



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA
EXPERIMENTAL DE EXTRACCIÓN DE
VAPORES PARA SUELOS
CONTAMINADOS CON GASOLINA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A:

I. A. FERNANDO JOSÉ OLALDE CHAVARRÍA



DIRECTORA DE TESIS: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES

MEXICO, D.F.

Febrero, 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. EN I. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

Secretario: DRA. FRIDA MARIA LEÓN RODRIGUEZ

Vocal: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES

1er. Suplente: M. EN C. ROLANDO SALVADOR GARCÍA GÓMEZ

2do. Suplente: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

Lugar donde se realizó el trabajo de tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTORA DE TESIS:

DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, **Dra. Rosario Iturbe Argüelles**, por su apoyo, asesoría, confianza y enorme paciencia.

A mi **papa Fernando** y mi **hermana Miriam**, por su cariño incondicional.

A los miembros del grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos y compañeros del Instituto de Ingeniería, **Rosa María Flores Serrano, Guillermina Pérez Casimiro, Adriana Ramírez González, Patricia Montiel García, Carlos Flores Torres, Jesús Flores Torres, Carlos Flores Vázquez, Daniel Flores Vázquez, Julio Barroso, Claudia Chávez Lopez, Lilia Corona Ramírez, Jéssica López Olvera, Ana Alejandrina Castro Rodríguez y Luis Torres Bustillo**, quienes me brindaron su ayuda y asesoría para la realización de este trabajo, y que hoy me honran con su amistad.

A mi comité tutorial y miembros del jurado para examen de grado, **M. en I. Ana Elisa Silva Martínez, Dra. Frida María León Rodríguez, Dra. Rosario Iturbe Argüelles, M. en C. Rolando Salvador García Gómez, y Dr. Alfonso Durán Moreno**, por brindarme su consejo y compartir por medio de su asesoría, su admirable experiencia profesional.

A **CONACYT**, por otorgarme la beca de apoyo que hizo posible mis estudios de maestría.

Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** por las facilidades materiales y el apoyo académico para la realización de mi proyecto de tesis.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por ser la institución y espacio que me ha permitido avanzar en mi desarrollo profesional y humano.

DEDICATORIA

A **Guillermina**,

quien con su cariño y apoyo,

se convirtió en mi luz,

mi fuerza

y mi corazón.

ÍNDICE	I
RESUMEN	VI
ABREVIATURAS	VII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo general.....	7
2.2 Objetivos particulares.....	7
2.3 Hipótesis.....	7
2.4 Alcances.....	7
3 MARCO TEÓRICO	11
3.1 Sistema de Extracción de Vapores (SEV).....	11
3.2 Ventajas y desventajas del SEV.....	12
3.3 Desarrollo cronológico de la tecnología del SEV.....	12
3.4 Características del suelo requeridas para el SEV.....	12
3.5 Tipos de suelo y contaminantes que se pueden remover por SEV.....	15
3.6 Características de la gasolina.....	15
3.7 Criterios de diseño.....	16
3.8 Tratamiento de vapores.....	17
3.9 Mejoramiento térmico de SEV.....	18
3.10 Aplicaciones del mejoramiento por tecnologías térmicas.....	20
3.11 Estudios de Laboratorio.....	20
4 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL SEV Y SU PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO	23
4.1 Diseño de los modelos experimentales.....	25
4.2 Desarrollo de los modelos experimentales.....	28
4.3 Sistema de lavado de gases.....	34
4.4 Sistema de flujo de aire.....	33
4.5 Características del suelo.....	37
4.6 Preparación y contaminación de los suelos.....	39
4.7 Definición de las condiciones de operación para las pruebas experimentales.....	39
4.8 Metodología de muestreo y parámetros de control.....	40
4.9 Condiciones generales de funcionamiento del sistema experimental SEV...	42
5 RESULTADOS	43
5.1 Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso con capas de arcilla.....	45
5.1.1 Condición inicial.....	45
5.1.2 Remoción de contaminantes.....	47
5.2 Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso homogéneo.....	50

5.2.1	Condición inicial.....	50
5.2.2	Remoción de contaminantes.....	52
5.3	Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso con capas de arcilla e inyección de aire caliente.....	55
5.3.1	Condición inicial.....	55
5.3.2	Remoción de contaminantes.....	57
5.4	Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso con capas de arcilla e inyección de aire caliente.....	60
5.4.1	Condición inicial.....	60
5.4.2	Remoción de contaminantes.....	62
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
6.1	Consideraciones generales.....	67
6.2	Análisis comparativo de los estratos superiores.....	68
6.3	Análisis comparativo de los estratos medios.....	71
6.4	Análisis comparativo de los estratos inferiores.....	75
6.5	Evaluación de la eficiencia de remoción.....	78
6.5.1	Diseño experimental.....	78
6.5.2	Resultados de las eficiencias por combinación de factores y nivel o estrato	80
6.6	Evaluación global.....	83
7	CONCLUSIONES.....	85
8	REFERENCIAS.....	91
ANEXOS.....		97
Anexo A	Análisis físicos y químicos.....	99
Anexo B	Pruebas de contaminación del suelo	111
Anexo C	Hoja de seguridad gasolina.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Componentes de la gasolina.....	16
Tabla 4.1	Diseño experimental.....	39
Tabla 4.2	Campaña de muestreo.....	41
Tabla 4.3	Condiciones de operación de SEV por unidad experimental.....	42
Tabla 5.1	Concentración inicial por niveles y puerto de muestreo en la unidad experimental C1.....	45
Tabla 5.2	Concentración inicial por niveles en la unidad experimental C1.....	45
Tabla 5.3	Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C1.....	47
Tabla 5.4	Concentración inicial por niveles y puerto de muestreo en la unidad experimental C2.....	50
Tabla 5.5	Concentración inicial por niveles en la unidad experimental C2.....	50
Tabla 5.6	Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C2.....	52
Tabla 5.7	Concentración inicial por niveles y puerto de muestreo en la unidad experimental C3.....	55
Tabla 5.8	Concentración inicial por niveles en la unidad experimental C3.....	55
Tabla 5.9	Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C3.....	57
Tabla 5.10	Concentración inicial por niveles y puerto de muestreo en la unidad experimental C4.....	60
Tabla 5.11	Concentración inicial por niveles en la unidad experimental C4.....	60
Tabla 5.12	Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C4.....	62
Tabla 6.1	Factores considerados en el experimento.....	78
Tabla 6.2	Combinaciones de los factores.....	79
Tabla 6.3	Resultados de eficiencia de remoción para el nivel superior de acuerdo a las posibles combinaciones de factores en el experimento.....	80
Tabla 6.4	Resultados de eficiencia de remoción para el nivel medio de acuerdo a las posibles combinaciones de factores en el experimento.....	80
Tabla 6.5	Resultados de eficiencia de remoción para el nivel inferior de acuerdo a las posibles combinaciones de factores de el experimento.....	80
Tabla 6.6	Ordenamiento de datos, considerando que un factor no tiene efecto significativo para el nivel superior.....	81
Tabla 6.7	Ordenamiento de datos, considerando que un factor no tiene efecto significativo para el nivel medio.....	81
Tabla 6.8	Ordenamiento de datos, considerando que un factor no tiene efecto significativo para el nivel inferior.....	81
Tabla 6.9	Ejemplo de datos ordenados que permiten efectuar un ANOVA.....	82
Tabla 6.10	Resultados de la ANOVA.....	82

INDICE DE FIGURAS

Fig. 4.1	Geometría prismática de una cámara experimental.....	26
Fig. 4.2	Cámara experimental con puertos de muestreo.....	26
Fig. 4.3	Cámaras experimentales.....	27
Fig. 4.4	Tubo para extracción/inyección.....	28
Fig. 4.5	Elemento extracción/inyección y su campo de influencia.....	29
Fig. 4.6	Tubo de extracción/inyección.....	29
Fig. 4.7	Unidad de extracción/inyección.....	30
Fig. 4.8	Unidades de Extracción/Inyección.....	31
Fig. 4.9	Cámara experimental con empacado.....	32
Fig. 4.10	Unidad experimental con empacado.....	32
Fig. 4.11	Unidades experimentales.....	33
Fig. 4.12	Esquema del Sistema Experimental de Extracción de Vapores.....	35
Fig. 4.13	Sistema experimental de Extracción de Vapores.....	36
Fig. 4.14	Análisis de las propiedades del suelo.....	38
Fig. 4.15	Procedimiento de muestreo.....	41
Fig. 5.1	Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para unidad experimental C1.....	46
Fig. 5.2	Concentración vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C1.....	48
Fig. 5.3	Porcentaje de remoción vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C1.....	49
Fig. 5.4	Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para unidad experimental C2.....	51
Fig. 5.5	Concentración vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C2.....	53
Fig. 5.6	Porcentaje de remoción vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C2.....	54
Fig. 5.7	Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para unidad experimental C3.....	56
Fig. 5.8	Concentración vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C3.....	58
Fig. 5.9	Porcentaje de remoción vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C3.....	59
Fig. 5.10	Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para unidad experimental C4.....	61
Fig. 5.11	Concentración vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C4.....	63
Fig. 5.12	Porcentaje de remoción vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C4.....	64
Fig. 6.1	Concentración de contaminante en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel superior de las cuatro unidades experimentales.....	70

Fig. 6.2	Porcentaje de remoción de contaminante en función de tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel superior de las cuatro unidades experimentales.....	71
Fig. 6.3	Concentración de contaminante en función de tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel medio de las cuatro unidades experimentales.....	73
Fig. 6.4	Porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel medio de las cuatro unidades experimentales.....	74
Fig. 6.5	Concentración en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel inferior de las cuatro unidades experimentales.....	76
Fig. 6.6	Porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel inferior de las cuatro unidades experimentales.....	77

PÁGINA EN BLANCO

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue el de evaluar experimentalmente la efectividad que presenta el sistema de extracción de vapores, para el saneamiento de suelos contaminados con gasolina, considerando dos tipos de estratigrafía del suelo, así como la aplicación de inyección de aire caliente. Para ello se fabricaron cinco cámaras experimentales de material acrílico (C1, C2, C3, C4, C5), con una base de madera. Dentro de las cámaras experimentales, se instaló una estructura de tubería de cobre con la capacidad de trabajar alternadamente la inyección de aire y la extracción de vapores. Las cámaras contaron con 18 puertos de muestreo en diferentes posiciones. El parámetro de control fue la determinación de hidrocarburos fracción ligera en fase adsorbida de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. El experimento consistió en combinar las variables de interés de la siguiente forma:

- C1, cámara con arena contaminada con gasolina y capas intercaladas de arcilla, con extracción de vapores y sin inyección de aire caliente
- C2, cámara con arena contaminada con gasolina, con extracción de vapores y sin inyección de aire caliente
- C3, cámara con arena contaminada con gasolina y dos capas intercaladas de arcilla, con extracción de vapores y con inyección de aire caliente
- C4, cámara con arena contaminada con gasolina con extracción de vapores y con inyección de aire caliente
- C5, cámara testigo con arena contaminada con gasolina, sin extracción de vapores y sin inyección de aire caliente.

El sistema de extracción fue acoplado a dispositivos de captura de vapores (cartuchos de carbón activado) y de enfriamiento de la corriente gaseosa. Adicionalmente, se efectuaron cinco campañas de muestreo distribuidas dentro de 56 horas de tratamiento efectivo.

Los resultados del experimento indicaron que a unas horas de iniciado el experimento, la migración de la gasolina fue muy variable. Observándose los cambios de la siguiente manera:

En la cámara 1 (C1), con presencia de capas de arcilla sin inyección de aire, la concentración mayor se presentó en la capa superior debido a la dificultad de migración de la gasolina hacia el inferior (69,873 mg/kg). En las capas inferiores la concentración de gasolina fue un poco menor (46,938 mg/kg).

En la cámara 2 (C2), con presencia de arena únicamente sin inyección de aire, la migración de la gasolina fue evidente, debido a la alta permeabilidad del suelo. En este caso a pocas horas de iniciado el experimento, la concentración promedio en la capa superior era de 4783 mg/kg, en la media era de 13,750 mg/kg y en la inferior era de 80,594 mg/kg.

En la cámara 3 (C3), con presencia de capas de arcilla e inyección de aire, el comportamiento es similar a la cámara 1 (C1).

En cámara 4 (C4), con presencia de arena e inyección de aire, se observó un comportamiento en la remoción del contaminante proporcional al tratamiento aplicado, pues la remoción fue uniforme en todos los niveles en relación al tiempo de tratamiento.

En la cámara 5 (C5), al ser ésta el elemento testigo y no contar con aplicación de tratamiento de remoción, el único elemento que participó en la migración del contaminante, fue la gravedad, de esta manera, se presentó reducción de la concentración del contaminante en las capas superior y media, mientras que en la capa inferior, la concentración se mantuvo relativamente alta (de 80,594 mg/kg a 75,266 mg/kg).

Para las cuatro cámaras experimentales a las que se les aplicó tratamiento, se obtuvieron eficiencias de remoción mayores a 90% a las 56 horas del experimento. Durante las primeras 28.5 horas, la influencia del aire y de las capas de arcilla fue evidente en la remoción del contaminante; a partir de esta última hora se presentó un comportamiento fluctuante en las cámaras con presencia capas de arcilla (C1 y C3), mientras que en aquellas que contaban únicamente con arena (C2 y C4) el comportamiento fue asintótico.

El experimento realizado sobre extracción de vapores indica que la principal influencia para la remoción de la contaminación del suelo se debe al tipo de suelo. Sin embargo, aun cuando exista presencia de capas de arcilla se pueden obtener muy altas eficiencias de remoción (arriba del 90%).

