual me ha llenado de satisfacciones. También a todo mi jurado por darme todo su apoyo y comentarios para mejorar este proyecto.

En el transcurso del tiempo, he encontrado personas importantes que me han enseñado a mejorar tanto en lo personal como en lo profesional, es por ello que quiero darles las gracias a la Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández de la cual he recibido un apoyo y ayuda incondicional para llevar acabo la terminación de esta tesis, a mis amigos que siempre han estado ahí para darme ánimos.

A CONACYT por apoyarme a realizar esta maestría, ya que sin su apoyo hubiera sido difícil haberla concluido.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Justificación.....	8
1.2 Objetivo General	10
1.2.1 Objetivos Particulares.....	10
1.3 Meta	10
1.4 Estructura de la tesis.....	11
1.5 Alcances y limitaciones	12
2 PROBLEMÁTICA	14
2.1 Derrames de hidrocarburos en el ambiente	14
2.1.1 Características del petróleo.....	14
2.2 Antecedentes del petróleo y derrames	17
2.3 Nacionales	20
2.3.1 Atlas de riesgo nacional para la industria del petróleo.....	29
2.4 Legislación	31
2.4.1 Internacional	31
2.4.2 Nacional.....	33
2.4.2.1 Constitución	33
2.4.2.2 La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) ...	34
2.4.2.3 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligroso (LEEGEPA-RP).	35
2.4.2.4 Normas Oficiales Mexicanas (NOM).....	36
2.5 Métodos de caracterización de suelos contaminados.....	39
3 PERCEPCIÓN REMOTA.....	43
3.1 Introducción a la percepción remota.....	43
3.2 Principios físicos de la percepción remota	45
3.2.1 Leyes de la radiación electromagnética	47
3.2.2 Espectro electromagnético	50
3.3 Sensores	51
3.3.1 Plataformas de percepción remota.....	53
3.4 Tipos de imágenes	54
3.5 Tipo de clasificaciones.....	58

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.

3.6 Aplicaciones de la percepción remota para identificar derrames	59
3.6.1 Sitios contaminados con petróleo.....	60
4 MODELOS DE MIGRACIÓN EN SUBSUELO	63
4.1 Factores de influencia	66
4.2 Transporte de contaminantes.....	70
4.2.1 Modelo para la evaluación de derrames de hidrocarburos (HSSM)	76
4.3 Aplicación.....	79
5 METODOLOGÍA.....	80
5.1 Percepción remota	82
5.2 Modelo de migración HSSM en la zona no saturada	85
5.2.1 Implementación del Sistema de Información Geográfica (SIG)	86
6 CASO DE ESTUDIO.....	89
6.1 Características Geográficas.....	89
6.2 Impacto ambiental en la exrefinería	97
7 RESULTADOS	99
7.1 Aplicación de las técnicas de percepción remota para la identificación de zonas impactadas por hidrocarburos.	99
7.1.1 Refinería Lázaro Cárdenas	100
7.1.2 Refinería Francisco I. Madero	106
7.1.3 Exrefinería 18 de Marzo	107
7.2 Determinación de la profundidad en la migración del hidrocarburo.....	109
7.3 Determinación de la extensión y volumen.....	115
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	117
8.1 Conclusiones	118
8.2 Recomendaciones	119
ANEXO	
REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación API de los hidrocarburos	15
Tabla 2 Características del petróleo	16
Tabla 3 Derrames Internacionales.....	19
Tabla 4 Principales emergencias o accidentes a nivel nacional	23
Tabla 5. Número de Eventos ocurridos en los Estados.....	29
Tabla 6 Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante ...	37
Tabla 7 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.....	38
Tabla 8 Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en el suelo	38
Tabla 9 Mínimos de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada	39
Tabla 10 Tipo de imágenes multispectrales y número de bandas	56
Tabla 11 Tipos de imágenes multispectrales y el rango del infrarrojo	57
Tabla 12 Usos de Suelo.....	69
Tabla 13 Características de las imágenes.....	83
Tabla 14 Climas presentes la Delegación.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Producción mundial de petróleo en 2005	17
Figura 2 Consumo mundial de petróleo en 2004	18
Figura 3 Consumo de México en 2003 - 2006.....	21
Figura 4 Emergencias ambientales por sustancias peligrosas.....	22
Figura 5 Pozo Ixtoc, Campeche	22
Figura 6 Derrame de petróleo crudo en Acatzingo, Puebla	25
Figura 7. Incendio en la refinería “Miguel Hidalgo” de Pemex, Tula HGO.	26
Figura 8 Accidentes ocurridos en el período de 1997 – 2001.....	27
Figura 9. a) Número de eventos por transporte b) Emergencias ambientales en el período 1997 -2001.	28
Figura 10. Atlas de riesgo nacional de la industria petrolera.....	30
Figura 11 Esquema de una onda electromagnética	46
Figura 12 Curvas de radiación de un cuerpo negro basada en la Ley de Stefan - Boltzmann	48
Figura 13 Curva de Emitancia Solar	49
Figura 14 Espectro Electromagnético aplicado en percepción remota	50
Figura 15 Imagen tomada por un sensor Landsat 7 ETM+ en la refinería Francisco I. Madero en Tamaulipas.....	52
Figura 16 Espectro del hidrocarburo.....	60
Figura 17 Principales procesos que influyen en el transporte de un contaminante en el subsuelo.....	71
Figura 18 Ubicación geográfica de la delegación Atzacapotzalco	90
Figura 19 Exrefinería 18 de marzo, Azcapotzalco.....	91
Figura 20 Distribución climatológica de la delegación Aztcapotzalco.....	93
Figura 21 Fisiografía de la Delegación Azcapotzalco	94

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

Figura 22 Geología de la delegación Azcapotzalco	95
Figura 23 Hidrología de la delegación Azcapotzalco	96
Figura 24 Vegetación de la delegación Azcapotzalco	96
Figura 25 Exrefinería 18 de Marzo	98
Figura 26 Ubicación de la refinería Lázaro Cárdenas.....	100
Figura 27 Algoritmo A aplicado a la refinería Lázaro Cárdenas	101
Figura 28 Algoritmo B aplicado a la refinería Lázaro Cárdenas	102
Figura 29 Refinería Lázaro Cárdenas, algoritmo C discriminación de cuerpos de agua y coberturas de vegetación.	103
Figura 30 Puntos de Muestreo.....	104
Figura 31 Isolíneas de Concentración de TPH.....	105
Figura 32 Refinería Francisco I. Madero, Tampico Tamaulipas	106
Figura 33 Refinería Francisco I. Madero, Algoritmo A.....	107
Figura 34 Exrefinería 18 de Marzo, Azcapotzalco	108
Figura 35 Cuadro de Datos Generales del Modelo HSSM	110
Figura 36 Cuadro de parámetros hidráulicos del modelo HSSM	111
Figura 37 Cuadro de las Características del Hidrocarburo	112
Figura 38 Parámetros de Control de Simulación para el Modelo HSSM	113
Figura 39 Profundidad del hidrocarburo en el subsuelo	114
Figura 40 Polígonos de la zona contaminada por hidrocarburos en la ex refinería 18 de Marzo	115

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Uno de los principales problemas de degradación al ambiente, es la contaminación de los sistemas suelo, vegetación y agua (superficial y subterránea) por derrames de hidrocarburos. Estos impactos han ocasionado severos daños a los sistemas y a la sociedad por sus repercusiones directas a la salud y a la economía. Hoy en día, es posible observar todos los desastres ecológicos que se han provocado a baja y alta escala, como resultado de la explotación, producción y transporte del recurso en todo el mundo.

Debido a la gran demanda del petróleo, se han perforado pozos en sitios no accesibles; esto ha generado que durante la presencia de derrames, la identificación de la extensión afectada sea difícil de establecer rápidamente.

Por ello, previo a los trabajos de limpieza y rehabilitación de un suelo contaminado por hidrocarburos, es necesario conocer la magnitud real de los derrames petroleros. Esta actividad ha sido normada por la Norma Oficial Mexicana (NOM) 138-SEMARNAT/2003, la cual establece la metodología para caracterizar un derrame. Por otro lado, la identificación de la extensión real de un derrame demanda tiempo y costos, los cuales llegan a ser considerables por lo que se recomienda un trabajo preciso. La metodología establecida en la NOM-138-SEMARNAT/2003 implica la aplicación de los siguientes pasos:

- a) Descripción del sitio y de la afectación
- b) Estrategia de muestreo
- c) Plan de muestreo
- d) Informe

Estos pasos implican un costo, el cual se relaciona principalmente al tiempo que se debe invertir en planear y efectuar los muestreos que caractericen al sitio afectado,

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

para lo cual se requieren de varias brigadas que cuenten con equipo y personal capacitado. Una alternativa para abatir estos costos es el uso de la percepción remota, la cual permite identificar espacialmente el sitio afectado por un derrame, así como la extensión real de este.

En vista de la importancia al identificar no solo el derrame sino su extensión y efectos a los ecosistemas y las ventajas que ofrecen técnicas como la percepción remota y la modelación de migración de contaminantes en el subsuelo, esta tesis desarrolla una metodología que incorpora las técnicas de percepción remota para la identificación de la zona contaminada por hidrocarburos a través de la combinación de bandas espectrales (algoritmos) y un modelo de migración (Modelo de Evaluación de Derrames de Hidrocarburos (*HSSM* por sus siglas en inglés, EPA 1997), que utiliza las características del suelo y del hidrocarburo, para conocer el movimiento del contaminante en el subsuelo en un tiempo y por consiguiente la profundidad, lo cual ayuda a definir el tiempo y el tipo de técnica de remediación requerida. La información obtenida por las técnicas de percepción remota empleando imágenes de satélite georeferenciadas y el modelo de migración, se incorporaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual ofrece un análisis de la información generada (series de datos, imágenes) y permite plasmarla en mapas. Tal fue el caso de la cuantificación del área y volumen de la zona impactada a través de las operaciones matemáticas realizadas en el SIG.

De acuerdo con el marco de la NOM-138-SEMARNAT/2003 (ver Anexo A), la metodología propuesta resultará una acción rápida para la detección de derrames o fugas, de tal manera que se logre un predimensionamiento de la afectación, con la finalidad de simplificar y acelerar la intervención pronta, minimizando los daños tanto al ambiente como a la salud y reduciendo costos de caracterización y muestreo del sitio.

1.2 Objetivo General

Determinar la extensión y el volumen de un sitio contaminado por hidrocarburos aplicando una metodología con técnicas de percepción remota y modelos de migración de hidrocarburos e integrando la información generada en un sistema de información geográfica (SIG).

1.2.1 Objetivos Particulares

1. Aplicar técnicas de percepción remota en imágenes de satélite para identificar zonas impactadas por hidrocarburos, así como su extensión.
2. Establecimiento del algoritmo para determinar sitios contaminados por hidrocarburos.
3. Implementar el algoritmo en las refinerías Lázaro Cárdenas con predominancia en suelo desnudo, Francisco I. Madero con una combinación de suelo desnudo y cemento y Azcapotzalco con cemento.
4. Emplear un modelo de migración para conocer como el hidrocarburo es transportado al subsuelo, así como su profundidad, particularmente en la zona no saturada.
5. Integrar la información generada en los puntos 1 y 2 a un Sistema de Información Geográfica (SIG).
6. Cuantificar área y volumen del sitio impactado por el contaminante en la zona.

1.3 Meta

Contar con una metodología rápida, eficaz y económica que permita cuantificar la extensión y el volumen de un sitio contaminado por hidrocarburos (crudo), con la finalidad de simplificar y acelerar la intervención pronta, minimizando los daños tanto al ambiente como a la salud y reduciendo costos de caracterización y muestreo en el sitio.

1.4 Estructura de la tesis

El Capítulo 2 define al hidrocarburo y las causas que originan que este se derrame como es el caso de las fugas en ductos debido a la corrosión de los materiales, explosiones en refinerías, problemas en el transporte (terrestre o marítimo). Asimismo, se muestra cual es la producción mundial y el sitio que ocupa México dentro de este, así como la relación en la incidencia de derrames con el aumento de la producción del crudo. Se identificaron las acciones que México y otros países han implementado para actuar en caso de desastres relacionados con petróleo. A este respecto, se revisa la normatividad nacional e internacional para la caracterización de sitios contaminados por hidrocarburos, así como las acciones tanto de indemnización como de restauración de los sitios.

El Capítulo 3 presenta el uso de la percepción remota para identificar la presencia de hidrocarburos y su extensión. Este capítulo se dividió en tres secciones: la primera muestra los principios físicos de la percepción remota, así como algunos de los sensores y plataformas que actualmente se encuentran en operación. La segunda sección muestra el tipo de imágenes disponibles y el pre-procesamiento requerido para su empleo. Finalmente, la tercera parte considera el proceso que se debe dar a las imágenes (combinaciones de bandas) para lograr la identificación de zonas contaminadas por hidrocarburos.

El Capítulo 4 hace una descripción bibliográfica de los fundamentos de los modelos de migración, revisando tanto las ecuaciones de flujo y transporte de una sustancia en la zona no saturada, como la incorporación de factores de influencia para la migración de contaminantes. En la última parte de este capítulo, se hace la descripción de los fundamentos y el funcionamiento del modelo aplicado.

Con la sección de la técnica de percepción remota (PR) y del modelo de migración (Modelo para Evaluación de Derrames de Hidrocarburos, EPA 1997), se estableció la metodología, la cual se indica en el Capítulo 5. El sitio de estudio es la refinería 18 de

Marzo ubicada en la delegación Azcapotzalco, Distrito Federal, por la gran polémica de la conversión de un uso de suelo industrial a un uso de suelo recreativo. Sin embargo, los datos disponibles en la zona de estudio se limitaban a la disponibilidad de imágenes de satélite, por lo que antes de emplear la metodología en la zona de estudio se evaluó su eficacia en refinerías con diversos problemas por derrames. Una de ellas es la refinería Lázaro Cárdenas en Minatitlán en el estado de Veracruz así como la refinería Francisco I. Madero en Tamaulipas. Si bien ambas refinerías muestran derrames sobre diferente suelo, esto permitió analizar el comportamiento del hidrocarburo por el tipo de suelo y definir el algoritmo a ser usado en la zona de estudio. Posteriormente, se consideró el Modelo para Evaluación de Derrames de Hidrocarburos (*HSSM*, por sus siglas en inglés) como el apropiado para el estudio debido a que es un modelo específico para hidrocarburos y permite la simulación de transporte en forma rápida con datos tanto de suelo como de las características del tipo de hidrocarburo derramado. Adicionalmente, tiene la ventaja de ser un modelo tanto para la zona no saturada y saturada, aunque en este trabajo se dará mayor énfasis a la zona no-saturada. Por último, los datos obtenidos fueron integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), de manera que se puedan manejar datos gráficos (imágenes, gráficas) con datos numéricos. El uso del SIG obtendrá el volumen de suelo contaminado y representar el un polígono del área afectada por el hidrocarburo.

En el Capítulo 6 se describe el sitio de estudio así como la problemática de contaminación. Los datos obtenidos se analizaron y discutieron en el Capítulo 7 donde se muestra los resultados de la aplicación de la metodología en la refinería 18 de Marzo, ubicada en la delegación Azcapotzalco, Distrito Federal. Finalmente, el Capítulo 8 presenta las conclusiones del estudio y algunas recomendaciones.

1.5 Alcances y limitaciones

- Identificación de zonas contaminadas con hidrocarburos con técnicas de percepción remota a partir de la identificación de residuos de hierro, y discriminando vegetación sana y vegetación estresada, así como cuerpos de agua.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

- Conocer la trayectoria y profundidad del hidrocarburo en el subsuelo, con el uso de un modelo de migración a fin de cuantificar el volumen impactado.
- Integración de los datos obtenidos a partir de la percepción remota y el modelo de migración en un sistema de información geográfica (ArcView 3.2), con la finalidad de cuantificar el área y volumen, para finalmente plasmarlo en un mapa.

2 Problemática

2.1 Derrames de hidrocarburos en el ambiente

Las afectaciones ambientales por derrames de hidrocarburos en los sistemas suelo y agua se han presentando desde el primer pozo perforado por Edwin L. Drake, en el año de 1859 en Texas, EUA (Chow, 1998). Estos eventos han generado considerables daños debido a las importantes pérdidas ecológicas, económicas y humanas.

2.1.1 Características del petróleo

La palabra petróleo se compone de dos palabras *Petro* (roca) y *Oleum* (aceite), por lo que su nombre gramatical es aceite de roca, pero convencionalmente se le conoce como Petroleum (en inglés Earth Oil). El petróleo es una mezcla de hidrocarburos que contiene entre 11 a 13% de carbono (C) y 83 a 86% de hidrógeno (H). Es a la unión de estos dos elementos (C_xH_y) que se denomina hidrocarburos (Bedient et al., 1994, IMP, 2006).

Los hidrocarburos pueden formarse a partir de cadenas lineales (parafinas), ramificadas (isoparafinas), dobles uniones entre átomos de carbono (oleofinas), moléculas con ciclos de carbonos (naftalenos) y ciclos con dobles uniones que forman la familia de los compuestos aromáticos (Bedient et al., 1994). Los hidrocarburos presentan diversas características en función de su número de átomos de carbono y la forma en que se encuentran acomodados dentro de las moléculas. En su estado físico, los hidrocarburos con 1 a 4 átomos de C son gaseosos, mientras que el estado líquido corresponde a compuestos de 5 a 20 átomos de C y el sólido cuando tiene más de 20 átomos de C en condiciones normales. Además, sus características varían por la presencia de pequeñas cantidades, partes por millón (ppm), de compuestos con átomos de nitrógeno, azufre y metales como hierro, níquel, cromo, vanadio, cobalto (Chow, 1998).

A nivel internacional los hidrocarburos se clasifican en función de su densidad, este parámetro fue propuesto por el Instituto Americano del Petróleo (API), el cual

diferencia las calidades del crudo y establece una de las principales clasificaciones a nivel internacional, En la tabla 1 se puede observar la clasificación del crudo de acuerdo con la densidad; por ejemplo de acuerdo con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) existen tres variedades de crudo, el istmo con una densidad de 33.6 grados API, maya con 22 grados API y el olmeca con 39.3 grados API. (IMP, 2006).

Tabla 1. Clasificación API de los hidrocarburos

Aceite crudo	Densidad (g/ cm ³)	Densidad grados API
Extrapesado	>1.0	10.0
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 – 22.3
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 – 31.1
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39
Superligero	< 0.83	> 39

Fuente: IMP, 2007

Entre sus características físicas, el petróleo presenta un color negro, por lo que se le denomina oro negro. El color se asocia principalmente a sus características de densidad (ej. pesada, extra pesada) y, por el contenido de cera. Esto es, dependiendo de su densidad, la transmisión de la luz puede hacer que se adapte colores como amarillo pálido, tonos de rojo y marrón hasta llegar al color negro como se le reconoce. Por ejemplo, el crudo más liviano presenta un color blanquecino-lechoso, al cual se le conoce como gasolina cruda (Chow, 1998).

En cuanto a sus características organolépticas, el petróleo presenta un olor aromático como el de la gasolina, pero debido a la presencia de impurezas, como el azufre el olor es a ácido sulfhídrico (huevo podrido). En el caso de contener sulfuro de hidrógeno se producen vapores irritantes, que pueden llegar a ser tóxicos y en algunos casos letales. La tabla 2 muestra una síntesis de las características del petróleo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.

Tabla 2 Características del petróleo

Propiedades Generales	Unidades	Valor
Masa atómica o molecular	kg/kmol	170-226
Punto de ebullición a 1013 mbar	°K	305-673
Punto de fusión a 1013 mbar	°K	230-225
Presión de vapor	°K	293
Volumen específico, del líquido y vapor a la temperatura de saturación a 1013 mbar y en las condiciones del proceso	m ³ /kg	8.67x10 ⁻⁴
Entalpía de vaporización a la temperatura de saturación , a 1013 mbar	kJ/kg	3.2 – 3.6 x 10 ⁻²
Entalpía de combustión a 298 K y 1013 mbar	kJ/kg	-424.54x10 ²
Limite inferior de inflamabilidad en aire	%	1
Limite superior de inflamabilidad en aire	%	6
Temperatura de inflamación, preferiblemente en recipiente abierto	°K	266 – 305
Densidad	Grados API	57.2 – 3
Rango de gravedad en grados API		
Extrapesados		Menos de 16
Pesados		16.1 - 21.9
Medianos		22.0 – 29.9
Livianos		30.0 – 39.9
Superlivianos		De 40 hacia delante
Índice de refracción (medido por un refractómetro)	-	1.39 a 1.49
Coefficiente de expansión	temperatura °C por volumen	0.00036 – 0.00096
Punto de congelación	°C	Varia de 15.5 - -45
Punto de deflagración	°C	-12 hasta 110
Poder calorífico	(calorías / gramo)	8.5 a 11.350
Calor específico		0.40 – 0.52
Viscosidad relativa a 20C	centipoise	1.002

Adaptada de IMP, 2006

2.2 Antecedentes del petróleo y derrames

En 1996, la Administración de Información de Energía (*Energy Information Administration*, EIA 2007) señaló al petróleo crudo como la principal fuente de energía del planeta con una producción mundial de 84.5 miles de millones de barriles en 2006. La figura 1 muestra la distribución de la producción mundial en 2005, donde el mayor productor es el medio oriente con el 30.6%, seguido de Europa y Euroasia con 21.9. Sin embargo, si se une la producción de Norte América y Centro y Sur América, el contienen produce 25.9%, lo que lo colocaría en segundo lugar mundial.

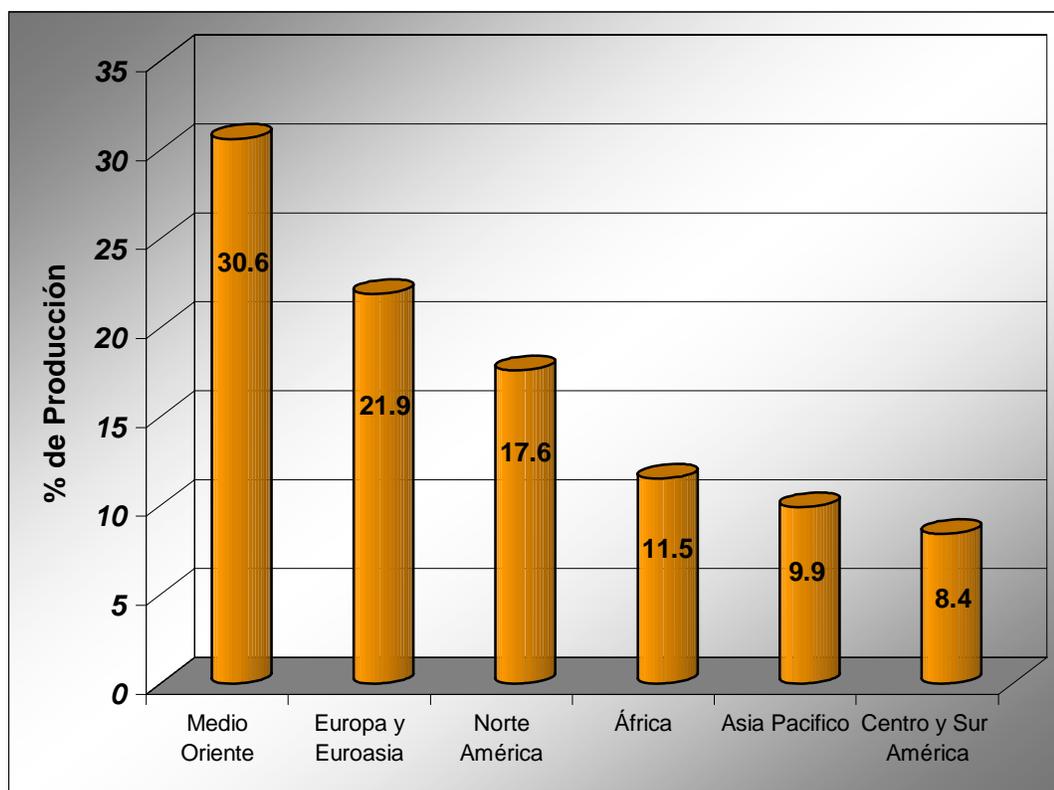


Figura 1 Producción mundial de petróleo en 2005
Fuente: ECOPETROL, S.A 2006

De igual forma que la producción de petróleo, el consumo mundial de acuerdo con la Administración de Información de Energía (*por sus siglas en ingles EIA*) fue de 84.54

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

miles de millones de barriles diarios para el año 2006. El porcentaje de consumo por regiones se muestra en la figura 2 donde se observa el consumo en 2004. En este caso el mayor consumidor es Norte América con el 30% del cual si se mantuvieran los mismo niveles de consumo en 2006 corresponderían a 24.22 miles de millones de barriles diarios. Asia Pacifico tan solo tiene un 1% menos que Norte América aunque es una de las regiones con producción menor (9.9 %). Todo lo contrario del Medio Oriente quienes producen más (30 %) y consumen solamente el 7%.

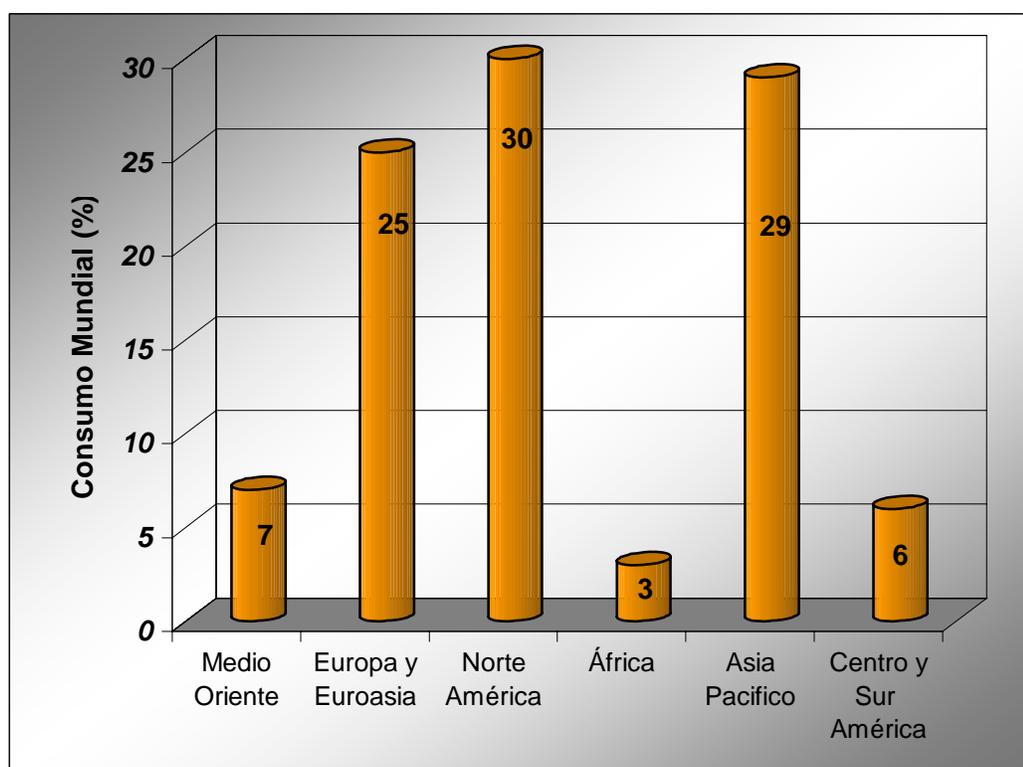


Figura 2 Consumo mundial de petróleo en 2004
Fuente: ECOPETROL S.A. 2006

Un dato importante es que cerca del 5% de la producción mundial de petróleo es derramada al medio ambiente como resultado de fallas en el sistema de producción y el transporte (Echarri, 1998). Los derrames ocasionados por transporte, se asocian a que éste se usa en lugares lejanos al sitio de extracción, por lo que se requiere mover a través de buques petroleros, pipas u oleoductos. Esta práctica está expuesta a accidentes, donde el petróleo es vertido o derramado al ecosistema, presentándose una emergencia. Aunque, el porcentaje de petróleo vertido por transporte no constituye

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

la mayor fuente de contaminación como en el caso de las refinerías, los desastres ambientales que originan son considerables llegando a ser irreversibles. Por ejemplo, del 0.1 al 0.2 % de la producción mundial de petróleo es vertida al mar, lo que genera daños al ecosistema marino, llegando a ocasionar la muerte de una comunidad biológica rompiendo la cadena productiva (Echarri, 1998, IPIECA, 2006).

Si bien, los derrames de petróleo se caracterizan por ser una masa densa que forma manchas las cuales cubren una gran extensión; la contaminación asociada a un derrame se debe analizar en función del ecosistema afectado y a los principales productos generados por el depósito o la degradación del petróleo (hidrocarburos totales de petróleo, HTP y Benceno-Tolueno-Xileno, BTEX). Por ejemplo, los productos de la combustión de los incendios de pozo o los productos químicos presentes en el lodo de perforación. Los accidentes más importantes que se han presentando a nivel internacional se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Derrames Internacionales

Fecha	Ubicación	Sustancia involucrada	Pérdidas materiales Toneladas vertidas
03/06/79	Pozo Iztoc 1, Sonda de Campeche, México	Petróleo	476 000
02/1991	Golfo Pérsico	Petróleo	525 000
03/1989	Exxon Valdez, Prince William Sound, Alaska, EUA	Petróleo crudo	37 000
19/12/82	Tacoa, Venezuela	Combustible	74,500
19/11/02	Barco Prestige, Costas de Galicia, España	Petróleo crudo	ND
1983	Pozo petrolífero, en Irán	Petróleo	272 000
1992	Oleoducto, Uzbekistan	Petróleo	272 000
1978	Petroleo Amoco Cadiz, Francia	Petróleo	234 000
1988	Petroleo Odyssey, Canadá	Petróleo	146 000
1979	Petroleo Atlantic Empress, Barbados	Petróleo	141 000
1979	Petrolero Atlantic Empress, Caribe	Petróleo	145 000
1967	Petroleo Torrey Canyon, Reino Unido	Petróleo	130 000
1994	Rotura de Oleoducto, Rusia	Petróleo	104 000
1976	Petrolero Urquiola, La Coruña	Petróleo	95 000
1992	Petrolero Mar Egeo, La Copruña	Petróleo	71 000
1980	Pozo petrolífero, Libia	Petróleo	143 000

ND No Dato

Adaptado de PROFEPA, 2005, UNEP- APPEL, 2003, EPA, 1996

<http://www.iesjovellanos.com/departamentos/cienciasnaturales/sistmedioamb/actividad7medioambiente/petroleo.htm>

Como se puede observar, la magnitud de estos accidentes ha sido tal que ha alertado a poblaciones y gobiernos. Una de las acciones fue la promulgación de leyes, reglamentos y convenios para regular el transporte de petróleo. La puesta en marcha de estas acciones ha permitido disminuir los impactos al medio ambiente y, por tanto, sus repercusiones en la economía y la sociedad.

2.3 Nacionales

Desde 1938, el petróleo es la principal actividad económica en México, la Agencia Internacional de la Energía (AIE), lo colocó en 2002 como el 4º productor internacional con 179 millones de toneladas que corresponde al 5% de la producción mundial (AIE, 2002). De acuerdo con lo anterior, la explotación petrolera se ha intensificado en las últimas décadas debido a las demandas del exterior, así Petróleos Mexicanos (Pemex) estima que la producción en 2005 fue de 3.3 millones de barriles diarios en todo su sistema (Pemex, 2005), de los cuales se exportaron alrededor del 50% de la producción diaria. De igual forma, el consumo de México se ha incrementado como se aprecia en la figura 3 donde para el periodo de 2003 a 2006, el consumo fue de 1.507 a 1.752 miles de millones de barriles (CIA World Factbook, 2007).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

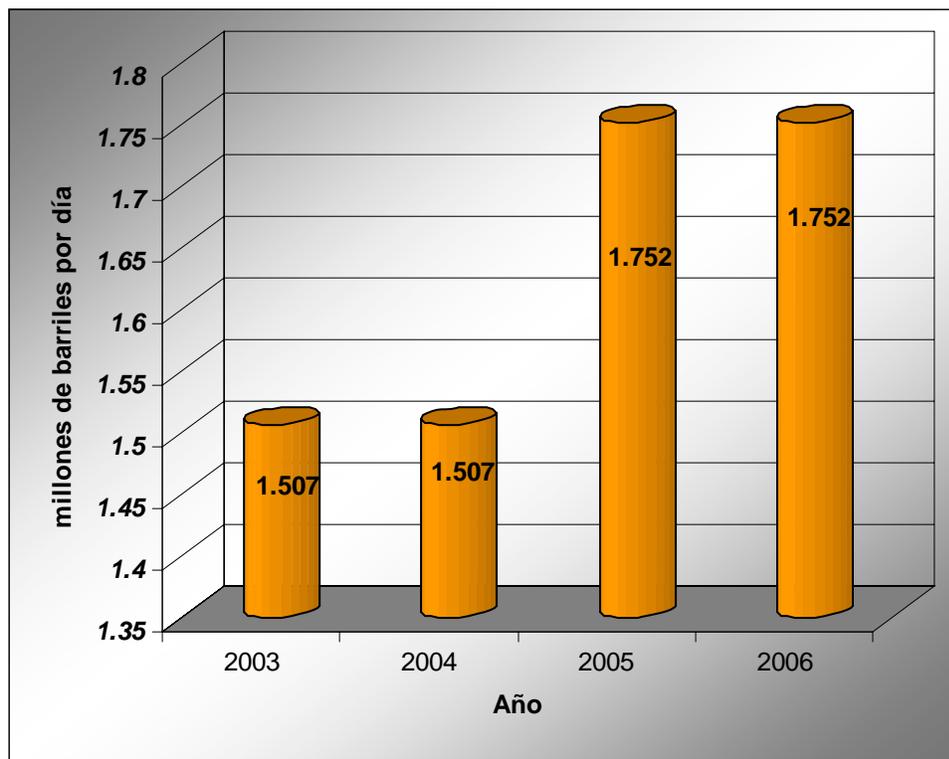


Figura 3 Consumo de México en 2003 - 2006
Fuente: CIA World Factbook, 2007

La producción y consumo de petróleo dejó una ganancia económica al gobierno, por concepto de impuestos directos e indirectos así como por derechos de extracción, de 854 millones de pesos durante el periodo de 1995 – 1999 (Pemex, 2000). Sin embargo, al igual que las ganancias económicas, el tamaño de producción ha traído una gran repercusión en el medio ambiente debido a los derrames asociados tanto a la producción como al transporte de petróleo y gas natural. En 2002, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2002) estableció a todo derrame o fugas de petróleo como “*emergencia por sustancias peligrosas*”. Lo anterior, colocó a la industria petrolera como el primer lugar en emergencias de este tipo; así en 2002 se presentaron 401 eventos de un total de 471, es decir el 85.13%. La figura 4 muestra las principales emergencias registradas por PROFEPA en 2002. Otras emergencias son incendios con un 5.73%, fugas 4.03 %, explosiones 3.39% y otros tipos no listados con 1.69% (PROFEPA, 2002).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

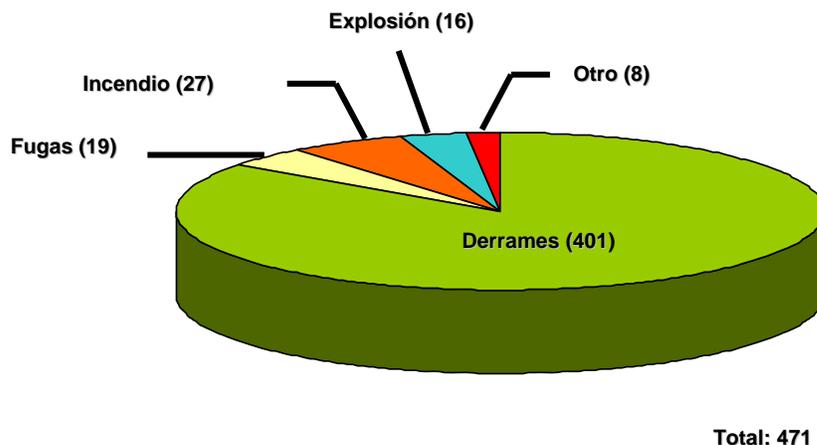


Figura 4 Emergencias ambientales por sustancias peligrosas
Fuente: PROFEPA, 2002

Las principales emergencias o accidentes que se han presentado en México a causa del petróleo crudo y sus derivados se listan en la tabla 4. Un ejemplo de este tipo de accidentes y con graves impactos ambientales a la fauna y flora marina fue el caso del pozo Ixtoc en Campeche, el cual liberó 3'100,000 barriles de petróleo al Golfo de México (figura 5).