La inyección de aire caliente, tuvo efecto en la remoción del contaminante principalmente en las primeras horas (28.5 h) de la experimentación.

Los resultados del experimento, demostraron que el Sistema Experimental de Extracción de Vapores cuenta con la solvencia técnica para efectuar pruebas de tratabilidad de suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles.

ABREVIATURAS

BTEX	B, Benceno; T, Tolueno; E, Etilbenceno; X, Xileno (suma de isómeros).
CAS	(Número CAS) Chemical Abstract Service.
COV's	Compuestos Orgánicos Volátiles.
COSV's	Compuestos Orgánicos Semivolátiles.
g/cm ³	Gramo sobre centímetro cúbico.
HFL	Hydrocarbons of Light Fraction, mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre 5 y 10 átomos de carbono.
HRGC/MSD	<i>Gas Chromatography accomplished to mass</i> . Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas.
kg/cm ²	Kilogramo sobre centímetro cuadrado.
LNAPL	<i>Light Non-Aqueous Phase Liquid</i> . Líquido en fase no acuosa más ligero que el agua.
L/m	Litro por minuto.
L/s	Litro por segundo.
mg/kg	Miligramos por kilogramo.
NAPL	<i>Non-Aqueous Phase Liquid</i> . Líquido en fase no acuosa.
PVC	Policloruro de Vinilo.
SEV	Sistema de Extracción de Vapores.
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
TIC	<i>Total ion current</i> . Corriente Iónica Total (cromatograma).
TPH GRO	<i>Total petroleum hydrocarbons- gasoline range organics</i> . Hidrocarburos Totales de Petróleo Rango Gasolina.
USEPA	Siglas en inglés para denominar a la Agencia de Protección Ambiental Norteamericana.

PÁGINA EN BLANCO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

PAGINA EN BLANCO

En México existen problemas serios de derrames de gasolina en ductos, tanques de almacenamiento, así como en estaciones de servicio.

Una de las tecnologías de remediación física, aplicable a estos casos, es el Sistema de Extracción de Vapores (SEV).

La extracción de vapores del suelo elimina las sustancias químicas dañinas, que aparecen en forma de vapores, del suelo por encima del nivel freático. Los vapores son gases que forman las sustancias químicas al evaporarse. Los vapores se extraen (eliminan) del suelo creando un vacío que los hace salir. La aeración a presión utiliza aire para eliminar los vapores dañinos del suelo contaminado y de las aguas subterráneas por debajo del nivel freático. Cuando se bombea aire por debajo en la superficie del terreno, las sustancias químicas se evaporan más rápidamente, con lo que se hace más fácil eliminarlas. Al igual que con la extracción de vapores, se emplea el vacío para extraer los vapores. Ciertas sustancias químicas, como los solventes y los combustibles, se vaporan fácilmente. La extracción de vapores y la aeración a presión funcionan mejor con esos tipos de sustancias químicas; éstas se emplean a menudo juntas para eliminar la contaminación tanto de los suelos como de las aguas subterráneas.

Para la extracción de vapores, es necesario perforar pozos de extracción en la zona contaminada. Estos pozos se perforan en el suelo pero sin llegar a las aguas subterráneas. Se sitúa el equipamiento junto a los pozos para crear el vacío que extrae el aire y los vapores a través del suelo a la superficie.

Se pueden perforar pozos de inyección de aire para ayudar a la eliminación de contaminantes. Los pozos de inyección de aire bombean aire al interior del suelo. El aire hace que los contaminantes se evaporen con mayor rapidez. A veces se emplean respiraderos en lugar de pozos de inyección de aire. Los respiraderos no bombean aire pero proporcionan espacio para el paso de aire fresco al interior del suelo. La cantidad de pozos de inyección de aire y de extracción puede ser uno o hasta cientos, según el área de la zona contaminada.

Una vez que los pozos de extracción sacan del suelo el aire y los vapores, un equipo especial para el control de la contaminación del aire los colecta. El equipo separa los vapores dañinos del aire limpio. Luego los vapores se pegan o se sorben a los materiales sólidos, o se condensan formando líquidos. Esos sólidos o líquidos contaminados se eliminan de manera segura.

La aeración funciona de manera muy semejante a la extracción de vapores. Sin embargo, los pozos que bombean el aire al interior del terreno se perforan en la tierra saturada de agua por debajo del nivel freático. El aire que se bombea al interior de los pozos perturba las aguas subterráneas, contribuyendo así a transformar los contaminantes en vapores. Los vapores ascienden hacia el suelo más seco que se halla por encima de las aguas subterráneas y son sacados a la superficie por los

pozos de extracción. Los vapores dañinos se eliminan del mismo modo que con en la sola extracción de vapores.

Existen factores que pueden afectar la aplicabilidad y efectividad del proceso, por lo que los estudios experimentales son esenciales, pues proporcionan información del diseño y reducen la incertidumbre sobre la efectividad de los resultados de la remediación.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la efectividad que tiene un modelo experimental de extracción de vapores propuesto para el saneamiento de suelos contaminados con gasolina, de igual forma contribuir al conocimiento que se tiene sobre la eficiencia de dichos sistemas bajo diferentes condiciones de operación, esencialmente la composición y tipo de suelo, así como la eficiencia que se obtiene de la inyección de aire a temperatura superior a la del ambiente.

Se fabricaron cinco cámaras experimentales de material acrílico, con una base de madera. Dentro de las cámaras, se instaló una estructura de tubería de cobre con la capacidad de trabajar alternadamente la inyección de aire y la extracción de vapores. Estas cámaras tienen 18 puertos de muestreo en diferentes posiciones.

El SEV incluye una bomba de vacío para atraer los vapores a través de pozos de extracción, una trampa con solución acuosa que permite enfriar el vapor extraído y un sistema de captura de vapores por adsorción en carbón activado granular.

Para evaluar la efectividad del sistema experimental se efectuaron pruebas, tomando en cuenta dos variables de interés. Se considerando dos tipos de estratigrafía del suelo, así como la aplicación de inyección de aire caliente.

Las pruebas permitieron determinar bajo qué circunstancias se alcanzó una mayor remoción de contaminante.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

PAGINA EN BLANCO

2.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema experimental de extracción de vapores para suelos contaminados con gasolina.

2.2 Objetivos particulares

- Diseñar y construir un modelo experimental de laboratorio que permita realizar estudios de remediación en suelos contaminados con gasolina.
- Efectuar pruebas de funcionamiento del sistema, midiendo la remoción de contaminante bajo diferentes condiciones de operación.
- Identificar la influencia que tiene la inyección de aire, en la remoción del contaminante en función del tiempo.
- Identificar la influencia que tiene la estratigrafía, en la remoción del contaminante en función del tiempo.
- Efectuar un análisis comparativo de la remoción del contaminante bajo las diferentes condiciones de operación.

2.3 Hipótesis

- Un sistema experimental de extracción de vapores permite identificar la influencia que tiene la estratigrafía, la inyección de aire y el tiempo, en la remoción de la fase vapor, en un suelo contaminado con gasolina.

2.4 Alcances

- Los modelos experimentales se usarán en el laboratorio.
- Las pruebas de laboratorio se llevarán a cabo sin repeticiones experimentales.
- Las características del proyecto no permiten tener réplicas.
- El suelo de trabajo es preparado.
- El elemento de control solo contará con un tipo de estratigrafía.
- El sistema operará con un solo régimen de flujo.

PAGINA EN BLANCO

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

PAGINA EN BLANCO

3.1 Sistema de Extracción de Vapores (SEV)

El sistema de extracción de vapores es una técnica de remediación física que consiste en captar los vapores almacenados en los poros del suelo de la zona no saturada, mediante un sistema de vacío y llevar estos vapores al exterior del suelo donde pasan a un sistema de lavado de gases o a un sistema de carbón activado.

La técnica consiste en instalar pozos de extracción de vapor en el área afectada, a distancias que impliquen que los radios de influencia se superpongan para asegurar que la aplicación de la técnica cubre toda el área (USEPA, 1996).

Pueden existir pozos de inyección de aire para forzar la entrada de aire al suelo, con el objetivo de promover el arrastre de los vapores dentro del suelo. Los respiraderos desempeñan la misma función que los pozos de inyección, pero son pasivos ya que en vez de ingresar aire, simplemente constituyen un pasaje para que se introduzca aire en el suelo. Los pozos de extracción de vapores pueden ser verticales u horizontales. Generalmente son verticales y penetran hasta las capas inferiores de la zona no saturada.

El sistema de extracción de vapores del suelo es un proceso seguro que requiere pocas tareas de mantenimiento.

3.2 Ventajas y desventajas del SEV

Ventajas

- Es una tecnología de remediación “*in situ*”, con perturbación mínima.
- Puede tratar grandes volúmenes de suelo a costos menores al de otras tecnologías.
- Es efectivo reduciendo los compuestos orgánicos volátiles (COVs) en la zona vadosa, por lo tanto reduce el potencial de migraciones posteriores (USEPA, 1996).
- El tiempo de tratamiento es corto, usualmente de unos cuantos meses hasta dos años. (USEPA, 1995). Barnes, 2003 ha discutido a detalle el método para estimar el tiempo de operación del SEV.
- Los suelos de textura gruesa son los ideales para la remediación por SEV (USEPA, 1996, 1998).

Desventajas

- El nivel del contaminante remanente en el suelo en muchas ocasiones no alcanza los criterios de los límites máximos permisibles debido a las limitaciones de la transferencia de masa. (Harper et al, 2003). En estos casos debe optarse por otra técnica de tratamiento.
- La aplicación se limita a lugares que contengan compuestos volátiles.

- Es difícil desarrollar modelos que permitan una predicción precisa del tiempo de tratamiento con el SEV (*Riser-Roberts, 1998; Yeung and Hsu, 2002; Barnes et al., 2002*).
- Las eficiencias de remoción mayores al 90% son difíciles de lograr. (*USEPA, 1996; Zhan and Park, 2002*).
- Un contenido de agua del suelo alto, puede reducir la permeabilidad del suelo y por lo tanto se puede reducir la efectividad del SEV debido a que se restringe el flujo de aire a través de los poros del suelo.
- No es apropiado para sitios con aguas subterráneas localizadas a menos de 1 m por debajo de la superficie del suelo.

3.3 Desarrollo cronológico de la tecnología del SEV

La extracción del vapor del suelo se desarrolló a principios de los años 80. La identificación de su primera aplicación fue polémica y era el tema por lo menos de una patente a mediados de 1980. La aceptación rápida del SEV como una tecnología de tratamiento del suelo se debió, en parte, a la relativa simplicidad de los principios que lo regían, el desarrollo temprano del diseño (*Johnson et al., 1990; USEPA, 1991a; Michaelson, 1993*), y el hecho de que se utilizan equipos y materiales convencionales (*Hutzler et al., 1989*).

La aceptación del SEV fue más rápida que para otras tecnologías innovadoras de tratamiento (*Gierke y Powers, 1997*). Su continua popularidad ha sido resultado de su buen funcionamiento remediando un gran número de sitios en donde se han logrado eficiencias efectivas. Su éxito se refiere principalmente a la reducción de riesgos.

El diseño básico, la instalación, y las prácticas operacionales no han cambiado sustancialmente desde los descritos en las primeras publicaciones por *Johnson et al., 1990b; USEPA, 1991b, Michaelson 1993 y, Holbrook et al., 1998*. Los refinamientos del diseño y los nuevos progresos se han enfocado hacia mejoras en el tratamiento de los gases a la salida, el funcionamiento del soplador, la durabilidad y la eficacia neumática.

3.4 Características del suelo requeridas para SEV

De acuerdo con la bibliografía, el SEV es aplicable en casos en que haya presencia de contaminantes de alta volatilidad que se encuentran en la zona no saturada y para suelos relativamente permeables y homogéneos. Idealmente el sitio debe estar cubierto de una capa superficial impermeable para poder contar con flujo y velocidad continuos de infiltración. (*Barnes et al., 2002; Barnes, 2003; Halmemies et al., 2003; Suthersan, 1997; Zhan and Park, 2002*).

De acuerdo con lo anterior, es necesario realizar una caracterización del sitio para lo cual se sugiere seguir los pasos que se mencionan a continuación (*Johnson et al, 1990*).

- 1.- Revisión bibliográfica: Realizar una compilación histórica, planos y entrevistas al personal del área. Esta información se usa para: identificar al contaminante, probables fuentes de contaminación, zona contaminada y área impactada potencialmente.
- 2.- Investigación preliminar del sitio: Conocimiento de las características geohidrológicas del lugar y de las características del suelo.
- 3.- Muestreo detallado del suelo: Perforación y muestreo del suelo para determinar las concentraciones del contaminante y composiciones. Se tiene que validar la calidad de los datos, asegurando que se ha colectado información específica.

Permeabilidad del suelo

La permeabilidad del suelo indica si los vapores pueden fluir fácilmente a través del espacio de poros del suelo.

Debido a que el flujo de aire y la permeabilidad del aire son linealmente dependientes, una permeabilidad alta del aire podría resultar en un flujo más alto a la misma presión de vacío.

Existen varios métodos que pueden ser empleados para la determinación de la permeabilidad del suelo, los cuales se listan a continuación:

1. Correlación con las propiedades físicas del suelo: La permeabilidad del suelo se estima de acuerdo a las características del suelo tales como: la distribución del tamaño de grano o conductividad hidráulica, considerando una correlación lineal. Este es un método de estimación rápido que provee una aproximación sólo de un orden de magnitud.
2. Medición en el laboratorio: Se toman muestras de suelo que se colocan en un tanque de presión (permeámetro) y se saturan con agua, el aire se inyecta para forzar el fluido fuera de la muestra. Los resultados se sustituyen en la ecuación de Darcy. Éste método altera la densidad másica y la estructura del suelo no refleja la variabilidad espacial, por lo tanto no es un método recomendado.
3. Prueba de fluctuación paramétrica del terreno: Se basa en su monitoreo de los cambios en la presión barométrica usando piezómetros instalados dentro de la zona vadosa.
4. Prueba de inyección de aire: Prueba de campo en la cual un volumen conocido de aire se inyecta en el suelo en un periodo dado.

5. Prueba de incremento en la presión: Monitoreo del gradiente de presión generado por la extracción de vapores.
6. Prueba de pérdida de presión. Este método es la prueba más certera de permeabilidad del suelo. El método involucra la medición de la presión en un pozo de monitoreo que se encuentra a una distancia dada de un pozo de extracción. Las mediciones son tomadas de al menos tres pozos de monitoreo localizados a distancias radiales variables del pozo de extracción. Esta prueba se realiza durante un corto tiempo pero lo suficientemente largo para extraer por lo menos uno o dos volúmenes de poro de aire (*Johnson et al., 1990a; Falta et al., 1989*).

La permeabilidad del suelo, desde la perspectiva de la operación de la extracción de vapores (SEV) se basa en la facilidad de flujo del aire a través de la zona no saturada, descrita como la permeabilidad gas-suelo. La densidad y viscosidad del gas también afecta su flujo, pero en menor grado para aplicaciones típicas de SEV (*Johnson et al., 1990a; Falta et al., 1989*). Las permeabilidades del gas son una función compleja de la porosidad del suelo lleno de gas y de la distribución de tamaño de poro. En la gran mayoría de proyectos de SEV, la permeabilidad del gas es medida “*in situ*” durante pruebas de permeabilidad del aire a nivel laboratorio.

Un suelo altamente heterogéneo puede tener una alta permeabilidad medida en una prueba piloto, debido a que parte del flujo puede concentrarse en capas predominantemente delgadas de alta permeabilidad, pero si la contaminación queda atrapada en zonas de baja permeabilidad, entonces la remoción estará limitada por la difusión (Suthersan, 1997). Así s uelos de textura gruesa generalmente tendrán altas permeabilidades (Suthersan, 1997).

Porosidad

Los suelos con altas porosidades permiten un flujo mayor al generar vacío. Las influencias de la permeabilidad intrínseca se relacionan con la distribución del tamaño de partícula del suelo.

Conductos subterráneos

Los conductores utilitarios debajo de la superficie (conductos electrónicos, telefónicos, de drenaje y agua) pueden ser puestos en una cama, así como tapados en materiales mucho más permeables que los suelos alrededor. Ésto puede interferir durante la aplicación de vacío para la extracción, debido a que se forman flujos preferenciales en direcciones diferentes a las esperadas por las condiciones geológicas del sitio.

3.5 Tipos de suelo y contaminantes que se pueden remover por SEV

El SEV es generalmente más exitoso cuando se aplica a productos del petróleo ligeros y por tanto más volátiles, como la gasolina. Los hidrocarburos pesados, como el diesel combustible, aceites de calentamiento y keroseno no son fácilmente removibles por esta técnica. La inyección de aire caliente mejora la volatilidad de estos productos

pesados del petróleo, pero los grandes requerimientos energéticos no lo hacen viable económicamente (USEPA, 1995, 1998; Zhan y Park, 2002). El benceno, tolueno, xileno, naftaleno, bifenilo, percloroetileno, tricloroetileno, tricloroetano y la gasolina son removidos de manera efectiva de suelos contaminados usando SEV (USEPA, 1996; Barnes et al., 2002).

Volatilidad

La propiedad de volatilidad está caracterizada por la presión de vapor del contaminante puro, si está presente como un líquido en fase no acuosa (NAPL, por sus siglas en inglés) y sí se encuentra presente solo en fases disueltas y absorbidas, por su constante de Henry. La presión de vapor puede ser transformada en términos de la capacidad de absorción de la fase gas para el contaminante. Por ejemplo, un compuesto con una presión de vapor de 0.1 mmHg a 25°C puede alcanzar una concentración de vapor de hasta 5.4 micromoles por litro de aire. Este ejemplo corresponde a lo que ha sido extraoficialmente considerado como el mínimo de la presión de vapor a la cual el SEV es práctica (Hutzler et al, 1989). Cuando la contaminación está presente como una mezcla NAPL, la capacidad de la fase vapor para cada contaminante se reduce a una cantidad en proporción directa a su fracción mol en la fase NAPL. Este efecto es conocido como la ley de Raoult (consultar Johnson et al., 1990a para aplicaciones de la ley de Raoult referentes al desempeño de la SEV).

La remoción de contaminación de la fase acuosa se encuentra en función de la constante química de Henry, que depende de la presión de vapor como de la solubilidad acuosa. En general, los compuestos que tienen una presión de vapor que puede considerarse alta tienen usualmente también una constante de Henry lo suficientemente alta para hacer efectiva la SEV (1 L⁰ atm/mol, Jordan et al., 1995). Las excepciones más notables son los compuestos orgánicos miscibles, tales como muchos alcoholes y cetonas, que tiene una alta presión de vapor (>80 mmHg) pero una constante de Henry baja (0.04 L atm/mol) debido a su solubilidad infinita.

3.6 Características de la gasolina

La gasolina proviene de la refinación del petróleo. El petróleo crudo se introduce en una torre de destilación, y los compuestos que se encuentran en fase gas a temperatura ambiente salen por la parte superior de la torre. Las diferencias en los componentes de la gasolina de una marca a otra no se consideran para los propósitos de remediación. El número de CAS es útil si se desea buscar mayor información sobre el compuesto. La

volatilidad de la gasolina se encuentra en el rango de 4-8 psia a 70°F. La contaminación del suelo debido a la gasolina ha sido identificada como un riesgo para la calidad del agua, ya que la gasolina se puede encontrar en diferentes fases (disuelto, libre en el ambiente o sorbido) que hace una fuente grande de contaminación del suelo (*La Grega, 2001*).

También, la fase del vapor del hidrocarburo representa un riesgo ya que puede provocar la explosión en los edificios subterráneos (como los sótanos) u otras estructuras. Una fuente de contaminación por la gasolina es la perforación de tanques de almacenamiento subterráneos. En la Tabla 1.1 se presentan los componentes principales de la gasolina (para mayor información ver anexo c).

Tabla 1.1 Componentes de la Gasolina (*Mattney C., 1994*)

Hidrocarburo	% en peso		Sustancia Peligrosa	Número de CAS ¹
	Sin Plomo	Premium Sin Plomo		
n-,i-Pentano	9	13	No	
n-Hexano	11	6	No	
2-Pentano	7	3	No	
2-Metilpentano	5	4	No	
n-Octano	1	1	No	
i-Octano	2	4	No	
Benceno	4	5	Si	71432
Tolueno	4	7	Si	108883
Etilbenceno	2	2	Si	100414
Xilenos	6	6	Si	1330207
Cumeno	1	2	Si	98828
MTBE, metanol o etanol	11-15	11-15	Si	67561

¹ No. CAS: Número del Chemical Abstracts Service (Servicio de Resúmenes Químicos) NOM-052-SEMARNAT-2005

3.7 Criterios de Diseño

El diseño del SEV es un proceso empírico que se deriva de los datos obtenidos de los estudios piloto desarrollados en el sitio específico a remediar, aunque el uso de los modelos matemáticos es una guía durante el diseño. Un estudio piloto provee los datos necesarios para determinar el radio de influencia de cada pozo y permite la detección de irregularidades en el movimiento del vapor según el tipo de suelo del lugar en específico. Una instalación piloto utiliza un número limitado de combinaciones entre pozos de extracción y monitoreo. Los pozos de extracción proporcionan las concentraciones iniciales de los COVs que se generan modificando las velocidades de

extracción. Los pozos de monitoreo permiten el análisis de las concentraciones del gas “*in situ*” y la medición de la eficiencia de la presión de vacío. Los periodos de prueba permiten analizar el comportamiento del sistema con diferentes velocidades de extracción y bombas de vacío. La duración actual de una prueba piloto se encuentra en el rango de 10 a 180 días dependiendo del tamaño y de la complejidad del sitio (Gregory *et al*, 2000). Las pruebas piloto permiten establecer los parámetros del diseño de sistemas a gran escala, como son: la distancia entre pozos de extracción y de monitoreo, los requerimientos de presión de vacío y del espaciamiento de las ranuras en el pozo. Adicionalmente se debe tomar en cuenta el método de tratamiento del gas efluente del sistema.

En un sistema de extracción vertical los pozos usualmente tienen 4 pulgadas de diámetro y son construidos generalmente de PVC (cloruro de polivinilo). La pantalla puede ser de acero, aluminio o PVC. A través del uso de filtro de arcilla, arena o grava empacado con pellets de bentonita y cemento se mantiene la integridad de los pozos. Gracias a estos aspectos los cortos de flujo de vapor serán mínimos. El pozo se enlaza con una bomba de vacío a través de tubería. La naturaleza exacta del sistema varía de acuerdo con las características del sitio e incluyen instrumentos como separadores de aire- agua, sensores de presión, sistemas de tratamiento de los gases efluentes y material de descarga. Uno de los aspectos más importantes a tomar en cuenta es el radio de influencia del sistema. La USEPA determina este parámetro como un indicador de la distancia máxima en la que un pozo de extracción, con una adecuada presión de vacío y flujo de vapor, puede efectivamente extraer los contaminantes del suelo. En la configuración final de un sistema, es importante que si se han empleado múltiples pozos se traslapen para que se pueda extraer completamente la contaminación de un sitio. La cantidad de presión de vacío que se necesita y las velocidades de flujo son los parámetros más importantes que afectan el costo y desempeño del sistema (Gregory *et al*, 2000).

3.8 Tratamiento de Vapores

Los vapores extraídos con este proceso deben pasar por un tratamiento de adsorción con carbón, incineración, oxidación catalítica o condensación. También se han usado otros métodos, como tratamiento biológico y oxidación ultravioleta. El tipo de tratamiento que se seleccione dependerá de los contaminantes presentes y su concentración. La adsorción con carbón es el tratamiento que más se usa para los vapores contaminados y se puede adaptar a una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles. Hay equipo a prueba de explosiones para manejar mezclas de gases extraídos de algunos vertederos o lugares donde se ha derramado gasolina, puesto que estas mezclas podrían ser explosivas. Para el caso de la gasolina se han probado métodos de tratamiento como es la biofiltración (Khan *F.I. et al.*, 2004).

El sistema de tratamiento del gas que sale del SEV, si se requiere, puede tener el costo mayor dentro del sistema de remediación. El carbón activado granular es el tratamiento que tiene un costo menor pero éste se incrementará si el gas a tratar se encuentra

como NAPL, especialmente como una mezcla de diferentes compuestos y se remueven concentraciones altas.

Los sistemas de combustión y oxidación son más costosos que el sistema de tratamiento por carbón activado, pero son generalmente más baratos de operar cuando

las concentraciones del gas a la salida son altas y si los contaminantes son combustibles o pueden ser oxidados fácilmente. Los sistemas de tratamiento del gas a la salida pueden ser rentados y algunos vendedores proporcionan sistemas piloto que pudieron probarse durante los estudios de permeabilidad.

Las pruebas piloto tienden a predecir las velocidades de remoción del contaminante del suelo. Por lo tanto, el tratamiento del gas debe ser considerado a largo plazo ya que debe ser flexible para poderlo ajustar a las condiciones de operación cuando las concentraciones disminuyan o se cambien por otras opciones de tratamiento.

3.9 Mejoramiento térmico de SEV

Todas las tecnologías de remediación para los sitios contaminados tienen sus limitaciones. Como resultado, las combinaciones de tecnologías de remediación, han recibido una gran atención ya que mejora el comportamiento final y puede incrementar la velocidad de tratamiento para alcanzar los límites permisibles. Estas combinaciones se han llamado "trenes de tratamiento" (USEPA, 2001).

Una de las técnicas con las que se puede mejorar la extracción de vapores del suelo es incrementando la temperatura del suelo. Estas técnicas de mejoramiento térmico para el SEV envuelven diversas tecnologías cuyo principal objetivo es la transferencia de calor en la superficie, ya sea para incrementar la presión de vapor de los COVs y COSVs, para favorecer su remoción vía SEV, o para incrementar la permeabilidad del suelo. Los compuestos contaminantes son removidos por celdas de extracción.

Las tecnologías térmicas de mejoramiento de la SEV incluyen la inyección de aire caliente o vapor, calentamiento por conducción térmica, calentamiento por resistencias eléctricas (RE), calentamiento por radiofrecuencia (RF).

Las aplicaciones pasadas de la tecnología de inyección de vapor se han enfocado primeramente en mover o evaporar productos libres del petróleo en la superficie a través de celdas de extracción para la remoción. La inyección de aire caliente ha sido utilizada para incrementar la presión de vapor de los COVs o COSV en la zona vadosa, lo cual reduce el tiempo de remoción e incrementa la remoción del contaminante. El uso del calentamiento por RE y por RF ha sido esencialmente enfocado a incrementar la velocidad de remoción másica en suelos con baja permeabilidad. El calentamiento por conductividad mejora la SEV convencional calentando la superficie del suelo para volatilizar los contaminantes. La tecnología de inyección de vapor mejora la extracción convencional inyectando vapor en la región contaminada. Los contaminantes son empujados por arriba de la temperatura de condensación del vapor de agua hacia

conductos de extracción. Adicionalmente, algunos de los contaminantes se evaporan o solubilizan debido a la inyección del vapor y son movidos hacia los conductos de extracción aplicando vacío. En los conductos de inyección de vapor se

pueden utilizar tres métodos comunes para descargar el vapor en la región contaminada: la inyección a través de barrenos e inyección por debajo del área contaminada. La inyección de vapor es más efectiva en regiones con suelos de permeabilidad mediana o alta, donde el condensado se pueda mover libremente a través del suelo. Además, una capa superficial de baja permeabilidad puede ser necesaria para prevenir el flujo intermitente de vapor para aplicaciones superficiales en el suelo (USEPA,1997).