Figura 5 Pozo Ixtoc, Campeche
Fuente: PROFEPA, 2002

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Tabla 4 Principales emergencias o accidentes a nivel nacional

FECHA DEL EVENTO	NOMBRE DEL EVENTO	UBICACION	SUSTANCIA INVOLUCRADA	CAUSAS	DAÑOS
01/06/79 - 09/03/80	Ixtoc	Sonda de Campeche	Petróleo crudo	Incendio ocasionado por la salida de petróleo y gas a presión	Impacto ecológico ocasionado por la liberación de 3,100,000 de barriles de petróleo, de los que se estima quedaron a la deriva 1,023,000
19/09/84	San Juan Ixhuatepec	San Juan Ixhuatepec, Mex	Gas LP	Explosión de esferas de gas LP	650 defunciones, 2,500 lesionados y cuantiosos daños materiales
22/04/92	Guadalajara	Guadalajara, JAL.	Gasolina	Presencia de gasolina en la red de alcantarillado	190 defunciones, 1,470 lesionados y cuantiosos daños materiales
16/02/95	Plátano y cacao	rancheria platano y cacao, mpo. del centro, Tab.	Gas amargo y gasolina	Explosión ocasionada por fallas aparentes en la soldadura de la tubería	7 defunciones, 16 lesionados y 125 evacuados
11/11/96	San Juan Ixhuatepec	San Juan Ixhuatepec, Mex.	Gasolina	Derrame e incendio de gasolina en tanques de almacenamiento	4 defunciones y 15 lesionados
03/01/02	Incendio en refinería "miguel hidalgo" de Pemex	Tula, Hgo.	ND	Incendio	Trabajadores quemados, 4 de ellos de gravedad y aprox. el 60% de a planta de alquilación destruida.
17/01/02	Derrame de petróleo crudo	Acatzingo, Puebla.	Petróleo crudo	Derrame	Niña fallecida, 5 personas intoxicadas y más 100 evacuados. Se afectaron alrededor de 40 hectáreas de tierra de cultivo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

FECHA DEL EVENTO	NOMBRE DEL EVENTO	UBICACION	SUSTANCIA INVOLUCRADA	CAUSAS	DAÑOS
17/01/02	Volcadura de pipa de Pemex	Colonia del Valle, D.F.	ND	Derrame e incendio de gasolina	ND
05/03/96	Central termoeléctrica, Adolfo López Mateos, (CFE)	Tuxpan, Ver	Combustoleo	Derrame	133.3 m ³ derramados
20/02/97	Refinería Lázaro Cárdenas	Coatzacoalcos, Ver	Gasolina	Derrame	42, 848 barriles derramados
01/05/97	Terminal Satélite Oriente	Col. Grajas , D.F.	Hidrocarburos	Explosión	N.D
	Área aledaña al 250+004 del poliducto 10",	Satélite Gómez Palacios	Hidrocarburos	Derrame	N.D
	Kilómetro 55.5 de la carretera Tampico - Mante	Poblado Villa Cuauhtémoc	Petróleo	Derrame	Alrededor de un millón de litros de petróleo derramado
	Rancho Monta Alta	Poblado Las Prietas	Petróleo	Derrame	100 mil litros derramados
04/05/2005	Ruptura de oleogasoducto	Tramo Luna Sen-Pijije, Oaxiacaque, Centra, Tab.	Fuga e incendio	Aceite y gas	Quema de pastizales
22/12/2004	Río Coatzacoalcos	Veracruz	Derrame	Crudo	Afecto a varias familias, afectación al ambiente con un costo de 6650 millones de pesos
29/01/2005	Río Tonalá y arroyo aguadulcita	Veracruz	Derrame	Gasolina	Muerte de miles especies, afectación aproximadamente a 200 pescadores, 300 barriles derramados

ND No Dato

Adaptado de PROFEPA, 2005 y el periódico Crónica, 2007.

En la figura 6 se observa la contaminación de suelo por el derrame de petróleo crudo en Acatzingo Puebla en 2002, el cual afectó más de 40 hectáreas de cultivo, una niña muerta, cinco intoxicados y más de 100 personas evacuadas (PROFEPA, 2002).



Figura 6 Derrame de petróleo crudo en Acatzingo, Puebla
Fuente: (PROFEPA 2002)

De acuerdo con la tabla 4, la mayoría de los eventos (57%) tiene lugar en las instalaciones de Pemex. De éstas, PROFEPA (2002) reportó para el periodo de 1997 a 2001, 1,479 accidentes los cuales incluyeron emergencias por transporte, en planta e incendios. La figura 7 muestra el incendio que se presentó en la refinería Miguel Hidalgo en Tula Hidalgo, donde aproximadamente el 60% de la planta de alquilación fue destruida y cuatro trabajadores resultaron con quemaduras de gravedad.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.



**Figura 7. Incendio en la refinería “Miguel Hidalgo” de Pemex, Tula HGO.
Fuente: PROFEPA 2002**

De los 1,479 accidentes en el período de 1997 al 2001 (figura 8), PROFEPA (2002) reportó que la mayoría se asociaron a derrames durante el transporte, con un total de 200 a 350 eventos por año. En segundo lugar, se ubicaron los eventos en las instalaciones de producción con 50 casos (PROFEPA, 2002).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

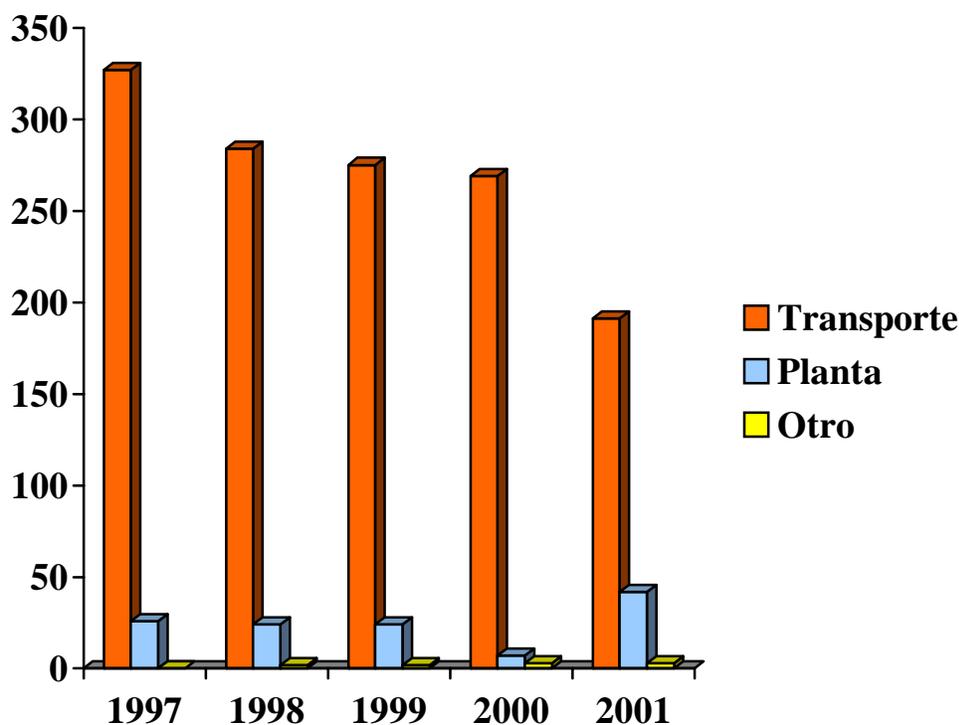


Figura 8 Accidentes ocurridos en el período de 1997 – 2001.
Fuente: PROFEPA, 2002.

De los eventos ocurridos en las instalaciones, casi todos tuvieron lugar en Pemex Exploración y Producción (PEP) siendo los más frecuentes aquellos presentados en ductos, seguidos de pozos petroleros, baterías de separación y en estaciones de compresión. Asimismo, los derrames presentados en Pemex Refinación (PR) tuvieron lugar en ductos, refinerías, terminales de almacenamiento, distribución y en plataformas marinas. De acuerdo con PROFEPA los problemas en los ductos se deben principalmente a tomas clandestinas, daños o averías provocados por terceros, corrosión y fallas de material. Así, el 40% de estos eventos se han asociados a fallas de material. En la figura 9a se observa el número de eventos, por tipo de transporte y 9b por emergencias ambientales, que tuvieron lugar en el período de 1997 – 2001 (PROFEPA, 2002).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

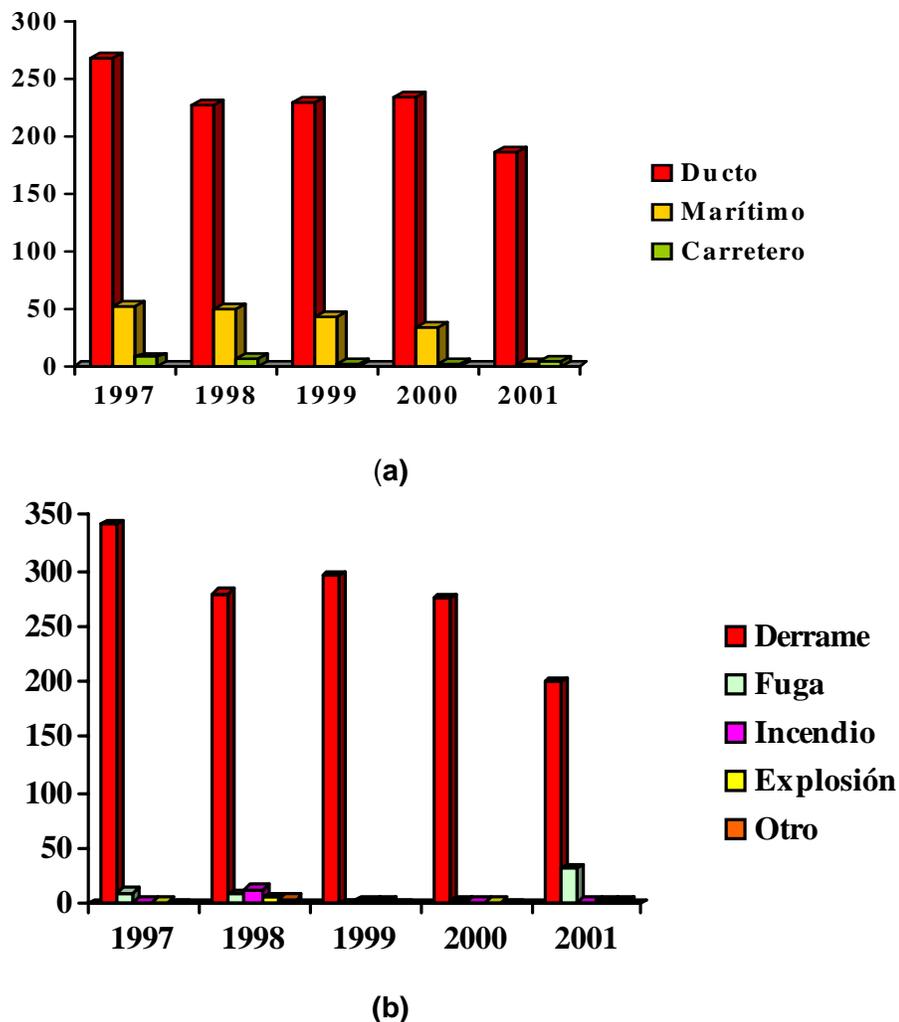


Figura 9. a) Número de eventos por transporte b) Emergencias ambientales en el período 1997 -2001.

Fuente PROFEPA, 2002

Es importante mencionar que Petróleos Mexicanos (Pemex) se divide en cuatro áreas: Exploración y Producción; Refinación; Gas y Petroquímica Básica; y Petroquímica. Siendo las áreas más vulnerables Pemex Exploración y Producción (PEP) y Pemex Refinación (PR), ya que es en ellas donde han ocurrido el 90% de las emergencias. Así, la PROFEPA (2002) señaló que el 88.7 % de los eventos ocurridos en el 2001, la mayoría se presentaron en los estados de Campeche, Veracruz y Tabasco, (PROFEPA, 2001); estos estados corresponden a los de mayor producción de petróleo. En la tabla 5

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

se observan las emergencias ocurridas en los estados por las actividades de Pemex con un total de 1,675 eventos en el año (PROFEPA, 2002).

Tabla 5. Número de Eventos ocurridos en los Estados

Estado	No. De Eventos	Estado	No. De Eventos
Baja California	4	Nayarit	0
Baja California Sur	1	Nuevo León	14
Campeche	419	Oaxaca	43
Chiapas	84	Puebla	44
Chihuahua	3	Querétaro	4
Coahuila	3	Quinta Roo	0
Colima	0	San Luis Potosí	0
Durango	14	Sinaloa	10
Estado de México	10	Sonora	6
Guanajuato	32	Tabasco	391
Guerrero	2	Veracruz	502
Hidalgo	26	Yucatán	2
Jalisco	7	Zacatecas	0
Michoacán	2	Zona Metropolitana	2
Morelos	1		

Fuente: PROFEPA, 2002

De lo anterior, se puede determinar que los derrames ocurridos en PEMEX afectan directamente al suelo en un **70%**, en un 30% al agua y en un 10% al aire, aunque Algunas de estas emergencias han afectado a los tres sistemas (PROFEPA, 2002).

2.3.1 Atlas de riesgo nacional para la industria del petróleo

Debido a la magnitud de los derrames ocurridos en el país y el grado de afectación a los sistemas agua, suelo y aire, tanto en la producción como en el transporte del petróleo, el Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED) realizó un Atlas de riesgo nacional (CENAPRED, 2006). En este Atlas se encuentran ubicadas las instalaciones de Perforación y Refinación, así como ductos, los cuales constan de 55,000 Km de tubería (figura 10). De esta forma, se pretende tener una mayor eficiencia en la prevención de accidentes y se podrán disminuir los impactos ambientales, sociales y económicos de las zonas aledañas a la industria.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.



Figura 10. Atlas de riesgo nacional de la industria petrolera
Fuente: Pemex (1998), CENAPRED 2006

Los estados con un mayor número de instalaciones son Tabasco, Veracruz, Campeche y Tamaulipas (figura 10). Además, la trayectoria de los ductos abarca el centro, noreste, suroeste del país. De acuerdo con las estadísticas presentadas por PROFEPA (2002) y con el Atlas de riesgos Nacional (Pemex 1998, CENAPRED, 2006), los principales estados con emergencias en orden de importancia son: Veracruz, Campeche y Tabasco lo que hace a estas zonas las de mayor vulnerabilidad.

2.4 Legislación

Como se mencionó en la sección 2.2, la ocurrencia de eventos en todo el mundo relacionados con derrames de petróleo crudo, ha llevado a establecer una legislación y convenios que permiten regular las acciones a seguir cuando se presente una emergencia o desastre. La legislación y convenios nacionales e internacionales relacionados con este tema se muestran en las siguientes secciones.

2.4.1 Internacional

A nivel mundial se han firmado una variedad de convenios para la prevención y control de derrames de hidrocarburos, pero es a nivel de cada país que se han establecido leyes y normas para disminuir la contaminación en suelo y agua por la ocurrencia de estos eventos. Algunos de los convenios internacionales de los que México ha formado parte son:

- **Convenio Internacional sobre Responsabilidad Civil** surgido por Daños causados por la contaminación de las aguas del mar por hidrocarburos. Este convenio entró en vigor el 19 de Junio de 1975, siendo su principal objetivo el garantizar la indemnización adecuada a las víctimas de la contaminación de hidrocarburos, resultado de siniestros marítimos por causa de buques tanques y sus cargas, donde se hace responsable de los daños y perjuicios el dueño del buque. Este convenio aplica a todos los buques de navegación marítima que transporte hidrocarburos a granel (más de 2,000 toneladas) (Borras, 2007).
- **Convenio Internacional sobre la Constitución de un Fondo Internacional de Indemnización de Daños debidos a Contaminación por Hidrocarburos**, el cual entró en vigor el 16 de Octubre de 1978. Este convenio es de carácter independiente y voluntario para los estados, su objetivo es proporcionar indemnización complementaria para los daños ocasionados por la contaminación producida por derrames de hidrocarburos procedente de la carga de buques tanques, actúa en la medida que sea inadecuada la protección que presta el

Convenio de Responsabilidad Civil (Borras, 2007).

- **Convenio Internacional sobre Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos**, el cual entró en vigor el 13 de Mayo de 1995. Su objetivo principal es proporcionar un marco mundial para la cooperación internacional en la lucha contra sucesos importantes o amenazas de contaminación en el mar debido a derrames de hidrocarburos (Borras, 2007).
- **Convenio Internacional sobre Responsabilidad e Indemnización de Daños en Relación con el Transporte Marítimo de Sustancias Nocivas y Potencialmente Peligrosas**. Su objetivo es establecer un fondo en el cual contribuyen los importadores para indemnizar los daños que afecten a las personas y los bienes ocasionados por sustancias nocivas y potencialmente peligrosas que transporta la nave. Este convenio aún no entra en vigor pero se prevé que permitirá pagar un máximo de 336 millones de dólares en indemnizaciones (Borras, 2007).

En los Estados Unidos de América, se estableció una Ley de respuesta ambiental exhaustiva, compensación y responsabilidad pública, E.U. 1980, mejor conocida como CERCLA o la Ley de Superfondo (EPA, 2006), en donde establece el esquema de notificaciones por derrames y por actividades de disposición previa. Esta ley contiene una Lista Nacional de Prioridades (LNP) que incluye los sitios más contaminados y presentan una prioridad para su limpieza. Además, presenta un Plan Nacional de Contingencia (PNC), que indica los procedimientos de cómo limpiar un sitio de la LNP y cualquier otro sitio contaminado e indica las responsabilidades de las partes potencialmente participantes por derrames o liberaciones de sustancias y residuos peligrosos (EPA, 2006).

Bajo el marco del Tratado de Libre Comercio (TLC) para América del Norte del que forman parte los gobiernos de los Estado Unidos Americanos, los Estados Unidos Mexicanos y Canadá (CONABIO, 2007), se acordó la creación de la Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA) y el Fondo de América del Norte

para la Cooperación Ambiental (FANCA). Así, los tres países se comprometen a elaborar y mejorar leyes, reglamentos, procedimientos, políticas y prácticas ambientales, que conlleven a promover medidas ambientales efectivas y económicamente eficientes, así como políticas y prácticas para prevenir la contaminación y el mejoramiento del ambiente (CONABIO, 2007)

Por lo que respecta al gobierno de Canadá se tiene la declaración inicial del Acta Canadiense de Protección al Ambiente (Canadian Environmental Protection ACT, CEPA) de 1998, donde se indica que “ *la protección al ambiente es esencial para el bienestar de Canadá, por lo que la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es de interés nacional, en parte por aspectos de salud pero además, porque éstas no pueden ser contenidas por barreras geográficas, siendo necesario cumplir con las obligaciones en materia ambiental*” (EC, 2006). La experiencia nacional se analizará con mayor detalle a continuación.

2.4.2 Nacional

En México, previo a los acuerdos del TLC, se han establecido medidas para la conservación y protección del medio ambiente desde la Constitución Mexicana de 1917 hasta la elaboración y promulgación de leyes, reglamentos y normas en la actualidad. Parte de la legislación vigente en materia de protección de la contaminación ambiental y, en específico, de derrames de hidrocarburos se presenta en las siguientes secciones.

2.4.2.1 Constitución

La constitución mexicana de 1917 hace referencia al cuidado y protección al medio ambiente en los artículos número 4, 25, 27, 73 y 115, los cuales mencionan el cuidado, prevención, conservación y restauración del medio ambiente. Así como que cada municipio se debe hacer cargo del tratamiento y disposición del agua además de controlar y vigilar la utilización del suelo.

2.4.2.2 La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEEGEPA) publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el día 28 de enero de 1988 y que fuera actualizada el día 05 de julio de 2007, considera la necesidad de analizar el impacto ambiental que se genera por la realización de obras o actividades *“que pueden causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o de reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente”* (LGEEPA, DOF, 2007)

En este sentido, las actividades petroleras pueden causar un desequilibrio ecológico como resultado de derrames producidos durante su producción y transporte (ej. oleoductos, gasoductos y poliductos). Adicionalmente, la PROFEPA considera que los derrames por hidrocarburos son emergencias por material peligroso, con lo cual la LEEGPA entra en vigor ya que en su Capítulo Cuarto establece los aspectos para atender la contaminación del suelo causada por materiales peligrosos (LGEEPA, 2007). Este Capítulo Cuarto se integra de 11 artículos de los cuales destacan por este tema los siguientes:

Art. 134, el cual establece la prevención y control de la contaminación de los suelos por presencia de materiales o residuos peligrosos y las acciones que deben llevarse a cabo para restaurar el sistema para cualquier actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico.

Art. 136 trata de las alteraciones del suelo por procesos biológicos que perjudiquen su aprovechamiento y explotación así como los daños a la salud y los riesgos.

Art. 139 hace referencia a las disposiciones que se tomarán tanto en la LEEGPA, la ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales

Mexicanas (NOM) que para tal efecto expida la Secretaría, en caso de descargas, depósitos o infiltraciones de sustancias o materiales contaminantes para el suelo.

Art. 140, el cual se refiere a que *la generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a la que se establezca en las NOM que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (DOF, 13 de Diciembre de 1996).*

2.4.2.3 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligroso (LEEGEPA-RP).

Conjuntamente con la LEEGEPa, esta en vigor el Reglamento de la LEEGEPa en materia de residuos peligrosos, el cual fue publicado en el DOF el 25 de Noviembre de 1988, destacando en el caso de derrames el Artículo 42 donde se establece que

“Cuando por cualquier causa se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos peligrosos, durante cualesquiera de las operaciones que comprende su manejo, el generador y, en su caso, la empresa que preste el servicio, deberá dar aviso inmediato de los hechos a la Secretaría; aviso que deberá ser ratificado por escrito dentro de los tres días siguientes al día en que ocurran los hechos, para que dicha dependencia esté en posibilidad de dictar o en su caso promover ante las autoridades competentes, la aplicación de las medidas de seguridad que procedan, sin perjuicio de las medidas que las mismas autoridades apliquen en el ámbito de sus competencias”.

El aviso por escrito a que se refiere el párrafo anterior deberá comprender los siguientes aspectos:

I.- Identificación, domicilio y teléfonos de los propietarios, tenedores, administradores o encargados de los residuos peligrosos de que se trate;

II.- Localización y características del sitio donde ocurrió el accidente;

III.- Causas que motivaron el derrame, infiltración, descarga o vertido;

IV.- Descripción precisa de las características fisicoquímicas y toxicológicas, así como, cantidad de los residuos peligrosos derramados, infiltrados, descargados o vertidos;

V.- Acciones realizadas para la atención del accidente;

VI.- Medidas adoptadas para la limpieza y restauración de la zona afectada; y

VII.- Posibles daños causados a los ecosistemas.

2.4.2.4 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

Con respecto a las NOM que regulan la contaminación en los suelos por hidrocarburos se han publicado las siguientes:

- **NOM-117-ECOL-1998**, que establece las especificaciones de protección ambiental para la instalación y mantenimiento mayor de los sistemas para el transporte y distribución de hidrocarburos y petroquímicos en estado líquido y gaseoso, que se realicen en derechos de vía terrestres existentes, ubicados en zonas agrícolas, ganaderas y eriales .Publicada en el DOF, el 24 de Noviembre de 1998.
- **NOM-021-SEMARNAT-2000**, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Publicada en el DOF, el 07 de diciembre del 2001.
- **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Publicada en el DOF, el 29 de marzo de 2005.

La PROFEPA toma los criterios de manejo y restauración de sitios afectados por hidrocarburos con base en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. La Norma 138 especifica los hidrocarburos que se deberán analizar a partir del tipo de contaminante vertido

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

(tabla 6); por ejemplo, en el caso de crudo se deberán analizar los Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) tanto en su fracción aceitosa como de diesel, así como los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Tabla 6 Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante

Parámetro Productos	HTP Fracción de productos aceitosos	HTP Fracción de diesel	HTP Fracción de gasolina	BTEX	HAP
Petróleo crudo	X				X
Combustóleo	X				X
Emulsiones	X				X
Asfalto	X				X
Parafinas	X				X
Diesel		X			X
Turbosina		X			X
Keroseno		X			X
Aceites lubricantes		X			X
Vaselinas		X			X
Aceites combustibles ligeros		X			X
Gas avión			X	X	
Gasolvente			X	X	
Gasolina magna			X	X	
Gasolina premium			X	X	
Gas nafta			X	X	
Éter de petróleo			X	X	
Ligroina			X	X	
Thinner			X	X	
Producto alquilado			X	X	
Aromina			X	X	

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/2003

Asimismo, la NOM-138-SEMARNAT/2003 menciona los límites máximos permisibles por fracción de Hidrocarburos asociados a derrames en función del uso del suelo: agrícola que incluye suelo forestal, recreativo y de conservación, residencial e industrial este último incluye zonas comerciales. En el caso de un suelo mixto deberá aplicarse el límite del menor valor de los usos de suelo. Estas especificaciones se presentan en la tabla 7. Por ejemplo, en el caso de una zona residencial no debe de contener el suelo más de 200 mg de hidrocarburos ligeros por kg de suelo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Tabla 7 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

Fracciones de Hidrocarburos	Uso de suelo Predominante (mg/Kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/ SS-2003

La tabla 8 hace mención a los Límites Máximos Permisibles por uso de suelo, especificando tipo de hidrocarburos como el Benceno, Tolueno, Xilenos mejor conocidos como BTEX, por mencionar algunos.

Tabla 8 Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en el suelo

Hidrocarburos específicos	Uso de suelo Predominante (mg/Kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100
Benzo (a) pireno	2	2	10
Dibenzo (a,h) antraceno	2	2	10
Benzo (a) antraceno	2	2	10
Benzo (b) fluaranteno	2	2	10
Benzo (k) fluaranteno	8	8	80
Indeno (1,2,3-cd)pireno	2	2	10

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/ SS-2003

Para llevar a cabo la caracterización del sitio afectado, la NOM-138 indica que se debe recabar información que sirva de base para conocer la dimensión de la afectación. En caso de derrames o fugas, la caracterización se debe realizar después de haber tomado las medidas de urgente aplicación. La caracterización del sitio debe contener como mínimo los siguientes elementos:

- Descripción del sitio y de la afectación
- Estrategia de muestreo
- Plan de muestreo
- Informe

De acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/2003, el muestreo se puede aplicar con métodos dirigidos o estadísticos, siempre y cuando los resultados permitan delimitar la distribución horizontal y vertical de los contaminantes en el suelo. La tabla 9 muestra los puntos mínimos de muestreo que se deben realizar para abarcar toda el área contaminada.

Tabla 9 Mínimos de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada

Área Contaminada (ha)	Puntos de Muestreo
Hasta 0.1	4
0.2	8
0.3	12
0.4	14
0.5	15
0.6	16
0.7	17
0.8	18
0.9	19
1.0	20
2.0	25

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/ SS-2003

Si se desea conocer a detalle la NOM-138-SEMARNAT/2003, se recomienda al lector revisar el Anexo A.

2.5 Métodos de caracterización de suelos contaminados

Como se observó en la sección, las fallas en las instalaciones o durante el transporte de petróleo han ocasionado que se tengan derrames en diversos ambientes. Uno de estos medios es el suelo donde no solo se perjudica la calidad del suelo, sino además se afectan las aguas superficiales y subterráneas. Es por ello que su análisis y determinación es importante, además de ocasionar pérdidas importantes de salud y económicas en las zonas afectadas. Esto lleva a las instancias correspondientes a desarrollar metodologías que permitan la caracterización de dichas zonas.

El primer paso para caracterizar zonas afectadas por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA, *por sus siglas en inglés*) es definir un sitio

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

contaminado. Así, la EPA define una zona afectada como *“aquella propiedad cuya expansión, desarrollo o reuso puede complicarse por la presencia, verdadera o percibida, de alguna sustancia peligrosa o algún contaminante”* (EPA, 2006).

La metodología utilizada por EPA para evaluar un sitio contaminado consta de ocho pasos:

1. Evaluación preliminar, donde se realiza una investigación de las condiciones del sitio o lugar.
2. Sistema de clasificación de peligro. Método de investigación para evaluar el riesgo que representa el área y evaluar la inclusión de un área, sitio o lugar en la lista de prioridades nacionales.
3. Lista de prioridades nacionales. Esta lista representa los lugares con daños severos los cuales requieren un tiempo considerable para ser restaurar o mejorar.
4. Investigación de tecnologías. Donde se determina el origen y la extensión de la contaminación.
5. Documentos de decisión, los cuales presentan las alternativas de restauración que pueden ser utilizadas.
6. Diseño de la tecnología e implementación de la misma.
7. Identificación de la terminación de la construcción de mecanismos o procesos de restauración.
8. Supervisión de los lugares restaurados, para la protección a largo plazo de la salud humana y al ambiente.

Por su parte la Agencia Ambiental Canadiense (CA), en su publicación **acciones sitios contaminados federales**, señalan el siguiente procedimiento o metodología para llevar acabo la caracterización del sitio contaminado y realizar la remediación más adecuada en el sitio, (CE, 2005):

1. Identificar los sitios potencialmente contaminados basados en sus actividades, alrededor o dentro del sitio.
2. Revisión histórica de derrames

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

3. Programa de prueba, donde se realiza una caracterización preliminar de las condiciones de la contaminación.
4. Clasificación del Sitio usando el Sistema de Clasificación Nacional del Ambiente (CCME), donde da la prioridad al sitio para las investigaciones y/o acciones futuras de la gerencia de remediación.
5. Programa detallado, donde se especifican los problemas específicos y proporciona las investigaciones y análisis mas detallados.
6. Se reclasifica el sitio usando el CCME con base en los resultados del paso 5.
7. Se desarrolla las estrategias de remediación de la gerencia de riesgo, y se realiza un plan específico para tratar la contaminación.
8. Instrumentación del plan específico y de la remediación
9. Divulgación del muestreo final, verificación de y documentación del éxito de la remediación.
10. Supervisión a largo plazo, si el sitio lo requiere.

En el caso de México, la información que se debe recabar en la evaluación o caracterización de un sitio afectado por hidrocarburos se lleva acabo bajo los lineamientos de la NOM-138-SEMARNAT/2003. Estos lineamientos son:

- Descripción del sitio afectado
 1. Localización del sitio en coordenadas geográficas UTM
 2. Un plano que permita localizarlo tanto a nivel regional como local
 3. Características del sitio que permitan evaluar la distribución y la afectación.
 4. Si es un derrame reciente el responsable debe indicar la cantidad aproximada del vertido y si se trata de un pasivo ambiental entonces realizar una recopilación histórica.

- Estrategia y Plan de muestreo: Este puede ser de tipo dirigido o estadístico dependiendo del sitio afectado, se establece la ubicación, el número, profundidad y volumen de muestra además de la técnica de muestreo y las medidas de seguridad de calidad.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

- Informe: Debe contener los pasos anteriores así como los resultados de los análisis de muestra y la interpretación de los resultados, además, de anexarse la cadena de custodia.

Como se observa parte de los lineamientos de la NOM-138-SEMARNAT/2003 implican salidas a campo para realizar un levantamiento en el sitio contaminado. Esta acción es costosa ya que se deben cubrir requerimientos de transporte, materiales de muestro y personal capacitado. Por lo tanto; lleva tiempo por la recolección y análisis de muestreo para detectar la afectación. Una herramienta para abatir estos costos, identificando primero el sitio afectado y su extensión y así definir los sitios de muestreo y las brigadas de personal calificado para toma de muestras es el uso de técnicas de percepción remota y el análisis de la información en sistemas geográficos. El uso de imágenes adquiridas remotamente como lo son las imágenes de satélite aunados a modelos de migración en suelos permite establecer las zonas impactadas por el derrame de mayor relevancia permitiendo una evaluación más rápida y, por tanto, establecer acciones inmediatas para evitar mayores afectaciones en el sistema (suelo-agua).

3 Percepción remota

En 1986, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) instauró un comité para regular el uso de la percepción remota (PR) mencionando que debería ser una tecnología disponible para el uso de todos los países (Chuvienco, 2002). Así, al regular la información obtenida a distancia y hacerla accesible tanto a científicos como al público en general, podrían estar alerta sobre los cambios que se puedan presentar en el medio ambiente (Chuvienco, 2002). Hoy en día, la PR se usa en diversos campos de investigación, por ejemplo en climatología, geología, hidrología, entre otros. Asimismo, esta herramienta se ha utilizado para la identificación de zonas contaminadas, desde el agotamiento de la capa de ozono hasta la detección de los derrames de petróleo y otros efectos ambientales (Bakker *et al.* 2004).

3.1 Introducción a la percepción remota

La percepción remota (PR) es una herramienta cualitativa y cuantitativa que facilita la interpretación y la elaboración de modelos ambientales y, por tanto, coadyuda en el proceso de planeación socioeconómica. La PR se puede definir como la ciencia y arte para la obtención de información a distancia de un objeto a través de un sensor (Ritchie y Rango, 1996).

La percepción remota no es una técnica reciente, ya que se pueden contar dentro de las primeras experiencias el uso de las primeras fotografías aéreas tomadas por Gaspar Félix de Tournachon desde un globo cautivo en 1859 (Hyatt, 1988). En años posteriores, se produjo el desarrollo de fotografías aéreas tomadas desde un avión, herramienta muy usada en la primera guerra mundial con el uso de la primera cámara área (Brookes, 1975). Durante la Segunda Guerra Mundial, con los avances en la óptica de las cámaras se introdujeron sensores como el radar y las plataformas de observación, así como, el mejoramiento de los sistemas de comunicación (Chuvienco, 2002).

En los 1960s, la NASA lanzó el primer satélite de la serie TIROS como parte de la misión Gemini-Titán en 1965, siendo utilizado para observaciones meteorológicas, además de realizar los primeros experimentos formales de fotografía espacial (Chuvieco, 2002). Debido al éxito alcanzado, la NASA creó un proyecto dedicado a la cartografía y evaluación de los recursos naturales, Earth Resources Technology Satellite (ERTS), el cual fue lanzado el 23 de julio de 1972 y fue llamado LANDSAT (Chuvieco, 2002).

Por los años cincuenta, el uso de las imágenes de satélite se expandió llegando a considerar las primeras discusiones jurídicas a causa de los primeros satélites espías. A este respecto, el presidente Eisenhower propuso en 1955 una política de cielos abiertos la cual fue rechazada por la Unión Soviética, y no fue sino hasta 1992 que se reguló la observación militar con el Tratado de Cielos Abiertos (Open Skies Treaty), firmado por los países de Estados Unidos de América (EUA), Canadá y otros estados de la OTAN, así como países del pacto de Varsovia, incluyendo Rusia, Ucrania y Belarus (Chuvieco, 2002).

El Tratado de Cielos Abiertos permitía sobrevolar el territorio de otro país utilizando sensores aprobados en el tratado y con limitaciones de resolución espacial que varían en función de la tecnología empleada (Heric et al., 1996). Sin embargo, para 1985 durante el congreso de UNISPECE'82 celebrado en Viena, se expresó el deseo de algunos países en desarrollo por controlar la distribución de las imágenes obtenidas sobre su territorio. Esta decisión llevo a considerar el fácil acceso (inmediato y no restrictivo) a la información detectada sobre el territorio perteneciente a cada país y a solicitar la previa autorización de éste para difundir dicha información a terceros (Chuvieco, 2002). Estos acuerdos se plasmaron en la resolución 41/65 de la ONU en diciembre de 1986, donde también se subrayó el interés de esta técnica para promover la protección del medio ambiente (Chuvieco, 2002).

De acuerdo con Tapia (1989), los criterios de esta legislación se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. La PR se empleara en provecho e interés de todos los países, de acuerdo con el derecho internacional.
2. Se respetará el principio de soberanía plena y permanente de los países sobre su propia riqueza y recursos naturales, sin perjudicar los legítimos derechos e intereses del país observado.
3. Se promueve la cooperación internacional sobre recepción, interpretación y archivo de datos, presentándose asistencia técnica para ello.
4. Deberán los estados informar al secretario general de la ONU sobre los programas de teledetección que se propongan desarrollar, así como a los países interesados que lo soliciten.
5. Se informará a los países afectados para prevenir fenómenos perjudiciales para su medio ambiente, los cuales tendrán acceso sin discriminación de los datos obtenidos sobre su territorio, aun costo razonable.

3.2 Principios físicos de la percepción remota

La PR tiene sus fundamentos en la medición de la energía electromagnética (EM), donde la principal fuente en la superficie de la tierra es el Sol, el cual emite radiaciones tales como: luz visible, calor y luz ultravioleta (Bakker *et al.* 2004).

Las propiedades de la EM están basada en dos teorías físicas, la ondulatoria y la cuántica, las cuales se describen enseguida (Belward y Valenzuela, 1991):

- **Teoría Ondulatoria** (Huygens, 1678 y Maxwell, 1865). La energía electromagnética es propagada en el espacio siguiendo un modelo armónico y continuo. La figura 11 ilustra la propagación de las ondas, las cuales se caracterizan por tener un campo magnético y uno eléctrico, perpendiculares uno con el otro y se propagan a la velocidad de la luz (c) (Bekker *et al.*, 2004).

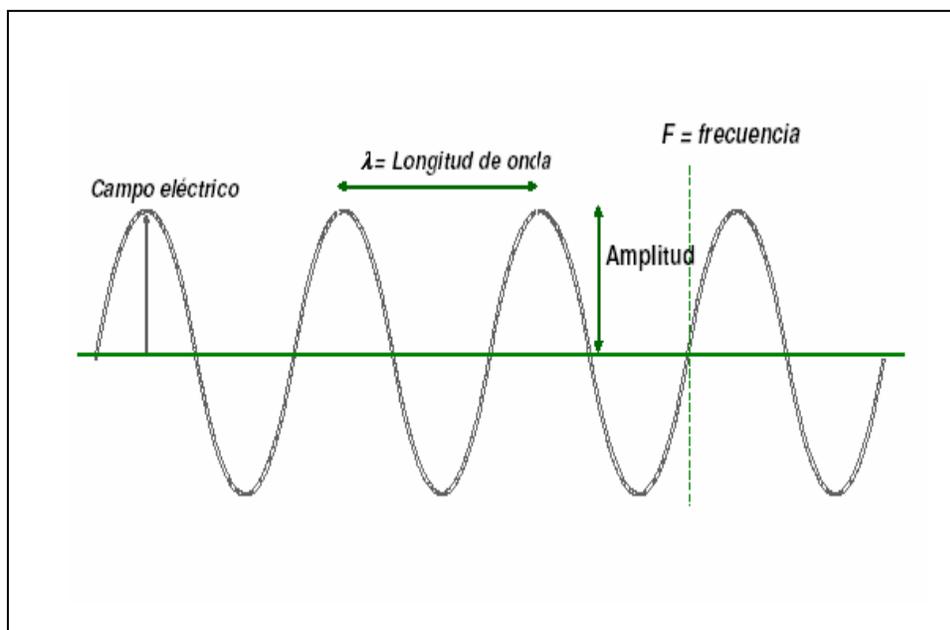


Figura 11 Esquema de una onda electromagnética
Fuente: Smith, 2001

Las características de este flujo energético se describe a través de la longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν); matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$c = \lambda \times \nu \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

c = Velocidad de la luz, con valor de 3×10^8 [m/s]

λ = Longitud de onda [m]

ν = Frecuencia [s^{-1}]

- **Teoría Cuántica** (Planck, 1900 y Einstein, 1910). La teoría considera el cálculo de la cantidad de energía transportada por un fotón, la cual esta en función de la frecuencia; matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$Q = h \times \nu \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

Q = Energía de un fotón [J]

h = Constante de Plack [6.6×10^{-34} J/s]

ν = Frecuencia [s^{-1}]

A partir de la relación de estas dos teorías, se deduce que es posible definir cualquier tipo de energía radiante en función de la longitud de onda o la frecuencia mediante la siguiente expresión:

$$Q = \left(\frac{c}{\lambda} \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

3.2.1 Leyes de la radiación electromagnética

Toda materia u objeto con una temperatura (T) alrededor del cero absoluto (0°K) es capaz de emitir energía electromagnética debido a la agitación molecular; a estos cuerpos se le conoce como cuerpo negro y tiene un valor de emisividad y de absorbancia igual a uno (Bekker et al, 2004). De acuerdo con la ley de Plack, un cuerpo negro se puede describir en función de la temperatura termodinámica y la longitud de onda a través de la siguiente ecuación:

$$M_{B,\lambda}(T) = \left(\frac{2\pi \left(\frac{hc^2}{\lambda^5} \right)}{\exp \left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)^{-1}} \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$M_{n,\lambda}$ = Emitancia radiativa

h = Constante de Plack [6.626×10^{-34} Ws^2]

k = Constante de Boltzmann [1.38×10^{-23} Ws^2K^{-1}]

c = Velocidad de la luz [m]

λ = Longitud de onda [m]

T = Temperatura absoluta [K]

- Ley de Stefan – Boltzmann

De acuerdo con Stefan-Boltzman, la cantidad total de energía emitida (M) por un cuerpo negro depende de la emisividad (ϵ) y la temperatura absoluta, los cuales están en función de la longitud de onda. La figura 12 muestra la energía emitida por longitud de onda, donde se observa que a mayor temperatura mayor contribución de longitudes de onda corta y viceversa. La ecuación para conocer el total de energía que radia por unidad de superficie se expresa de la siguiente forma:

$$M_B = \sigma T^4 \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$$

T = Temperatura [°K]

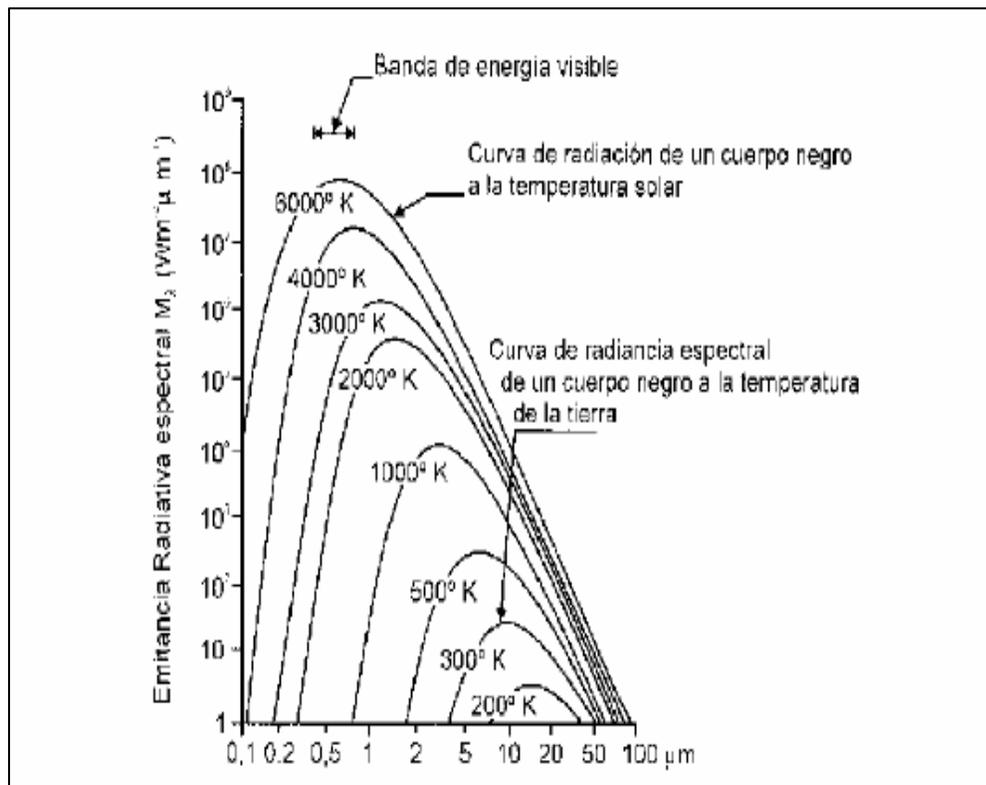


Figura 12 Curvas de radiación de un cuerpo negro basada en la Ley de Stefan - Boltzmann

Fuente: Belward y Velenzuela, 1991

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

- Ley de desplazamiento de Wien

A medida que la temperatura absoluta de un cuerpo cambia, la longitud de onda dominante se desplaza según la siguiente expresión (Barrett y Curtis, 1992):

$$\lambda_{\max} = \frac{C_3}{T} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:

C_3 = Constante con un valor de 2893 $\mu\text{m}/\text{K}$

T = Temperatura [K]

La ley de Wien tiene una gran importancia para seleccionar las bandas más convenientes para detectar un objeto a una determinada temperatura como se muestra en la figura 13.

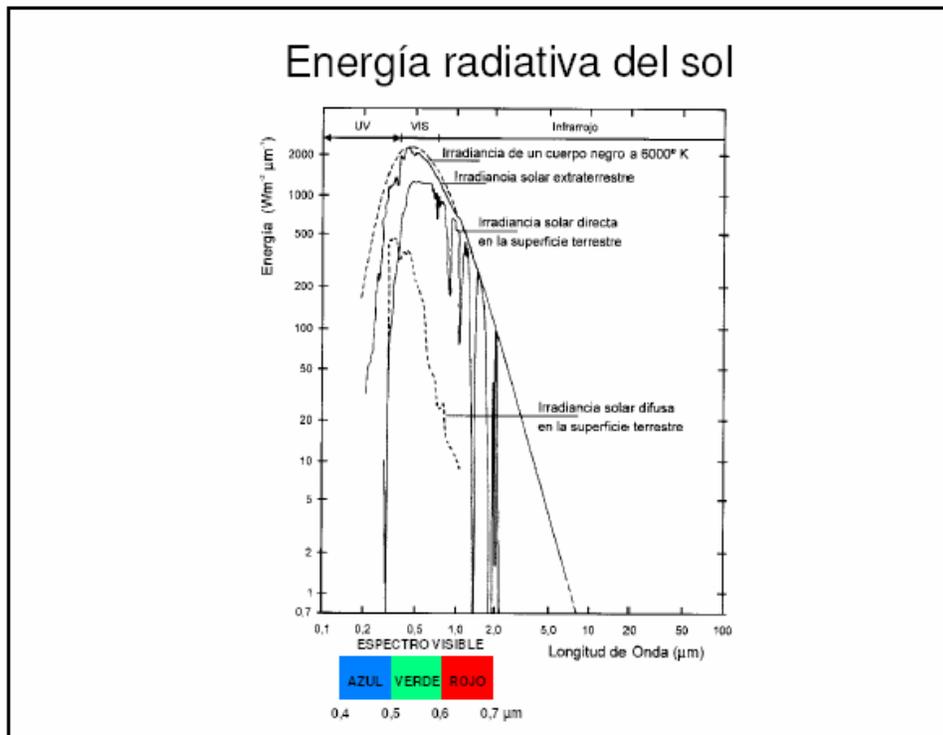


Figura 13 Curva de Emitancia Solar
Fuente: Chuvieco, 2002

3.2.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético se refiere al rango total de longitud de onda que es emitida por un cuerpo. El espectro comprende desde longitudes de onda corta como rayos gama, rayos x hasta longitudes de onda larga como la telecomunicación. A partir de la longitud de onda se establece una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Bekker *et al*, 2004).

Las principales bandas o regiones que se utilizan en PR son: la región visible, infrarroja y microonda, estas pueden observarse en la figura 14 donde presenta el intervalo de longitud de onda para cada una de las regiones mencionadas (Smith, 2001).

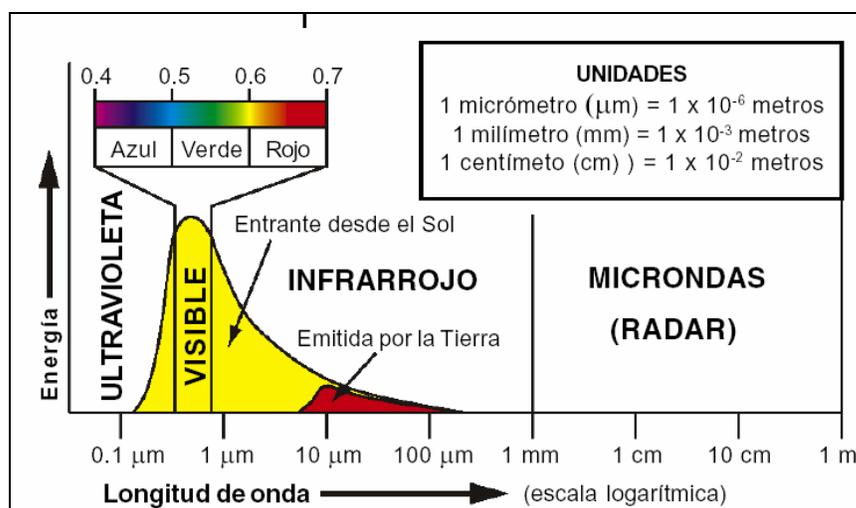


Figura 14 Espectro Electromagnético aplicado en percepción remota
Fuente: Smith, 2001

Las regiones electromagnéticas se describen de la siguiente manera (Belward y Valenzuela, 1991).

- Espectro visible (0.4 a 0.7 µm). Se le denomina así por ser la única radiación electromagnética visible al ojo humano. En esta región se distinguen tres bandas elementales: Azul (0.4–0.5 µm), Verde (0.5-0.6 µm) y Rojo (0.6-0.7 µm).
- Infrarrojo cercano (IRC, 0.7-1.3 µm). También conocido como infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico. Resulta de especial importancia por su capacidad para

discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm). En esta región se mezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Se divide en dos bandas; la primera se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm , y se le denomina infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR) y la segunda comprendida entorna a 3.7 μm , se le conoce como infrarrojo medio (IRM). Esta banda detecta la humedad atmosférica.
- Infrarrojo Lejano o Térmico (IRT, 8 a 14 μm). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres, siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (ej. incendios o volcanes activos).
- Micro-ondas (M, por encima de 1 mm). Indica longitudes de ondas milimétricas, esta es prácticamente transparente a la influencia atmosférica, es por ello que se utilizan en zonas donde las cubiertas de nubes son frecuentes.

3.3 Sensores

La PR se basa en la medición de la energía electromagnética a través de un sensor, el cual presenta una resolución espacial que le permite discriminar información de detalle (Bekker *et al*, 2004; Estes y Simonett, 1975). La discriminación refiere a la capacidad de distinguir un objeto de otro; mientras que la información de detalle implica la resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal que se puede obtener. Existen diferentes sensores que proporcionan información única de las propiedades de las características de la superficie de la tierra. Por ejemplo, mediciones de reflectancia solar para conocer el albedo, la temperatura de la superficial, el contenido de humedad, entre otros (Schultz y Engman, 2000). La figura 15 muestra una imagen tomada por un sensor.



**Figura 15 Imagen tomada por un sensor Landsat 7 ETM+ en la refinería Francisco I. Madero en Tamaulipas.
Fuente: GLCF, 2006**

Así, los sensores remotos miden la energía y se clasifican en dos grupos (Chuvienco, 2002):

- Sensores pasivos: emplean energía de origen natural, tal como la luz solar y la artificial, por lo que captan la energía radiada por los objetos. Es decir, almacenar la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres. Este sensor sólo mide longitudes de onda larga relacionadas con la temperatura de la tierra, por lo que no depende de la iluminación del sol para ser operado. Se clasifican en: fotográficos, ópticos–electrónicos y de antena (radiómetros de microondas). Este tipo de sensor se ve fuertemente influenciado por las condiciones atmosféricas (Bakker *et al*, 2001; Chuvienco 2002).
- Sensores activos: Este sistema tiene la capacidad de emitir y controlar el haz energético, mide la cantidad de energía reflejada del objeto. Los sistemas conocidos son el radar (radio detección) y LiDAR (luz detección), el primero

trabaja con la región de microondas y el segundo con luz polarizada (láser) entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (Bakker *et al.*, 2001). Una ventaja es que controlan la señal de iluminación y no son influenciados por las condiciones atmosféricas (Bakker *et al.*, 2001; Chuvieco 2002).

3.3.1 Plataformas de percepción remota

Las plataformas disponibles se encuentran en función de su órbita, se clasifican en dos tipos principales, geosincrónicos o geoestacionarios y heliosincrónicos o polares, estos tienen las siguientes características (Chuvieco, 2002).

- Geosincrónicos o Geoestacionarios: se encuentran colocados en órbitas muy alejadas (36 000 Km) lo que permite sincronizar al movimiento de la tierra y moverse en la misma dirección, son capaces de registrar áreas de cobertura (1/3 de la superficie de la tierra) cada 30 minutos y observando siempre la misma zona. Sus desventajas se relacionan a dificultades técnicas y económicas debido a la órbita alta y la cobertura en los polos reducida. Su principal uso son las telecomunicaciones y la climatología (Chuvieco, 2002). En estos se encuentran los satélites Meteosat, GOMS, Insat o GOES. Por ejemplo la resolución espacial de Meteosat en su banda 1 es de 2.5 Km. x 2.5 Km. y en sus bandas 2 y 3 de 5.0 Km. x 5.0 Km. (Bekker *et al*, 2004).
- Heliosincrónicos: se encuentran colocados en órbitas cercanas con una inclinación del ángulo entre 98 y 99 grados. Pasa por el ecuador al mismo tiempo solar cada día, lo que lo hace útil para análisis comparativos de datos multitemporales (Bekker *et al*, 2004, Chuvieco,2002). Este tipo de plataformas tienen la facilidad tecnológica y económica para obtener un desempeño adecuado de los sensores, pero su área de cobertura es baja y existe una pérdida de datos por efectos climatológicos (ej. nubosidad). Las plataformas que se encuentran entre este tipo de satélites son: Landsat, TERRA, SPOT e IRS (Bekker *et al*, 2004).

Los sensores son capaces de medir la energía radiada o reflectada por un objeto situado a grandes distancias del sensor, la energía sensada es procesada como una

señal eléctrica con una fuerza proporcional a la cantidad de energía emitida, la cual es registrada y transmitida en forma digital (serie de números), presentando diferentes niveles de luminosidad (Smith, 2001).

3.4 Tipos de imágenes

Existen dos tipos básicos de imágenes de satélite, las pancromáticas y las multiespectrales. Las *imágenes pancromáticas* son adquiridas por sensores digitales que miden la reflectancia de energía en una amplia proporción pero única del espectro electromagnético (bandas). Para la mayoría de los sensores pancromáticos, esta banda abarca desde la parte visible hasta el infrarrojo cercano del espectro y se presentan como imágenes en blanco y negro (*Bussiness Image Group and Spot Image Corporation*, 1999).

Las *imágenes multiespectrales* son adquiridas por sensores digitales, que miden la reflectancia en varias bandas (verdes, rojas, azules, infrarrojas y térmicas). Por lo general, se cuentan con dos detectores separados y alineados que miden la energía en partes diferentes de la misma longitud de línea. Una vez medida la energía, los valores de reflectancia se combinan para crear imágenes a falso color (FC). Los satélites de sensores remotos multiespectrales actuales miden la reflectancia de tres a siete bandas diferentes al mismo tiempo (*Bussiness Image Group and Spot Image Corporation*, 1999; Smith, 2001).

La elección de la imagen se basa específicamente en los objetivos que se persiguen en un proyecto determinado, como es mencionado a continuación (*Bussiness Image Group and Spot Image Corporation*, 1999):

Imágenes pancromáticas

- Localizar, identificar y medir características de superficie y objetos sobre ella; primero por su apariencia física.
- Identificar con representación precisa las localizaciones de construcciones humanas.
- Actualizar elementos físicos sobre mapas existentes.

- Delinear los límites de la tierra y ambientes acuáticos.
- Identificar y cuantificar los crecimientos urbanos y sus desarrollos.
- Derivar modelos digitales de elevación del terreno en forma precisa.
- Clasificar los usos de tierra.

Imágenes multiespectrales

- Localizar, diferenciar e identificar características de la superficie terrestre, mediante características menos obvias como: el contenido de minerales, contenido de humedad, especies vegetales, contenidos de clorofila o propiedades químicas.
- Detectar el “estrés” o salud en la vegetación, cultivos o bosques.
- Delinear y medir cambios en hábitat naturales y ecosistemas.
- Diferenciar superficies rocosas y suelos mediante su composición y consolidación.
- Delinear humedales.
- Estimar la profundidad de las aguas en zonas costeras.
- Clasificar coberturas de terreno.

Las imágenes digitales de satélite son datos raster, el cual significa que la imagen está compuesta de numerosas y pequeñas unidades, organizados en cuadros de manera matricial o píxeles (“picture element”) que cubren el área total de una escena.

En las imágenes multiespectrales cada píxel tiene un falso color creado por la combinación de escalas de brillo del rojo, verde y azul (RGB: Red, Green y Blue) que corresponden a los números digitales (ND) en tres bandas diferentes. (*Bussiness image group and Spot image corporation*, 1999). Cada píxel tiene información espacial e información espectral, lo que permite identificar visualmente objetos y características de la superficie por apariencia física, así como establecer valores de reflectancia a partir de los ND. Las tablas 10 y 11 presentan los tipos de imágenes multiespectrales según la plataforma, así como el tipo de banda que manejan.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.

Tabla 10 Tipo de imágenes multispectrales y número de bandas

Plataforma y año de lanzamiento.	Tamaño de la celda	Tamaño de la imagen	Número de bandas espectrales	Rango de las bandas visible (µm)	Rango de la banda Infrarrojo Cercano (µm)
Ikonos-2 VNIR 1999	4 m	11 x 11 Km	4	B 0.45 – 0.52 G 0.52 – 0.60 R 0.63 -0.69	0.76 – 0.90
TERRA (ASTER) (EOS-AM-1) 1999	15 m (Vis, Nir) 30 m (MIR) 90 m (TIR)	60 x 60 Km	14	G 0.52 – 0.60 R 0.63-0.69	0.76-0.86
SPOT 4 HRVIR (XS) 1999	20 m	60 x 60 Km	4	G 0.50-0.59 R 0.61 -0.68	0.79-0.89
SPOT 1, 2, 3 HRV (XS) 1986	20 m	60 x 60 Km	3	G 0.50-0.59 R 0.61 -0.68	0.79-0.89
IRS-1C, 1D LISS III 1995	23.6 m 70.8 m (MIR)	142 x 142 Km 70 x 70 Km (Pan)	3	G 0.52 -0.59 R 0.62 -0.68	0.75-0.86
Landsat 7 ETM+ 1982	30 m	185 x 170 Km	7	B 0.45-0.515 G 0.52 -0.60 R 0.63 -0.69	0.75-0.90
Landsat 4 , 5 TM 1982	30 m	185 x 170 Km	5	B 0.45-0.515 G 0.52 -0.60 R 0.63 -0.69X	0.76-0.90
IRS-1A, 1B LISS I, II	36.25 m (LISII) 72.5 m (LISS 1)	148 x 148 Km	4	B 0.45-0.52 G 0.52-0.60 R 0.63-0.69	0.77-0.86
Landsat 4, 5 MSS 1982	79 m	185 x 185 Km	4	G 0.5-0.6 R 0.6-0.7	0.7-0.8 0.8-0.9
IRS-1C, 1D WiFS 1995	189 m	810 x 810 Km	2	R 0.62-0.68	0.77-0.86

Fuente: Smith, 2001

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.

Tabla 11 Tipos de imágenes multiespectrales y el rango del infrarrojo

Plataforma y año de lanzamiento.	Rango de las Bandas Medio Infrarrojo (mm)	Rango de Banda (mm)	Rango de Banda PAN (mm)	Tamaño de Celda	Intervalo Nominal de re-visita
Ikonos-2 VNIR 1999	Ninguna	Ninguna	0.45 – 0.90 B, G, R, NIR	1 m	11 días (2.9 días ⁺)
Terra (EOS-AM-1) 1999	1.60 – 1.70 2.145 – 2.185 2.185 – 2.225 2.235 -2.285 2.295 – 2.365 2.36 – 2.43	8.125 – 8.475 8.4575– 8.825 8.925-9.275 10.25-10.95 10.95-11.65	Ninguna	X	16 días
SPOT 4 HRVIR (XS) 1999	1.58 – 1.75	Ninguna	0.61- 0.68 R	10 m	26 días (5 días ⁺)
SPOT 1, 2, 3 HRV (XS) 1986	Ninguno	Ninguno	0.51- 0.73 G, R	10 m	26 días (5 días ⁺)
IRS-1C, 1D LISS III 1995	1.55-1.70	Ninguno	0.50- 0.75 G, R	5.8 m	24 días (5 días Pan ⁺)
Landsat 7 ETM+ 1982	1.55-1.75 2.09 -2.35	10.40 – 12.50	Ninguno	X	16 días
Landsat 4 , 5 TM 1982	1.55 -1.75 2.08-2.35	10.40 – 12.50	ninguno	X	16 días
IRS-1A, 1B LISS I, II	Ninguno	Ninguno	Ninguno	X	22 días
Landsat 4, 5 MSS 1982	Ninguno	Ninguno	Ninguno	X	16 días
IRS-1C, 1D WiFS 1995	Ninguno	Ninguno	Ninguno	X	5 días

Fuente: Smith, 2001

Como se menciona anteriormente, la información disponible en las imágenes se encuentran en formato digital, lo que permite que la adquisición de dicha información sea rápida. Otra ventaja es que el costo de una imagen no procesada es más bajo, comparando con el costo de una fotografía aérea por kilómetro cuadrado, además de no estar sujeta a límites políticos o barreras geográficas y permitir tener imágenes actuales de una zona.

3.5 Tipo de clasificaciones

Mediante el uso de la PR se puede establecer una clasificación por medio de la similitud espectral usando la medida de la distancia entre los puntos del espacio espectral, es decir, se identifica a cada cubierta a partir de un patrón visual, considerando las siguientes fases: definición de las categorías, agrupación de píxeles semejantes y comprobación y verificación de resultados (Chuvieco, 2002). Esto permite tener una mayor confiabilidad en los resultados además de tener una cuantificación más exacta de las áreas de estudio. La clasificación se puede obtener mediante una clasificación supervisada y no supervisada, las cuales se describen a continuación.

➤ Clasificación supervisada

Esta clasificación se hace a partir de la designación de áreas de entrenamiento en la imagen, en donde cada una de estas áreas representa un material de superficie conocido, es decir, se parte de un conocimiento previo de la zona de estudio y, por lo tanto, una clase espectral deseada. Durante la clasificación se calcula un patrón promedio espectral para cada área de entrenamiento que permite hacer una discriminación y separar las firmas espectrales similares (Chuvieco, 2002).

➤ Clasificación no supervisada

No requiere ningún tipo de conocimiento del área de estudio, se deriva de una serie de agrupamientos (clusters), es decir; píxeles con un comportamiento espectral homogéneo, lo que permite hacer una clasificación espectral y, en consecuencia, identificar zonas con base en tonos, textura, disposición, etc., para después asignar a una de las clases temáticas establecidas (Chuvieco, 2002).

3.6 Aplicaciones de la percepción remota para identificar derrames

Como se ha observado en las secciones anteriores, la PR permite el uso de información adquirida a distancia a través de sensores portados en aeronaves o satélites. Esta información se encuentra en imágenes donde la información esta en forma analógica o digital, la cual una vez cambiada a un formato físico permite aplicar algoritmos que representen de manera continua o discreta la escena. Las imágenes obtenidas por estos sensores miden la energía en una zona del espectro electromagnético muy específica. Así, el valor de reflectancia obtenida a partir de la conversión de los ND, provee una representación muy precisa de la superficie como forma, tamaño, color y los aspectos visuales (*Bussiness Image Group and Spot Image Corporation, 1999*).

Las medidas de reflectancia representan la firma espectral de cada uno de los objetos en la superficie, por tanto ayudan a revelar características propias como el contenido mineral de las rocas, la humedad del suelo, la salud de la vegetación, la composición física de los edificios y otros detalles invisibles mediante técnicas convencionales. Estas propiedades analizadas mediante el uso de PR se conocen como el contenido espectral de una imagen de satélite, y en el caso específico de este tema de tesis, se ha usado para localizar sitios contaminados con petróleo.

3.6.1 Sitios contaminados con petróleo

De acuerdo con Murguía y Martínez (1991) y SEMARNAT (1996), las propiedades físicas del suelo más afectadas por derrames de hidrocarburos es la estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados, aumento de la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico. Cabe señalar, que la persistencia de sustancias tóxicas esta en función del tamaño de la partícula del estrato, ya que entre más pequeña mayor área superficial para la absorción de productos químicos.

Autores como Clutis (1989), Ellis et al. (2001), Kühn y Höring (1996) confirmaron que la firma espectral que caracteriza los hidrocarburos se encuentra en el Infrarrojo cercano y medio, entre 1.73 a 2.31 μm . Esta región del espectro puede ser cubierta mediante la plataforma Landsat a través de las bandas 5 (1.55 – 1.75 μm) y 7 (2.08-2.35 μm), las cuales corresponden al infrarrojo cercano y medio. La figura 15 muestra el espectro del hidrocarburo en el suelo.

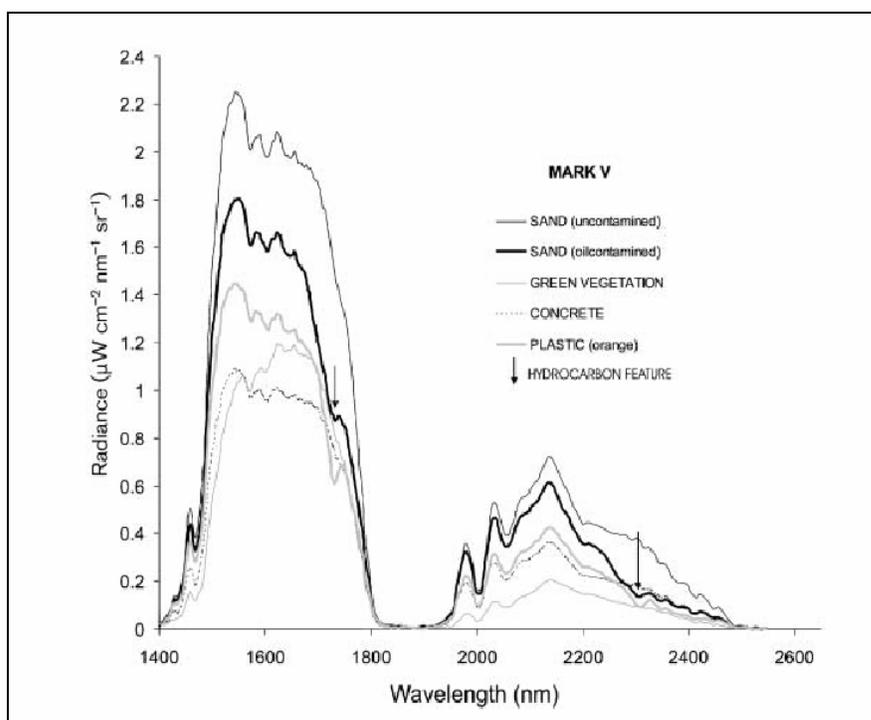


Figura 16 Espectro del hidrocarburo
Fuente: Kühn et al., 1996

Las reacciones de la microfiltración de hidrocarburos pueden provocar en la superficie de los suelos alteraciones químicas de los minerales, presentes, los cuales se traducen en un aumento en el contenido de arcillas y carbonatos en el infrarrojo cercano. En algunos suelos, se llega a presentar un incremento del contenido de contenido de hierro férrico (Fe_2O) (Yupnpeng Wang, Xuan Ding, 2000).

De acuerdo con SEMARNAT (1996), las propiedades químicas más afectadas en el suelo es el aumento de carbono orgánico ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable, lo que también genera una disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos, así como favorece el aumento de manganeso y hierro intercambiable y de fósforo disponible. Puesto que la arcilla y los carbonatos presentan una alta absorción en el infrarrojo medio, al aumentar el contenido de estos minerales arcillosos y carbonatos se tiene una alta absorción de la energía electromagnética lo que causa una disminución de la reflectancia apreciable en la banda 7 de Landsat (Yupnpeng Wang, Xuan Ding, 2000). Asimismo, la relación entre las bandas 5 y 7 de Landsat (TM y ETM+) muestra las posibles variaciones del contenido de minerales arcillosos y carbonatados en los suelos más limpios. Wang y Ding (2000) han propuesto la relación de bandas 5/7 como la que mejor discrimina zonas con arcillas y carbonatos.

En el caso de zonas con hierro ferroso y férrico, Wang y Ding (2000) proponen usar las bandas 1, 2 y 3 de Landsat (TM y ETM+) mediante las relaciones 1/3 y 2/3. Las relaciones de las bandas 1 y 3 de Landsat de la forma 1/3 tiene una intervalo promedio de 0.613 a 0.854 μm , y el hierro férroso de 0.67a 0.83 μm (Wang y Ding, 2000).

Otro manera de encontrar las alteraciones por el contenido de hierro 3^+ en suelos con hidrocarburo es aplicando las bandas 1, 3, 4, 5 y 7 de Lansat TM o ETM+. Las zonas contaminadas se localizan empleando la siguiente combinación [3/1 (R), 4/3 (G), 7/5 (B)], donde se obtiene mediante la interpretación de FC de matices de verde y amarillos, los cuales representan coberturas de vegetación, mientras que el color naranja-magenta muestra alteraciones de suelos por hidrocarburos, el negro-azul indica agua y el azul-grisáceo indica zona urbanas (Almeida – Filho, 2002).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Como resultando al aplicar los estudios realizados por Wang y Ding (2000) y Almeida – Filho (2002), se concluyó que era importante desarrollar una metodología propia para distinguir zonas contaminadas con hidrocarburos, con las características del petróleo mexicano, rico en azufre, metales y asfaltenos (IMP, 2006). La metodología comprende el uso de algoritmos para distinguir zonas contaminadas con hidrocarburos (crudo), vegetación y cuerpos de agua. Las imágenes que se utilizaron para llevar a cabo la metodología para la detección de suelos contaminados por hidrocarburos son del tipo multiespectral cubriendo el visible (VIS), Infrarrojo cercano y medio. Las imágenes fueron de la plataforma Landsat 7 (sensor ETM+), estas imágenes corresponden a la refinería de Minatitlán en Veracruz, la refinería Francisco I. Madero en Tampico y la refinería 18 de Marzo en el Distrito Federal.

4 Modelos de migración en subsuelo

Los efectos tóxicos del petróleo dependen de la cantidad y composición, frecuencia y tiempo de exposición, así como del estado físico del derrame, características del sitio, variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno, el uso de dispersantes químicos, la sensibilidad de la biota del sitio, entre otros. Todo lo anterior es clave para determinar la manera en que el hidrocarburo se moverá a través del suelo contaminando no solo este medio sino los acuíferos presentes.

Los modelos de migración en subsuelo (MMS) son herramientas matemáticas que simulan el flujo de contaminantes a través del subsuelo. Su aplicación requiere el conocimiento previo de aspectos geológicos, como la estratigrafía vertical (las capas del suelo, arena y rocas que se encuentran en el sitio), entre otros.

El subsuelo está dividido en dos zonas, la no saturada (zona vadosa o de aireación) y la saturada. La zona no saturada se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático, y a su vez, se subdivide en tres zonas: humedad del suelo la cual se encuentra inmediatamente debajo de la superficie, intermedia la cual esta entre la humedad del suelo y la franja capilar, donde el agua que se encuentra en esta zona se le conoce como vadosa y la franja capilar que ocupa la porción del fondo de la zona de aireación. La zona saturada se encuentra limitada en su parte superior por el nivel freático, los poros se encuentran saturados de agua, a lo que se le conoce como agua subterránea o acuífero (Bedient *et al.*, 1994). Geológicamente, un acuífero es permeable cuando puede transmitir significativamente agua bajo gradientes hidráulicos normales (Freeze y Cherry, 1979).