La tecnología de inyección de aire caliente es similar a la inyección de vapor, pero se utiliza aire caliente en lugar de vapor. El aire caliente se puede introducir a través de pozos de inyección o inyectándolo, usando un taladro mezclador. La ventaja principal de la tecnología de la inyección de aire caliente es su costo bajo en comparación con las otras tecnologías. El aire caliente puede ser mucho más fácil de proporcionar que el vapor de la alta calidad. Sin embargo, la inyección del aire caliente no es un medio eficiente para proporcionar calor a la superficie del suelo debido a la baja capacidad de transferencia calor del aire. Ya que la inyección de vapor y la inyección del aire caliente implican la introducción de un fluido bajo presión en el interior del suelo, necesitarán las mismas características geológicas.

Para la RF, la energía se libera en la región contaminada usando electrodos o antenas que emiten ondas de radiofrecuencia. Las ondas de radio aumentan el movimiento molecular, que calienta el suelo. Los electrodos se colocan en la superficie del área contaminada o se insertan en agujeros perforados en el área contaminada. La energía emitida por los electrodos excita la región contaminada y eleva la temperatura. La RF es eficiente para la remoción de COVs que se encuentran en suelos de baja permeabilidad en la zona vadosa.

El calentamiento por RE utiliza el suelo como un camino para la conducción de la corriente eléctrica. La energía se disipa debido a la resistencia emitida por el calor. Se han realizado aplicaciones de calentamiento por RE mediante tubos de metal que se insertan en la región contaminada perforando el suelo. Posteriormente se pasa una corriente eléctrica a través de estos tubos para calentar la región contaminada y eliminar la humedad del suelo y direccionar los contaminantes. La tecnología de RE es eficiente para remover COVs que se encuentran en suelos con baja permeabilidad en la zona vadosa (USEPA,1997).

En el calentamiento del suelo por conducción térmica, una fuente de calor se pone en la superficie de la contaminación o se inserta en la formación del suelo, y el calor se transfiere a los contaminantes por conducción. Típicamente, un calentador común por RE se utiliza como la fuente de calor. La calefacción térmica de la conducción se puede utilizar para quitar COVs en un suelo de baja a media permeabilidad. Una ventaja de

esta tecnología es su facilidad de implementación y su costo relativamente bajo. Sin embargo, la conducción del calor con este método es muy lenta e ineficiente y requiere mantener un gran gradiente de temperatura para que se alcancen velocidades aceptables de calefacción (USEPA,1997).

3.10 Aplicaciones del mejoramiento por tecnologías térmicas

En general, las tecnologías de mejoramiento térmico deben ser consideradas durante la remediación del suelo por una o más de las siguientes aplicaciones:

Retiro de compuestos orgánicos absorbidos con bajas presiones de vapor: El sistema de SEV generalmente no es eficiente para quitar los compuestos orgánicos con presiones de vapor menores a 0.1 mmHg a 1.0 mmHg a temperatura ambiente. El

rango de aplicación puede ser extendido empleando tecnologías térmicas, ya que tienen el efecto de aumentar las presiones de vapor del contaminante, que hacen que los contaminantes sean más volátiles y por lo tanto, más susceptible al tratamiento de SVE.

Reducción del tiempo de tratamiento para las matrices difíciles: Algunas tecnologías de mejoramiento térmico, tales como el calentamiento por RF y RE, se han utilizado para disminuir el tiempo del tratamiento para COVs en suelos arcillosos y salinos. La calefacción del suelo primero crea vapor, que mejora la extracción de COVs del suelo, y después seca el suelo para aumentar la permeabilidad. Los tiempos reducidos del tratamiento pueden disminuir perceptiblemente el costo de la remediación.

Tratamiento de compuestos NAPL: Algunos sitios contienen compuestos NAPL que complican las estrategias de remediación y alargan los tiempos del tratamiento. Las tecnologías de mejoramiento térmico, especialmente cuando se introduce vapor, se pueden utilizar para solubilizar o los compuestos NAPL y que posteriormente puedan ser retirados por la SEV.

Aumento de la actividad biológica en suelo: Los aumentos de la temperatura del suelo pueden estimular la actividad biológica en éste. En general, se espera que las velocidades de biodegradación se dupliquen por cada incremento de 100° C en la temperatura del suelo. Las tecnologías de mejoramiento térmico tales como la modificación superficial del suelo, la calefacción por fibra óptica y la inyección de vapor de agua caliente se pueden utilizar para proporcionar pequeños aumentos en temperatura del suelo (2 a 10° C) (Suthersan,1997).

3.11 Estudios de Laboratorio

Los estudios de laboratorio son a menudo el mejor método para optimizar los requerimientos de flujo de aire y contenido de humedad, así como otros parámetros de control para un SEV. Éstos permiten la manipulación de los parámetros bajo condiciones controladas y pueden llevarse a cabo simultáneamente con un modelado y

estudios piloto en campo con la finalidad de optimizar la ejecución del sistema. Debido a lo oneroso que resultan estas actividades, su implementación es rara, excepto cuando se trata de grandes sitios contaminados con COVs no biodegradables donde la volatilización es posible.

Los estudios de laboratorio pueden realizarse usando columnas o cubos de suelo. Los cubos de suelo ofrecen el beneficio de proveer una mejor simulación de los perfiles de flujo de aire bajo de la superficie del suelo. Sin embargo los cubos de suelo no serán capaces de simular las condiciones macro geológicas de un lente de arena, lentes de arcilla o cualquier otro cambio mayor en la geología.

Los investigadores se han concentrado preferentemente en evaluar la velocidad del flujo de aire mínimamente aceptable para una extracción exitosa del vapor (Armstrong, Friend, y Mc Clennan 1994, Gierke, Hutzler, y McKenzie 1989, Sleep y Syikey 1989, y Brusseau, Jessup, y Rao 1991). Este tipo de estudios en laboratorio permiten obtener una matriz con elementos esenciales para el diseño de un sistema de extracción de vapores como son: tipo de contaminante, tipo de suelo, contenido de humedad y velocidad de flujo de aire mínimo. Y así mejorar de forma significativa el desempeño del sistema.

PAGINA EN BLANCO

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL SEV Y SU PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

PAGINA EN BLANCO

La metodología para llevar a cabo el desarrollo de los modelos experimentales se describe a continuación:

- Revisión bibliográfica.
- Diseño de los modelos experimentales.
- Desarrollo de los modelos experimentales (instalación de tubería, sistema de calentamiento, sistema de lavado de gases, sistema de muestreo, pruebas de flujo).
- Caracterización de los suelos que se probarán.
- Preparación y contaminación de los suelos .
- Definición de las condiciones de operación para las pruebas experimentales.
- Pruebas de remediación con la aplicación de SEV.
- Obtención de datos.
- Evaluación de resultados.

4.1 Diseño de los modelos experimentales

Los modelos o cámaras experimentales son los elementos unitarios del sistema. Se diseñaron con una geometría de prisma rectangular. La mayoría de los estudios experimentales tienen como diseño base una estructura cilíndrica (columnas); sin embargo, esto limita su manejo y el volumen de suelo de estudio, es por ello que se decidió una estructura prismática.

Características

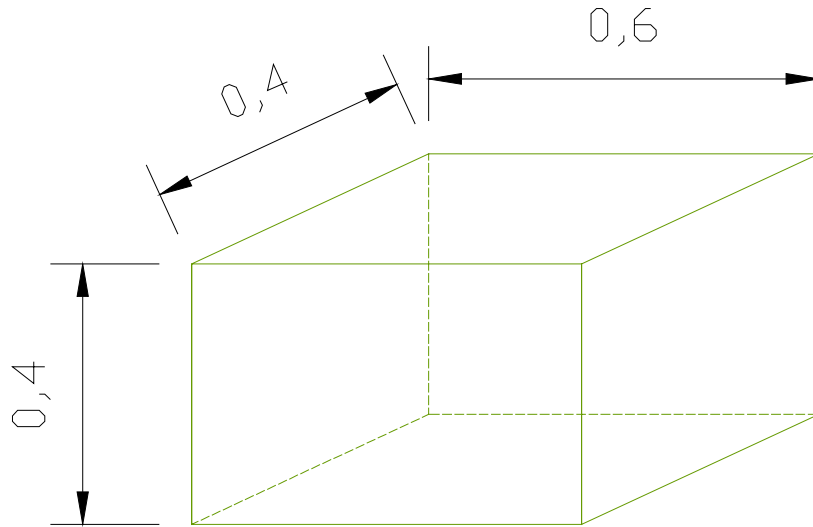
Tomando en cuenta el espacio y recursos disponibles, así como los tipos de pruebas que se plantearon desde el inicio del proyecto, se tomó la decisión de contar con un mínimo de 4 cámaras experimentales (Fig.4.1). Las cámaras experimentales tienen las siguientes dimensiones:

- Ancho 0.4 m
- Largo 0.6 m
- Altura 0.4 m
- Peso 8 kg aprox
- Volumen 0.1 m³
- 18 Puertos de muestreo

Los materiales empleados para la realización de las cámaras experimentales son las siguientes:

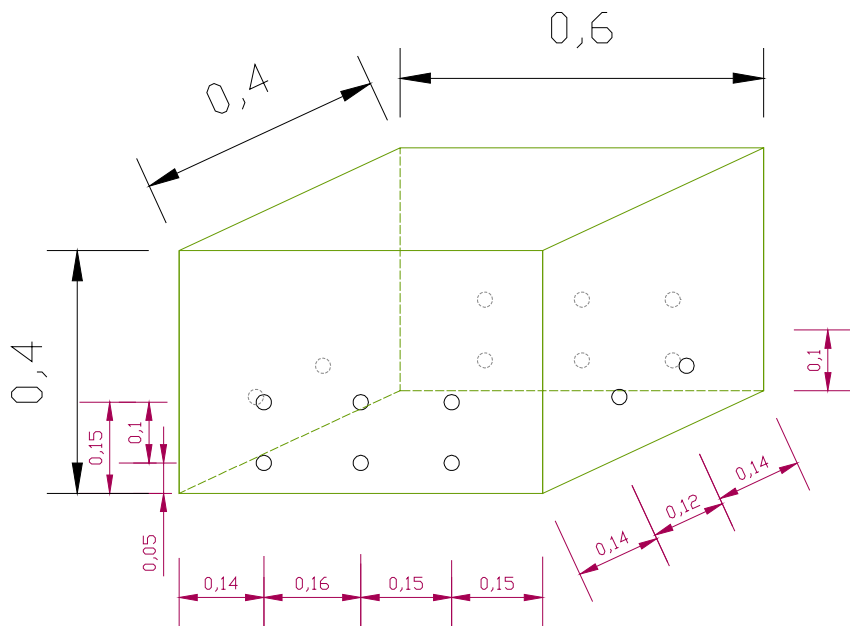
- Base de madera
- Paredes de acrílico de 4 mm de espesor
- Marco de acero
- Sellador a base de poliuretano
- Puertos de muestreo tipo tapa rosca de 22 mm

En la Figura 4.2 se presenta el diseño con los puertos de muestreo.



Nota: acotación en metros

Fig. 4.1 Geometría prismática de una cámara experimental.



Nota: acotación en metros

Fig. 4.2 Cámara experimental con puertos de muestreo.

En la fig. 4.3 se presentan las fotografías de los modelos experimentales.



(a)



(b)



(c)

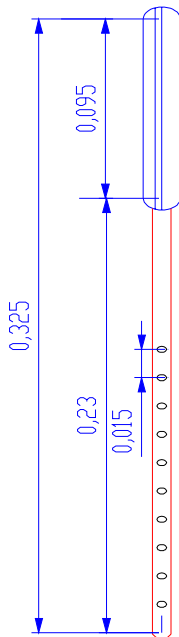
Fig. 4.3 Cámaras experimentales. (a) y (b) sin puertos de muestreo y sin sellar, (b) con puertos de muestreo y sellador.

4.2 Desarrollo de los modelos experimentales

Tubería para extracción/inyección

Para estos elementos, que actúan como pozos de inyección de aire y de extracción de COV's, se realizaron pruebas con diferentes materiales y calibres, con la finalidad de garantizar el mejor desempeño en cuanto al radio de influencia que pudiera alcanzarse tomando en consideración la potencia de los equipos a emplear (compresor y bomba de vacío). Se encontró que diámetros mayores en el barreno impedían un flujo de aire uniforme a lo largo del tubo de extracción, por lo que se realizaron pruebas de laboratorio, con tres diferentes calibres de barreno, esto permitió conocer la mejor disposición y número de orificios por elemento que permiten el flujo de vapores o aire.

Los tubos de extracción/inyección se cubrieron con una malla de acero num. 100, para evitar la introducción de pequeñas partículas de suelo y evitar así el taponamiento (Fig 4.4).



Las características del material empleado en la construcción de los tubos de extracción fueron las siguientes:

Tubo de cobre de diámetro nominal de $\frac{1}{4}$ ', la realización de 20 orificios por tubo, divididos 10 en línea vertical y 10 en sentido transversal. El diámetro nominal de cada orificio fue de $\frac{1}{16}$ ' y la longitud de cada elemento 23 cm. La malla utilizada fue de acero del número 100.