Para poder llevar a cabo la modelación del transporte de cualquier contaminante en el subsuelo se debe comprender en primer lugar el movimiento del agua en este. En 1856, Henry Darcy determinó las leyes de flujo a través de suelo arenoso, teniendo como resultado una ecuación matemática que permite conocer el comportamiento del agua en función de la velocidad (V), la conductividad hidráulica (K) y el gradiente hidráulico

(i) (Rodarte, 1994; Freeze y Cherry, 1979), matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$V = -Ki \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

V = Velocidad [m/s]

K = Conductividad Hidráulica [m/s]

I = Gradiente hidráulico [adimensional]

Debido a que cualquier cambio de flujo en el subsuelo se mueve en tres dimensiones se requiere dimensionar la ecuación de Darcy en x, y z, y para ello se aplica la ecuación de continuidad (ecuación 8), para condiciones no estacionarias tanto para un acuífero libre y uno confinado (Rodarte, 1994)

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

ρ = densidad del agua [ML⁻³]

$v_{x,y,z}$ = descarga específica en dirección longitudinal, lateral y vertical [LT⁻¹]

n = porosidad del medio poroso

t = tiempo [T]

Otro factor importante a considerar es el cambio de masa del agua debido a la expansión o compresión (cambio en la densidad) o por la compactación del medio poroso (cambio de la porosidad). De esta manera la ecuación 8 se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde expandiendo los términos del lado izquierdo de $\frac{\partial \rho}{\partial x}$, $\frac{\partial \rho}{\partial y}$, $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ y dividiendo por la densidad del fluido, la ley de Darcy (ec. 7) se modifica de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 10})$$

La ecuación 10 es una ecuación diferencial de segundo orden en tres dimensiones que permite modelar el comportamiento del agua en el subsuelo. Para ello, se requiere dar condiciones de frontera y una condición inicial, ya sea para un acuífero o un pozo, K y S, respectivamente (Rodarte, 1994).

Si el material del acuífero es homogéneo e isotrópico¹, se puede dividir la ecuación 10 por la conductividad hidráulica de éste.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde K es la conductividad hidráulica en las tres dimensiones

En el caso de la zona no saturada los mecanismos de flujo y transporte son más complejos, debido a los efectos de la fuerza de capilaridad y las características no lineales de suelo. Los poros del suelo se encuentran parcialmente llenos de agua y otra parte con aire. Por tanto, el agua que se encuentra en esta zona se le conoce como agua vadosa y la porosidad esta definida como la suma de los contenidos de agua (Bedient et al., 1994).

$$n = \theta_w + \theta_a \quad (\text{Ec. 12})$$

donde:

n = Porosidad

θ_w = Contenido de agua

En esta zona no saturada, el contenido de humedad es menor que la porosidad del suelo, y la presión es menor que la atmosférica, es decir, la carga de presión es menor a cero. Por lo tanto, la conductividad hidráulica (K) y el contenido de agua (θ_w) están en

¹ Isotrópico tiene la propiedad de transmitir igualmente en todas direcciones cualquier acción recibida en un punto de su masa.

función de la carga de presión (Bedient *et al.*, 1994). La diferencia de presión a través de la interfase agua-aire es llamada presión capilar y ésta en función de la tensión intersticial y la curvatura de radio. La presión capilar en un tubo puede ser determinada por el peso de la columna de agua en el mismo y las fuerzas capilares ascendentes; matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$P = \frac{2\sigma \cos \gamma}{r} \quad (\text{Ec. 13})$$

donde:

σ = Tensión intersticial

r = radio del tubo

γ =Angulo de interfase entre los dos líquidos

4.1 Factores de influencia

Una vez reconocido la complejidad de los mecanismos de flujo y transporte en la zona no saturada, para realizar la modelación del transporte de contaminantes se necesita realizar la caracterización de la zona de estudio a partir de los factores de influencia en el sistema superficial y del subsuelo para conocer el comportamiento en el medio de un agente extraño. Con lo anterior, se implementan y desarrollan metodologías que faciliten la visualización del movimiento de un contaminante a través del tiempo, lo que permitirá que si existen poblaciones cerca de la zona de afectación se implementen programas de emergencias. La ejecución de estos programas servirá para salvaguardar la integridad de los pobladores y, en caso de una emergencia mayor, poder implementar acciones complementarias como refugios, rutas evacuaciones, etc. (Volke y Velasco, 2002).

En el caso de los contaminantes orgánicos específicamente de hidrocarburos (petróleo crudo) en el subsuelo, su movilidad en el subsuelo está en función de sus características físicas y químicas, pero además, de las características del medio donde se encuentra. Por lo que las variables principales que se establecen en el sistema superficial para la caracterización de un sitio contaminado son:

a) Contaminante

Las características o parámetros determinantes de los hidrocarburos que influyen en el transporte de contaminantes en el suelo son la densidad, presión de vapor, coeficiente de distribución de suelo, polaridad, electronegatividad, hidrofobicidad, solubilidad en agua, coeficiente de distribución agua-suelo/sedimento (K_d) (Volke y Velasco, 2002).

La hidrofobicidad es la característica más importante debido que permite determinar la movilidad, estabilidad, acumulación, bioacumulación y sorción química del hidrocarburo en el suelo (Volke y Velasco, 2002).

b) Clima

Describe las condiciones atmosféricas prevalecientes en un sitio, por lo general se utilizan dos componentes principales la lluvia y la temperatura. Estas variables ayudan a determinar la tasa y el tipo de formación del suelo, distribución de la vegetación y tipo de procesos geomorfológicos, además de formar la base para diferentes clasificaciones de fenómenos naturales (Fitz y Patrick, 1987).

- La temperatura tiene un efecto importante en los suelos, ya que influye en las tasas de reacción, esto es, cada 10 °C la velocidad de reacción del suelo aumenta en un factor de 2 o 3 unidades. También contribuye a la descomposición biológica de la materia orgánica, aumenta la cantidad de humedad que evapora en el suelo y en el desarrollo de vegetación, además de conocer el grado de solubilidad del contaminante en el medio (FitzPatrick, 1987). A partir del aumento de evaporación, la presión de vapor se ve afectada, así al tener un valor bajo (10^{-4} atm) la fracción de un compuesto orgánico pasa rápidamente al fase de vapor (Jury, 1989). Elevadas temperaturas, también provocan la precipitación de sales y el encostramiento de la superficie de los suelos (FitzPatrick, 1987).
- Lluvia. Permite que los suelos permanezcan húmedos; esta variable es importante debido a que tiene influencia en el clima, tipo de vegetación y la presión de vapor del

contaminante (FitzPatrick, 1987). También favorece los procesos de velocidad y lixiviación de las sustancias contaminantes en el suelo (Jury, 1989), a partir de la solubilidad del contaminante y las condiciones y tipo de suelo que se presentan en el sitio.

c) Vegetación

Es un amortiguador en la temperatura y la humedad del suelo; se correlaciona con el contenido de materia orgánica y tiene un fuerte impacto en la evapotranspiración (FitzPatrick, 1987).

d) Suelo

Es un recurso natural no renovable que tiene entre sus funciones ser un medio filtrante que permite la recarga de los mantos acuíferos y protección de éstos. Además de acuerdo a su textura, puede prevenir que un contaminante alcance las aguas subterráneas; por ejemplo, en texturas gruesas (suelos arenosos y grava) la lixiviación es más rápida que en texturas finas (arcillas, limos). Por ello es importante conocer las características físicas del suelo como permeabilidad, conductividad hidráulica, estructura del suelo, etc.

En cuanto a las afectaciones que provocan los derrames de hidrocarburos en el suelo Elías Murguía y Martínez (1991 en SEMARNAT, 1996) concluyeron que las propiedades físicas más afectadas son la misma estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados y al aumento de la retención del agua en la capa superficial. Las propiedades químicas afectadas son el aumento de carbono orgánico ya que el 75% del carbono del petróleo es oxidable, disminución del pH debido a la acumulación de carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos, y aumento del manganeso, hierro intercambiable y fósforo disponible.

e) Usos de Suelo

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

Conocer el uso de suelo en el que se encuentra la zona contaminada es vital para establecer las acciones a tomar al presentarse un derrame y para ubicar, a partir de la normatividad vigente, los límites máximos permisibles para las concentraciones de hidrocarburos que se puedan tener en el suelo sin riesgo o daño a la salud y al medio ambiente (Volke y Velasco, 2002).

Las categorías de los usos de suelo se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 12 Usos de Suelo

Uso de suelo	Características
<i>Zona agrícola, forestal, suelo natural</i>	El suelo agrícola, forestal o natural presenta concentraciones endémicas de los diversos elementos o sustancias químicas. Las concentraciones asociadas a esta clasificación tendrán como objetivo evitar la transferencia y la acumulación de contaminantes a través de la cadena alimenticia y/o daños al ambiente.
<i>Zona Residencial</i>	En zonas habitacionales y de usos intensivos, las principales características son la presencia de niños y personas de la tercera edad, así como la presencia de una superficie con recubrimiento (asfalto o concreto)
<i>Zona Industrial / comercial</i>	Zonas con ausencia de niños y personas de la tercera edad, y con superficie recubierta.

(Volke y Velasco, 2002).

f) Estratificación de capas

La estratificación de capas permite conocer el tipo de materiales que se encuentran en el subsuelo (arcilla, arenas, limos, etc.), este factor ayuda a conocer el comportamiento de la migración de cualquier contaminante. Asimismo, se puede establecer la velocidad, volumen y tiempo en el que una pluma contaminante puede llegar a impactar un acuífero.

g) Topografía

La topografía es la representación de la elevación del terreno que permite en el caso de un derrame indicar si existe alguna depresión o zona que favorezca la migración del contaminante.

h) Hidrología Superficial

La hidrología superficial está conformada por todos los cuerpos de agua como lagos, lagunas y ríos. En general, el agua superficial constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua permitiendo el desarrollo de diferentes sistemas ambientales y el impulso de diversas actividades humanas. Esto obliga a identificar el riesgo a ser contaminados (Aparicio, 2003).

4.2 Transporte de contaminantes

El transporte de contaminantes está en función de los procesos de migración así como del comportamiento de contaminantes; tanto en sus características físicas, químicas y biológicas (Bedient et al, 1994). El transporte y los principales procesos de transformación en contaminantes orgánicos (figura 17) están dados por la dispersión, advección, adsorción y las transformaciones químicas y biológicas que tienen lugar (Bonazountas and Kallidromitou, 1993).

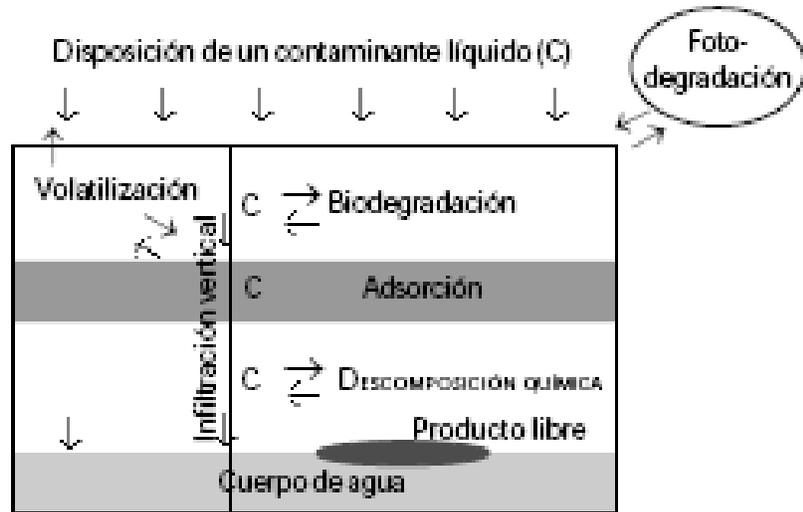


Figura 17
Figura 17 Principales procesos que influyen en el transporte de un contaminante en el subsuelo
Fuente: Eweis et al. 1998

La ecuación general de transporte es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial C_s}{\partial t} + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_r \quad (\text{Ec. 14})$$

donde:

D = Coeficiente de dispersión hidrodinámica

V = Velocidad lineal del agua subterránea

ρ_b = Densidad aparente del suelo

n = Porosidad

C = Concentración de la solución

C_s = Concentración adsorbida

t = Tiempo

$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_r$ = Término para degradación

a) Dispersión hidrodinámica

Los contaminantes solubles son transportados por el medio poroso saturado por el proceso advección, esto es; a una velocidad equivalente a la del movimiento del

agua subterránea. Por su parte, las sustancias disueltas son interceptadas por las partículas sólidas, desviando su trayectoria hacia los espacios vacíos, donde se provoca una dispersión mecánica del agua y de los contaminantes presentes (Bedient et al., 1994).

El movimiento de dispersión produce una estela o pluma de contaminación que se va expandiendo en el subsuelo a favor del sentido del flujo del agua subterránea, de mayor a menor gradiente hidráulico (Soárez, 1999). A nivel microscópico, se produce también un proceso de difusión molecular, en el cual los solutos son transportados debido a variaciones de concentración entre las fases fluidas (Soárez, 1999). El coeficiente de difusión en el fluido se expresa a partir de la primera Ley de Fick:

$$F = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{(Ec. 15)}$$

donde:

F = Cantidad de masa de una sustancia que pasa por difusión a través de una sección dada por unidad de tiempo.

c = Concentración del soluto

$\frac{dc}{dx}$ = Gradiente de concentración

Para sistemas donde la concentración varía con el tiempo, se aplica la segunda ley de Fick:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad \text{(Ec. 16)}$$

Adicionalmente, la difusión en medios porosos, presenta un recorrido más complejo por lo cual se debe emplear el coeficiente de difusión efectiva D:

$$D = w \cdot D \quad \text{(Ec. 17)}$$

Donde w es un coeficiente empírico que considera el efecto de la fase sólida del medio poroso en la difusión ($w < 1$ predominando los valores 0.5 a 0.01) y D es el coeficiente de difusión molecular.

Finalmente, la dispersión hidrodinámica engloba la dispersión del frente de soluto debido a la difusión molecular y a la dispersión mecánica. Por tanto, el coeficiente de dispersión hidrodinámica mide la dispersión de una sustancia que fluye debido a la suma de la difusión y la dispersión, en forma longitudinal y transversal (Soárez, 1999)

$$D_L = A_L V_e + D^* \quad (\text{Longitudinal}) \quad (\text{Ec. 18})$$

$$D_T = A_T V_e + D^* \quad (\text{Transversal}) \quad (\text{Ec. 19})$$

donde:

D_L = Coeficiente de dispersión longitudinal

D_T = Coeficiente de dispersión transversal

A_L = Dispersión longitudinal

A_T = Dispersión transversal

V_e = Velocidad eficaz $V_e = \frac{K * i}{m_e}$

D^* = Coeficiente de difusión molecular

Cabe mencionar que en suelos con conductividad hidráulica alta el mecanismo predominante de transporte es por dispersión mecánica, mientras que en suelos de baja conductividad predomina la difusión molecular (Soárez, 1999).

b) Adsorción, Sorción y Absorción.

Otro elemento importante de la ecuación general de transporte (ec. 14) son los procesos de sorción, adsorción y absorción. La sorción se refiere a la adhesión de iones o moléculas a superficies o interfases. El proceso de transferencia tiene lugar en diferentes estados físicos: líquido-sólido, sólido-gas, líquido-gas y líquido-líquido, produciendo un incremento en la concentración del contaminante en la superficie o interfase con respecto a la concentración en solución (Adamson, 1982; Fränzele, 1993). La sorción se divide en adsorción cuando se tiene la atracción de un compuesto hacia una superficie sólida, y absorción cuando un contaminante penetra en un sólido. Para la

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

zona superficial, las relaciones suelo-contaminantes se dan mediante ambos procesos de absorción y adsorción. La absorción se da a la relación del soluto con la materia orgánica amorfa o natural o en Líquidos de la Fase No Acuosa (LNAPL) como es el caso del petróleo o la condensada o en polímeros o residuos de combustión, La relación de adsorción se asocia a superficies orgánicas húmedas (hollín) o superficies minerales (cuarzo) y dentro de los microporos o en minerales microporosos (zeolitas) con superficies porosas a saturación de agua < 100 %. Los contaminantes orgánicos que llegan a la zona de aguas subterráneas es debido a la solución del suelo o como fases de líquidos orgánicos que pueden ser inmiscibles en el agua (Ortiz Salinas, 2007).

Los factores que afectan la absorción son: solubilidad, estructura molecular, peso molecular y polaridad.

Los modelos más usados para describir la adsorción y que permiten determinar la concentración del contaminante en el subsuelo y representar los resultados en isothermas de adsorción, se describen enseguida:

- Modelo Lineal pero que hace el modelo lineal, l que es la representación general

$$C_s = K_d C_e \quad (\text{Ec. 20})$$

donde:

C_s = Masa del compuesto adsorbido por la masa del suelo [mg/kg]

K_d = Coeficiente de distribución [L/Kg]

C_e = Concentración del químico en fase líquida [mg/l]

Cuando la isoterma no se comporta en forma lineal se utilizan los siguientes:

- Modelo de Freundlich

$$C_s = K_d C_e^N \quad (\text{Ec. 21})$$

donde :

K_d = Coeficiente de distribución de Freundlich

N = Coeficiente exponente de Freundlich

Para hacer lineal la ecuación se aplican logaritmos y se obtiene la siguiente expresión:

$$\log C_s = \log K_d + N \log C_e \quad (\text{Ec. 22})$$

La pendiente de la gráfica correspondiente es N y la ordenada al origen es $\log K_d$.

➤ Modelo de Langmuir, lo mismo

$$C_s = \frac{aK_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde a es la masa del químico requerido para saturar una unidad de masa de suelo y K_L es la constante de Langmuir. La ecuación 23 corresponde a un modelo de crecimiento limitado, similar a los utilizados para representar una población microbiana dinámica (Knox, 1993). Un método para dar solución a la ecuación 22 es su linealización, la cual se obtiene invirtiendo la expresión.

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{C_e}{a} + \frac{1}{aK_L} \quad (\text{Ec. 24})$$

Estos modelos permiten obtener isotermas de adsorción dependiendo del tipo de sorbente, del químico y del intervalo de concentraciones que se consideren.

En un compuesto químico, una mayor solubilidad permite una mayor movilidad y, por lo tanto, tiene menor probabilidad de ser acumulativo, bioacumulativo, volátil y persistente. Los compuestos orgánicos ligeros como las gasolinas, aceites y petróleo crudo tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea. Los compuestos orgánicos densos, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden moverse en dirección al flujo de agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad (Ortíz Salinas, 2007) L: esto lo copie tal cual dale una manita para que no se vea plagio

4.2.1 Modelo para la evaluación de derrames de hidrocarburos (HSSM)

El modelo aplicado es el Modelo para la Evaluación de Derrames de Hidrocarburos (HSSM *por sus siglas en inglés*) de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (EPA en sus siglas en inglés), esta integrado por tres módulos:

- El modelo de Transporte Cinemático del Contaminante Aceitoso (KOPT)
- Oilens
- El modelo de Estela de Fuente Transitoria tipo Gaussiana (TSPLUME)

El modelo simula el flujo de la fase acuosa de menor densidad que el agua (LNAPL) y el transporte de un compuesto químico del LNAPL desde la zona vadosa hasta la zona saturada (nivel freático). Supone que el contaminante se libera en o debajo de la superficie en cantidad suficiente para formar una fase fluida distinta al agua. En el modelo, se idealiza el sistema de flujo como estable en una región de fuente circular que sobreyazca a un acuífero freático a una profundidad específica (Weaver et al., 1997).

Cabe mencionar que el modelo trata el flujo y transporte en la zona no saturada como unidimensional; por lo tanto, es conservador (EPA,1997) ya que desprecia entre otros el esparcido lateral de contaminantes por fuerzas capilares, el esparcido debido a la heterogeneidad, el efecto del flujo del aire en el transporte y los efectos del gradiente capilar. Esta simplificación causa que las ecuaciones gobernantes lleguen a ser ecuaciones hiperbólicas, que son resueltas por el método de generalizado de características donde se idealiza el borde frontal del LNAPL que se mueve en el suelo como un frente abrupto (Charbenean et al; 1995). De esta manera, de la ecuación general de transporte (Ec. 14) sólo toma en cuenta la dispersión hidrodinámica del sistema.

A continuación se describen cada uno de los módulos.

❖ **Modelo de transporte cinemático del contaminante aceitoso (KOPT)**

El modelo de transporte cinemático del contaminante aceitoso (KOPT, *en sus siglas en inglés*) utiliza las propiedades del suelo (parámetros de la curva de presión capilar) para aproximar la permeabilidad relativa. Adicionalmente, ya que el gradiente capilar tiene un impacto dramático sobre la capacidad de infiltración del suelo, el modelo utiliza el modelo aproximado Green –Ampt (Green y Ampt, 1911), para estimar la fase LNAPL. Lo anterior da como resultado una mejor estimación del flujo en el suelo, bajo una condición de flujo o de encharcamiento de carga constante en la superficie.

En el modelo KOPT, la cantidad de cada fluido se expresa como saturación, S , y se define como la fracción del espacio poroso llenado por un fluido determinado (Weaver et al, 1997).

Tres formas de simulación de un derrame de LNAPL se presentan en el modelo KOPT:

- a) La liberación de un LNAPL puede ocurrir a un caudal conocido para una duración específica.
- b) Volumen conocido de LNAPL en un intervalo especificado a una profundidad especificada.
- c) Especificación de una profundidad constante de encharcamiento con LNAPL para una cierta duración.

❖ **OILENS**

Este modelo simula el esparcido radial de la fase del LNAPL en el nivel freático y la disolución del compuesto químico. Este se basa en tres aproximaciones importantes que son:

- El esparcido del LNAPL que es puramente radial, lo que implica que la inclinación del nivel freático es pequeña, suficiente para ser insignificante para el

movimiento de la lente.

- El espesor se determina únicamente por la flotación (relaciones de Ghyben-Herzberg).
- La forma de la lente está dada por las suposiciones de Dupuit, donde se supone que el flujo es horizontal y que el gradiente se aproximan a la variación de la carga dividida entre la distancia horizontal. La altura de la lente depende de la densidad y viscosidad de la fase LNAPL, las características del derrame y la conductividad hidráulica saturada del sistema (Weaver et al, 1997).

❖ **Módulo de estela de fuente transitoria tipo gaussiana (TSGPLUME).**

El módulo TSGPLUME permite conocer el transporte en el acuífero del compuesto químico a partir de una solución analítica bidimensional promediada verticalmente de la ecuación de advección–dispersión (ver ecuación 13). Dos consideraciones importantes son la condición de frontera para el acuífero y las suposiciones usadas al aplicar el modelo de plano bidimensional (Weaver et al., 1997).

Las condiciones de frontera se sitúan en el borde en el sentido hacia aguas abajo del gradiente de la lente y toman la forma de la distribución de concentración tipo Gaussiana con el pico directamente en el sentido hacia aguas abajo del centro de la lente. La concentración pico de la distribución Gaussiana se ajusta a través del tiempo de manera que el flujo de masa simulado desde la lente se iguala con la que entra al acuífero. El ancho de la distribución Gaussiana permanece constante y se considera que cuatro desviaciones estándar son igual al diámetro constante en el modelo TSGPLUME para la condición de fuente del acuífero (Weaver et al., 1997).

En este módulo se supone que el flujo es unidimensional, de manera que la advección del contaminante se simula únicamente en la dirección longitudinal (X_T) del terreno.

4.3 Aplicación

De acuerdo con lo anterior, el modelo HSSM se basa en las propiedades de migración como son la absorción, advección y de dispersión de un contaminante en el subsuelo. Cada uno de los módulos del modelo requieren las características del subsuelo, del hidrocarburo derramado y el tiempo de exposición para obtener de una forma rápida la trayectoria de un contaminante de fase líquida no acuosa (NAPL, *por sus siglas en inglés*) en el subsuelo. lo cual ayuda a tomar las medidas adecuadas para una pronta acción con la finalidad de disminuir las afectaciones en la zona, es decir que el contaminante no se propague a zonas urbanas, agrícolas, ecológicas, y más importante a cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos. Además de las acciones anteriores, al igual que la percepción remota, permite dar los primeros elementos para la selección de la técnica más adecuada de remediación en el sitio.

5 Metodología

La metodología para poder distinguir zonas contaminadas con hidrocarburos (petróleo crudo) se implementó a partir de la revisión y selección de técnicas de PR y de modelos de migración (Modelo de Evaluación de Derrames de Hidrocarburos, *HSSM*) así como de la normatividad vigente en esta materia.

La metodología se divide en:

- a) Identificación del sitio
- b) Aplicación de las técnicas de percepción remota (PR)
- c) Aplicación del modelo de migración de derrames de hidrocarburos (*HSSM*)
- d) Integración de la información obtenida por la percepción remota y el modelo de migración en un sistema de información geográfica (SIG).

A continuación se describen cada una de las etapas.

- a) Identificación del sitio. Consiste en la ubicación y conocimiento de la zona de estudio. Para ello se realizó una recopilación de las características geográficas (latitud, longitud, vegetación, fisiografía, hidrología, etc), del suelo y del tipo hidrocarburos presentes (características físico químicas), ver tabla 2.
- a) Uso de la percepción remota. Una vez que se tiene la ubicación geográfica del sitio afectado, se aplicó la percepción remota para poder detectar las zonas contaminadas por hidrocarburos a partir de información espectral con el establecimiento de un algoritmo. Asimismo, se discrimino la información asociada a cuerpos de agua, vegetación y construcciones, principalmente para distinguir zonas con presencia de hierro.
- b) Modelo de Migración. De acuerdo con lo mencionado en la sección 4.3, el modelo necesita las características del suelo y del tipo de hidrocarburo que se requiere simular. Cabe señalar que el modelo simula contaminantes de fase

líquida no acuosa (NAPL), así de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (ver sección 2.4.2.3) los hidrocarburos que se deben muestrear en el caso de petróleo crudo son: HTP (hidrocarburos totales del petróleo) y HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos). Las características tanto del suelo como del contaminante permitieron aplicar un modelo de migración para conocer la profundidad alcanzada por el hidrocarburo en el subsuelo, en este caso se simuló el modelo para hidrocarburos HTP.

- c) Sistema de Información Geográfica (SIG). Se analizaron los datos obtenidos en los puntos b y c con el Sistema de Información Geográfica (SIG) para el sitio de estudio, del cual se obtuvo mapas visuales de la zona contaminada, cuantificación del área y el cálculo del volumen de suelo contaminado.

Esta metodología se integra en el Diagrama 1, donde se especifica los pasos seguidos para obtener resultados que permitieran cuantificar el área y el volumen afectados por hidrocarburos en la zona de estudio.

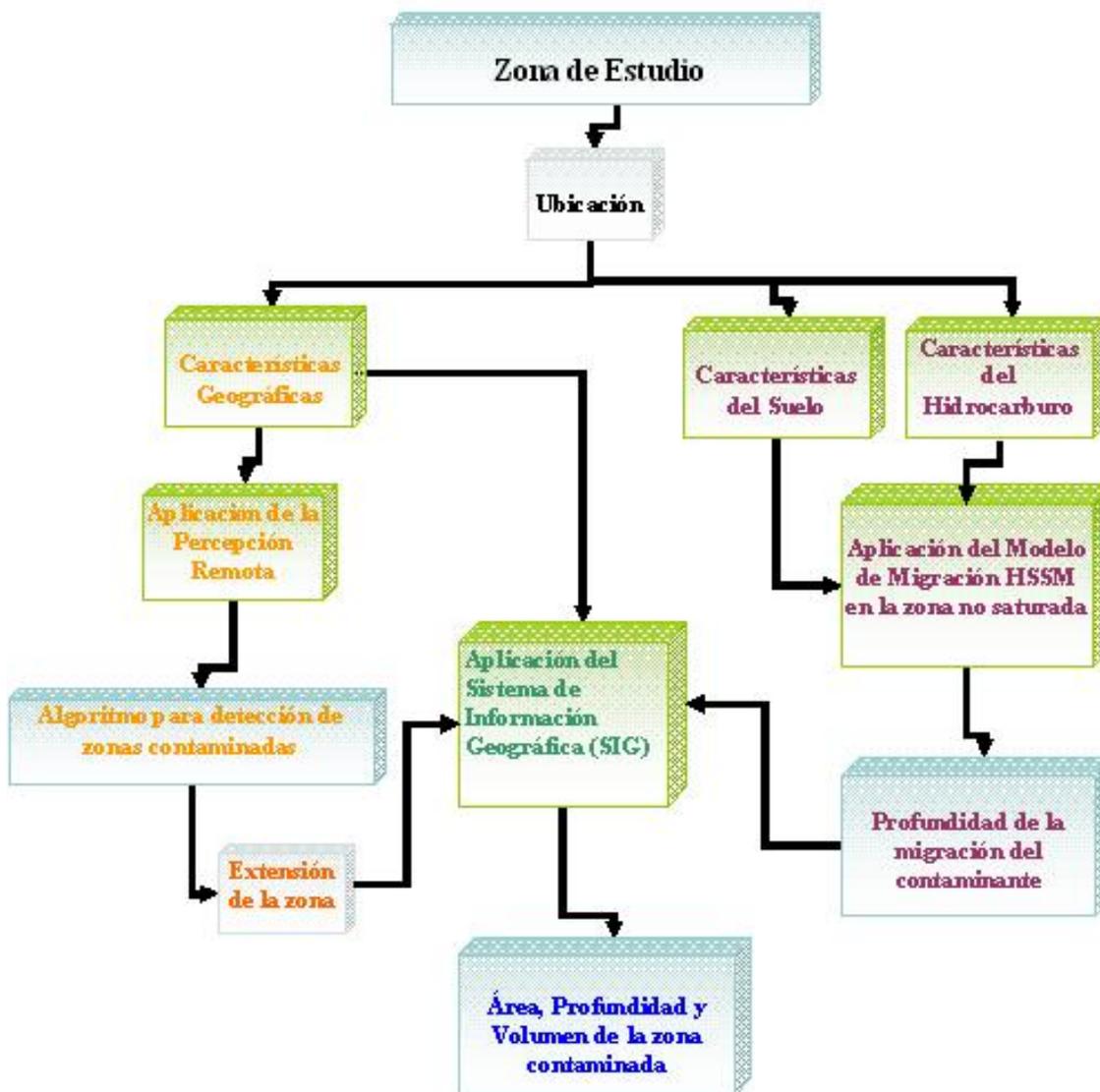


Diagrama 1 Metodología para la determinación de la extensión de un suelo contaminado por hidrocarburos

5.1 Percepción remota

Como se mencionó en la sección 3.5, para llevar a cabo la localización de zonas afectadas por derrames, la PR es una herramienta que permite identificar estos sitios mediante el uso de firmas espectrales, de esta forma se puede diferenciar suelo

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

afectado de suelo no-afectado. Es importante considerar un suelo afectado por hidrocarburo esta sujeto a reacciones químicas, físicas y biológicas por lo que se debe considerar las posibles alteraciones en el suelo y, por lo tanto, variaciones la firma espectral del hidrocarburo (1.73 a 2.31 μm) (Clutis1989; Ellis et al., 2001; Kühn y Höring 1996).

En el estudio se consideraron tres sitios de interés para los cuales se obtuvieron imágenes Landsat TM. La tabla 13 muestra las características de las imágenes utilizadas.

Tabla 13 Características de las imágenes

Área de estudio	Fila, Línea	Zona UTM	Tamaño de pixel	Fecha de toma de la imagen
Refinería de Minatitlan, Estado de Veracruz	23/48	15	30 x 30 m	16 de Marzo de 2000
Refinería Madero, Estado de Tamaulipas	26/45	14	30 x 30 m	18 de Octubre de 2001
Refinería 18 de Marzo, Distrito Federal	28/46	14	30 x 30 m	23 de Octubre de 1999

La imagen de la refinería de Minatitlán se analizó en primer lugar debido a que se trata de un sitio con muestreos de campo disponible, lo que permitiría validar los resultados obtenidos y de esta manera aplicar los resultados a las otras dos refinerías y ver su comportamiento. El procesamiento de la imagen se realizó mediante el software ER Mapper 6.4, donde se aplicaron diferentes algoritmos o combinación de bandas para distinguir un color representativo que indicara zonas contaminadas por hidrocarburos.

Las combinaciones utilizadas se realizaron conforme a los resultados reportados por varios autores al identificar zonas contaminadas por hidrocarburos (sección 3.5). En particular, se usaron las siguientes combinaciones de bandas para la identificación de compuestos específicos como;

- Bandas 5 y 7 para la detección de arcillas y carbonatos

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

- Bandas 1, 3, 4 y 7 para la localización de zonas con contenido de hierro II
- Bandas 4, 3 y 2 y 7, 4 y 2 para hacer la discriminación de coberturas vegetales y cuerpos de agua.

La metodología que se llevó a cabo para las imágenes de satélite, se muestra en el diagrama 2.

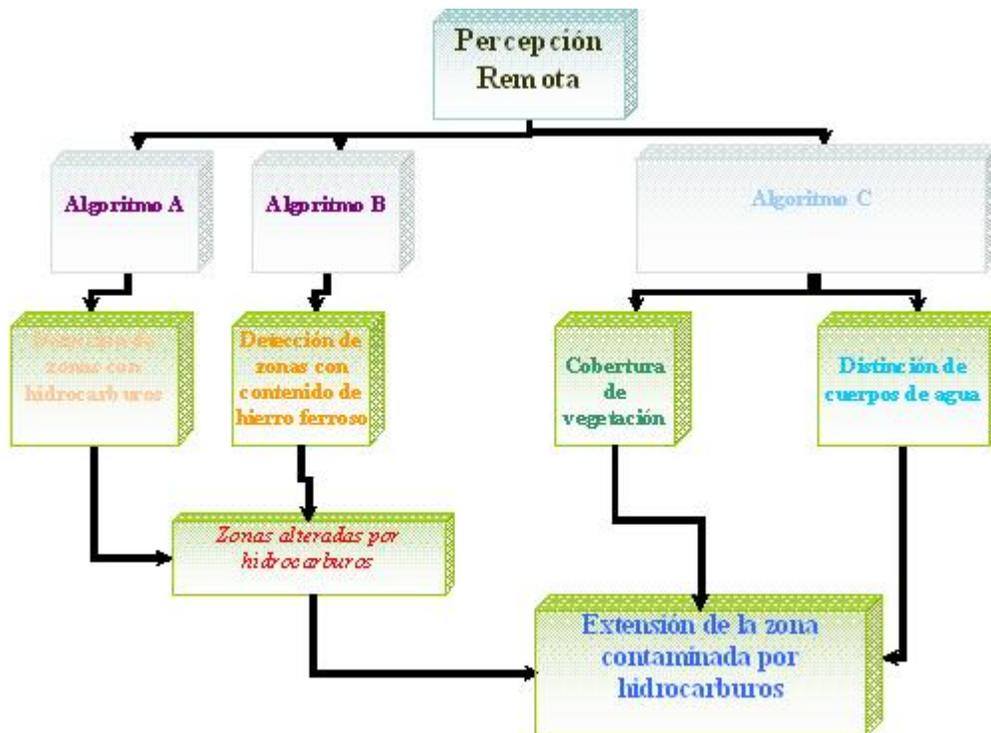


Diagrama 2. Metodología para la aplicación de las técnicas de percepción remota a las imágenes de satélite

Una vez que se identificó el color representativo para las zonas contaminadas mediante la combinación de bandas se llevo acabo la validación a partir de datos de campos (muestreos) de hidrocarburos totales de petróleo (TPH). El algoritmo encontrado para identificar crudo se utilizo para analizar las imágenes de la refinería Francisco I. Madero y en la zona de estudio (exrefinería 18 de Marzo).

5.2 Modelo de migración HSSM en la zona no saturada

Una vez identificada la extensión del derrame, el siguiente paso consistió en aplicar un modelo de migración de contaminantes en la zona no saturada, con la finalidad de establecer el desplazamiento de la pluma contaminante. El modelo empleado fue el de HSSM, el cual requiere conocer las características del suelo y del hidrocarburo (ver Sección 4). El resultado esperado es un panorama general de la interacción entre suelo y contaminante en una sola dimensión (profundidad), para así cuantificar el volumen de suelo contaminado a tratar. El diagrama 3 muestra el proceso requerido por el modelo para establecer la profundidad del contaminante en el subsuelo después de un derrame.

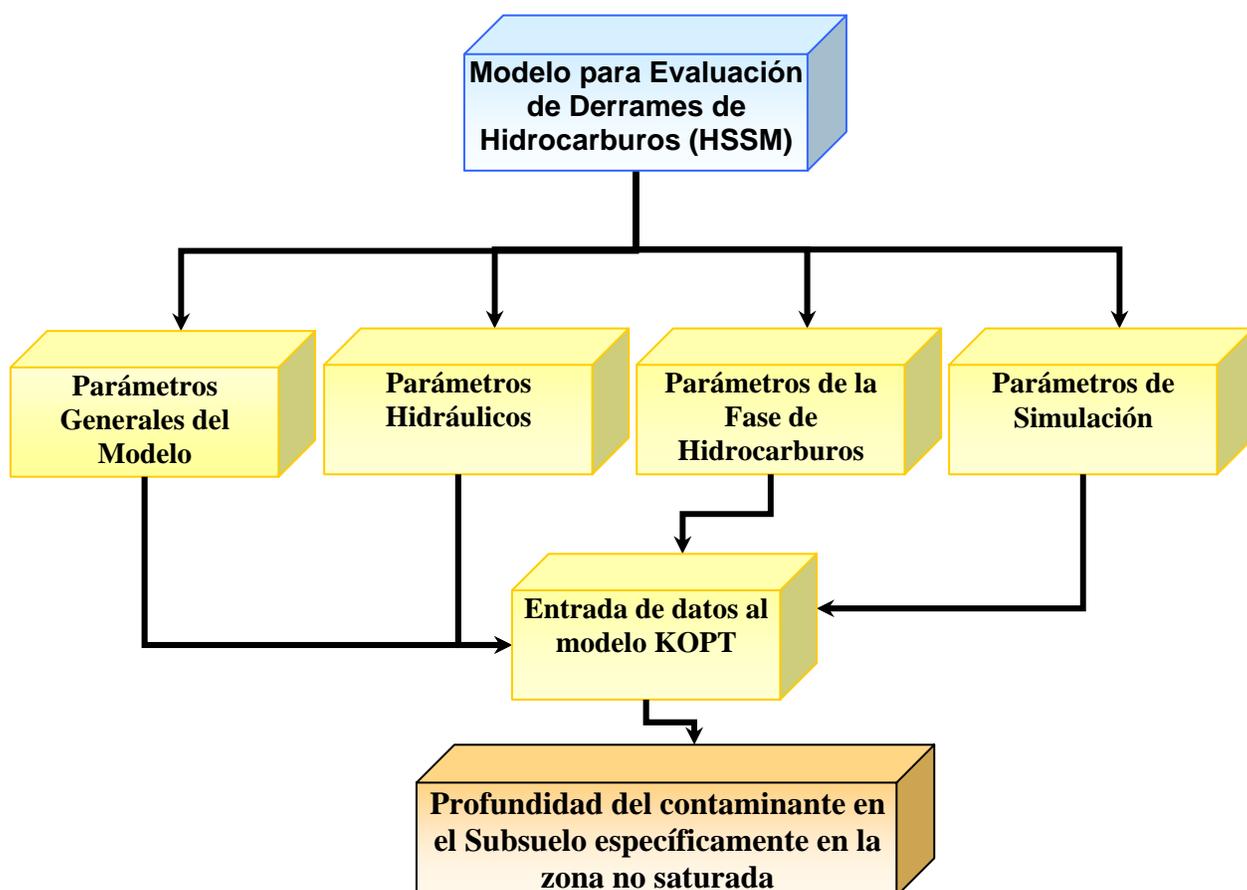


Diagrama 3 Metodología para la aplicación del modelo HSSM

El modelo se aplicó para la exrefinería 18 de Marzo en el Distrito Federal, debido a la gran polémica generada por el cambio de uso de suelo industrial a un uso de suelo recreativo.

5.2.1 Implementación del Sistema de Información Geográfica (SIG)

Según la *National Center for Geographic Information and Analysis* (NCGIA) un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema de hardware y software con procesamientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión (1990). Así, el SIG permite manejar una diversidad de bases de datos como cobertura vegetal, topografía, etc., los cuales ayudan a generar mapas para lograr una mejor visualización de un problema específico en la zona de estudio. Asimismo, se pueden generar conexiones con las bases de datos que permitan mediante multiplicadores, crear otra nueva base de datos con base en los requerimientos del proyecto.

La estructura, funcionamiento y operación de in Sistema de Información Geográfica (SIG), se basa en cuatro funciones:

➤ **Entrada de datos**

Consiste en el acopio y procesamiento de datos provenientes de una diversidad de datos como: imágenes de satélite, fotografías aéreas, fuentes estadísticas, textos, animaciones, etc.

➤ **Archivo y acceso de datos**

Permite un acceso rápido a la base de datos, así como su eficiente utilización y corrección. Para llevar acabo lo anterior se emplea un interfaz con manejadores de base de datos, por ejemplo scripts, lenguajes de programación, etc.

➤ **Manejo y análisis de datos**

Esta función se utiliza para una gran variedad de tareas como agregar información,

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

estimar parámetros, para el uso de modelos de simulación de espacios temporales, análisis de redes, sobreponer vistas y datos, cambiar escalas, manejo de datos geográficos, proyecciones cartográficas (cónicas, cilíndricas y planas), entre otros.

➤ Salida o reporte de datos

Permite obtener la salida de los datos procesados a través de diagramas, gráficos, tablas, mapas, textos, etc.

El SIG que se implementará contiene bases de datos topográficos, estratificación, los resultados del modelo de migración de contaminantes y los resultados obtenidos del procesamiento de la imagen satelital. Esta integración permitirá obtener la visualización de la mancha contaminante, básica para cuantificar el área y volumen que el contaminante esta afectando. El Diagrama 4 representa los pasos a seguir para implementar el SIG y los resultados que se obtendrán.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

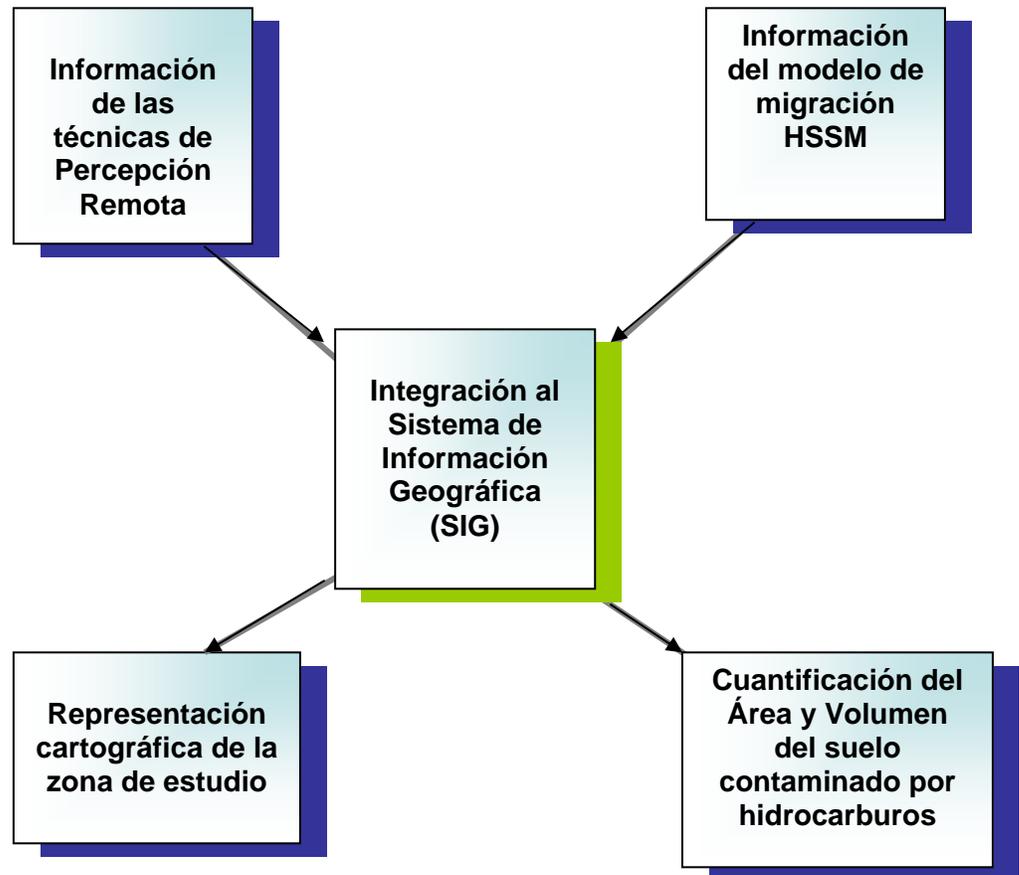


Diagrama 4. Metodología para la aplicación del sistema de información geográfica (SIG)

6 Caso de Estudio

La exrefinería 18 de Marzo se encuentra ubicada en la delegación Azcapotzalco en el Distrito Federal, inició operaciones en el año de 1933 con una superficie de 174 hectáreas, en las cuales, se distribuían 14 unidades de proceso: 11 energéticos y 3 de petroquímica (Pemex, 2006). Su producción inicial fue de 7 500 barriles diarios de combustible, la cual fue aumentando, de manera que para el año de 1991 tenía una producción de 105 000 barriles diarios (Pemex, 2006). Concluyó sus actividades el 18 de Marzo de 1991 por decreto del Gobierno Federal, teniendo como premisa la conservación del medio ambiente y su interrelación con los habitantes de su entorno; para lo cual se desarrolló el Proyecto Integral Azcapotzalco. Este proyecto incluye una terminal de almacenamiento y distribución de crudo y combustibles, un parque recreativo y un parque ecológico (Dueñas, 1999).

6.1 Características Geográficas

➤ Ubicación Geográfica

La delegación Azcapotzalco se encuentra ubicada en la Ciudad de México, sus coordenadas al Norte 19° 31' y al sur 19° 27', al Este 99° 09' y al Oeste 99° 13' con una altitud de 2240 msnm. La delegación Azcapotzalco (figura 18) representa el 2.2% del territorio del Distrito Federal y colinda al Norte con el estado de México, al este con las delegaciones Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc, al sur con las delegaciones Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, y al oeste con el estado de México (INEGI, 2005).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

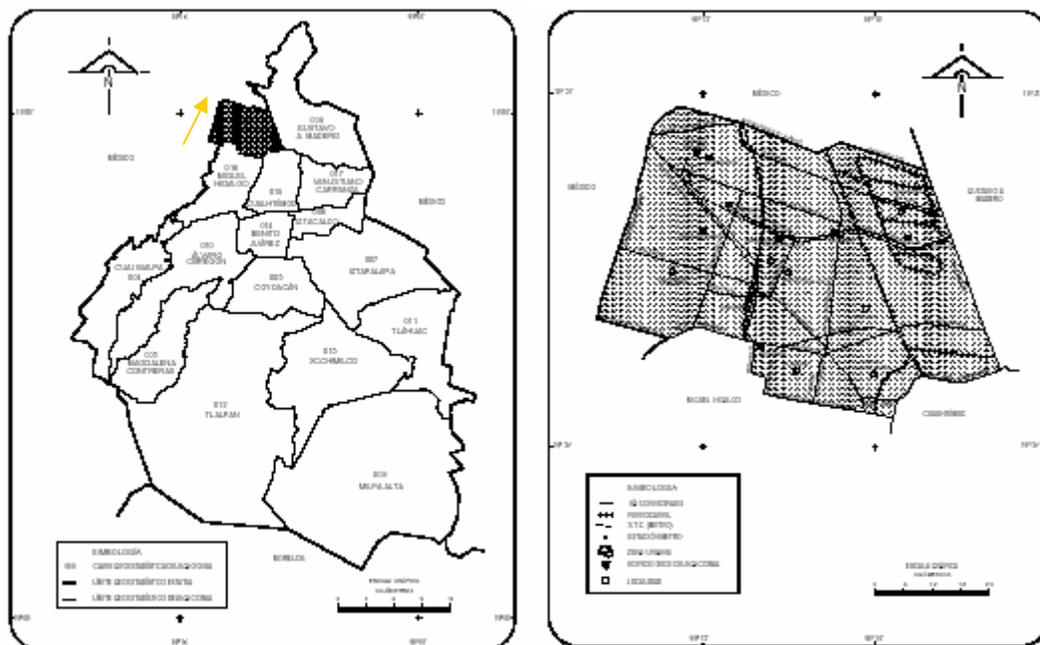


Figura 18 Ubicación geográfica de la delegación Atzacapotzalco
Fuente: INEGI, 2005

Con la expropiación de la industria decretada por el presidente Cárdenas, la refinería que era propiedad de “El Águila”, pasa a ser propiedad de la nación y es administrada por PETROMEX, empresa estatal. La refinería tenía una superficie de 174 hectáreas, contando con catorce unidades de proceso (PEMEX, 2006), distribuidas de la siguiente forma: once correspondientes a energéticos y tres a petroquímica. Además contaba con sectores de laboratorio, servicios auxiliares, estaciones de bombeo, talleres, servicio contra incendios, oficinas administrativas, colonia residencial y campos deportivos. La capacidad de proceso era de 110 mil barriles diarios de petróleo crudo proveniente de Poza Rica, Veracruz (PEMEX, 2006). La figura 19 presenta la ubicación de la exrefinería 18 de Marzo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.

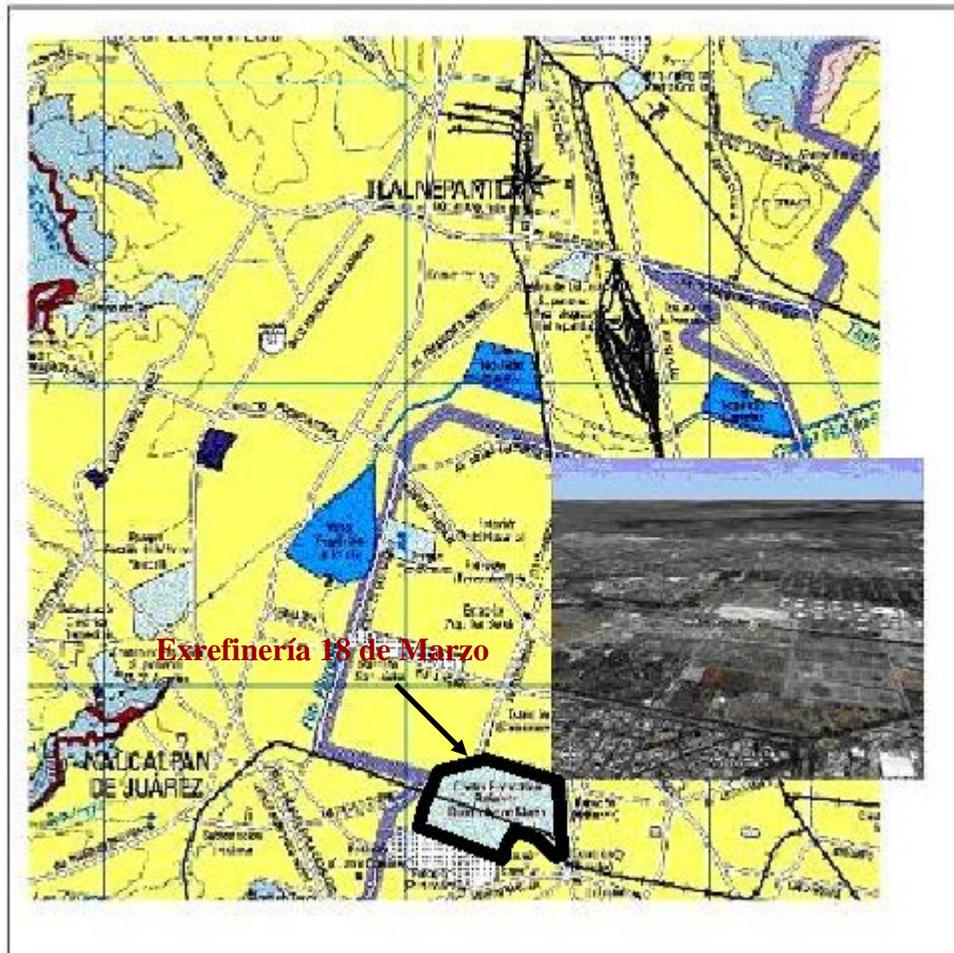


Figura 19 Exrefinería 18 de marzo, Azcapotzalco
Fuente: Google Earth, 2006 y Mapas de México 2006

➤ **Población**

Azcapotzalco cuenta con una población de 441, 008 habitantes (INEGI 2005) que representa el 52.4% de la población total del Distrito Federal. Las localidades principales son Central Rosario, Industrial Vallejo, Patanco, San Pedro Xalpa, Azcapotzalco, Clavería y Nueva Santa María (INEGI, 2005).

➤ **Actividades Económicas**

Azcapotzalco es una zona industrial que tiene 1 503 unidades económicas de las cuales destaca el sector alimentario con 470 unidades, bebidas y tabaco con 46 y fabricación de insumos textiles con 17 (INEGI, 2005).

➤ **Uso de Suelo**

El suelo es en esta zona corresponde a uso urbano, el cual se divide en zonas industriales, comerciales y viviendas (INEGI, 2005).

➤ **Clima**

Presenta dos tipos de clima los cuales se distribuyen de acuerdo con la tabla 14: templado subhúmedo con lluvias en verano con humedad media (C(W₁)) con 11.94 % de la superficie delegacional y templado subhúmedo con lluvias en verano con menor humedad (C(W₀)) con 88.06%. En la figura 20 se observa la distribución climatología (a) para el Distrito Federal y la distribución a nivel delegacional (b).

Tabla 14 Climas presentes la Delegación.

<i>Tipo o Subtipo</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Porcentaje de la superficie delegacional.</i>
Templado Subhúmedo con lluvias en verano, con humedad media.	C(w ₁)	11.94
Templado Subhúmedo con lluvias en verano, con menor humedad.	C(w ₀)	88.06

Fuente: CGSNEGI, 2005

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

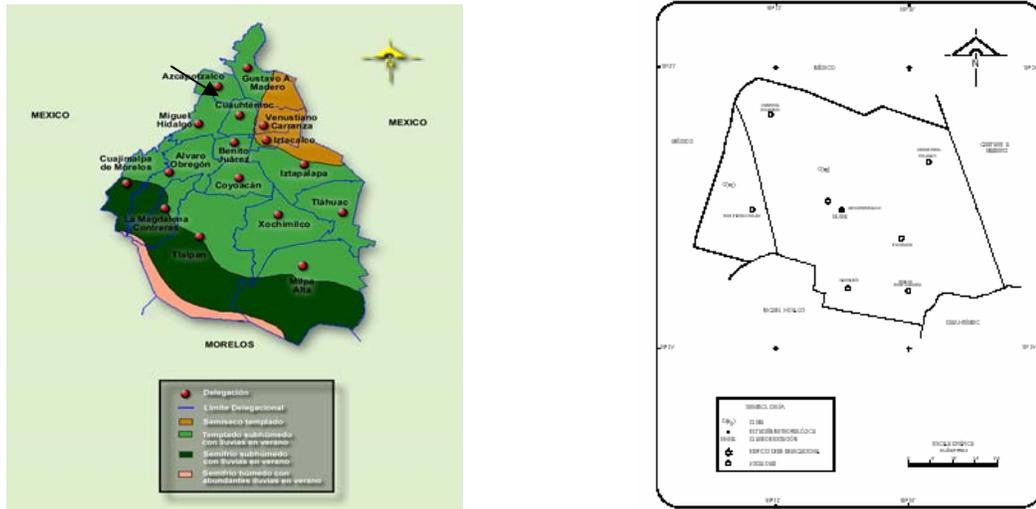


Figura 20 Distribución climatológica de la delegación Azcapotzalco
Fuente: INEGI, 2005

La delegación cuenta con una estación meteorológica tradicional ubicada a 19° 29' 00" Latitud Norte y 99° 11' 00" Longitud Oeste a una altitud de 2240 msnm. El promedio de temperatura anual es de 18.6°C y la precipitación media anual es 766 mm (INEGI, 2005).

➤ Fisiografía

Se ubica en el Eje Neovolcánico, en los Lagos y Volcanes de Anáhuac, los sistemas de topoformas son la llanura aluvial (clave 502) con el 8% y lacustre (clave 503) con 92% de la superficie delegacional (INEGI, 2005). La exrefinería 18 de Marzo se encuentra en la llanura lacustre. La Figura 21 muestra la fisiografía de la delegación Azcapotzalco

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

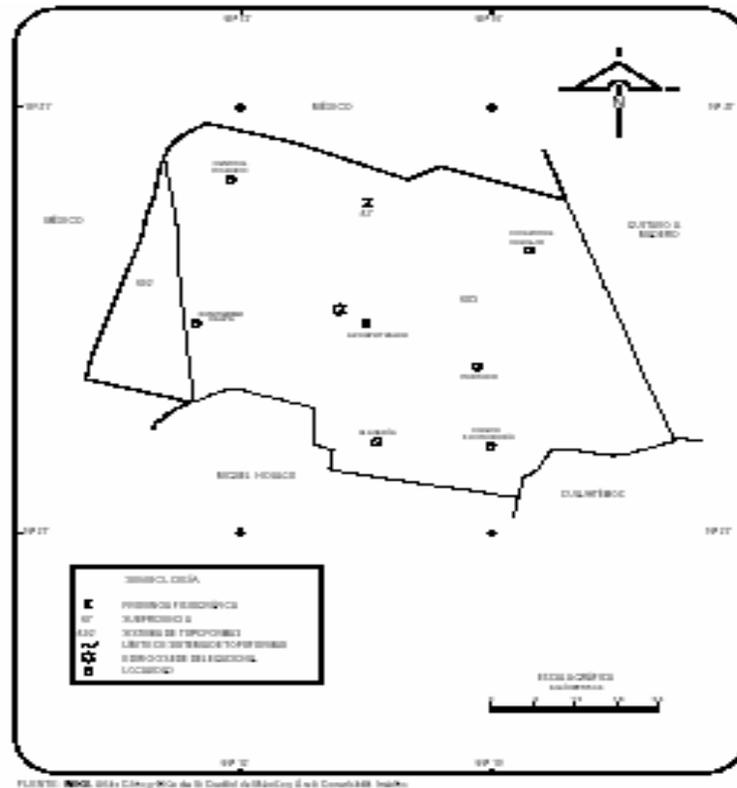


Figura 21 Fisiografía de la Delegación Azcapotzalco
Fuente: INEGI 2005

➤ **Geología**

El área corresponde a la era del cenozoico, su litología se distribuye en lacustre con un superficie de 88.04% y aluvial con una superficie de 11.96% del total delegacional. La Figura 22 se observa la distribución geológica a nivel delegacional y Distrito Federal (INEGI, 2005)

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

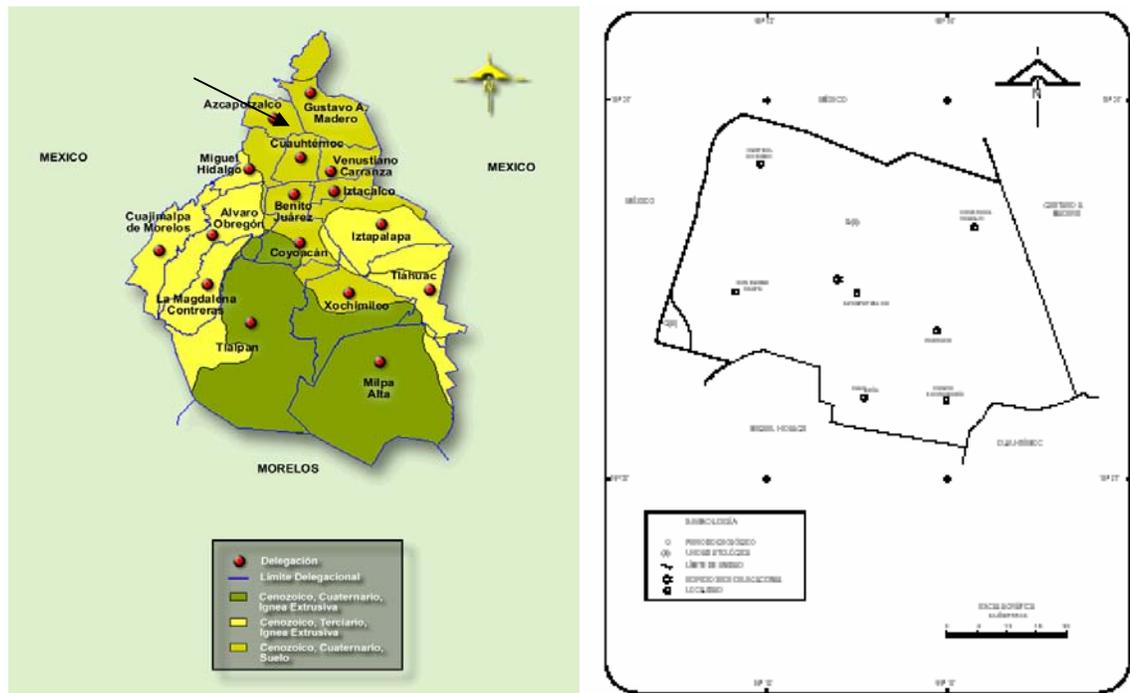


Figura 22 Geología de la delegación Azcapotzalco
Fuente: INEGI, 2005

➤ Hidrología

La delegación Azcapotzalco se encuentra ubicada en la región Región Hidrológica (RH) 26 Panuco. Pertenece a la cuenca del río Moctezuma y la subcuenca lago de Texcoco - Zupango, el cual cubre 100% de la superficie delegacional. El cuerpo de agua ubicado es el río Consulado que se encuentra entubado. La figura 23 ilustra la hidrología de la delegación.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

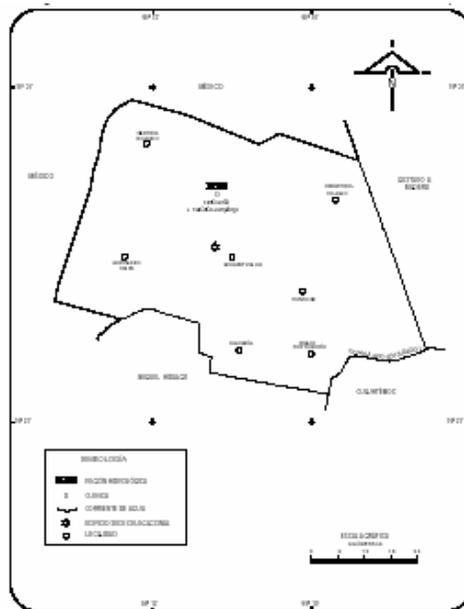


Figura 23 Hidrología de la delegación Azcapotzalco
Fuente: INEGI, 2005

➤ Vegetación

Como se observa en la figura 24, la delegación Azcapotzalco sólo cuenta con las áreas verdes de los parques recreativos, ya que en su mayoría es mancha urbana.



Figura 24 Vegetación de la delegación Azcapotzalco
Fuente: INEGI, 2005

6.2 Impacto ambiental en la exrefinería

La operación de la refinería fue suspendida definitivamente el 18 de marzo de 1991 por el deterioro progresivo al medio ambiente y la calidad de vida en la zona metropolitana. Los altos índices de contaminación tuvieron lugar debido a la liberación de aproximadamente 224 toneladas de contaminantes al día (147 toneladas de monóxido de carbono, 28 de hidrocarburos, 34 de bióxido de azufre, 10 de ácido nitrogenado, 63 de compuestos orgánicos volátiles, 1 de ácido fluorhídrico, 0.5 de benceno y 0.2 de ácido sulfhídrico), lo que al año se tenía un total de 81 800 toneladas (Superación, 2006). De acuerdo con los estudios realizados por Petróleos Mexicanos Pemex en 2006, la exrefinería presentaba a una severa contaminación en sus instalaciones, donde se identifican diversas fuentes:

- Desperdicios Sólidos
- Chatarra
- Lodos aceitosos
- Lodos Blancos
- Lodos Plomizos
- Hidrocarburos en el subsuelo
- Otros productos tóxicos

Los desperdicios sólidos se encuentran constituidos por basura producto de la limpieza general y por residuos de construcción, lana mineral, asbesto, etc.

Los lodos aceitosos se originan en los almacenamientos de crudo, combustóleo, gasóleo y en las plantas de tratamiento de efluentes, están compuestos por parafinas, asfáltenos agua, material orgánico y englobado por hidrocarburos (Pemex, 2006). Se encuentran distribuidos en toda la refinería principalmente en tanques y en algunas de las áreas de protección de los mismos (Pemex, 2006)

Por su parte los lodos blancos son provenientes de los tratamientos de abastecimiento y tratamiento (Pemex, 2006), por lo que en la refinería se encontraron en las calderas; estos lodos están formados principalmente por carbonatos (Pemex, 2006).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Los residuos de lodos plomizos se obtuvieron al añadir tetraetilo de plomo a la gasolina NOVA, (PEMEX, 2006). Otros productos tóxicos que se encontraron en la refinería son los BTEX.

De acuerdo con Pemex y el Gobierno de la República, el abandono de la exrefinería ha generado una contaminación por más de 15 años, por lo que el día 17 de mayo de 2006 se dio inicio de la remediación del suelo el cual constará más 75 millones de dólares, los cuales serán cubiertos por Pemex y la Secretaría de Hacienda (Reforma, 2006). La figura 25 muestra una foto de la exrefinería donde se observa el estado de abandono en que se encuentra.



Figura 25 Exrefinería 18 de Marzo
Fuente: Reforma, 2006

7 Resultados

Los resultados de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 5 se muestran en este capítulo de la siguiente forma: primero se describe como se uso la percepción remota y a continuación el modelo de migración HSSM para la exrefinería 18 de Marzo. Una vez obtenidos los resultados se integraron en un sistema de información geográfica (SIG), para finalmente, presentar la afectación de los derrames de hidrocarburo mediante el cálculo del volumen del hidrocarburo en el subsuelo.

7.1 Aplicación de las técnicas de percepción remota para la identificación de zonas impactadas por hidrocarburos.

Los algoritmos empleados como parte de las técnicas de percepción remota (PR) consistieron en la combinación de bandas espectrales. Esta combinación de bandas ayudó a identificar las zonas contaminadas por hidrocarburos en el suelo, esto debido al cambio que se ve expuesto el suelo en contacto con el contaminante. Para la aplicación de los algoritmos se uso el programa comercial ER Mapper 5.6 y las imágenes utilizadas fueron de la plataforma Landsat TM con una resolución espacial de 30 x 30 metros correspondientes a los años de 1999 para la refinería Lázaro Cárdenas, 2000 para la refinería Francisco I. Madero y 2001 para la exrefinería 18 de Marzo.

Los algoritmos o combinaciones de bandas empleadas fueron las siguientes:

- A. Bandas 2, 3, 4 5 y 7. Con base en lo propuesto por Cutlis (1989), Ellis et al., (2001), Kühn y Höring (1996), se probaron diferentes combinaciones entre bandas y se concluyó que la que mejor representa al hidrocarburo en un suelo contaminado era la combinación RGB [3/2, 4/3, 7/5].
- B. Bandas 2, 3, 4. La combinación RGB [2/3, 4/3, 2/3-4/3] fue utilizada ya que de acuerdo con lo reportado por Almeida-Filho *et al.* (1999) permite localizar con

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

precisión zonas con contenido de hierro resultado de oxidación producida en el suelo por derrames de hidrocarburos.

- C. Bandas 2, 3, 4 y 7. En este caso se emplearon diferentes combinaciones de estas bandas para observar cambios en la cobertura vegetal o bien en cuerpos de agua que se presumían hubiesen sido afectados por el hidrocarburo. Las combinaciones empleadas fueron RGB (4 3 2 y 7 4 2).

7.1.1 Refinería Lázaro Cárdenas

Las combinaciones A, B y C se aplicaron en primer lugar a la imagen de 1999 correspondiente a la refinería Lázaro Cárdenas, la cual se ubica dentro del área del pantano de Santa Alejandrina en Minatitlán, Veracruz (figura 26).