Fig. 4.4 Tubo para extracción/inyección

En la Fig. 4.5 se muestra el elemento de extracción y su radio de influencia.

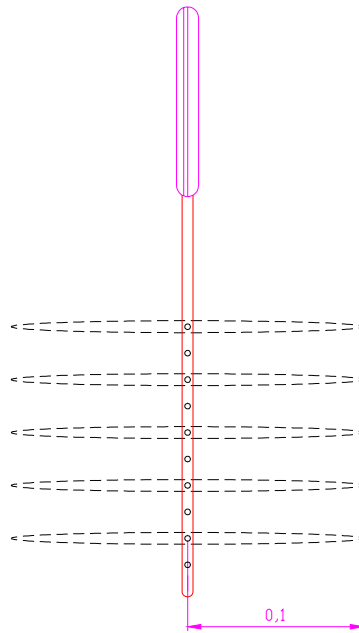


Fig.4.5 Elemento extracción/inyección y su campo de influencia.



(a)



(b)

Fig. 4.6 Tubo de extracción/inyección (a) sin malla (b) con malla.

Tomando en consideración la geometría y las dimensiones de las cámaras experimentales, se diseñaron las unidades de extracción/inyección, las cuales están compuestas por once tubos de cobre con un diámetro de $\frac{1}{2}$ " y 20 cm de longitud. Para la disposición y número de los once tubos, se consideró un radio de influencia promedio, de 10 cm, lo cual se obtuvo de las pruebas realizadas en el laboratorio.

Es importante destacar que, el radio de influencia se encuentra en función del flujo de vapor/aire, presión de vacío o de aire inyectado, así como del tipo de suelo. La presión y el flujo se pueden controlar por medio de una válvula acoplada a cada uno de los once elementos con los que cuenta la unidad.

Los elementos de inyección/ extracción son desmontables de la unidad, de igual forma, es desmontable una unidad de conexión que permite comunicar la unidad con la instalación externa de suministro de aire o de extracción. En la Figura 4.7 se aprecian los detalles del sistema de extracción de vapores y en la Figura 4.8 se presenta el sistema de empackado y el de muestreo de suelo.

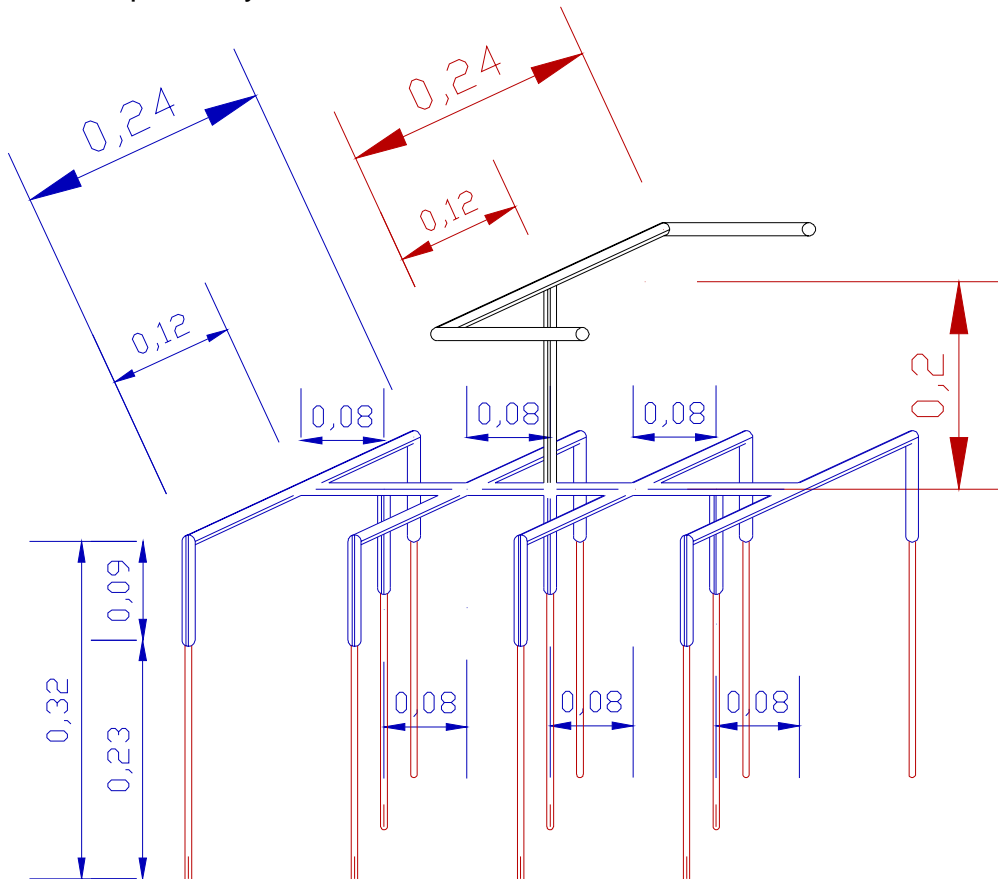


Fig. 4.7 Unidad de extracción/inyección.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.8 Unidades de Extracción/Inyección (a) sistema sin unidad de conexión, (b) unidad de conexión y (c) sistema acoplado a la unidad de conexión.

La unión de una cámara experimental y una unidad de extracción/inyección permiten obtener lo que en este proyecto llamaremos unidad experimental. Las unidades experimentales permiten el estudio de hasta $48,000 \text{ cm}^3$ de suelo, como se aprecia en la Fig. 4.9

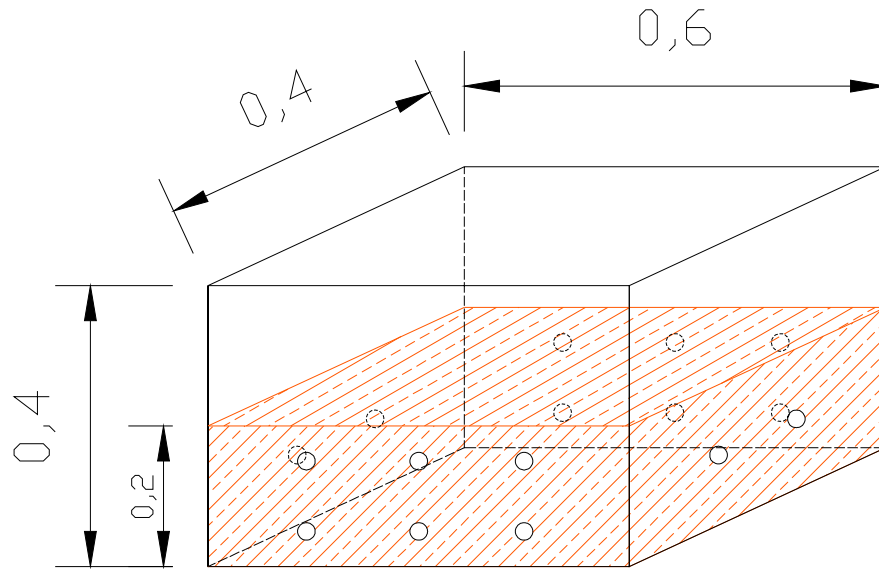


Fig. 4.9 Cámara experimental con empaçado.

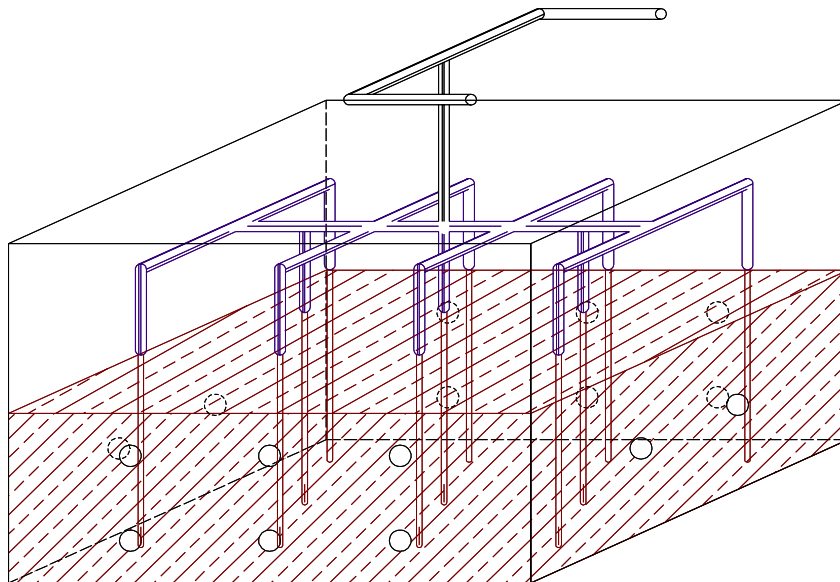


Fig. 4.10 Unidad experimental con empaçado.



(a)



(a)



(a)

Fig. 4.11 Unidades experimentales (a) con puertos de muestreo, (b) con unidad de conexión y (c) vista lateral.

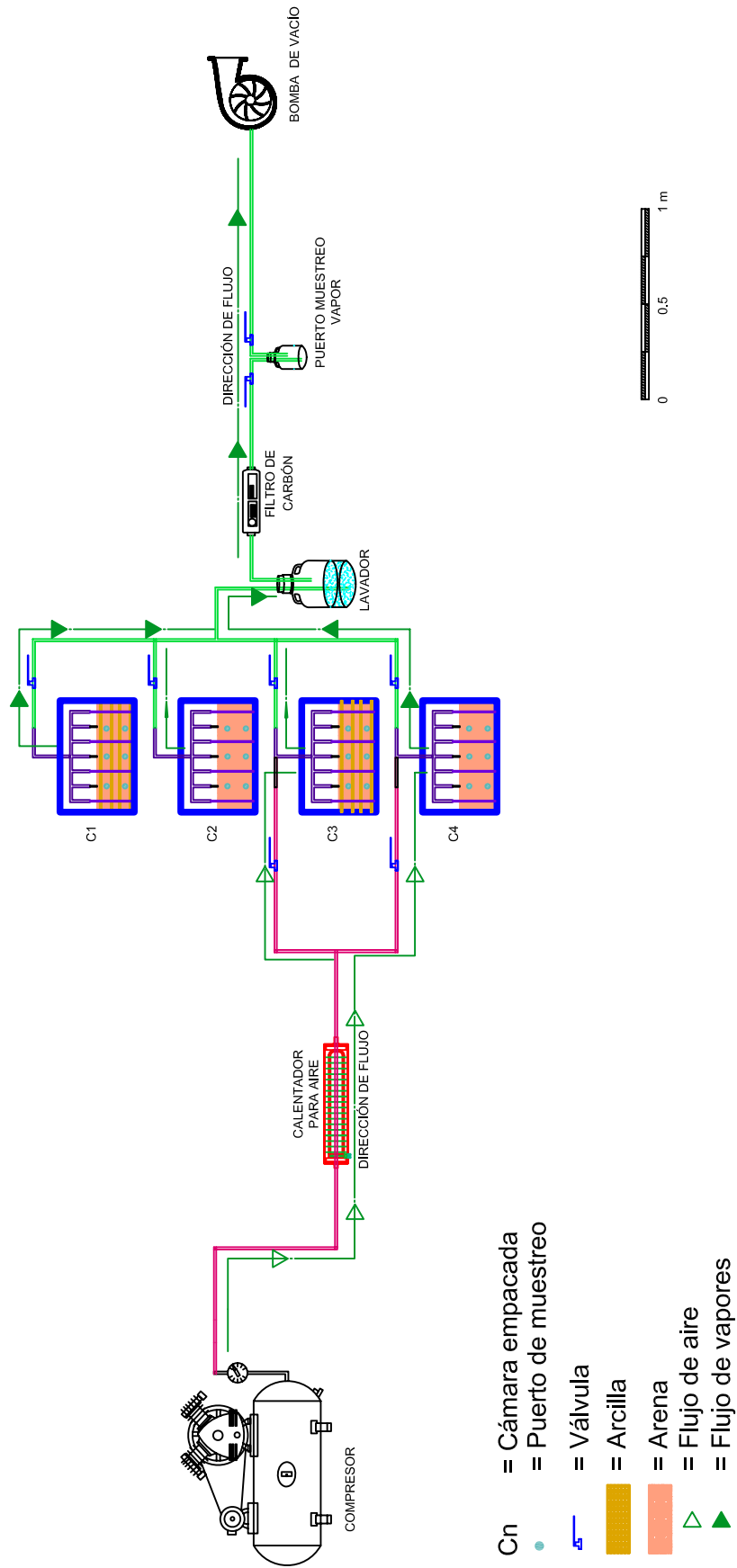
4.3 Sistema de lavado de gases

Como se aprecia en la Fig. 4.12, a la salida del equipo se acopló un sistema de captura de gases, compuesto de un tanque de 20 L con solución de lavado, que tiene además de la finalidad de capturar los vapores, la de enfriar la corriente gaseosa. Acoplado a este tanque de lavado se encuentra un par de cartuchos de carbón activado conectados en serie. Y como último eslabón de este subsistema, se encuentra una trampa de vapores, compuesta de material arcilloso, que permite, tanto retener los remanentes de vapores del contaminante, así como facilitar la toma de muestra del mismo y evaluar el funcionamiento del subsistema de lavado.

4.4 Sistema de flujo de aire

El sistema de inyección de aire y de extracción de vapores presenta las siguientes características que se mencionan a continuación:

- Presión máxima de inyección de aire 1.5- 3 kg/cm².
- Presión de vacío 25- 50 cm Hg como vacío.
- Flujo de aire hasta 60 L/m en régimen continuo.
- Flujo de vapor 750 L/s en régimen continuo.
- Temperatura de trabajo de 50 °C y hasta 80 °C.
- Régimen de trabajo intermitente y continuo.
- Consumo de energía hasta 1 kW en operación simultánea.
- Captura de vapores en cartucho de carbón activado.
- El sistema permite variabilidad en régimen de flujo, radio de influencia, presión, temperatura.
- Se cuenta con cuatro cámaras experimentales y permite acoplar dos más.
- El desarrollo experimental considera hacer estudios de remediación a suelos contaminados con gasolina.