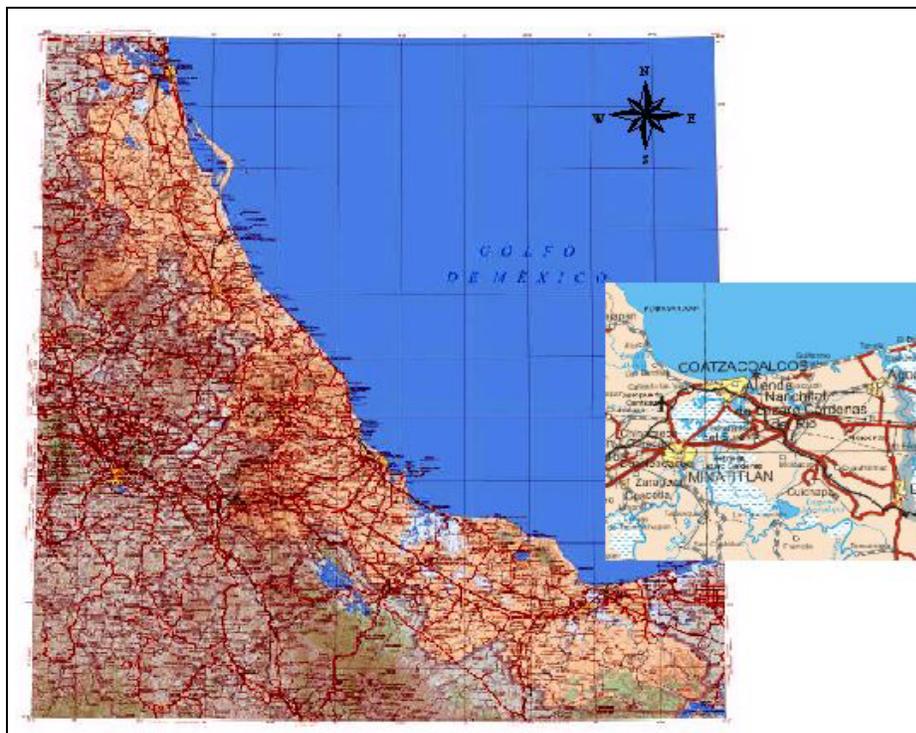


Figura 26 Ubicación de la refinería Lázaro Cárdenas

El algoritmo A detectó las zonas afectadas por el hidrocarburo con una coloración en FC anaranjada, como se puede observar en la figura 27.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

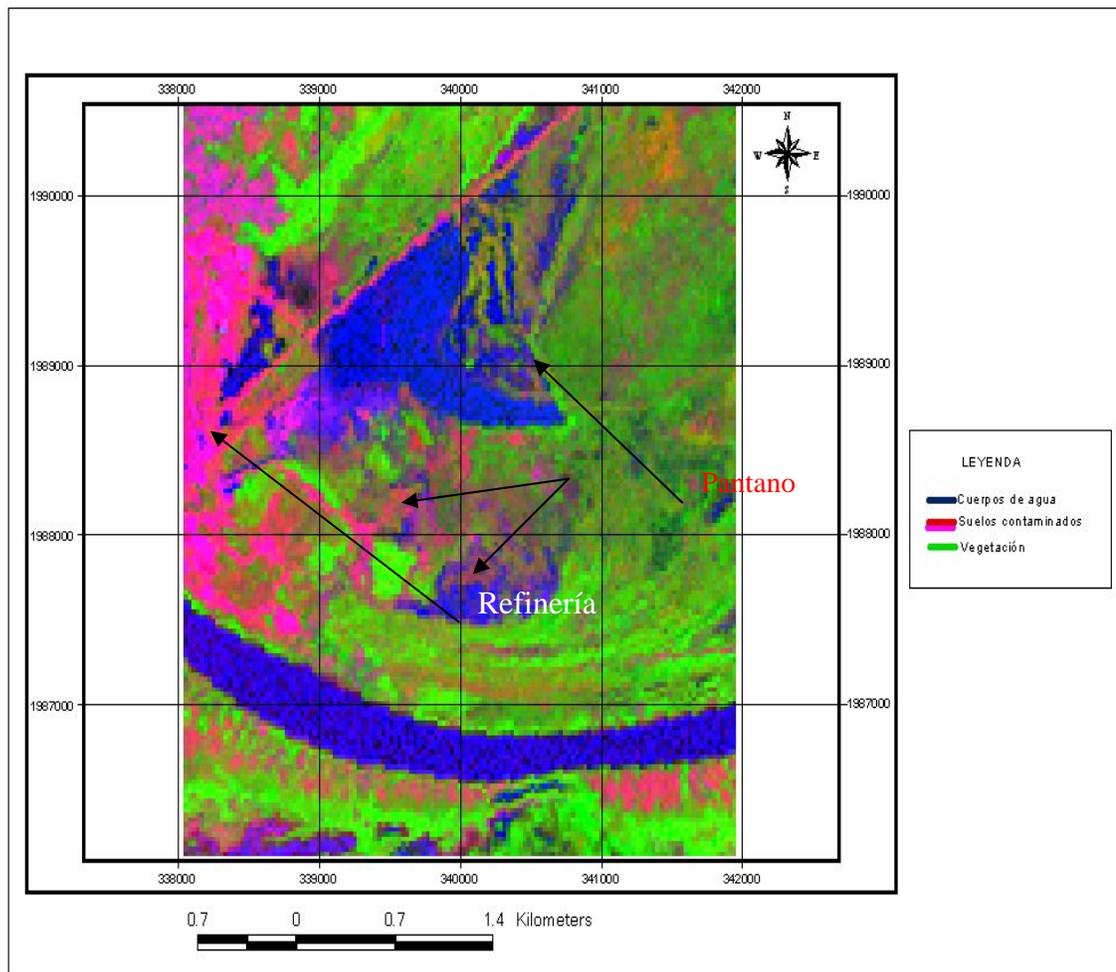


Figura 27 Algoritmo A aplicado a la refinería Lázaro Cárdenas

Con lo que respecta el algoritmo B, las zonas con suelos alterados por presencia de hidrocarburos fueron observadas fácilmente mediante una coloración en FC anaranjada. El color anaranjado se observó en áreas independientes así como en donde prevalece un color magenta (figura 28). Esto comprueba lo reportado por Almeida-Filho et al. (1999) para suelos con hierro intercambiable resultado de la reacción de oxidación por la presencia del hidrocarburo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

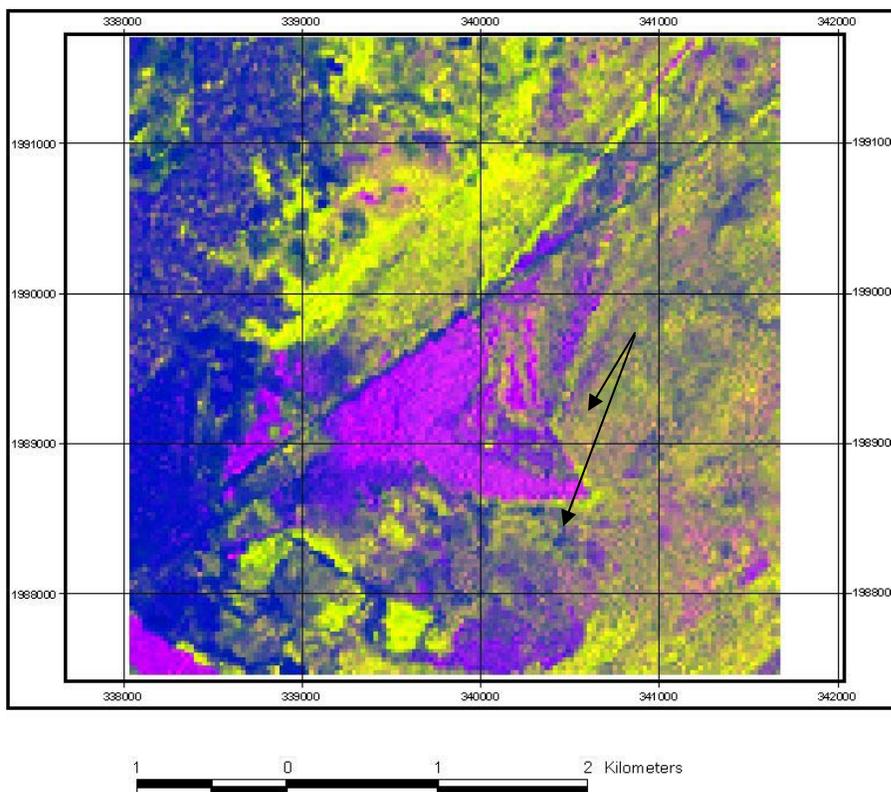


Figura 28 Algoritmo B aplicado a la refinería Lázaro Cárdenas

Las combinaciones RGB empleadas en el algoritmo C, no mostraron una fácil discriminación que permitiera identificar al hidrocarburo, ya que el hecho de revisar la presencia de vegetación estresada no garantiza que se por la presencia de estos contaminantes, ya que puede ser debido a la escasez de agua o la presencia de pestes. La figura 29 muestra la vegetación, cuerpos de agua y suelo desnudo en la refinería Lázaro Cárdenas.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

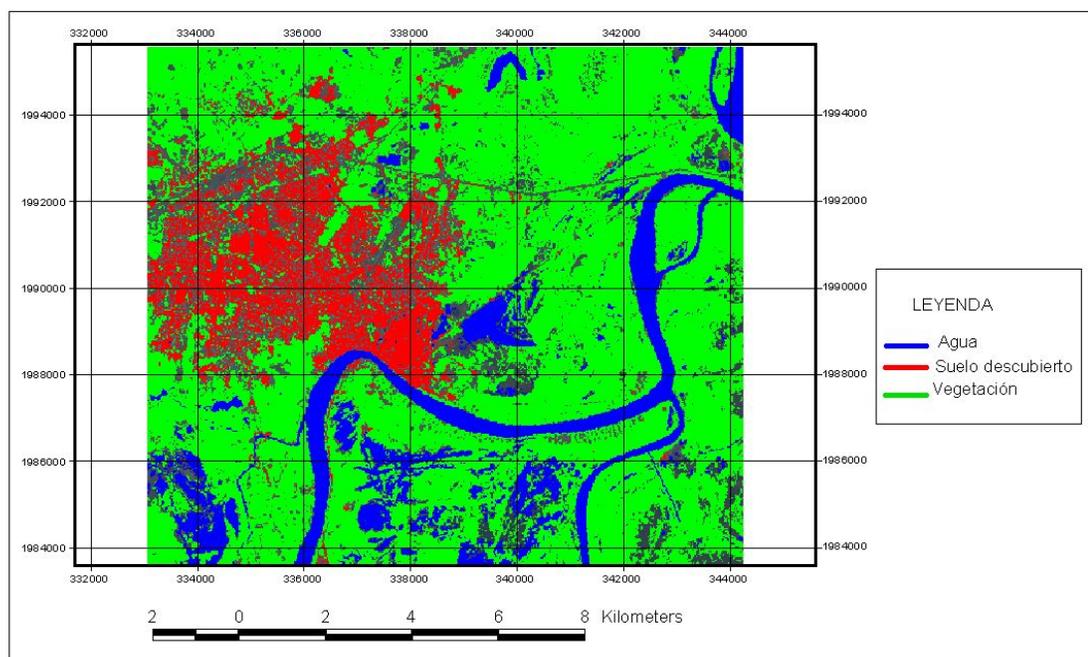


Figura 29 Refinería Lázaro Cárdenas, algoritmo C discriminación de cuerpos de agua y coberturas de vegetación.

Los resultados encontrados por el algoritmo A se corresponden a los estudios reportados por Cutlis (1988) con base a la firma espectral para la detección de suelos contaminados con hidrocarburos. Mientras que los resultados obtenidos empleando el algoritmo B confirma lo propuesto por Almeida-Filho et al. (1999) para la detección de hierro intercambiable en suelos afectados por hidrocarburos. De la misma manera, los resultados encontrados con algoritmo A fueron corroborados por el algoritmo B, lo que indica que el algoritmo propuesto (A) efectivamente detecta suelos afectados por hidrocarburos.

Aún cuando ambos algoritmos A y B representan áreas afectadas por hidrocarburos, el algoritmo A contiene las bandas 5 y 7 que según Cutlis (1988) representan la firma espectral de un suelo contaminado, mientras que el algoritmo B se enfoca a los compuestos de hierro, los cuales se presentan por la afectación de las propiedades químicas del suelo (oxidación del carbono orgánico). Por lo tanto, el algoritmo A es el

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

que mejor identifica zonas afectadas por derrames de hidrocarburos y, es por ello, que se usará en adelante.

Los resultados del algoritmo A fueron validos con datos de verdad terreno, la cual consistía en una serie de puntos de muestreo de las concentraciones de TPH. Estos datos permitieron trazar isolíneas para así detectar aquellos sitios con mayor contaminación en la zona. Lo anterior se puede observar en la figura 30, donde se aprecia la localización de los puntos de muestreo (Montes de Oca *et al.*, 1998).

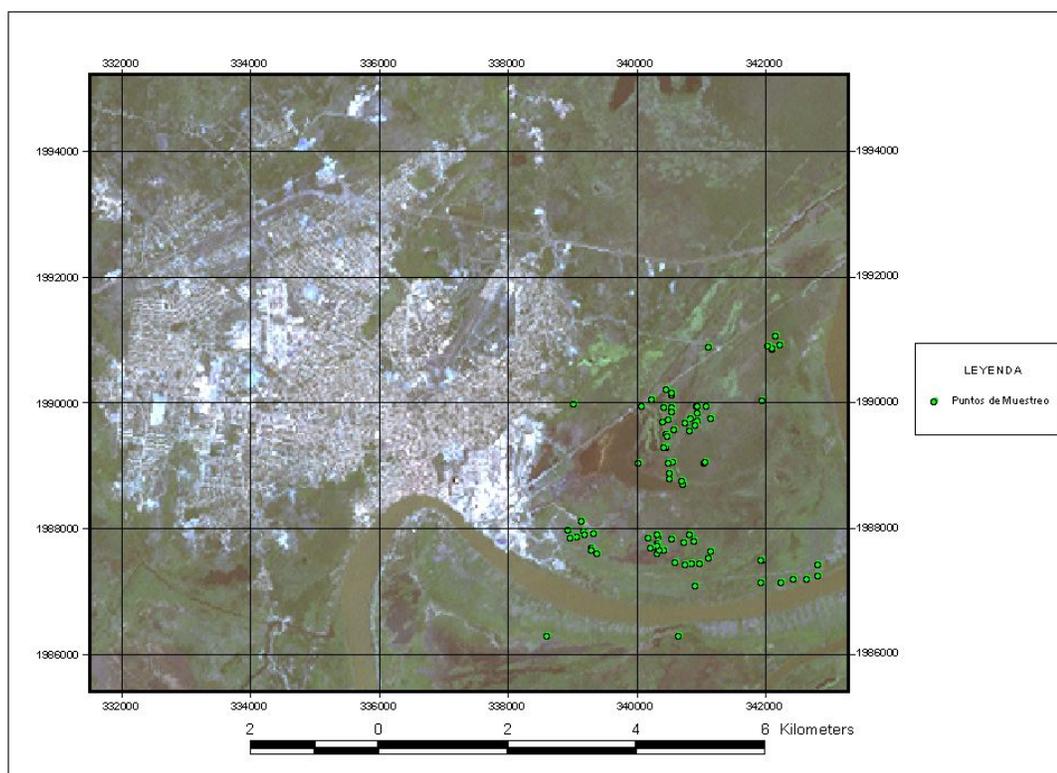


Figura 30 Puntos de Muestreo

En la figura 31 se muestran las isolíneas obtenidas para la concentración de TPH. Como se puede observar los sitios de mayor concentración coinciden con las zonas de coloración anaranjado, las cuales se identificaron como la coloración debida a hidrocarburo en suelo por derrames de crudo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

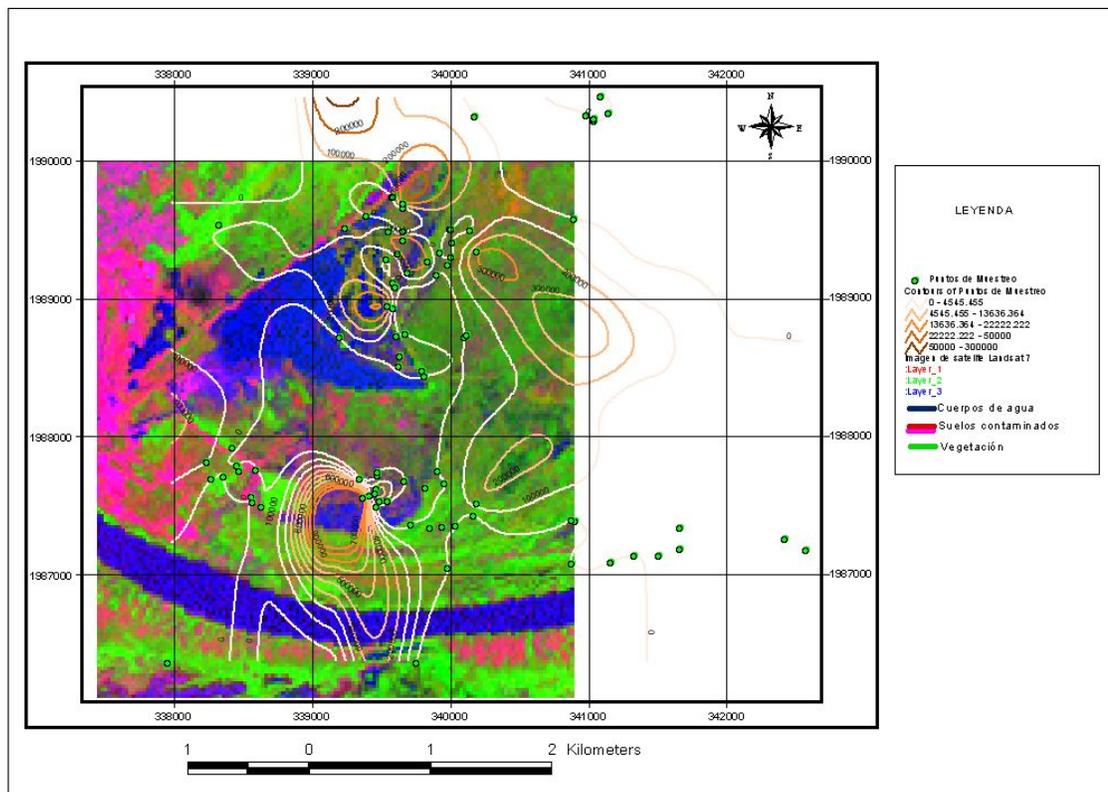


Figura 31 Isolíneas de Concentración de TPH

La magnitud de las zonas afectadas y los niveles de concentración hallados (figura 31) de hidrocarburos derramados en el pantano de Santa Alejandrina han sin duda alterado el ambiente natural de este ecosistema en forma significativa.

Aunque con las isolíneas es posible detectar las zonas con mayor contaminación estas se limitan a los puntos del muestreo por lo que no es posible determinar si otras zonas se encuentran afectadas también por hidrocarburos y, por lo tanto, determinar la verdadera la extensión del problema. Es por ello que los resultados presentados en la figura 27 obtenidos con las técnicas de PR son una excelente alternativa para identificar zonas con diferentes grados de contaminación en toda el área afectada y así poder establecer de manera confiable la extensión de ésta.

7.1.2 Refinería Francisco I. Madero

La validación del algoritmo A con los puntos de muestreo permitió aplicar de manera confiable dicho algoritmo en la refinería Francisco I. Madero.

La refinería Francisco I. madero se localiza en el estado de Tamaulipas al Noreste del país (figura 32), lo cual confiere diferencias de vegetación, tipo de suelo, altitud, urbanización, etc. con respecto a la refinería Lázaro Cárdenas. Al aplicar el algoritmo A se observó la misma coloración en FC anaranjada (figura 33) que en el caso de la refinería Lázaro Cárdenas. Esta coloración indica la presencia de hidrocarburo en el suelo y, por lo tanto, los derrames que tuvieron lugar en diferentes sitios de la refinería a causa de la producción y transporte del hidrocarburo.



**Figura 32 Refinería Francisco I. Madero, Tampico Tamaulipas
Fuente Google Earth 2007**

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

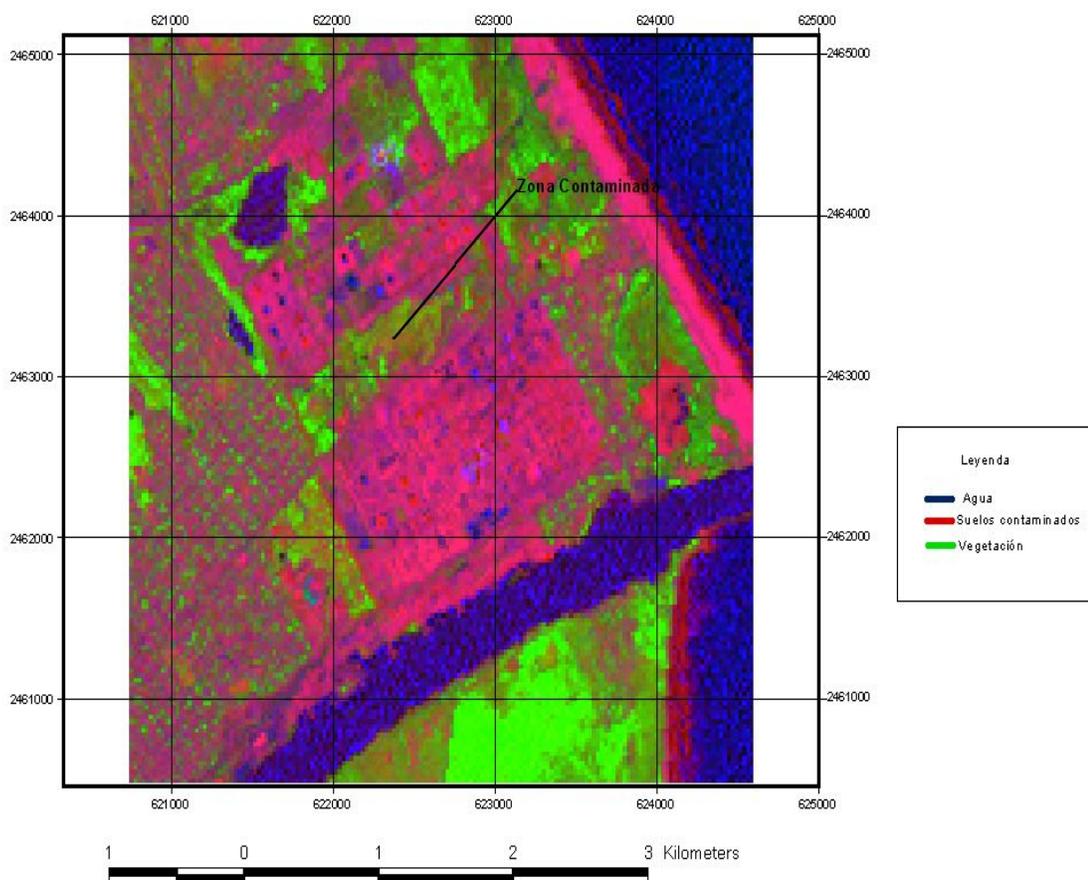


Figura 33 Refinería Francisco I. Madero, Algoritmo A

Al obtener resultados similares en cada una de las refinerías anteriores con características climatológicas y geológicas diferentes, dio confianza en la aplicabilidad del algoritmo A para la identificación de zonas afectadas por derrames de hidrocarburos.

7.1.3 Exrefinería 18 de Marzo

Finalmente, con la corroboración de la aplicabilidad del algoritmo A para detectar zonas contaminadas por hidrocarburos, se procedió a emplearlo para la zona de estudio, en este caso, la exrefinería 18 de Marzo. La figura 34 muestra una toma de Google Earth de la exrefinería en 2006 donde se muestra el área y su distribución en planta.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.



Figura 34 Exrefinería 18 de Marzo, Azcapotzalco
Fuente: Google Earth, 2006

El resultado obtenido tras el empleo del algoritmo A fue de una gran coloración anaranjada en la zona noroeste (figura 33). Este resultado es congruente con lo observado en la distribución de la exrefinería ya que estas zonas correspondían a depósitos del crudo y, por tanto, zonas sujetas a continuos derrames. El color naranja varia con respecto a la coloración obtenida en las otras dos refinerías ya que las condiciones en la exrefinería difieren al estar ubicado a una mayor altura donde el suelo predominante es pavimento, el cual reacciona de diferente manera ante la presencia de hidrocarburos.

En síntesis, los resultados obtenidos muestran que el FC anaranjado a partir del RGB del algoritmo A, representa de manera confiable la zona afectada por derrames de hidrocarburos, así como la extensión de la misma. A continuación se presentan los

resultados del modelo de migración para posteriormente incorporar ambos resultados en el SIG.

7.2 Determinación de la profundidad en la migración del hidrocarburo.

De acuerdo con Comisión Nacional del Agua (CNA, 2002), la parte superior del acuífero de la Cd. de México presenta un paquete arcilloso, el cual forma un acuitardo de espesor variable (10 – 70 metros) y que actúa como semiconfinante. Las características de este acuitardo son su alta porosidad y baja permeabilidad.

Para definir el contaminante a modelar se tomó en cuenta que la refinería era productor y distribuidor de petróleo crudo, combustóleo y gasolina. Este parámetro junto con algunos estudios de precios realizados por Pemex, se definió el contaminante el cual fue el petróleo.

Los pasos que se siguieron para correr el modelo de migración consistieron en la creación automática de una base de datos con el título de la corrida, así como las características generales del contaminante y el tipo de suelo. El resultado es una serie de archivos y datos generales (figura 35).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

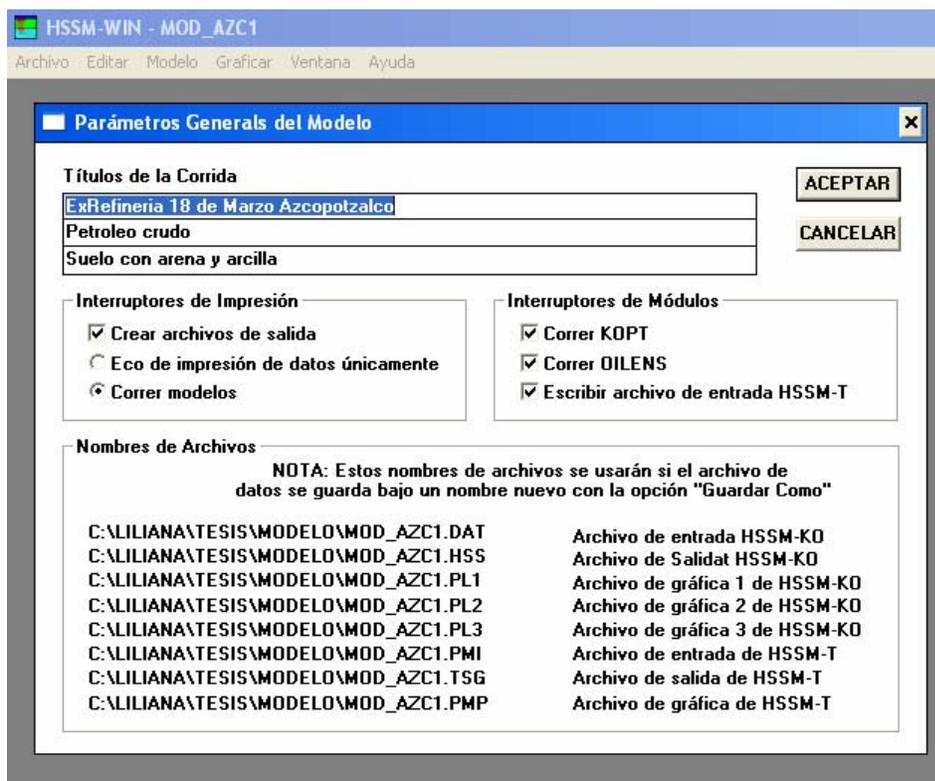


Figura 35 Cuadro de Datos Generales del Modelo HSSM

A partir de generar el archivo datos, DAT, el modelo requiere las propiedades hidráulicas tanto del agua como del subsuelo. Estas características se obtuvieron de estudios realizados por CNA (2002) sobre el acuífero del valle de México, por lo que se consideró con base en los cortes litológicos que el valor de la conductividad hidráulica (K) varía de 10^{-1} a 10^{-9} m/s, la conductividad vertical en metros por día de acuerdo con el estrado arcilloso corresponde a 0.0116 y la conductividad horizontal con un valor de 0.029 (Iturbe, 2007 Com. personal). Con respecto a las propiedades del agua estas se tomaron de los valores que presenta el manual del modelo HSMM. Asimismo, se consideró el valor de 0.000136 m/d (Palma, 2007 Com. personal) para la velocidad de recarga. Finalmente, los valores del modelo de la curva de presión se tomaron de los valores estandarizados para estratos de arcillas según Brooks y Corey (EPA, 1997). En la figura 36 se observa cada uno de los parámetros que se requieren en esta fase y los valores empleados.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Parámetros Hidráulicos

PROPIEDADES HIDRAULICAS

Viscosidad dinámica del agua (cp)	1.000
Densidad del agua (g/cm ³)	1.000
Tensión superf. agua (dina/cm)	65.00
Valor máx. de krw durante inf.	.5000

Archivo de Datos: C:\LILIAN\ANTESIS\MODELO\MOD. **ACEPTAR**
 Activar comprobación de rango **Cancelar**

Recarga

Velocidad media de recarga (m/d) valor:
 Saturación

Modelo de la curva de presión Capilar

Brooks y Corey
 van Genuchten

Lambda de Brooks y Corey	.3887
Carga de entrada de aire (m)	0.080941
Saturación residual de agua	.075
Alpha de van Genuchten (1/m)	0
n de van Genuchten	0

PROPIEDADES DEL MEDIO POROSO

Conductividad hidr. vert. sat. (m/d)	0.0116
Razón de cond. hidr. horiz/vert	2.5
Porosidad	.2
Densidad global (g/cm ³)	1.510
Espesor saturado del acuífero (m)	20.00
Profundidad al nivel freático (m)	10.00
Parámetro de espesor capilar (m)	.1000E-01
Gradiente agua subt. (m/m)	.1000E-01
Dispersividad longitudinal (m)	7.43
Dispersividad transversal (m)	.7430
Dispersividad vertical (m)	.6000

Figura 36 Cuadro de parámetros hidráulicos del modelo HSSM

A continuación se alimentan las características del hidrocarburo que se requieren para poder modelar la pluma contaminante. En este caso, los valores fueron tomados de la tabla 2 y del manual del modelo HSSM; la tabla 2 presenta las propiedades físicas y químicas del petróleo crudo. Como se observa en la figura 37, además de las propiedades de los hidrocarburos también se incluyen las propiedades de compuestos disueltos y las características del derrame.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

MSM-WIN - MOD_RZCT

Archivo Editar Modelo Graficar Ventana Ayuda

Parámetros de la Fase de Hidrocarburos

PROPIEDADES DE LA FASE DE HIDROCARBUROS	
Densidad del NAPL (g/cm³)7500
Viscosidad din. NAPL (cp)	1.002
Solubilidad del Hidrocarburo (mg/l)	0.18
Sat. res. NAPL en Acuífero.1500
Sat. res. NAPL en Zona vadosa5000E-01
Coef. part. suelo/aqua (l/kg)8300E-01
Tens. superf. NAPL (dina/cm)	35.00

PROPIEDADS DE COMPUESTOS DISUELTOS	
<input checked="" type="checkbox"/> Existe Compuesto Disuelto	
Conc. inic. comp. en NAPL (mg/l).	8208.
Coef. partición NAPL/agua	311.0
Coef. partición suelo/aqua (l/kg)8300E-01
Solubilidad compuesto (mg/l)	1750.
<input type="checkbox"/> Vida med. Compuesto en acuíf.	0.0

Archivo:

Activar comprobación de rango

DERRAME DE HIDROCARBUROS

Flujo especificado

Volúmen/Area especificado

Encharcamiento de carga const.

Encharc. var. desp. carga const.

Flujo de NAPL (m/d)	0
Tiempo de inicio (d)	0
Tiempo de terminación (d)	0
Profundidad encharcamiento (m)	0
Volúmen/Area del NAPL (m)	86000
Prof. inf. zona NAPL (m)5000

Figura 37 Cuadro de las Características del Hidrocarburo

Por último, los parámetros de simulación (figura 38) son alimentados al modelo. Estos parámetros incluyen: las características físicas del lente (radio), el tiempo de simulación que para este caso se propuso un tiempo de 10 años, perfiles de la lente y, si se cuenta con pozos de visita, la distancia en la que se encuentran.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Parámetros de Simulación

PARAMETROS DE CONTROL DE SIMULACION

Archivo: C:\LILIANA\TESIS\MODELO\MOD.
 Activar comprobación de rango

Radio fuente de la lente NAPL (m).
 Factor de multiplicación del radio.
 Sat. máx. NAPL en lente NAPL.
 Tiempo term. simulación (d)
 Interv. máx. tiempo solución (d)
 Tiempo mínimo entre intervalos de tiempo impresos (d)

Criterio de terminación de Simulación OILENS
 Tiempo especificado por usuario
 Esparcido de la lente NAPL se para
 Flujo máx. masa contaminante al acuífero
 Contaminante lixiviado de la lente

Fracción de masa remanente.

PARAMETROS DEL MODELO HSSM-T

Porc. máx. radio contam. [%]
 Concentración min. de salida (mg/l)
 Tiempo de inicio (d)
 Tiempo de terminación (d)
 Incremento de tiempo (d)

LOCALIZACION POZOS RECEPTORES

	X (m)	Y (m)
1	5.000	.0000
2	10.00	.0000
3	15.00	.0000
4	20.00	.0000
5		
6		

Introduzca coordenadas para cada uno de hasta de 6 pozos
 Número de pozos

PERFILES DE LA LENTE

1	1.000
2	7.000
3	30.00
4	365.0
5	1095
6	2190
7	3650
8	
9	
10	

Introduzca tiempo (d) para cada uno de hasta 10 perfiles
 Número de perfiles

Figura 38 Parámetros de Control de Simulación para el Modelo HSSM

Una vez alimentado el modelo se generó una corrida donde se simuló el comportamiento del contaminante a través de la zona vadosa a partir del primer día que se presenta el derrame. Es importante mencionar que en esta corrida consideré un medio homogéneo. La figura 39 muestra la gráfica resultado de la aplicación del modelo tomando en cuenta la velocidad de recarga. La gráfica muestra que el contaminante se propaga 1.75m de profundidad en el subsuelo en un periodo de 6 años. El eje Y representa los valores de profundidad en el subsuelo, los cuales están dadas por números positivos, mientras que el eje X representa la saturación líquida (0-1).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

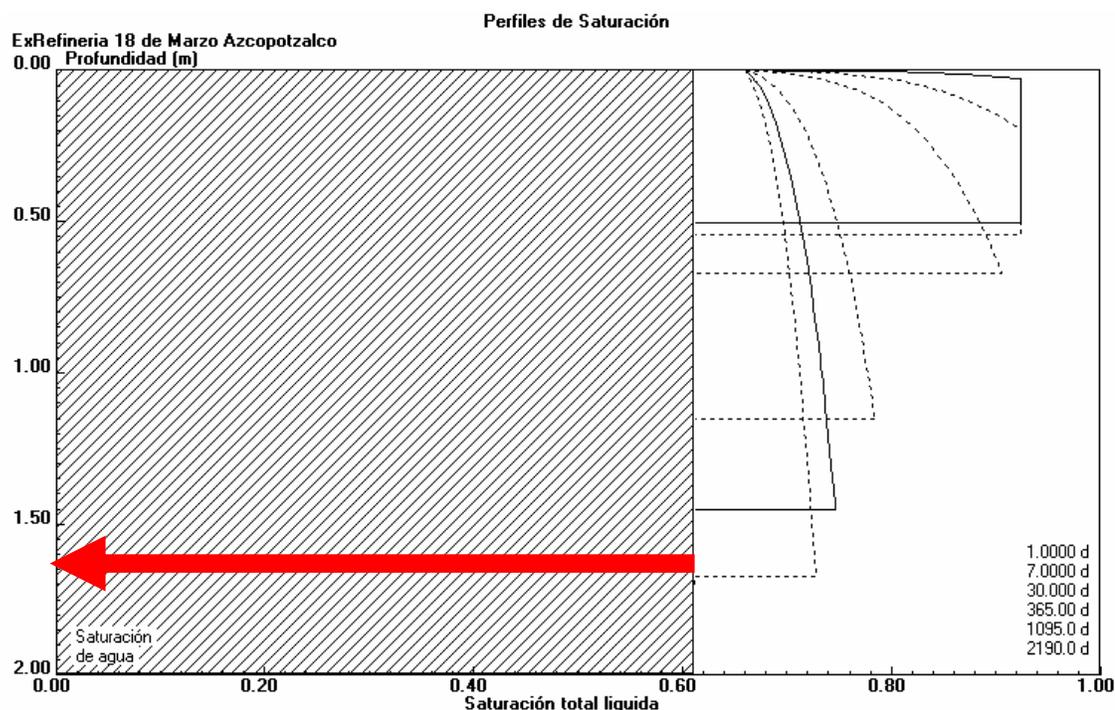


Figura 39 Profundidad del hidrocarburo en el subsuelo

Estudios realizados en la exrefinería 18 de Marzo por medio de muestreos han dado como resultado que la contaminación se encuentra a una profundidad de 1.5 a 2.0 metros (Iturbe, 2007 Com. personal.), por lo que, los resultados anteriores muestran la bondad del modelo para simular la migración del petróleo en la zona no saturada, con lo cual es posible establecer las acciones a seguir una vez conocida la profundidad de la migración del contaminante. Con lo anterior, se puede concluir que los datos obtenidos por la simulación del modelo son de buena calidad, y por lo tanto, confiables.

El valor de profundidad y la extensión obtenida mediante PR fueron alimentados al SIG.

7.3 Determinación de la extensión y volumen

A partir de los resultados obtenidos con las técnicas de Percepción Remota y el Modelo de Migración (HSSM), se integró un Sistema de Información Geográfica (SIG), con ayuda del software ArcView 3.2, que permitió tener un manejo de los datos y analizarlos y estimar el volumen de la zona afectada.

A partir del FC anaranjado obtenido, se trazaron polígonos de las zonas contaminadas creando una base de datos con las áreas para cada polígono. En la figura 40 se observan los polígonos de las zonas impactadas por hidrocarburos en la exrefinería 18 de Marzo.

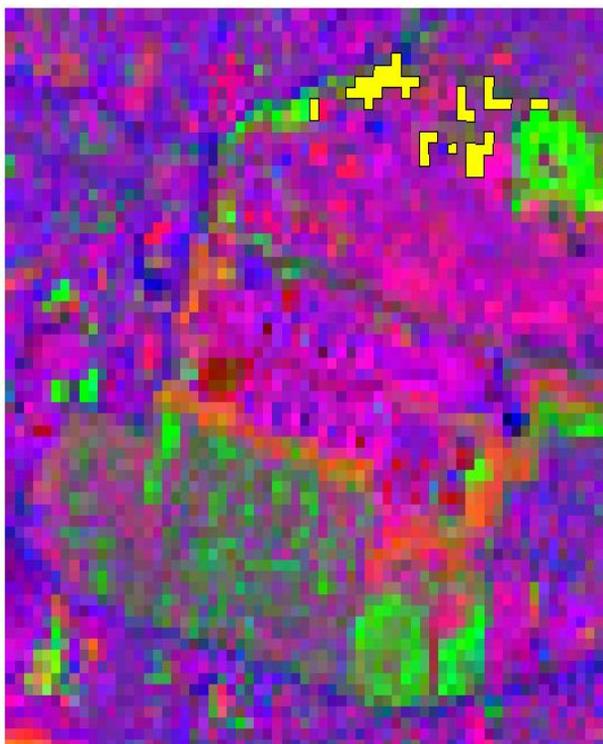


Figura 40 Polígonos de la zona contaminada por hidrocarburos en la ex refinería
18 de Marzo

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Con el área obtenida, se multiplicó éste valor por la profundidad del contaminante en el subsuelo resultado del modelo HSSM, para cuantificar el volumen total impactado en el subsuelo. Se obtuvieron dos casos, uno considerando 1.75 metros de profundidad para el cual se tuvo un volumen de 260, 731 m³. De acuerdo, con los resultados obtenidos tanto en la percepción remota y el modelo de migración, el volumen obtenido es confiable.