POSGRADO DE INGENIERÍA, INGENIERÍA AMBIENTAL
 GRUPO DE INVESTIGACIÓN: SANEAMIENTO DE SUELOS Y ACUÍFEROS

ESQUEMA DEL SISTEMA EXPERIMENTAL DE EXTRACCIÓN DE VAPORES

DIBUJÓ:
 I. A. FERNANDO J.
 OLALDE CHAVARRÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM
 FIGURA 4.12



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.13 Sistema experimental de extracción de vapores. (a) con equipo, (b) y (c) con instalación externa y (d) con sistema de tratamiento.

4.5 Características del suelo

Para la realización de las pruebas experimentales se seleccionaron dos tipos de suelo :

- Suelo arenoso, proveniente de Coatzacoalcos, Veracruz.
- Suelo arcilloso, proveniente de Azcapotzalco, Ciudad de México.

Existen diferentes propiedades del suelo que interfieren en el funcionamiento de un SEV, por lo que es indispensable conocer la presencia de algunas propiedades del suelo. En el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería y en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería se llevaron a cabo los siguientes análisis de ambos suelos, los análisis se hicieron de acuerdo a los establecido en la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000, siendo los que a continuación se detallan:

- Suelo tipo arenoso
 - Granulometría(SUCS).- Arena mal graduada.
 - Densidad real(NOM-021-RECNAT-2000).- 2.7 g/cm^3 .
 - Densidad aparente.- 1.55 g/cm^3 .
 - Porosidad.- 43%.
 - Materia orgánica(NOM-021-RECNAT-2000).- 0.3 %.
- Suelo tipo arcilloso
 - Granulometría (SUCS).- Arcillas inorgánicas de alta plasticidad.
 - Densidad real(NOM-021-RECNAT-2000).- 2.23 g/cm^3 .
 - Densidad aparente.- 1.24 g/cm^3 .
 - Porosidad.- 44 %.
 - Materia orgánica(NOM-021-RECNAT-2000) .- 0.58%.

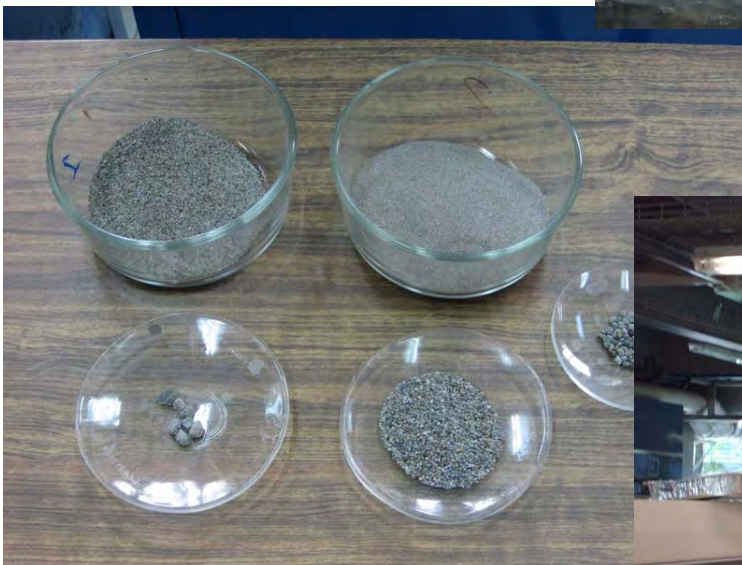
En relación a los procedimientos de determinación de los diferentes parámetros, ver Anexo A



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.14 Análisis de las propiedades del suelo. (a) suelo arenoso, (b) suelo arcilloso, (c) Análisis granulométrico y (d) determinación de densidad real.

4.6 Preparación y contaminación de los suelos

Se efectuaron pruebas sobre la forma de contaminar el suelo. De las diferentes formas de impregnar el suelo con gasolina, se encontró que la que permitía una mayor homogeneización, era con un mezclado previo y el empaque por capas de 5 cm. (Ver anexo B). Este procedimiento provoca volatilización, sin embargo, las pruebas también proporcionan la cantidad de gasolina a emplear.

De esta forma se utilizaron 180 mL de gasolina por cada kilogramo de suelo, esta cantidad de gasolina, proporcionó una concentración teórica de 131,400 mg/kg de hidrocarburos de la fracción ligera. Los ensayos demostraron que la concentración determinada en el laboratorio es del rango de 25,000 a 30,000 mg/kg. La pérdida por volatilización fue de más del 50% (ver página 114).

4.7 Definición de las condiciones de operación para las pruebas experimentales

El objetivo de estas pruebas fueron las de evaluar el funcionamiento del sistema de extracción de vapores con base en las variables de respuesta.

Los factores involucrados en este estudio fueron:

- Técnica
 - Reforzamiento térmico
 - Sin reforzamiento térmico
- Estratigrafía
 - Suelo arenoso homogéneo (suelo tipo a)
 - Suelo arenoso con capas de arcilla (suelo tipo b)

Por las características propias de este estudio y tomando en consideración los recursos disponibles, se decidió aplicar una sola prueba para cada combinación de factores. La tabla 4.1 resume este diseño.

Tabla 4.1 Diseño experimental.

Calor	Tipo de suelo	
	a	b
Si	1	1
No	1	1

Se consideró un elemento de control, es decir, el suelo testigo, el que no se sometió a la técnica de extracción de vapores, ni contó con aplicación de aire caliente; este elemento de control se preparó con el tipo de suelo arenoso.

Con la finalidad de lograr el objetivo planteado, se implemento un esquema flexible que permitió la retroalimentación entre la parte experimental y las actividades de evaluación y análisis.

4.8 Sistema de muestreo

Los muestreos se realizaron en la matriz suelo. Esto permitió conocer el avance en la remoción en la fase adsorbida por medio del SEV, para ello se dispusieron 16 puntos de muestreo por cada unidad experimental; se efectuaron cinco campañas de muestreo para cada uno de los cuatro cajones que recibieron tratamiento y tres campañas de muestreo para el elemento testigo.

En el primer sondeo se obtuvieron muestras puntuales por cada uno de los puertos con la finalidad de conocer la distribución del contaminante, así como una muestra compuesta por cada nivel. A partir del segundo sondeo, se realizaron muestreos compuestos por nivel.

El procedimiento de muestreo fue el siguiente:

- Se destapa el puerto de muestreo indicado.
- Se introduce una jeringa desechable por cada punto de muestreo, lo cual permite extraer más de 50 gramos de suelo.
- La muestra de suelo se retiene en la jeringa.
- Se tiene dispuesto un frasco de vidrio de 125 mL, con contratapa de teflón.
- En dicho frasco se vierte la muestra de la jeringa, se etiqueta y se preserva a 4°C para ser enviado a laboratorio.

De acuerdo a lo establecido en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, un suelo contaminado con gasolina debe ser sometido a los siguientes análisis:

- Hidrocarburos Fracción Ligera.
El método de referencia es el EPA 8015B, 1996 o versiones posteriores, para Hidrocarburos Rango Gasolina (GRO)
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, el cual es.
- Análisis de BTEX.
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.

Tomando en cuenta los requerimientos técnicos y económicos del muestreo de BTEX, así como las necesidades del experimento de contar con un parámetro de control que permita monitorear el proceso de remoción de contaminante (gasolina) en fase adsorbida, se seleccionó la fracción ligera de hidrocarburos, de acuerdo al método propuesto por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

Para efectuar el análisis del parámetro de control seleccionado (hidrocarburos fracción ligera) se contó con el apoyo de un laboratorio acreditado ante la EMA.

Tabla 4.2 Campaña de muestreo.

Fecha	Tiempo efectivo tratamiento (horas)	Unidad Experimental	Tipo de muestreo
10/Marzo/2008	0	C1,C2,C3,C4,T	Puntual por cada puerto y compuesto por cada nivel
3/Abril/2008	14.5	C1,C2,C3,C4,T	Compuesto por nivel
26/Abril/2008	28.5	C1,C2,C3,C4	Compuesto por nivel
13/Mayo/2008	42.5	C1,C2,C3,C4	Compuesto por nivel
29/Mayo/2008	56.5	C1,C2,C3,C4,T	Compuesto por nivel

C1= Arena con capas de arcilla

C2= Arena homogénea

C3= Arena con capas de arcilla y reforzamiento térmico

C4= Arena homogénea y reforzamiento térmico

T = Elemento testigo (arena)



a) obtención de muestra por medio de jeringa introducida en puerto de muestreo.



b) muestras obtenidas

Fig. 4.15 Procedimiento de muestreo

4.9 Condiciones generales de funcionamiento del sistema experimental SEV

Las cinco unidades experimentales se empacaron con el tipo de suelo establecido para cada una de ellas. Previo al empacado, el suelo fue sometido al mezclado con gasolina para conseguir las condiciones de contaminación deseada. El empacado de suelo se realizó por capas de 18 kg de arena previamente mezcladas con 2400 mL de gasolina y 1000 mL de agua destilada. Para el caso de las capas de arcilla se utilizó 6 kg de suelo arcilloso, 800 mL de gasolina y 333 mL de agua. Se intercalaron 2 capas de arcilla en las unidades experimentales programadas para ello. Se empacaron las capas necesarias para obtener un volumen de empacado de 0.048 m³. Una vez efectuado el empacado del suelo las unidades experimentales fueron selladas empleando un sellador a base de poliuretano y se permitió el secado de éste por 48 horas. Al término de las 48 horas necesarias para obtener el sellado, se realizó la primera campaña de muestreo, ésta permitió conocer las condiciones iniciales de concentración de gasolina en el suelo. Al finalizar el muestreo inicial en todas las unidades experimentales, se inició el tratamiento de remediación de suelo aplicando la extracción de vapores. La Tabla 4.3 resume las características de cada uno de las unidades experimentales y las condiciones de operación del sistema de extracción de vapores.

Tabla 4.3 condiciones de operación de SEV por unidad experimental.

Unidad experimental	Volumen de empacado	Tipo de empaque	Tipo de tratamiento aplicado
C1	0.048 m ³	Arena y 2 capas de suelo arcilloso	Extracción de vapores
C2	0.048 m ³	Arena homogénea	Extracción de vapores
C3	0.048 m ³	Arena y 2 capas de suelo arcilloso	Extracción de vapores y reforzamiento con aire caliente
C4	0.048 m ³	Arena homogénea	Extracción de vapores y reforzamiento con aire caliente
C5	0.048 m ³	Arena homogénea	Sin tratamiento
Donde C1, C2, C3, C4 Y C5, son las diferentes unidades experimentales			

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

PAGINA EN BLANCO

5.1 Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso con capas de arcilla, unidad experimental C1

5.1.1 Condición inicial

Para conocer los valores de concentración inicial dentro de la unidad experimental, se efectuó un muestreo puntual por cada uno de los puertos y por cada estrato o nivel para esta unidad experimental. Tales resultados se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Concentración inicial de contaminante por niveles y puerto de muestreo en la unidad experimental C1.

Nivel	Puerto de muestreo	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	1a	27,439
	9a	49,623
	3a	77,803
	11a	102,003
	5a	77,000
	13a	85,371
Medio	15a	33,896
	7a	25,193
	16a	23,047
	8a	29,570
Inferior	4a	22,364
	12a	23,641
	2a	41,356
	10a	46,686
	14a	24,310
	6a	71,433

De igual forma, se tomó una muestra compuesta por cada uno de los niveles. Los valores obtenidos para esta unidad experimental se muestran en la Tabla 5.2

Tabla 5.2 Concentración inicial de contaminante por niveles en la unidad experimental C1.

Nivel	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	69,873
Medio	31,435
Inferior	46,938

Con los valores de concentración inicial obtenidos de forma puntual, se efectuó un modelado, con la finalidad de esquematizar la distribución inicial de contaminación por cada uno de los niveles o estratos, la Figura 5.1 presenta el resultado del modelo para la unidad experimental C1.