8 Conclusiones y recomendaciones

Uno de los principales problemas de contaminación en el suelo así como en el subsuelo (además de otros ambientes, ej. marino) es el derrame de petróleo. El impacto de los derrames de petróleo no sólo significa pérdidas económicas sino también afectan a sectores sociales y ambientales, entre otros. Los derrames en suelos y subsuelos tiene lugar tanto en las refinerías durante su producción como al transportar el producto al usuario intermedio o final (ductos, pipas, buques). Los efectos de dichos derrames Por este motivo, el trabajo de tesis proponía encontrar una metodología, la cual mediante el uso de de técnicas de percepción remota y modelos migración bajo una plataforma georeferenciada (SIG), permitiera tomar las acciones necesarias para disminuir o eliminar el daño ocasionado por el derrame. Los alcances de la tesis fueron logrados, ya que por medio de la percepción remota y, en particular, el uso de algoritmos, se identificaron aquellas zonas impactadas por hidrocarburos (petróleo crudo) y se estimó su extensión. Por lo que demostró ser una herramienta útil que no sólo proporciona resultados confiables sino que reduce tiempo y costo. Con respecto al modelo de migración empleado, este mostró de manera confiable la pluma contaminante en la zona vadosa para así establecer la profundidad a la cual se encuentra el contaminante en el subsuelo y el tiempo que tomo en llegar. Finalmente, la incorporación de los resultados obtenidos al aplicar la percepción remota y el modelo de migración al SIG permitió la obtención de mapas mostrando el sitio afectado a fin de cuantificar y dimensionar rápidamente el área y volumen de la zona que se encuentra impactada y las acciones a tomar.

8.1 Conclusiones

1. La detección de suelos impactados por hidrocarburos por medio de la percepción remota permitió tener resultados confiables para la localización de sitios contaminados por estos contaminantes. Cabe mencionar que el presupuesto del proyecto no permitió la adquisición de imágenes de satélite recientes y con mayor resolución espectral. En el caso de haber utilizado otro tipo de imágenes (ej. Spot o Ikonos) se hubieran podido identificar con mayor precisión las zonas afectadas y, por lo tanto, obtener una extensión y áreas más confiables.
2. Los algoritmos A y B con base en combinaciones de bandas TM se emplearon para identificar las zonas contaminadas por hidrocarburos. El algoritmo A se basa en la presencia del hidrocarburo en suelo arenoso y el algoritmo B identifica suelos con compuestos de hierro. El algoritmo A proporcionó una mejor discriminación del hidrocarburo ya que las bandas TM 5 y 7 representan la firma espectral de un suelo contaminado por hidrocarburos. La coloración en FC para las zonas afectadas fue anaranjado.
3. Los puntos de control (muestreos) permitieron calibrar el algoritmo A y con ello, tener la seguridad de que se trata de zonas contaminadas por hidrocarburos. En este caso, el FC anaranjado se presentan en las isolíneas trazadas con presencia de TPH.
4. El Modelo de evaluación de Derrames de Hidrocarburos (HSSM, *por sus siglas en inglés*) permitió calcular la profundidad de penetración de petróleo crudo en la zona vadosa, de acuerdo con los datos referidos por Iturbe (2007, com. Personal), se puede concluir que el modelo es robusto proporcionando datos similares a los reportados. Esto representa una gran ventaja, debido a que, por lo general no se cuenta con este tipo de dato o bien se supone llegando a incurrir en serios errores al no saber la dirección y profundidad de la pluma contaminante. Otra ventaja del modelo, es que permite tomar acciones rápidas y así poder disminuir los impactos generados en la sociedad, economía y medio

ambiente. Así como, la disminución de costos de muestreo.

5. El modelo de migración presentó algunos problemas en el llenado de algunos campos o parámetros, debido a que requiere características del derrame como el flujo especificado derramado, encharcamiento de la carga constante, las cuales no se contaban, por lo que se le dieron valores promedio para poder hacer la simulación del modelo. Otro punto importante es que se supone un estrato de tipo homogéneo.
6. La implementación del Sistema de Información Geográfica (SIG), fue una herramienta importante pues facilitó la obtención de la cuantificación de áreas y volumen de la zona afectada, de una forma rápida y precisa. Una de las ventajas fue la obtención de un mapa georeferenciado con el cual se pudieron visualizar las zonas afectadas por derrame.
7. La metodología propuesta ayuda a tener un manejo eficiente y rápido de algún evento por derrame de hidrocarburos, lo que significa ventajas tanto en el aspecto ambiental debido a que se reduciría las afectaciones por un derrame como en el económico al reducir los costos y tiempo de muestreo. Asimismo, se pueden implementar de manera inmediata las prácticas de remediación de suelos, por lo que el SIG es una herramienta clave en la toma de decisiones para la rehabilitación de suelos contaminados.

8.2 Recomendaciones

1. Se requieren imágenes de satélite que tengan mejor resolución espacial es decir, que tengan resoluciones espaciales mínimas 5m x 5m, para poder mejorar la identificación de las zonas afectadas y, por lo tanto, brindar mayor exactitud en la cuantificación del área impactada.
2. Realizar muestreos tanto de suelo como del contaminante para obtener una caracterización de sus propiedades fisicoquímicas, y poder mejorar resultados en la aplicación de modelos de transporte. De igual forma, las características climáticas, de vegetación, topografía mejoran la modelación del contaminante en el subsuelo.

ANEXO

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y LAS ESPECIFICACIONES PARA SU CARACTERIZACIÓN Y REMEDIACIÓN.

Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo de 2005

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

JUAN RAFAEL ELVIRA QUESADA, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Ernesto Enríquez Rubio, Comisionado Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización, de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en lo dispuesto en los artículos 32 Bis fracciones I, II, IV y 39 fracciones I y XXI de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracciones I, II, V, VI y XI, 6o., 36, 37, 37 Bis, 134 fracciones I, II, III y V, 136, 139 y 152 Bis de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 2o. fracción X, 7o. fracción II, 68, 69, 70, 73, 77, 78 y 79 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; 3 fracción XIII, 13 apartado A fracción IX, 116, 117, 118 fracciones I y VII, 182, 278 fracciones III y IV, 280 y 282 de la Ley General de Salud; 38 fracciones II, III y VII, 40 fracciones X y XI, 41, 43, 44, 46 y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28, 31, 33 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 8 fracciones V y VI del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2 Apartado C fracción X del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud; y 3 fracciones I inciso I i, II y XI, 10 fracciones IV y VIII, 12 fracciones I y III del Reglamento de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios.

CONSIDERANDO

Que el Proyecto de Norma Oficial Mexicana fue aprobado por el Comité Consultivo Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en sesión celebrada el 21 de mayo de 2003, y que de conformidad con el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó el 19 de marzo de 2004, para consulta pública a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales contados a partir de la fecha de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**, presentaran sus comentarios ante el citado Comité, sito en Boulevard Adolfo Ruiz Cortines número 4209, quinto piso, Fraccionamiento Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, código postal 14210, Distrito Federal, o en el correo electrónico aescamilla@semarnat.gob.mx.

Que durante el plazo mencionado la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvo a disposición del público para su consulta en el domicilio del Comité antes señalado.

Que de conformidad con lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al Proyecto de Norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el citado Comité realizándose las modificaciones procedentes al Proyecto y que las respuestas a los comentarios y modificaciones antes citados fueron publicados en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de marzo de 2005.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Que cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en sesión de fecha 30 de noviembre de 2004 aprobó para publicación definitiva la presente Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, hemos tenido a bien expedir la siguiente:

NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y LAS ESPECIFICACIONES PARA SU CARACTERIZACION Y REMEDIACION

Prefacio

En la elaboración de esta Norma Oficial Mexicana participaron:

SECRETARIA DE ENERGIA
SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
SECRETARIA DE SALUD
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA
Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental
PROCURADURIA FEDERAL DE PROTECCION AL AMBIENTE
Subprocuraduría de Inspección Industrial
Subprocuraduría de Auditoría
COMISION NACIONAL DEL AGUA
CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACION
CONFEDERACION DE CAMARAS INDUSTRIALES
ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA (ANIQ)
ONEXPO NACIONAL, A.C.
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Instituto de Geografía
Instituto de Ingeniería
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
COLEGIO DE INGENIEROS PETROLEROS
COLEGIO DE INGENIEROS AMBIENTALES DE MEXICO
ASOCIACION NACIONAL DE RESTAURADORES AMBIENTALES, A.C.
AGENCIA DE COOPERACION TECNICA ALEMANA-GTZ
PETROLEOS MEXICANOS
Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental
Pemex Exploración y Producción
Pemex Refinación
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO EN LIQUIDACION
OPERADORA INTERGRUPO, S.A. DE C.V.

Y en la elaboración del Anexo A. Métodos Analíticos para la determinación de hidrocarburos en suelos, participaron:

INTERTEK TESTING SERVICES DE MEXICO, S.A. DE C.V.
LABORATORIOS ABC, QUIMICA INVESTIGACION Y ANALISIS, S.A. DE C.V.
CONTROL QUIMICO NOVAMANN INTERNACIONAL, S.A. DE C.V.

INDICE

- 0. Introducción**
- 1. Objetivo**
- 2. Campo de aplicación**
- 3. Referencias**
- 4. Definiciones**
- 5. Abreviaturas**
- 6. Límites máximos permisibles**
- 7. Especificaciones para la caracterización**
- 8. Especificaciones ambientales para la remediación**
- 9. Evaluación de la conformidad**
- 10. Grado de concordancia con normas internacionales**
- 11. Bibliografía**
- 12. Observancia de esta Norma**
- Anexo A
- Anexo B

0. Introducción

El Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006, tiene como primer objetivo detener y revertir la contaminación de los recursos naturales, agua, aire y suelo, con el propósito de garantizar su conservación para las generaciones futuras.

Los derrames de hidrocarburos, por las sustancias que involucran, pueden poner en peligro los lugares donde se producen, la integridad de los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales.

Cuando un derrame de hidrocarburos permanece sin ser atendido puede causar daños constantes y crecientes al suelo y a otros recursos naturales.

La falta de especificaciones ambientales para la restauración de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos constituye uno de los principales factores de incertidumbre sobre la efectividad de los resultados de la remediación.

Ante la situación descrita, el 20 de agosto de 2002 se publicó en el **Diario Oficial de la Federación**, la Norma Oficial Mexicana de Emergencia: Límites máximos permisibles de contaminación en suelos por hidrocarburos, caracterización del sitio y procedimientos para la remediación, la cual fue prorrogada por seis meses más, el 20 de febrero de 2003.

Con el propósito de dar certidumbre en las acciones de caracterización y remediación a los causantes de la contaminación he tenido a bien expedir la presente Norma Oficial Mexicana.

1. Objetivo

Establecer los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.

2. Campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para quienes resulten responsables de la contaminación con hidrocarburos en suelos.

3. Referencias

NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

4. Definiciones

Para los efectos de esta Norma Oficial Mexicana se consideran las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y las que a continuación se mencionan:

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

4.1 Cadena de custodia

Registro que acompaña a las muestras desde su obtención hasta su entrega al laboratorio de pruebas y análisis.

4.2 Características del sitio

Características o propiedades físicas, químicas, mecánicas y dinámicas de un suelo y de la(s) sustancia(s) distribuidas en él, así como los procesos que controlan el comportamiento y transporte del contaminante en el medio en el que se encuentra alojado y que proporcionan la comprensión de éstos para poder predecir su comportamiento futuro en el sitio.

4.3 Derrame

Cualquier descarga, liberación, rebose, achique o vaciamiento de hidrocarburos que se presente en suelo.

4.4 Dilución de suelo contaminado

Acción de adicionar un material determinado a un suelo contaminado, con el propósito específico de reducir la concentración de uno o más contaminantes.

4.5 Hidrocarburos

Compuestos químicos, constituidos principalmente por átomos de carbono e hidrógeno.

4.6 Hidrocarburos de fracción ligera

Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre cinco y diez átomos de carbono (C₅ a C₁₀).

4.7 Hidrocarburos de fracción media

Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre diez y veintiocho átomos de carbono (C₁₀ a C₂₈).

4.8 Hidrocarburos de fracción pesada

Mezcla de hidrocarburos cuyo peso molecular sea mayor a C₁₈.

4.9 Laboratorio de pruebas

Laboratorio con métodos acreditados y aprobados conforme a lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

4.10 Medidas de urgente aplicación

Acciones que conducen a inactivar una fuente de contaminación y a detener la migración de los contaminantes en el medio ambiente.

4.11 Métodos analíticos

Los métodos propuestos en el Anexo A de esta Norma, mediante los cuales se harán los análisis para determinar el grado de contaminación de suelos contaminados con hidrocarburos.

4.13 Muestra duplicada

Una de dos o más muestras o submuestras que se obtienen separadamente en el mismo sitio, al mismo tiempo y con el mismo procedimiento de muestreo.

4.14 Muestreo dirigido

Muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados, cuando se cuenta con información previa del sitio, se conoce el producto derramado y es evidente la extensión de la afectación.

4.15 Muestreo estadístico

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Muestreo realizado conforme los métodos matemáticos establecidos, cuya función es dar certidumbre a través de observaciones determinadas, sobre diferentes parámetros para el total del universo.

4.16 Nivel de fondo

Concentración en el suelo de los hidrocarburos regulados que no son atribuibles a la fuente de contaminación que se está considerando y que se encuentran de manera natural o fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena a la considerada.

4.17 Pasivo Ambiental

Sitio contaminado, que no ha sido remediado, en el que pueden, además, encontrarse depósitos o apilamientos de residuos sólidos, de manejo especial o peligrosos, los cuales deben de ser manejados conforme a la legislación vigente.

4.18 Punto de muestreo

Es el lugar específico donde se toma la muestra.

4.19 Sitio de muestreo

Es el área a muestrear.

4.20 Suelo

Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

4.21 Suelo contaminado con hidrocarburos:

Aquel en el cual se encuentran presentes hidrocarburos que por sus cantidades y características afecten la naturaleza del suelo.

5. Abreviaturas

5.1 BTEX

B, benceno; T, tolueno; E, etilbenceno; X, xilenos (suma de isómeros)

5.2 HAP

Hidrocarburos aromáticos polinucleares.

6. Límites máximos permisibles

6.1 Los productos asociados a los derrames de hidrocarburos para los que se establecen límites máximos permisibles de contaminación en suelos se enlistan en la Tabla 1.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Tabla 1.- Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante

PRODUCTO CONTAMINANTE	HIDROCARBUROS					
	FRACCION PESADA	HAPs	FRACCION MEDIA	HAPs	FRACCION LIGERA	BTEX
Mezclas	X	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X	X
Combustóleo	X	X				
Parafinas	X	X				
Petrolatos	X	X				
Aceites	X	X				
Gasóleo			X	X		
Diesel			X	X		
Turbosina			X	X		
Keroseno			X	X		
Creosota			X	X		
Gasavión					X	X
Gasolvente					X	X
Gasolinas					X	X
Gasnafta					X	X

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

6.2 Los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos se presentan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	Uso de suelo predominante ¹ (mg/kg base seca)			Método analítico
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial	
Ligera	200	200	500	Anexo A.1
Media	1,200	1,200	5,000	Anexo A.2
Pesada	3,000	3,000	6,000	Anexo A.3

1. Para usos de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados.
2. Agrícola incluye suelo forestal, recreativo, y de conservación.
3. Industrial incluye comercial.

Tabla 3.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo

Hidrocarburos específicos	Uso de suelo predominante ¹ (mg/kg base seca)			Método analítico
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial	
Benceno	6	6	15	Anexo A.4
Tolueno	40	40	100	Anexo A.4
Etilbenceno	10	10	25	Anexo A.4
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	Anexo A.4
Benzo[a]pireno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Dibenzo[a,h]antraceno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Benzo[a]antraceno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Benzo[b]fluoranteno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Benzo[k]fluoranteno ⁴	8	8	80	Anexo A.5
Indeno (1,2,3-cd)pireno ⁴	2	2	10	Anexo A.5

1. Para usos de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados.
2. Agrícola incluye suelo forestal, recreativo y de conservación.
3. Industrial incluye comercial.
4. La determinación de hidrocarburos aromáticos polinucleares deberá realizarse únicamente en los casos que se pretende demostrar que se está cumpliendo con los límites máximos permisibles.

7. Especificaciones para la caracterización

Para la caracterización del sitio se debe recabar información que sirva de base para conocer la dimensión de la afectación.

En caso de derrames o fugas, la caracterización se debe realizar después de haber tomado las medidas de urgente aplicación.

La caracterización del sitio debe contener como mínimo los siguientes elementos:

- Descripción del sitio y de la afectación
- Estrategia de muestreo

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

-Plan de muestreo
-Informe

7.1 Descripción del sitio y de la afectación

7.1.1 Se debe localizar con coordenadas geográficas UTM la zona de afectación en un plano a escala que permita su ubicación a nivel regional y local.

7.1.2 Se deben determinar las características del sitio que permitan evaluar la distribución del contaminante y del grado de afectación e indicar el uso de suelo y la topografía del mismo.

7.1.3 Cuando se trate de un derrame reciente el responsable de la contaminación debe indicar la cantidad aproximada y el tipo de contaminantes derramados.

7.1.4 Cuando se trate de un pasivo ambiental se debe realizar una recopilación de los antecedentes históricos sobre las actividades y sucesos que originaron la contaminación.

7.1.5 La caracterización debe incluir un plan de muestreo que se debe realizar conforme a lo establecido en numeral 7.3.

7.2 Estrategia de muestreo

Para ayudar a la comprensión de los numerales de este apartado, se incluye el Anexo B.

7.2.1 Se podrá aplicar una estrategia de muestreo por métodos dirigidos o estadísticos, siempre y cuando los resultados permitan delimitar la distribución horizontal y vertical de los contaminantes en el suelo, de conformidad con los límites establecidos en las tablas 2 y 3 de la presente Norma.

7.2.2 Cuando se aplique el muestreo dirigido se deben tomar como mínimo el número de puntos de muestreo en superficie establecidos en la tabla 4.

7.2.3 Cuando el muestreo dirigido no permita delimitar la distribución horizontal y vertical de la zona afectada, ni el tipo de contaminantes y su concentración, se debe realizar una estrategia de muestreo considerando métodos estadísticos.

7.2.4 La selección de los puntos de muestreo debe considerar las características del sitio.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.

Tabla 4.- Mínimos de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada

AREA CONTAMINADA (ha)	PUNTOS DE MUESTREO
HASTA 0.1	4
0.2	8
0.3	12
0.4	14
0.5	15
0.6	16
0.7	17
0.8	18
0.9	19
1.0	20
2.0	25
3.0	27
4.0	30
5.0	33
10.0	38
15.0	40
20.0	45
30.0	50
40.0	53
50.0	55
100.0	60

7.3 Plan de muestreo

7.3.1 El responsable del muestreo debe integrar un Plan de Muestreo, en el que:

- Se establezcan y definan las responsabilidades del personal involucrado en cada procedimiento.
- Se sustente la ubicación y el número de los puntos de muestreo, la profundidad y el volumen de las muestras.
- Se describa la técnica de muestreo, el equipo de muestreo y las medidas de seguridad.
- Se establezcan las medidas de aseguramiento de calidad del muestreo incluyendo la cadena

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

de custodia.

- Se especifiquen los recipientes, la preservación y el transporte de la muestra.

7.4 Especificaciones técnicas para llevar a cabo el muestreo

7.4.1 Para la toma de muestras se debe apegar al Plan de muestreo elaborado, las desviaciones al mismo se deben justificar y documentar.

7.4.2 Las muestras a tomar en un suelo contaminado siempre serán simples (material colectado en un solo punto de muestreo).

7.4.3 En el muestreo estadístico no se puede tomar muestras en los mismos puntos que los utilizados en el muestreo dirigido.

7.4.4 Evitar el uso de fluidos de perforación y la utilización de equipos y recipientes para las muestras que ocasione la pérdida de hidrocarburos volátiles y la contaminación cruzada.

7.4.5 Durante la perforación para la obtención de muestras de suelo no se debe ocasionar la contaminación de acuíferos.

7.4.6 Como un procedimiento de aseguramiento de calidad, se tomará y analizará una muestra duplicada por cada diez muestras tomadas.

i. En los casos en que se sospeche la presencia de hidrocarburos ajenos al problema de contaminación que se esté evaluando, se podrán tomar muestras que sirvan para establecer niveles de fondo.

ii. Cuando se pueda recuperar una muestra del producto contaminante en fase libre, debe entregarse al laboratorio junto con las muestras de suelo para calibrar el equipo de análisis y facilitar la identificación del tipo de hidrocarburo presente.

7.5 Especificaciones sobre la integridad, identificación y manejo de las muestras

7.5.1 Para seleccionar el recipiente apropiado deben observarse las especificaciones contenidas en la tabla 5 de esta Norma Oficial Mexicana.

7.5.2 Los recipientes deben ser nuevos o libres de contaminantes.

7.5.3 Cuando se requiera analizar hidrocarburos de fracción ligera y BTEX la muestra se debe tomar en recipientes independientes del resto de las fracciones.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

Tabla 5.- Recipientes para las muestras, temperaturas de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro

Parámetro	Tipo de recipiente	Temperatura de preservación	Tiempo máximo de conservación
Hidrocarburos Fracción Ligera	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón (Cartucho con sello que asegure la representatividad de las muestras hasta su análisis)	4°C	14 días
BTEX		4°C	7 días
Hidrocarburos Fracción Media	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón (Cartucho con sello que asegure la representatividad de las muestras hasta su análisis)	4°C	14 días
Hidrocarburos Fracción Pesada		4°C	14 días
HAP		4°C	14 días

¹ /El tiempo máximo de conservación se refiere al lapso que no deberá ser excedido desde que se toma la muestra hasta que se realiza la extracción del analito de interés.

7.5.4 Cada muestra deberá ser sellada y etiquetada inmediatamente después de ser tomada y debe ser entregada para su análisis a un laboratorio de pruebas acreditado.

7.5.4.1 No se deben analizar muestras cuyos sellos han sido violados.

7.5.4.2 Todos los sellos deben contar con el número o clave única de la muestra.

7.5.4.3 Todas las etiquetas deben contar con la siguiente información como mínimo: nombre de la persona que tomó la muestra, fecha y hora de muestreo, nombre de la empresa, lugar del muestreo, y número o clave única misma que la del sello.

7.6 El informe de la caracterización debe contener como mínimo lo establecido en todos los numerales de este capítulo, así como los resultados de los análisis realizados, los métodos utilizados, la interpretación de los resultados, y se debe anexar la cadena de custodia correspondiente.

8. Especificaciones ambientales para la remediación.

8.1 En el caso de que la concentración de hidrocarburos en todas las muestras de suelo analizadas sean iguales o menores a los límites máximos permisibles de contaminación establecidos en las tablas 2 y 3 del capítulo 6 de esta Norma Oficial Mexicana, no serán necesarios los trabajos de remediación.

8.2 Todo aquel suelo que presente concentraciones de hidrocarburos por arriba de los límites máximos permisibles de contaminación establecidos en las tablas 2 y 3 del capítulo 6 de esta Norma Oficial Mexicana, deben ser restaurados hasta cumplir con el numeral 8.1.

8.3 En caso de pasivos ambientales y otros casos justificables se podrán determinar acciones de remediación específicas al sitio con base en estudios de evaluación de riesgo al ambiente y a la salud conforme lo establecido en la legislación vigente.

8.3.1 La evaluación de riesgo al ambiente y a la salud, tendrá como finalidad establecer cualquiera de las siguientes opciones específicas al sitio:

- a) acciones de remediación con base en niveles específicos,
- b) acciones de remediación para disminuir los riesgos y la exposición a los contaminantes,
- c) acciones de monitoreo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

8.3.2 El riesgo al ambiente se evaluará como mínimo con base en la determinación de la dispersión de los contaminantes, la determinación de la capacidad de retención de los contaminantes en el suelo y la exposición y la toxicidad de los contaminantes a los organismos blanco residentes en el sitio.

8.3.3 En el caso de que en el sitio existan especies vegetales o animales bajo protección de la legislación ambiental vigente, la evaluación del riesgo al ambiente se realizará con base en un estudio ecotoxicológico a dichas especies.

8.3.4 El estudio de evaluación de riesgo a la salud humana se hará con base a una metodología aceptada por la autoridad competente.

8.4 Durante la remediación se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

8.4.1 Se debe evitar la transferencia de contaminantes al suelo limpio, al aire y al agua.

8.4.2 No se deben generar mayores alteraciones ambientales que las producidas por el suceso que provocó la contaminación.

8.4.3 No se debe diluir el suelo contaminado, entendiendo por ello la mezcla de suelo contaminado con suelo limpio o menos contaminado, cuando por esta acción directa se pretenda lograr concentraciones de hidrocarburos por debajo de los límites establecidos en esta Norma.

8.4.4 Sólo se permite la adición de materia orgánica como co-sustrato cuando ésta sea parte de la técnica de remediación.

8.4.5 Sólo se permite el uso de formulaciones químicas, o de microorganismos que no alteren en detrimento las características y propiedades del ecosistema.

8.4.6 No se deben utilizar microorganismos modificados a través de manipulación genética.

8.4.7 Cuando la técnica de remediación utilizada modifique el pH del suelo, se debe garantizar al final de la remediación que éste sea similar al de la zona aledaña.

8.4.8 Los lixiviados generados durante el tratamiento del suelo contaminado deberán manejarse conforme a la legislación vigente.

8.4.9 Cuando las actividades de limpieza impliquen la construcción de obra civil o hidráulica adicional a la existente se deberá cumplir con la normatividad en materia de impacto ambiental.

8.5 En el caso de que los niveles de fondo de hidrocarburos sea mayor a los límites máximos permisibles de contaminación establecidos en las tablas dos y tres del capítulo 6 de esta Norma Oficial Mexicana, los trabajos de remediación serán realizados hasta alcanzar los niveles de fondo.

9. Evaluación de la conformidad

La evaluación de la conformidad de la presente Norma Oficial Mexicana se realizará de acuerdo a lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, además de lo siguiente:

9.1 El procedimiento de evaluación de la conformidad se llevará a cabo por las Unidades de Verificación (UV's) y los laboratorios acreditados y aprobados, y en ausencia de éstos la evaluación se realizará por parte de las autoridades competentes.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

9.2 Durante la visita de evaluación, la UV o la autoridad competente comprobarán que se mantiene el cumplimiento de las disposiciones de la presente Norma:

9.2.1 La Secretaría reconocerá las determinaciones analíticas que hayan sido muestreadas y analizadas por un laboratorio acreditado conforme a las disposiciones legales aplicables, y de acuerdo a los métodos establecidos en los anexos A.1 a A.6 de la presente Norma.

10. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración

Esta Norma no coincide con ninguna Norma Internacional por no existir Norma Internacional sobre el tema que integre las disposiciones técnicas y de procedimientos que se establecen en la presente Norma. Sin embargo, ésta se elaboró con base en métodos analíticos y fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente.

11. Bibliografía

Australian National Environment Protection Council. Guideline on the investigation levels for soil and Groundwater. Australia, 1999.

Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada-wide standards for petroleum hydrocarbons

(PHCs) in soil. April, May 2001. Winnipeg, Canada.

Environmental Protection Division of the Prince Edward Island Department of Technology and Environment.

Petroleum Contaminated Site Remediation Guideline. Canada, 1999.

Environmental Research Advisory Council of the Canadian Association of Petroleum.

Environmentally acceptable endpoints for residual petroleum hydrocarbons in soil. Canada, January 2001.

Grupo de Trabajo para establecer Criterios sobre Hidrocarburos Totales del Petróleo. Análisis de Hidrocarburos del Petróleo en el Medio Ambiente (Volumen 1) Amherst Scientific Publishers.

Amherst,

Massachusetts. 1998.

Grupo de Trabajo para establecer Criterios sobre Hidrocarburos Totales del Petróleo. Evaluación de Riesgo a la Salud de Sitios Liberados de Petróleo: Implementación de los Acercamientos del Grupo de

Trabajo (Volumen 5) Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1997.

Grupo de Trabajo para establecer Criterios sobre Hidrocarburos Totales del Petróleo. Selección de fracciones representativas de HTP basada en consideraciones de transporte y destino.

(Volumen 3)

Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1997.

Grupo de Trabajo PROFEPA-SEMARNAT Procedimiento para Atención de Emergencias Ambientales, Asociadas con Sustancias Químicas, Caracterización y Restauración de Suelos, Documento Interno. México, mayo de 2002.

La Agencia de Protección Ambiental (USEPA). Lineamientos Finales para la Evaluación de Exposiciones.

FR 57 (104) 22888-22938. 1992.

La Agencia de Protección Ambiental (USEPA). Metas Preliminares para la Región IX (PRGs). 2004.

<http://www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg>.

La Agencia de Protección Ambiental (USEPA). Remediaciones Supuestas. Caracterización del Sitio y

Selección de Tecnologías para Sitios Contaminados con Componentes Orgánicos Volátiles en Suelos.

Referencias Rápidas. Oficina de Emergencias y División de Control 5203G de Respuestas de Remediación en Sitios Peligrosos.

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 17a. Edición. Porrúa. México. 1999.
- Ley de Aguas Nacionales. Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 1 de diciembre de 1992.
- NMX-AA-052, Protección al Ambiente Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Preparación de Muestras en Laboratorios para su Análisis.
- NOM-EM-138-ECOL-2002, Que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, publicada el 20 de agosto de 2002 en el **Diario Oficial de la Federación**.
- Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados. Ecuador, 2003.
- NYC Department of Environmental Conservation, Division of Environmental Conservation Remediation. SIPI technology and remediation series. August 1992.
- Reglamento a la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos. Publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de noviembre de 1998. México, 1998.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. Publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 12 de enero de 1994. México, 1994.
- Saval, Susana. Remediación y restauración. En: Pemex Ambiente y Energía, Los Retos del Futuro, UNAMPetróleos Mexicanos, México, 1995. Págs.151-189.
- Saval, Susana. La Biorremediación como alternativa para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos. En Memorias del Seminario Internacional sobre Restauración de Sitios Contaminados, Instituto Nacional de Ecología, México, 26 al 29 de mayo, México. 1997. Págs. 141-147.
- Saval, Susana. Exitos y fracasos de la remediación de suelos. En: Conservación y Restauración de Suelos, UNAM, PUMA, SEMARNAP, Editores: Christina Siebe *et al.*, México, 1999. Págs. 511-526.
- Seoanez Calvo, Mariano *et al.* Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión. 1996. Editorial Mundi-Prensa, Barcelona.
- Seoanez Calvo, Mariano. El gran diccionario del medio ambiente y la contaminación. Mundi-Reusa/Coediciones. México, 1997.
- Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group. Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfDs) for Total Petroleum Hydrocarbons (Volume 4). Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1998.
- Grupo de Trabajo para establecer Criterios para el consumo máximo de varias fracciones de hidrocarburos que no hace daño a la salud humana (RfD) y la inhalación máximo del hidrocarburos que no dañará la salud humana. (Volumen 4) Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1998.
- Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group. Composition of Petroleum Mixtures (Volume 2). Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1998. Grupo de Trabajo para establecer Criterios sobre Hidrocarburos Totales del Petróleo. La composición de mezclas de hidrocarburos de petróleos (Volumen 2). Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1998.
- Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group. Human Health Risk-based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing The Working Group Approach (Volume 5). Amherst Scientific Publishers. Amherst, Massachusetts. 1997.

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

12. Observancia

La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos establecidos en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y demás disposiciones legales aplicables.

TRANSITORIO

UNICO.- La presente Norma Oficial Mexicana, entrará en vigor 60 días después de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

Provéase la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el **Diario Oficial de la Federación**, México, Distrito Federal, a los seis días del mes de enero de dos mil cinco.- El Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, **Juan Rafael Elvira Quesada**.- Rúbrica.- El Comisionado Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización, de Regulación y Fomento Sanitario, **Ernesto Enríquez Rubio**.- Rúbrica.

ANEXO A. METODOS ANALITICOS PARA LA DETERMINACION DE HIDROCARBUROS EN SUELOS

En este Anexo se presentan los resúmenes de los métodos analíticos que se deben utilizar para evaluar las concentraciones de los hidrocarburos presentes en los suelos a los cuales se les va a evaluar su conformidad con esta NOM.

Como se observa, no se presentan los métodos completos sino sus principales elementos para obtener resultados confiables y reproducibles, es fundamental que los laboratorios de ensayo que apliquen estos métodos utilicen las referencias bibliográficas como base para establecer sus propios protocolos de trabajo, los cuales deben cumplir con las especificaciones de este Anexo y con todas las especificaciones de control de calidad y de desempeño de los métodos de referencia.

Las muestras deben ser perfectamente homogeneizadas y cribadas con un tamiz de ± 1.0 mm en campo, lo anterior evitando en lo posible la pérdida de los compuestos volátiles antes de su envase final y transporte al laboratorio.

A.1 DETERMINACION DE HIDROCARBUROS DE FRACCION LIGERA

1.1 Método analítico

El análisis de hidrocarburos de fracción ligera deberá cubrir pesos moleculares entre C5 y C10 y puntos de ebullición entre 60°C y 170°C, que en su mayoría corresponden a sustancias volátiles. El método de referencia es el EPA 8015B 1996 o versiones posteriores, para Hidrocarburos Rango Gasolina (GRO) modificado con el método de la Ref 2.

La determinación cuantitativa se deberá realizar con un cromatógrafo de gases con columna capilar no polar y detector de ionización de flama o detector selectivo de masas en modo TIC. Como resultado se obtiene un perfil de picos cuya separación está en función de los pesos moleculares de los hidrocarburos presentes.

1.2 Preparación de la muestra

Para el análisis es necesario extraer previamente los hidrocarburos que están presentes en la muestra de suelo homogeneizada y cribada. Debe utilizarse un sistema de Purga y Trampa, el cual está acoplado al cromatógrafo de gases con la finalidad de introducir los hidrocarburos directamente a la columna de separación, inmediatamente después de haber sido purgados del suelo y concentrados en una trampa especial, con lo cual se reduce la manipulación de la muestra y los tiempos entre la extracción y el propio análisis.

La técnica de Purga y Trampa consiste en hacer pasar una corriente de gas inerte a temperatura ambiente, a través de la muestra suspendida en agua reactivo y calentada a 40°C. Los hidrocarburos ligeros se desorben del suelo, pasan a la fase gaseosa y son entonces captados por un material adsorbente en la trampa del equipo. Posteriormente, este material se calienta y se le hace pasar a contracorriente, un gas inerte que desorbe los hidrocarburos, arrastrándolos hacia la columna del cromatógrafo.

1.3 Calibración

De acuerdo al numeral 7.4.6 de la Norma, cuando exista producto libre, éste deberá entregarse junto con la muestra para calibrar el equipo y cuantificar la cantidad de producto derramado.

Para la calibración del equipo se deberá utilizar una mezcla estandarizada de compuestos puros que simulan una gasolina. Se deberán cumplir los requisitos de calidad para métodos analíticos establecidos por la normatividad correspondiente.

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

SOLUCION PATRON DE CALIBRACION DE HIDROCARBUROS FRACCION LIGERA (en metanol)	
Compuesto	Concentración mg/L
pentano	100
2 metilpentano	100
MTBE	100
2,2,4 trimetilpentano	100
benceno	100
tolueno	100
n-nonano	100
n-decano	100
etilbenceno	100
m,p,o-xilenos	100
1,2,4 trimetilbenceno	100
n-butilciclohexano	100
naftaleno	100
Total	1,300

La curva de calibración debe iniciar al menos en 10 mg/kg y hasta el rango lineal del equipo utilizado.

1.4 Cuantificación

La cuantificación deberá realizarse por la suma de áreas de todos los picos que conforman el perfil dentro del intervalo de C5 (pentano) a C10 (naftaleno), a partir de la línea base y no con el método de valle-valle.

1.5 Reporte de resultados

Se deberá reportar la concentración de hidrocarburos de fracción ligera en mg/kg base seca, por lo cual será necesario determinar también la humedad de la muestra conforme al método del Anexo A.6 de esta Norma.

1.6 Referencias

1. Evaluation of Proposed Analytical Methods to Determine Total Petroleum Hydrocarbons in Soil and Groundwater prepared by Midwest Research Institute for USEPA Office of Underground Storage Tanks, August 14, 1990.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

2. Procedures for the laboratory analysis of hydrocarbon samples in terms of carbon fractions, August 4, 2000 submitted to Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, D.F. Prepared by Advanced Infrastructure Management Technologies Oak Ridge, Tennessee 37831-7606, managed by Lockheed Martin Energy Systems, Inc. for the U.S. Department of Energy under contract No. DE-AC05-84OR-21400.
3. EPA 5030 B (1996). Purge and Trap for Aqueous Samples (Revision 2, December 1996).
4. EPA 5035 (1996). Closed-System Purge-and-Trap and Extraction for Volatile Organics in Soil and Waste Samples (Revision 0, December 1996).
5. EPA 8015 C (2000). Non-Halogenated Organics Using GC/FID (Revision 3, November 2000).
6. Anexo AS-05 Contenido de humedad del suelo de la NOM-021-RECENAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

A.2 DETERMINACION DE HIDROCARBUROS DE FRACCION MEDIA

2.1 Método analítico

El análisis de hidrocarburos de fracción media deberá cubrir pesos moleculares entre C10 y C28 y puntos de ebullición entre 170°C y 430°C.

El método de referencia es el EPA 8015B 1996 para Hidrocarburos Rango Diesel (DRO) o versiones posteriores, modificado con el método de la Referencia 1.

La determinación cuantitativa se deberá realizar con un cromatógrafo de gases con columna capilar no polar y detector de ionización de flama. Como resultado se obtiene un perfil de picos cuya separación está en función de los pesos moleculares de los hidrocarburos presentes.

2.2 Preparación de la muestra

Para el análisis es necesario extraer previamente los hidrocarburos que están presentes en la muestra de suelo homogeneizada y cribada, mediante cualquiera de las técnicas que se enlistan a continuación. Soxhlet. Una muestra de suelo homogeneizada y cribada se mezcla con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua contenida. Se coloca en un cartucho de celulosa para extraer los hidrocarburos en un equipo tipo Soxhlet. El disolvente puede ser una mezcla de acetona/hexano (1:1), o bien, cloruro de metileno/acetona (1:1).

Sonicación Una muestra de suelo homogeneizada y cribada se mezcla con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua contenida. Se somete a sonicación en presencia de un disolvente orgánico de una a tres veces, según el contenido de hidrocarburos. El disolvente puede ser una mezcla de acetona/hexano (1:1), o bien, cloruro de metileno/acetona (1:1). El extracto se separa del suelo por filtración al vacío o por centrifugación. Los extractos orgánicos se concentran con un concentrador Kuderna Danish a un volumen final entre 1 y 10 ml según la sensibilidad deseada.

2.3 Calibración

De acuerdo al numeral 7.4.6 de la Norma, cuando exista producto libre, éste deberá entregarse junto con la muestra para calibrar el equipo y cuantificar la cantidad de producto derramado.

Para la calibración del equipo se deberá utilizar una mezcla de compuestos puros que simulan un diesel. Se deberán cumplir los requisitos de calidad para métodos analíticos establecidos por la normatividad correspondiente.

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

SOLUCION PATRON DE CALIBRACION DE HIDROCARBUROS FRACCION MEDIA (en metanol)	
Compuestos	Concentración, mg/L
Decano	1,000
Dodecano	1,000
Tetradecano	1,000
Hexadecano	1,000
Octadecano	1,000
Eicosano	1,000
Docosano	1,000
Tetracosano	1,000
Hexacosano	1,000
Octacosano	1,000
Total	10,000

La curva de calibración debe iniciar al menos en 10 mg/kg y hasta el rango lineal del equipo utilizado.

2.4 Cuantificación

La cuantificación deberá realizarse por la suma de áreas de todos los picos que conforman el perfil dentro del intervalo de C10 a C28, a partir de la línea base y no con el método de valle- valle.

2.5 Reporte de resultados

Se deberá reportar la concentración de hidrocarburos de fracción media en mg/kg base seca, por lo cual será necesario determinar también la humedad de la muestra conforme al método del Anexo A.6 de esta Norma.

2.6 Referencias

1. "Procedures for the laboratory analysis of hydrocarbon samples in terms of carbon fractions", August 4, 2000 submitted to Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, D.F. Prepared by Advanced Infrastructure Management Technologies Oak Ridge, Tennessee 37831-7606, managed by Lockheed Martin Energy Systems, Inc. for the U.S. Department of Energy under contract No. DE-AC05-84OR- 21400.
2. "Method for Determination of Extractable Petroleum Hydrocarbons (EPH) in Soil and Water" - Draft- February 28, 1990; prepared for Total Petroleum Hydrocarbons Method Committee by Midwest Research Institute.
3. EPA 3540 C (1996). Soxhlet Extraction (Revision 3, December 1996).
4. EPA 3550 C (2000). Ultrasonic Extraction (Revision 3, December 2000).
5. EPA 8015 C (2000). Non-Halogenated Organics Using GC/FID (Revision 3, November 2000).
6. Anexo AS-05 Contenido de humedad del suelo de la NOM-021-REC/NAT-2000. Que establece

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

A.3 DETERMINACION DE HIDROCARBUROS DE LA FRACCION PESADA

3.1 Método analítico

El análisis de hidrocarburos de la fracción pesada deberá cubrir pesos moleculares mayores a C18.

Los métodos de referencia son el EPA 9071B para la extracción de los HCFP del suelo con n-hexano y su purificación y determinación gravimétrica por el método EPA 1664A.

La determinación cuantitativa se deberá realizar gravimétricamente a partir del extracto con n-hexano de la muestra de suelo cribada y secada con Na₂SO₄ anhidro y procesada con sílica gel estandarizada.

3.2 Preparación de la muestra

Para el análisis es necesario que la muestra de suelo homogeneizada y cribada sea extraída con n-hexano mediante cualquiera de las técnicas que se enlistan a continuación.

Soxhlet. Una muestra de suelo homogeneizada y cribada se mezcla con sulfato de sodio anhidro hasta eliminar el agua contenida. Se coloca en un cartucho de celulosa para extraer los hidrocarburos en un equipo tipo Soxhlet con n-hexano.

Sonicación. Una muestra de suelo homogeneizada y cribada se mezcla con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua contenida. Se somete a sonicación en presencia del n-hexano de una a tres veces, según el contenido de hidrocarburos. El extracto se separa del suelo por filtración al vacío o por centrifugación.

3.3 Limpieza de la muestra

Un aspecto importante para la confiabilidad de este análisis radica en la limpieza de la muestra, la cual se deberá hacer con gel de sílice en una proporción de 30 gramos por cada gramo de material extraído, según se refiere en el método EPA 1664A.

Además, se debe someter la muestra en su totalidad a un proceso de homogeneización y cribado antes de iniciar el análisis; este paso es necesario para evitar sesgo en la selección de la submuestra que va a ser destinada para las determinaciones analíticas.

3.4 Calibración

Se debe utilizar una balanza analítica calibrada y se debe estandarizar la gel de sílice como se especifica en el método EPA 1664A.

3.5 Reporte del resultado

Se deberá reportar la concentración de hidrocarburos de fracción ligera en mg/kg base seca, por lo cual será necesario determinar también la humedad de la muestra conforme al método del Anexo A.6 de esta Norma.

3.6 Referencias

1. EPA 1664A (2002). n-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated n-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non-Polar Material) by Extraction and Gravimetry (revision A, July 2002).
2. EPA 9071B n-Hexane Extractable Material (HEM) for Sludge, sediment and Solid Samples , SW 846 Rev III A, 1998.
3. EPA 3540 C (1996). Soxhlet Extraction (Revision 3, December 1996).
4. EPA 3550 C (2000). Ultrasonic Extraction (Revision 3, December 2000).
5. Anexo AS-05 Contenido de humedad del suelo de la NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

A.4 DETERMINACION DE BENCENO, TOLUENO, ETILBENCENO Y XILENOS (SUMA DE ISOMEROS)

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

4.1 Método analítico

La determinación cuantitativa de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (como la suma de los isómeros *orto*-, *meta*- y *para*-) se debe realizar en un equipo de cromatografía de gases con columnas capilares adecuadas. Pueden utilizarse cualquiera de los siguientes sistemas de detección: espectrometría de masas, o detectores de fotoionización y conductividad electrolítica colocados en serie o si no están en serie, el análisis con doble columna de polaridad diferente en forma simultánea, para la cuantificación y confirmación de los analitos de interés.

El método de referencia es el EPA 8260B 1996 o versiones posteriores para Compuestos Orgánicos Volátiles por HRGC/MSD y Purga y Trampa o el EPA 8021B 1996 o versiones posteriores para Compuestos Volátiles Aromáticos y Halogenados por Cromatografía de Gases usando Detectores de Fotoionización y Conductividad Electrolítica y Concentrador de Purga y Trampa.

4.2 Preparación de la muestra

Para el análisis es necesario extraer previamente los BTEXs que están presentes en la muestra de suelo homogeneizada y cribada. Debe utilizarse un sistema de Purga y Trampa, el cual esta acoplado al cromatógrafo de gases/espectrómetro de masas con la finalidad de introducir los hidrocarburos directamente a la columna de separación, inmediatamente después de haber sido purgados del suelo y concentrados en una trampa especial, con lo cual se reduce la manipulación de la muestra y los tiempos entre la extracción y el propio análisis.

La técnica de Purga y Trampa consiste en hacer pasar una corriente de gas inerte a temperatura ambiente, a través de la muestra suspendida en agua reactivo y calentada a 40°C. Los hidrocarburos ligeros se desorben del suelo, pasan a la fase gaseosa y son entonces captados por un material adsorbente en la trampa del equipo. Posteriormente, este material se calienta y se le hace pasar a contracorriente, un gas inerte que desorbe los hidrocarburos, arrastrándolos hacia la columna del cromatógrafo donde son separados y transferidos al espectrómetro de masas donde son identificados y cuantificados.

4.3 Calibración

Para la calibración del equipo se deberán utilizar: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (isómeros *orto*-, *meta* y *para*-) puros certificados o una mezcla de materiales de referencia con certificado de análisis.

Se deberán cumplir con los requisitos de calidad para métodos analíticos establecidos por la normatividad correspondiente.

La curva de calibración debe iniciar para cada compuesto en una concentración 10 veces menor al límite máximo permisible más bajo de la NOM-138-SEMARNAT-2003 y hasta el rango lineal de trabajo del método.

4.4 Cuantificación

No se debe utilizar el TIC para cuantificar, la cuantificación deberá realizarse considerando la técnica de Perfil de Extracto de Iones con el área bajo la curva del ión principal de cada compuesto a partir de la línea base.

Se deberá confirmar la identidad de cada compuesto por medio de la comparación del espectro de masas con la biblioteca de espectros del equipo.

4.5 Reporte de resultados

Se deberá reportar la concentración de los hidrocarburos de manera individual, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (suma de isómeros), en mg/kg base seca, por lo cual será necesario determinar también la humedad de la muestra conforme al método del Anexo A.6 de esta Norma.

Se deberán anexar los TIC de cada uno de los BTEX identificados comparados con la biblioteca de espectros del equipo.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

4.6 Referencias

1. EPA 5035 (1996). Closed-System Purge-and-Trap and Extraction for Volatile Organics in Soil and Waste Samples (Revision 0, December 1996).
2. EPA 8260 B (1996). Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) (Revision 2, December 1996).
3. Anexo AS-05 Contenido de humedad del suelo de la NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

A.5 DETERMINACION DE HIDROCARBUROS POLIAROMATICOS (HPAs)

5.1 Método analítico

Los métodos de referencia son el EPA 8310 1986 o el EPA 8270C 1996 o versiones posteriores, para Hidrocarburos Poliaromáticos modificados con el de la Referencia 1.

La determinación cuantitativa de hidrocarburos poliaromáticos se debe realizar en un cromatógrafo de líquidos de alta resolución con detector de DAD acoplado con un detector de fluorescencia (EPA 8310 1986) o por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (EPA 8270C 1996).

Cuando existan interferencias que no permitan identificar o cuantificar los HPAs por Cromatografía de Líquidos, se deberá utilizar Espectrometría de Masas para la identificación y cuantificación, los límites de detección aumentarán dependiendo de las interferencias, por lo que deberán estimarse e informarse en el reporte de resultados o aplicar un método de limpieza adecuado al extracto obtenido y analizar ya sea por Cromatografía de Líquidos o por espectrometría de masas.

Con estos métodos se pueden identificar y cuantificar 16 HPAs diferentes, aunque los importantes para efectos de aplicación de esta Norma son: benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno e indeno(1,2,3-cd)pireno.

5.2 Preparación de la muestra

Para el análisis es necesario extraer previamente los hidrocarburos que están presentes en la muestra de suelo homogeneizada y cribada, mediante cualquiera de las técnicas que se enlistan a continuación. Soxhlet. Una muestra de suelo homogeneizada y cribada se mezcla con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua contenida. Se coloca en un cartucho de celulosa para extraer los hidrocarburos en un equipo tipo Soxhlet. El disolvente puede ser una mezcla de acetona/hexano (1:1), o bien, cloruro de metileno/acetona (1:1) (v/v).

Sonicación. Una muestra de suelo homogeneizada y cribada se mezcla con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua contenida. Se somete a sonicación en presencia de un disolvente orgánico de una a tres veces, según el contenido de hidrocarburos. El disolvente puede ser una mezcla de acetona/hexano (1:1) (v/v), o bien, cloruro de metileno/acetona (1:1).

El extracto se separa del suelo por filtración al vacío o por centrifugación.

En cualquiera de los dos casos, se puede requerir una limpieza para eliminar interferencias.

5.3 Calibración

Para la calibración del equipo se deberá utilizar al menos los siguientes compuestos puros certificados o una mezcla de materiales de referencia certificados: benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno e indeno(1,2,3-cd)pireno. Se deberán cumplir los requisitos de calidad para métodos analíticos establecidos por la normatividad correspondiente.

En el caso de Cromatografía de Líquidos, se deben programar los detectores para tener las siguientes longitudes de onda de cuantificación en el detector de fluorescencia a los tiempos

**DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE
HIDROCARBUROS.**

de retención de cada uno de los compuestos, el detector de DAD debe programarse de 200 a 350 nm con objeto de obtener los espectros UV que ayudarán a identificar los picos de los HPAs detectados y utilizar 270 nm para cuantificar los tres primeros HPAs.

Compuesto	Longitud de Onda UV	Longitud de Onda de Excitación (nm)	Longitud de Onda de Emisión (nm)
Pireno		237	385
Benzo(a)antraceno		277	376
Benzo(b)fluoranteno		255	420
Benzo(k)fluoranteno		255	420
Benzo(a)pireno		255	420
Dibenzo(a,h) antraceno		300	415
Indeno(1,2,3-c ,d) pireno		250	495

La curva de calibración debe iniciar para cada compuesto en una concentración 10 veces menor al límite máximo permisible más bajo de la NOM-138-SEMARNAT-2003 y hasta el rango lineal de trabajo del método.

5.4 Cuantificación

Se deberá considerar el área bajo la curva de cada compuesto a partir de la línea base con la señal de la longitud de onda especificada en la tabla anterior.

En el caso de Espectrometría de Masas, no se debe utilizar el TIC para cuantificar, la cuantificación deberá realizarse considerando la técnica de Perfil de Extracto de Iones con el área bajo la curva del ión principal de cada compuesto a partir de la línea base y se deberá confirmar la identidad de cada compuesto por medio de la comparación del espectro de masas con la biblioteca de espectros del equipo.

5.5 Reporte de resultados

Se deberá reportar la concentración de benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno e indeno(1,2,3-cd)pireno en mg/kg base seca, por lo cual será necesario determinar también la humedad de la muestra conforme al método del Anexo A.6 de esta Norma.

5.6 Referencias

1. Handbook for the HPLC Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Agilent Technologies, HP Part No. 01050-90300.
2. EPA 3540 C (1996). Soxhlet Extraction (Revision 3, December, 1996).
3. EPA 3550 C (2000). Ultrasonic Extraction (Revision 3, December, 2000).
4. EPA 8270 D (1998). Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) (Revision 4, January 1998).

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

5. EPA 8310 (1986). Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (Revision 0, September 1986).

6. Anexo AS-05 de la NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

A.6 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

6.1 Método analítico

El método de referencia es el Anexo AS-05 de la NOM-021-RECNAT-2000.

El método se basa en la determinación de la cantidad de agua expresada en gramos que contiene una muestra de suelo. Esta masa de agua se referencia de la masa de suelo seco de la muestra. La determinación de la masa de agua se realiza por la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco. Se considera como suelo seco aquel secado a la estufa a 105°C hasta obtener un peso constante.

En muestras de suelos con hidrocarburos de la fracción ligera y media, el secado a 105°C puede producir pérdida de masa de dichos hidrocarburos volátiles. Sin embargo, bajo este método, esto es inevitable.

6.2 Preparación de la muestra

Se coloca la muestra en un recipiente de aluminio tarado y se pesa, posteriormente, si la muestra presenta indicios de contener hidrocarburos volátiles que pudieran presentar un riesgo de explosión al colocar la muestra en la estufa, se debe dejar la muestra al menos 12 horas a temperatura ambiente para que se evaporen estos compuestos volátiles, para después ser secada en la estufa, en caso contrario, los recipientes de aluminio con la muestra homogeneizada y cribada se introducen inmediatamente en la estufa durante ocho horas como mínimo a una temperatura de 105°C posteriormente se registra el peso y se vuelven a introducir los recipientes hasta que se logre un peso constante en las muestras.

6.3 Calibración

Se debe utilizar una balanza calibrada.

6.4 Cuantificación

Se deben tener las muestras a peso constante antes de su cuantificación final, el resultado se debe calcular con el promedio de las dos últimas muestras que se leyeron para obtener el peso constante.

6.5 Reporte de resultados

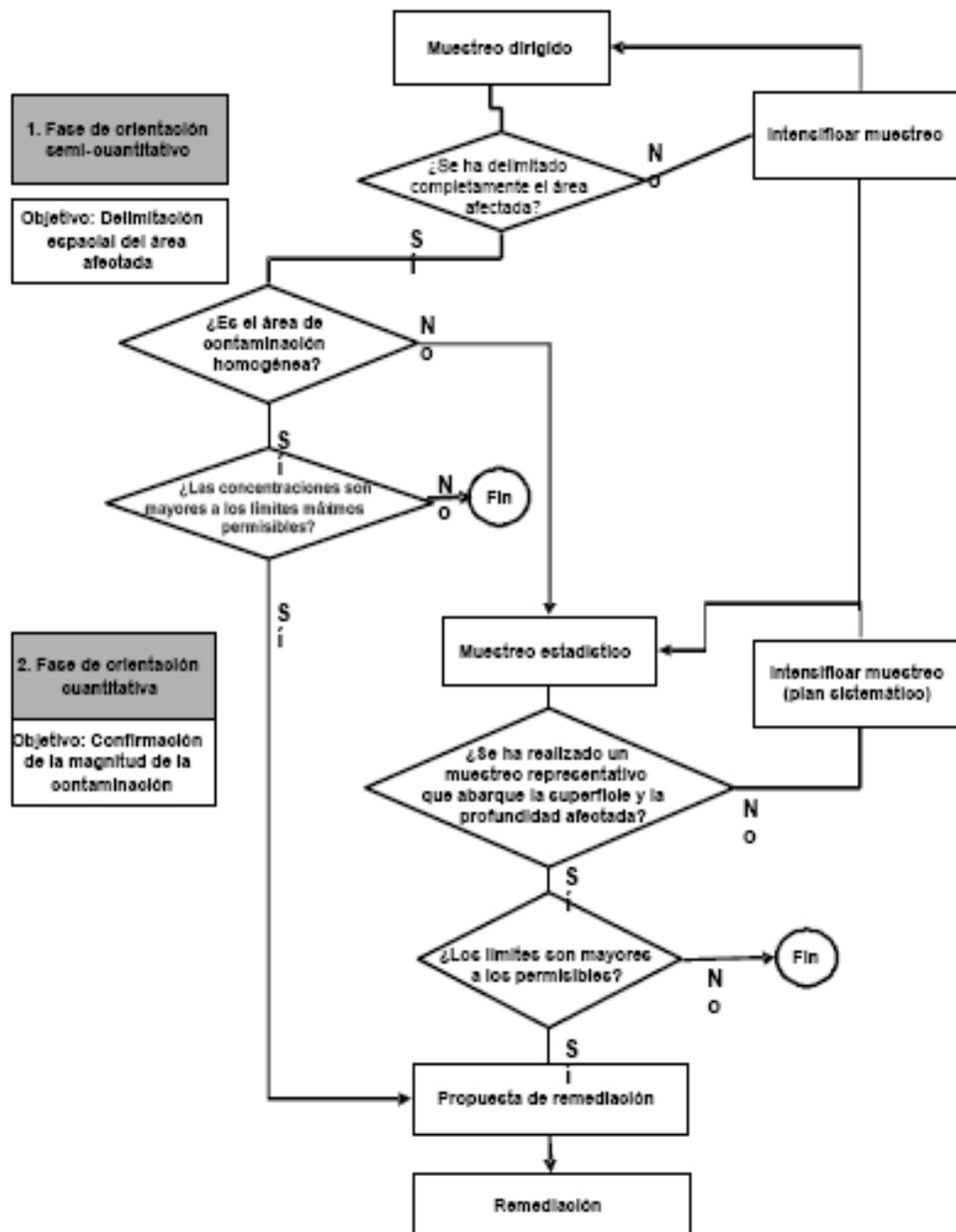
El resultado se debe expresar en % con tres cifras significativas.

6.6 Referencias

Anexo AS-05 Contenido de humedad del suelo de la NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

DETERMINACIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR DERRAMES Y FUGAS DE HIDROCARBUROS.

ANEXO B Estrategia General de Muestreo



Revisión Bibliográfica

1. Aparicio J. Francisco, 2003. Fundamentos de Hidrología Superficial. Ed. Limusa, Distrito Federal, México.
2. EPA, SEMARNAT, 1993. Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte entre el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, el Gobierno de Canadá y el Gobierno de los Estados Unidos Americanos. Consulta de página web:25/mayo/2006.
http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/cca.html
3. Almeida Filho R, Fernando P. Miranda y Tadashi Yamakawa, 1999. Remote Detection of tonal anomaly in an area of Hydrocarbon Microseepage. Tucano basin, north – eastern Brazil. Revista International Journal of Remote Sensing. Vol 20 No. 13 P. 2683 –2688.
4. Almeida Filho R., 2002. Remote Detection of Hydrocarbon Microseepage – Induced Soil Alteration. Revista International Journal of Remote Sensing. Vol. 23 P. 3523 – 3524 – 2688.
5. Barrett Eric C, Curtis Leonard F., 1992. Introduction to Enviromental Remote Sensing, Tecera Edición, Editorial Chapman and Hall. Londres, Inglaterra.
6. Belward Alan S., Valenzuela Carlos R., 1991. Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Devolving Countries. Editorial Kluwer Academic Publishers.
7. Bedient B. Philip, Rifai S. Hanadi, Newell J. Charles, 1994. Ground Water Contamination “Transport and Remediation”. Ed. Prentice Hall Inc. EUA
8. Bakker Wim H, Grabmaier Kart A, Huurneman Gerrit C, Van der Meer Freek D, Prakash Anupma, Tempfli Klaus, Gieske Ambros S. M, Hecker Chris S. M, Janssen Lucas S. M, Parodi Gabriel N, Reeves Colin V, Weir Michael J. c, Gorte Ben G. H, Horn John A, Kerle Norman, Pohl Chistine, Van Ruitenbeek Frank J y Woldai Tsehaie, 2001. Principles of Remote Sensing, Internacional Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Educational Texbook Series2 pag. 29 -110- Holanda.
9. Borrás C. Gonzalo, 2007. Convenios y protocolos internacionales. Fecha de Consulta: 15/abril/2007 <http://www.cetmar.org/documentacion/Convenios.htm>

10. Brookes, A. J. 1975. Photo Reconnaissance: The Operational History, Londres, Reino Unido.
11. Bonazountas, M. & D. Kallidromitou. 1993. Mathematical Hydrocarbon Fate Modelling in Soil Systems. Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils. Lewis Publishers. EUA.
12. Bussiness Image Group and Spot Image Corporation, 1999.
13. Centro Nacional de Prevención y Desastres, 2006. [Consulta de pagina web: 2 de abril de 2007 www.cenapred.unam.mx/metadataexplorer/index.html
14. Chow Pangay S.,1997. Petroquímica y Sociedad, Fondo de Cultura Económica. México.
15. CIA World Factbook, 2007. Consulta de página Web: Fecha de consulta: 09/mayo/2007 http://www.indexmundi.com/es/mexico/petroleo_consumo.html.
16. Chuvieco Salinero Emilio, 2002. Teledetección Ambiental (La observación de la Tierra desde el Espacio). Editorial Ariel Ciencia, España.
17. Cortinas de Nava Cristina, 2002. Gestión de Residuos Peligrosos, UNAM, México.
18. Cortina de Nava Cristina, Vega Gleason Silvia, 1993. Residuos Peligrosos en el Mundo y en México. INE, SEDESOL. México
19. Conabio, 2007. Cooperación internacional "Comisión para la cooperación ambiental de América del Norte. Fecha de consulta: 15/Enero/2007 http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/cca.html
20. Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Gerencia de aguas subterráneas. Distrito Federal, México.
21. Wilson J., David Ann N. Clarke. Marcel Dekker, Inc, 1994. Hazardous waste site soil remediation (Theory and Application of Innovative Technologies). Nueva York, EUA.
22. Diario Oficial de la Federación, Constitución Mexicana de 1917. Fecha de consulta: 12/Marzo/2007 <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1.pdf>
23. Diario Oficial de la Federación,2007. "La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente "(LGEEPA), SEMARNAT, publicado en el Diario Oficial de la Federación, viernes 1 enero de 1988, actualizada el día 05 de julio de 2007

México.

24. Diario Oficial de la Federación, 1988. "Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de residuos peligrosos". SEMARNAT, publicado por el Diario Oficial de la Federación, 25 de Noviembre de 1998.
25. Diario Oficial de la Federación, 2001. NOM-021-SEMARNAT-2000 , publicado por el Diario Oficial de la Federación, 07 de diciembre del 2001
26. Diario Oficial de la Federación, 2005. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, publicado por el Diario Oficial de la Federación, 29 de marzo de 2005.
27. Donald L. Wise, Debra J. Trantolo, 1994. Remediation of Hazardous waste contaminations soils.Ed. Marcel Dekker Inc. Nueva York, México.
28. Dutton Alan R Mace Robert E, 2002, "Evaluación de los Modelos numéricos de flujo en aguas subterráneas en el acuífero de Ogallala en Texas" *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*,. Vol. 19, Núm.2, pág. 107-120.
29. ECOPETROL S.A., 2005, Estadísticas Internacionales. Fecha de consulta: 05/junio/2006http://www.ecopetrol.com.co/especiales/estadisticas2005/estadisticas-int/consumo_petroleo_mundial.htm
30. Energy Information Administration 2007, Datos Internacionales. Consulta en página Web: falta fecha <http://www.eia.doe.gov/emeu/ipsr/t21.xls>
31. Estes J. E y Simonett D. S, 1975. Fundamentals of image interpretation, en R. G. Reeves (ed.), Manual of Remote Sensing , Falls Church, American Society of Photogrammetry, pp. 869 – 1076. PAIN
32. EPA, 2006. Proceso de Restauración. Consulta de página web: <http://www.epa.gov/superfund/spanish/what.htm>. Fecha de consulta: 25/noviembre/2006
33. EPA, 2006. Proceso de Restauración. Fecha de consulta: 25/noviembre/2006 http://www.epa.gov/superfund/spanish/sp_sfproces.htm.
34. Environment Canada, 2005. Taking action on federal contaminates sites: An environmental and economic priority. Fecha de consulta: 05/diciembre/2006 http://www.ec.gc.ca/etad/csmwg/pub/taking_action/en/toc_e.html.
35. Environment Canada, 2006.Understanding the Toxics Management Process.

- Fecha de consulta: 05/diciembre/2006.
<http://www.ec.gc.ca/toxics/tmp/en/index.cfm>.
36. Frezze R. A y Cherry J.A (1979). "Groundwater", Prentice Hall, Nueva Jersey, Estados Unidos de América.
 37. Fränzele, O. 1993. Contaminants in Terrestrial Environments. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Germany.
 38. FitzPatrick, 1987. Suelos "su formación, clasificación y distribución. Ed. CECOSA, tercera impresión.
 39. Guía Norteamericana de respuesta en caso de emergencia, 1996. incompleta
 40. Gilvert M. Masters, 1998. Introduction to Environmental engineering and Science., Ed. Prentice Hall, Nueva Jersey, EUA.
 41. Goyle Woodside, 1993. Hazardous materials and hazardous waste management: a technical guide. Ed. Wiley-Interscience Publication, Nueva York, EUA.
 42. Global land cover facility (glcf), 2006. Fecha de consulta: 20/octubre/2006 :
<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>.
 43. Guyanés Chander y Markham Brian, 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*,. 14 (11), 2674 -2677.
 44. Instituto Nacional de Ecología, Restauración de Suelos contaminados., México.
 45. Instituto Mexicano del Petróleo, 2006. Consulta de pagina web: 05/junio/2006
[www,imp.mx/petroleo/composicion.html](http://www.imp.mx/petroleo/composicion.html)
 46. Instituto Mexicano del Petróleo, 2006. Consulta de pagina web: 05/junio/2006
www,imp.mx/petroleo/tipo.html
 47. INEGI, 2005. Cuaderno Estadístico Delagacional Azcapotzalco. Fecha de consulta:15/abril/2006.
http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825001142&seccionB=bd
 48. HESE, S. & C. SCHMULLIUS (2006): High Resolution Oil Spill Mapping in West Siberia. – Geomonitoring in der Energie- und Rohstoffwirtschaft, Workshop. Freiberg, Alemania 21-22 June 2006.
 49. Heric M, Lucas C y Devine C, 1996. The Open Skies Treaty: qualitative utility evaluations of aircraft reconnaissance and commercial satellite imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 279 -284.

50. Hyatt, E. 1988. Keyguide to Information Sources in Remote Sensing, MansellPubl. Ltd. Londres, Inglaterra.
51. Juárez Najera Margarita. 1996, Estudio de la Contaminación del suelo en plantas industriales en el Marco de la Auditoria Ambiental, Tesis de la División de Estudios de Postgrado de Ingeniería, UNAM, México.
52. Jury, W. A. 1989. Chemical Movement through Soil. Vadose Zone Modeling of Organic Pollutants. Stephen C. Hern, Susan M. Melancon. Lewis Publishers Inc. USA.
53. Knox R. D, Palmer C. D y Fishazardous W (1989), "Transport and fate of Contaminants in the Subsurface" U.S Enviromental Protection Agency, Ada, EPA/625/4-89/019. Estados Unidos de América.
54. Kühn F., Oppermann K. y Hörig B., 2003. Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *International Journal Remote Sensing*, 25 (12), 2467 – 2473.
55. La Grega Michael D., Buckingham Phillip L., Evans Jeffrey C., 1994. Hazardous waste Management. Mc Grow Hill International Editions. Nueva York, Estados Unidos de América.
56. Cole G. Mattney, 1994. Assessment and Remediation of Petroleum contaminated sites. Ed. Lewis Publishers. Estados Unidos de América.
57. Mejía J. Yánez L., Carrizales L., Díaz –Barriga F. 2002. Evaluación Integral de Riesgo en sitios contaminados. Universidad de San Luis Potosí, México, Consulta de pág, web.30/abril/2006. <http://ambiental.uaslp.mx/>
58. Myles John, Wotherspoon Poul, 1998. Evaluación y Administración de Riesgos de Derrames de Hidrocarburos. Guía ambiental No. 19 de ARPEL.
59. Ortiz Brito Oscar, Ize Lema Irma, Gavilán García Arturo, 2003. Restauración de Suelos Contaminados con Hidrocarburos en México. INE Gaceta 69, México.
60. Ortiz Salinas, 2007. Hidrocarburos en el suelo. Sección 5. Fecha de consulta: 2/ septiembre/ 2007 <http://www.monografias.com/trabajos7/hime/hime2.shtml>
61. Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2006. Soluciones Espaciales a los Problemas del Mundo. Volumen 6, impreso en Australia.
62. Prats Jann, Eskelinen Miia, Pulliainen Jouni, Pyhäläht Timoi, Hallikainen Martti, 2004. Detection of Pollution on sea ice with airborne and spaceborne

- spectrometer. *IEEE Transsaction on Geoscience and Remote Sensing*, incompleta
63. PROFEPA, 2001. Emergencias Ambientales ocurridas en Pemex a Nivel Nacional. Consulta de página Web:08/mayo/2006 <http://www.profepa.gob.mx/NR/rdonlyres/A7B2B867-1077-4BF7-AA16-5CB4E946F3FC/833/EmerPemex.ppt>
64. PROFEPA, 2002. Consulta de página Web: 08/mayo/2006
65. Principios de Degradación Biológica de suelos y aguas subterráneas. Universidad de Chile, Dept. de Ing. Civil. Chile.
66. SEMARNAT, EPA, 2005. Programa México-Estados Unidos Frontera 2012. Fecha de consulta: 11/marzo/2006. [www..emarnat.gob.mx/informacionambiental/Publicacion/frontera2012_espanol.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Publicacion/frontera2012_espanol.pdf) -
67. Rodarte Ramón L, 1994. Hidrología Subterránea. Colección: Desarrollo tecnologico, IMTA y Colegio de Postgraduados, pág. 60-73, México.
68. Rencs Andrew N., 1999. Remote Sensing for the Earth Sciences, Editorial John Wilwy and Song, Inc. Vol. 3, tercera edición, Estados Unidos de América.
69. Ritchie J. C. y Rango A., 1996. "Remote Sensing applications to hydrology: Introduction". *Hydrological Sciences Journal* , 41(4), 429-431.
70. Schultz A. Pert, Engman T. Edwin. Remote sensing in hydrology and water management. Ed. Springer, 2000. Alemania
71. Soánez Calvo Mariano, 2000. Tratado de Reciclado y Recuperación de Productos de los Residuos. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España.
72. Soánez Calvo Mariano, 1999. Contaminación del Suelo "Estudios, Tratamiento y Gestión", Ed. Mundi Prensa. Madrid, España.
73. Tapia L, 1989. Derecho espacial y programas de observación de la Tierra, en R. Núñez (ed.), La observación de la Tierra desde el Espacio, Santander, Univ. Menéndez Pelayo pp. 1-15.
74. Universidad Nacional Autónoma de México, 1999. Compendio de Información del Sector Energético Mexicano, México.
75. Volke Sepúlveda, Velasco Trejo, 2002. Tecnologías de Remediación de Suelos Contaminados. INE, SEMARNAT, México.

76. Weaver W. James, Charbeneau J Randall, Kien K. Bob y Provost B. Jacques 1997. Guía de Usuario del Modelo de Evaluación de Derrames de Hidrocarburos (HSSM). Nacional Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development y U.S Enviromental Protection Agency, EUA.
77. Wim H. Bekker 2004. Princeples of Remote Sensing, ITC Educational Texbook Series, tercera edición. Incomplete
78. Yong Reymond N., Catherine N. Mulligan, 2003, Natural attenuation of contaminants in soil. Mulligan. Ed. Lewis Publishers. Estados Unidos de América.
79. Yaron B., Calvet R., Prost R., 1996. Soil Pollution (Proceses and Dynamics), Ed. Springer. Alemania.
80. Wang Yunpeng, Ding Xuan, 2000. Hydrocarbon Alteration Characteristics of Soil and Mechanism for Detection by Remote Sensing in East Sichuan Area, China. *Natural Resources Research*, 9 (4), 295 -301.