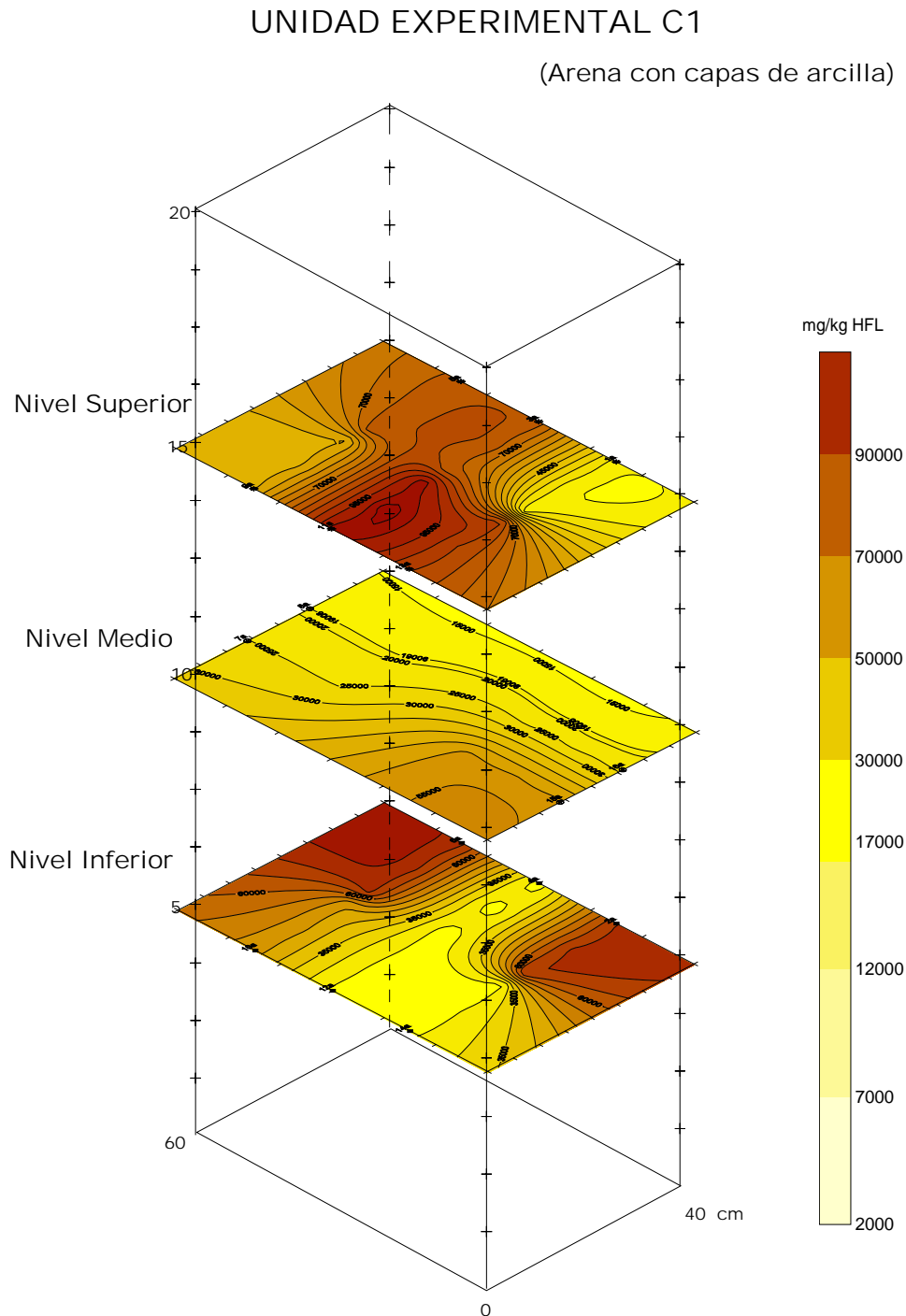


Fig. 5.1 Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para la unidad experimental C1. La escala vertical a la izquierda del modelo, representa los 20cm de suelo empacado y la ubicación a partir del piso de los puertos de muestreo.

5.1.2 Remoción de contaminante

La Tabla 5.3 presenta el resultado de las cinco campañas de muestreo para la unidad experimental C1.

Tabla 5.3 Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C1.

Nivel	Número de muestreo	Fecha de muestreo	Tiempo efectivo de tratamiento (horas)	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)	Porcentaje de remoción
Superior	1°	10/03/08	0	69,873	0.0
	2°	10/04/08	14.5	57,275	18.0
	3°	26/04/08	28.5	168	99.8
	4°	13/05/08	42.5	456	99.3
	5°	29/05/08	56.5	154	99.8
Medio	1°	10/03/08	0	31,435	0.0
	2°	10/04/08	14.5	45,891	0.0
	3°	26/04/08	28.5	2,998	90.5
	4°	13/05/08	42.5	5,017	84.0
	5°	29/05/08	56.5	844	97.3
Inferior	1°	10/03/08	0	46,938	0.0
	2°	10/04/08	14.5	57,455	0.0
	3°	26/04/08	28.5	9,762	79.2
	4°	13/05/08	42.5	23,645	49.6
	5°	29/05/08	56.5	5,237	88.8

La evolución del contaminante presente en fase adsorbida dentro de la unidad experimental, se representa gráficamente en las Figuras 5.2 y 5.3, en ellas se aprecian tres diferentes líneas, las cuales corresponden a cada uno de los niveles o estratos en los que se dividió la matriz suelo. La Figura 5.2 representa la remoción del contaminante en términos de la concentración inicial; por su parte, la Figura 5.3 representa el porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento.

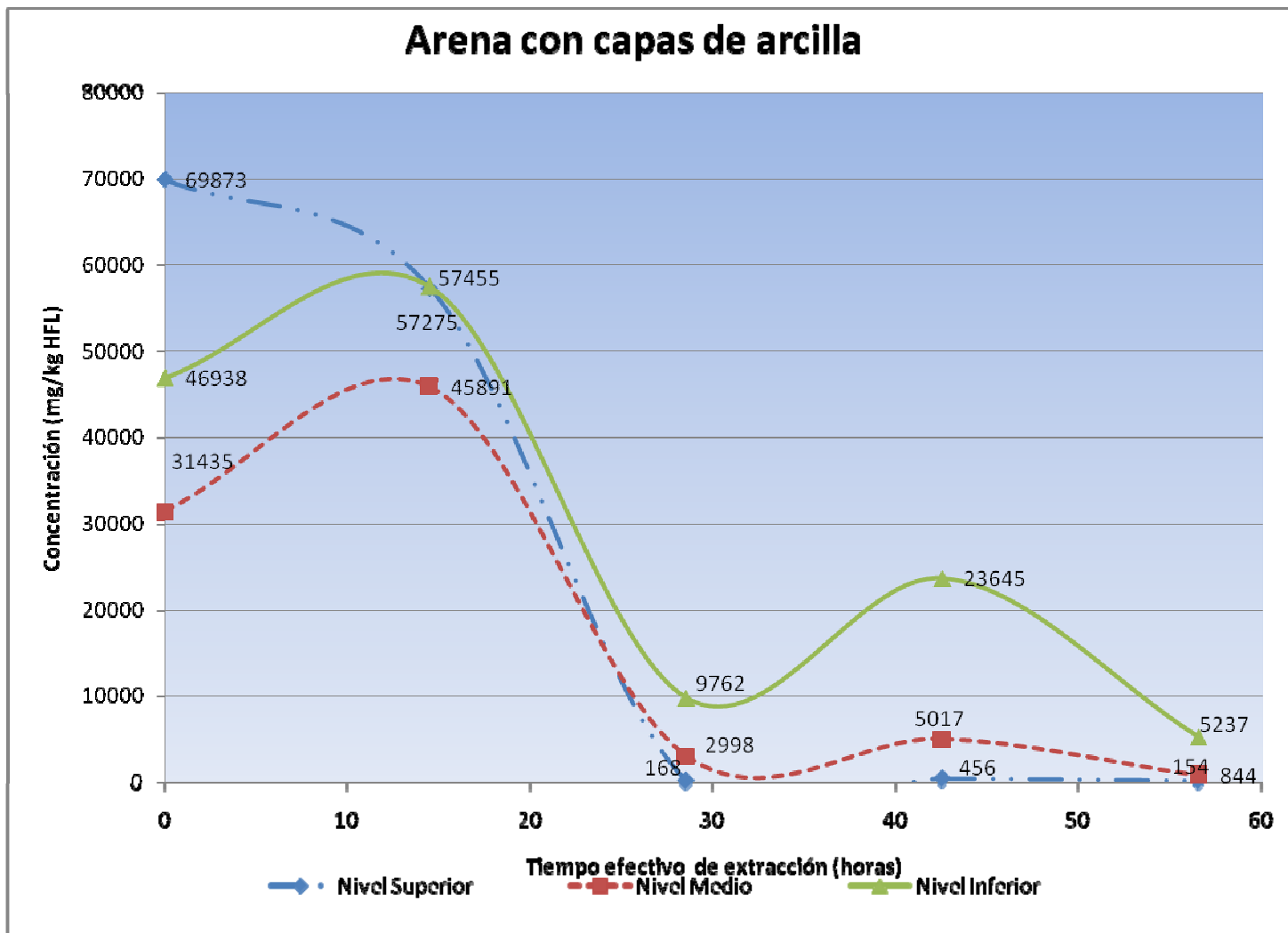


Fig. 5.2 Concentración vs el tiempo efectivo de tratamiento en la unidad experimental C1.

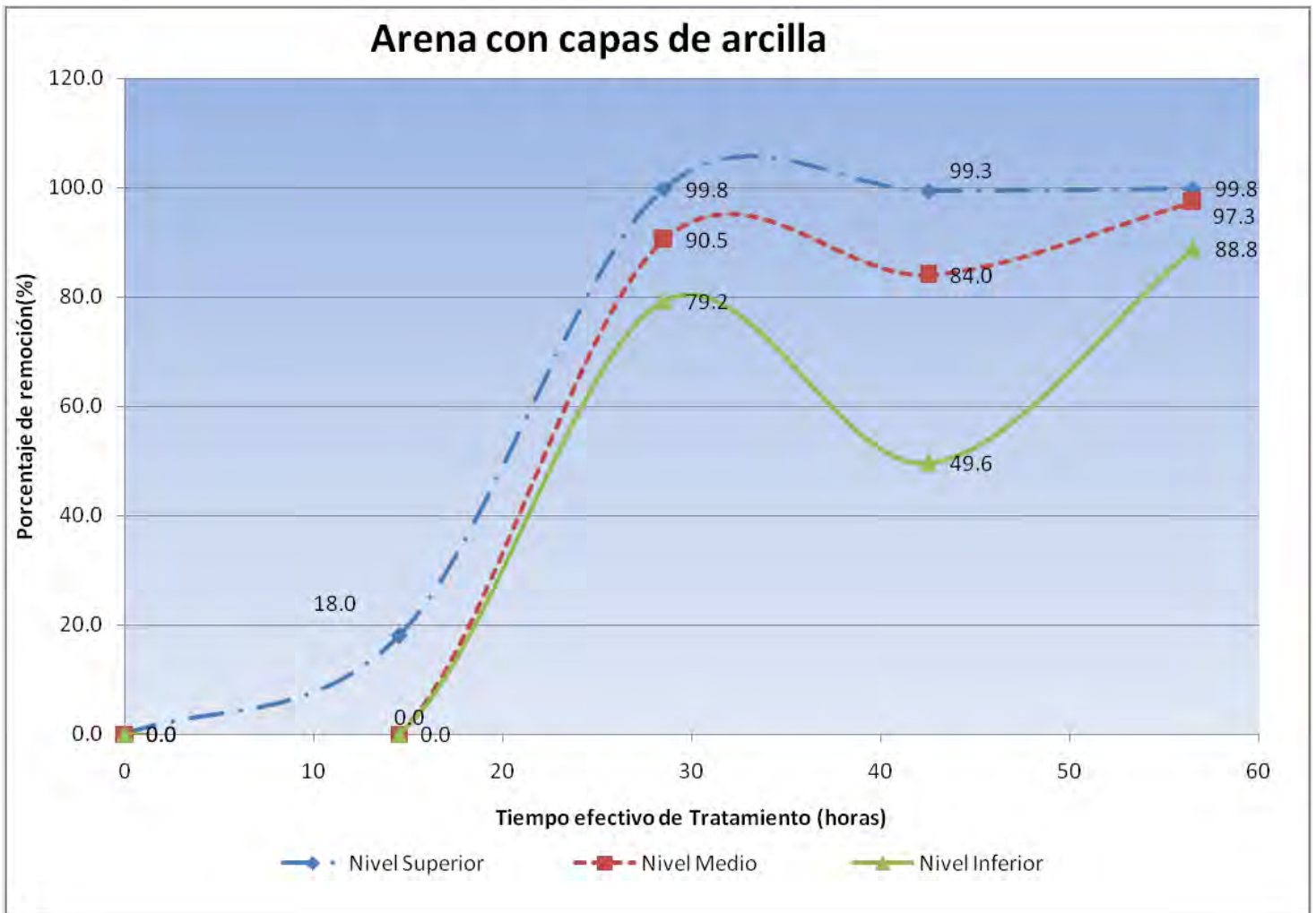


Fig. 5.3 Porcentaje de remoción vs el tiempo efectivo de tratamiento en la unidad experimental C1.

5.2 Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso homogéneo, unidad experimental C2

5.2.1 Condición inicial

Para conocer los valores de concentración inicial dentro de la unidad experimental, se efectuó un muestreo puntual por cada uno de los puertos y por cada estrato o nivel para esta unidad experimental. Tales resultados son mostrados en la Tabla 5.4

Tabla 5.4 Concentración inicial de contaminante por niveles y por puerto de muestreo en la unidad experimental C2.

Nivel	Puerto de muestreo	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	1a	3,308
	9a	7,684
	3a	4,462
	11a	5,315
	5a	2,369
	13a	5,560
Medio	15a	15,444
	7a	10,724
	16a	13,701
	8a	13,867
Inferior	4a	31,814
	12a	58,212
	2a	115,054
	10a	54,396
	14a	8,1187
	6a	116,349

De igual forma, se tomó una muestra compuesta para cada uno de los niveles. Los valores obtenidos para esta unidad experimental se muestran en la Tabla 5.5

Tabla 5.5 Concentración inicial de contaminante por niveles en la unidad experimental C2.

Nivel	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	4,783
Medio	13,750
Inferior	80,594

Con los valores de la concentración inicial obtenidos de forma puntual, se efectuó un modelado, con la finalidad de esquematizar la distribución inicial de contaminación por cada uno de los niveles o estratos; la Figura 5.4 presenta el resultado del modelo para la unidad experimental C2.

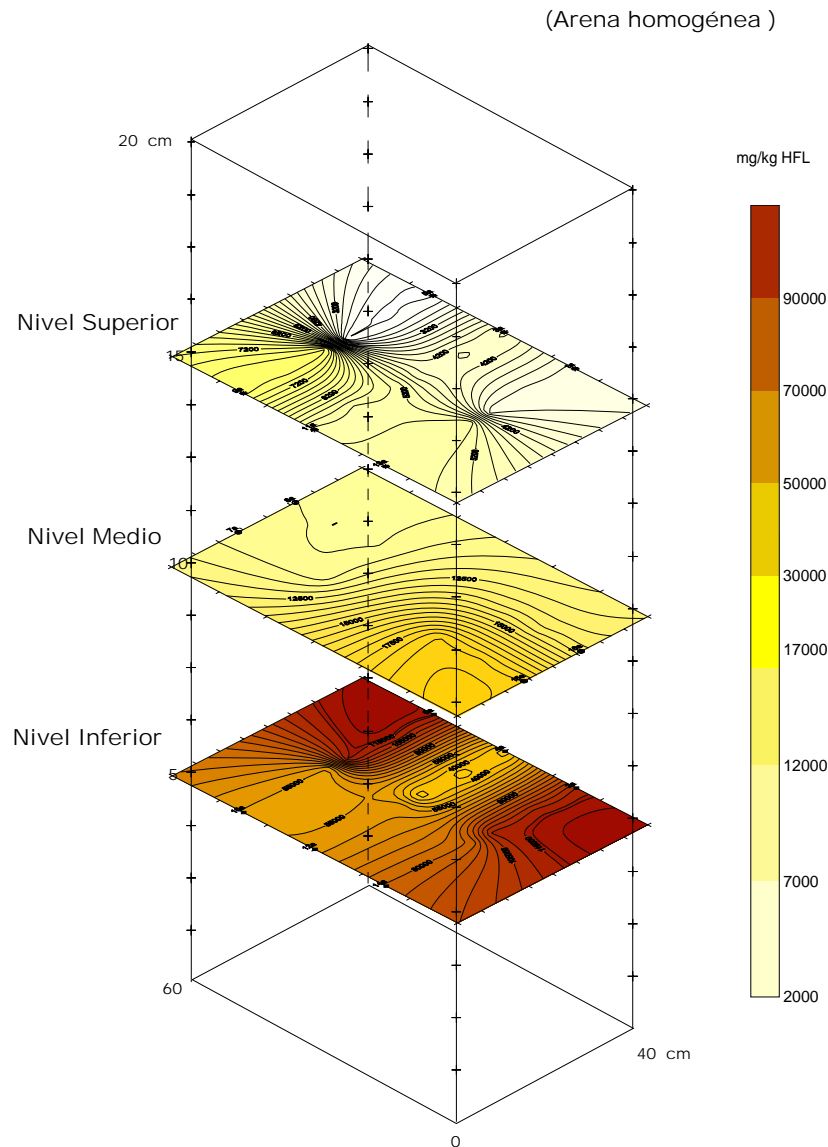


Fig. 5.4 Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para la unidad experimental C2. La escala vertical a la izquierda del modelo, representa los 20cm de suelo empacado y la ubicación a partir del piso de los puertos de muestreo.

5.2.2 Remoción de contaminante

La Tabla 5.6 presenta el resultado de las cinco campañas de muestreo para la unidad

experimental C2.

Tabla 5.6 Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C2.

Nivel	Número de muestreo	Fecha de muestreo	Tiempo efectivo de tratamiento (horas)	Concentración (mg/kg carburos ligera) Hidro-fracción	Porcentaje de remoción
superior	1°	10/03/08	0	4,783	0.0
	2°	10/04/08	14.5	4,017	91.4
	3°	26/04/08	28.5	790	98.3
	4°	13/05/08	42.5	1,152	97.5
	5°	29/05/08	56.5	285	99.4
Medio	1°	10/03/08	0	13,750	0.0
	2°	10/04/08	14.5	6,717	51.1
	3°	26/04/08	28.5	3,175	76.9
	4°	13/05/08	42.5	1,800	86.9
	5°	29/05/08	56.5	609	95.6
Inferior	1°	10/03/08	0	80,594	0.0
	2°	10/04/08	14.5	110,716	0.0
	3°	26/04/08	28.5	4,680	94.2
	4°	13/05/08	42.5	5,149	93.6
	5°	29/05/08	56.5	3,845	95.2

Las Figura 5.5 y 5.6 representan la evolución del contaminante presente en fase adsorbida dentro de la unidad experimental C2; en éstas se aprecian tres diferentes líneas, las cuales corresponden a cada uno de los niveles o estratos en los que se dividió la matriz suelo. La Figura 5.5 representa la remoción del contaminante en términos de la concentración de éste; por su parte, la Figura 5.6 representa el porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento.

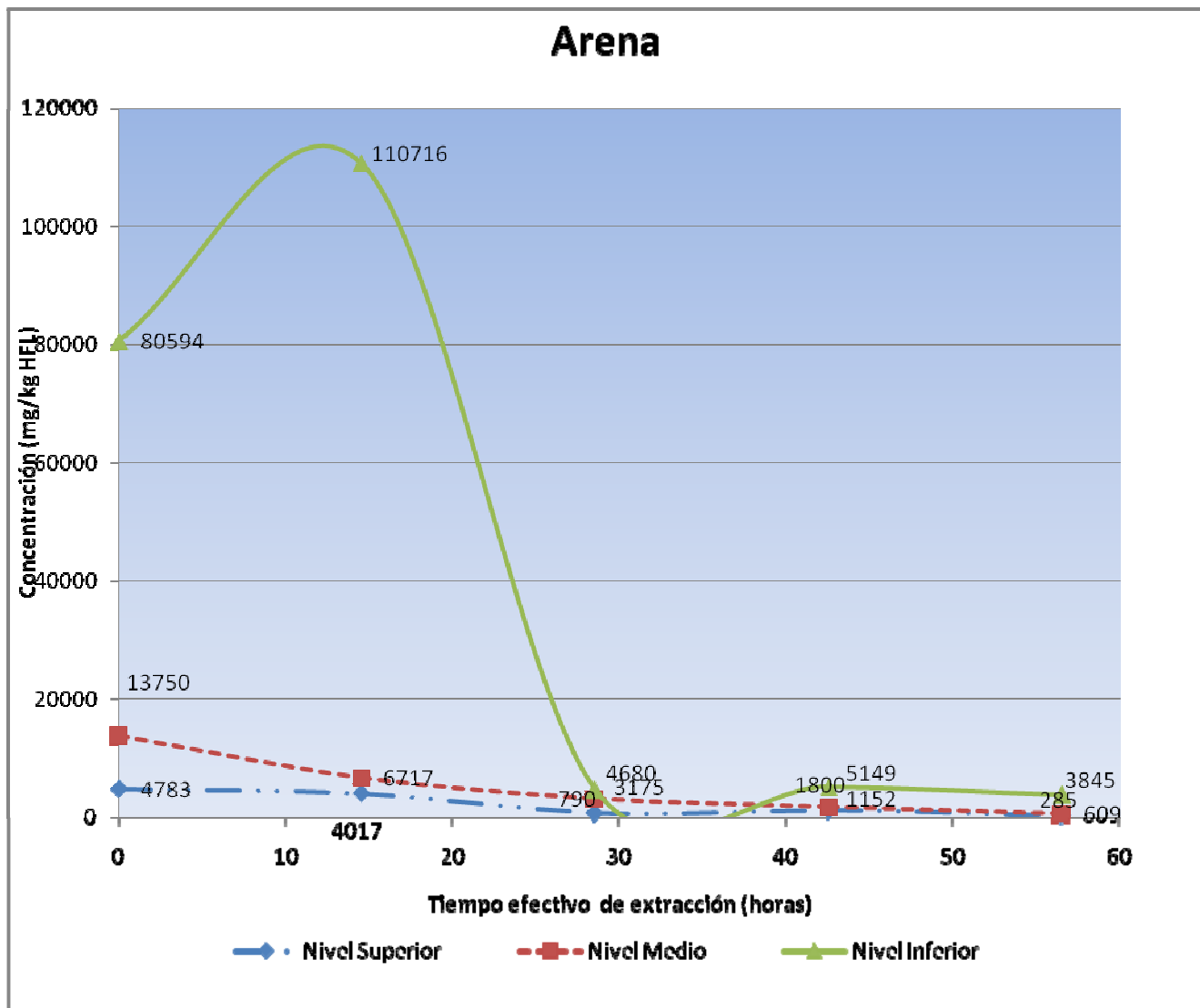


Fig. 5.5 Concentración vs el tiempo efectivo de tratamiento en la unidad experimental C2.

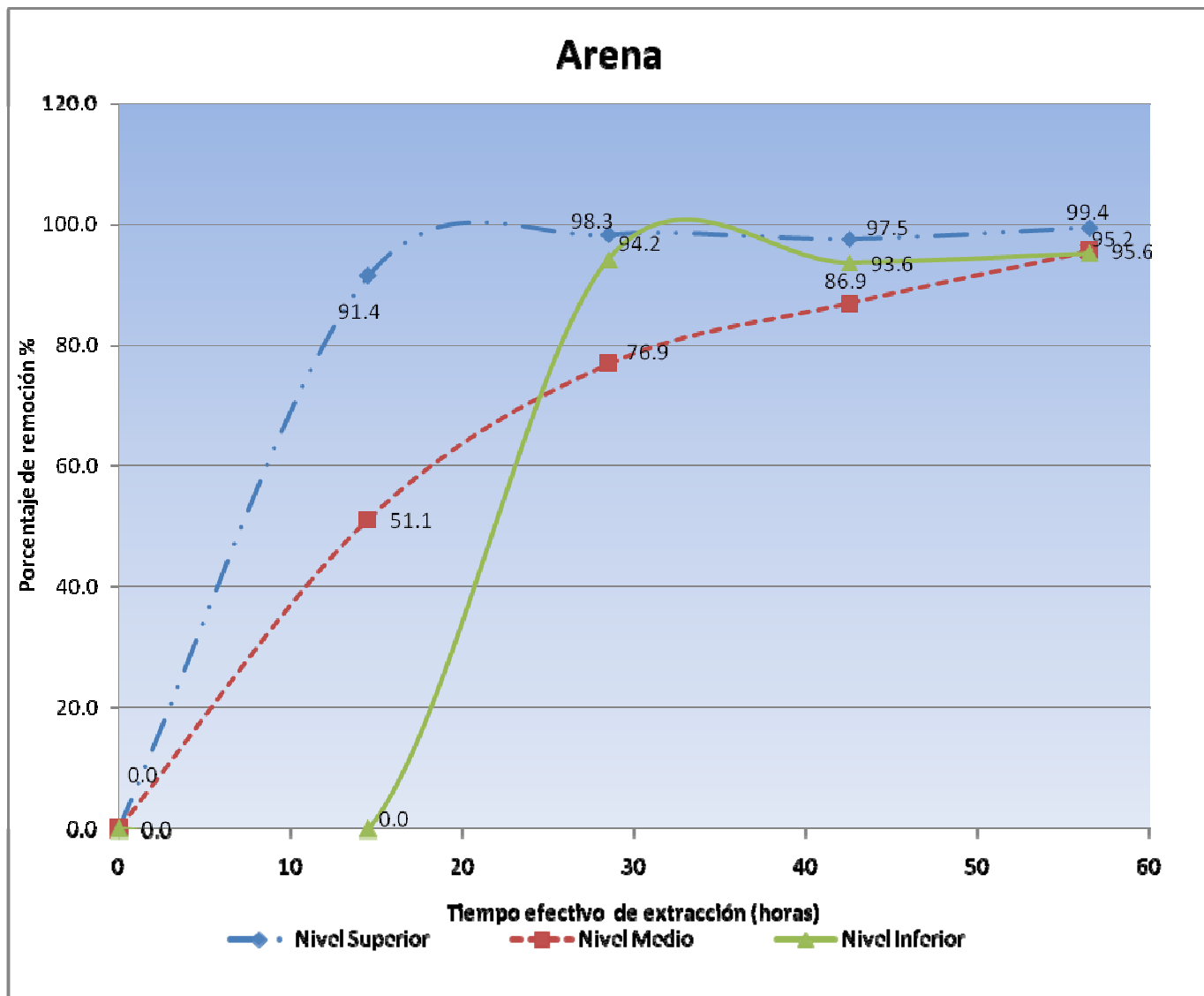


Fig. 5.6 Porcentaje de remoción vs el tiempo efectivo de tratamiento en la unidad experimental C2.

5.3 Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso con capas de arcilla e inyección de aire caliente, unidad experimental C3

5.3.1 Condición inicial

Para conocer los valores de concentración inicial dentro de la unidad experimental, se efectuó un muestreo puntual para cada uno de los puertos y por cada estrato para la unidad experimental C3. Tales resultados son mostrados en la Tabla 5.7

Tabla 5.7 Concentración inicial de contaminante por niveles y por puerto de muestreo en la unidad experimental. C3

Nivel	Puerto de muestreo	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	1a	26218
	9a	43081
	3a	32068
	11a	29829
	5a	75088
	13a	10831
Medio	15a	21117
	7a	8140
	16a	16249
	8a	19911
Inferior	4a	17049
	12a	45964
	2a	32065
	10a	72454
	14a	93653
	6a	73170

De igual manera, se tomó una muestra compuesta para cada uno de los niveles. Los valores obtenidos para esta unidad experimental se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Concentración inicial de contaminante por niveles en la unidad experimental C3.

Nivel	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	36186
Medio	18690
Inferior	55187

Con los valores de concentración inicial obtenidos de manera puntual, se efectuó un modelado, con la finalidad de esquematizar la distribución inicial de contaminación para cada uno de los niveles o estratos, la Fig. 5.7 presenta el resultado del modelo para la unidad experimental C3.

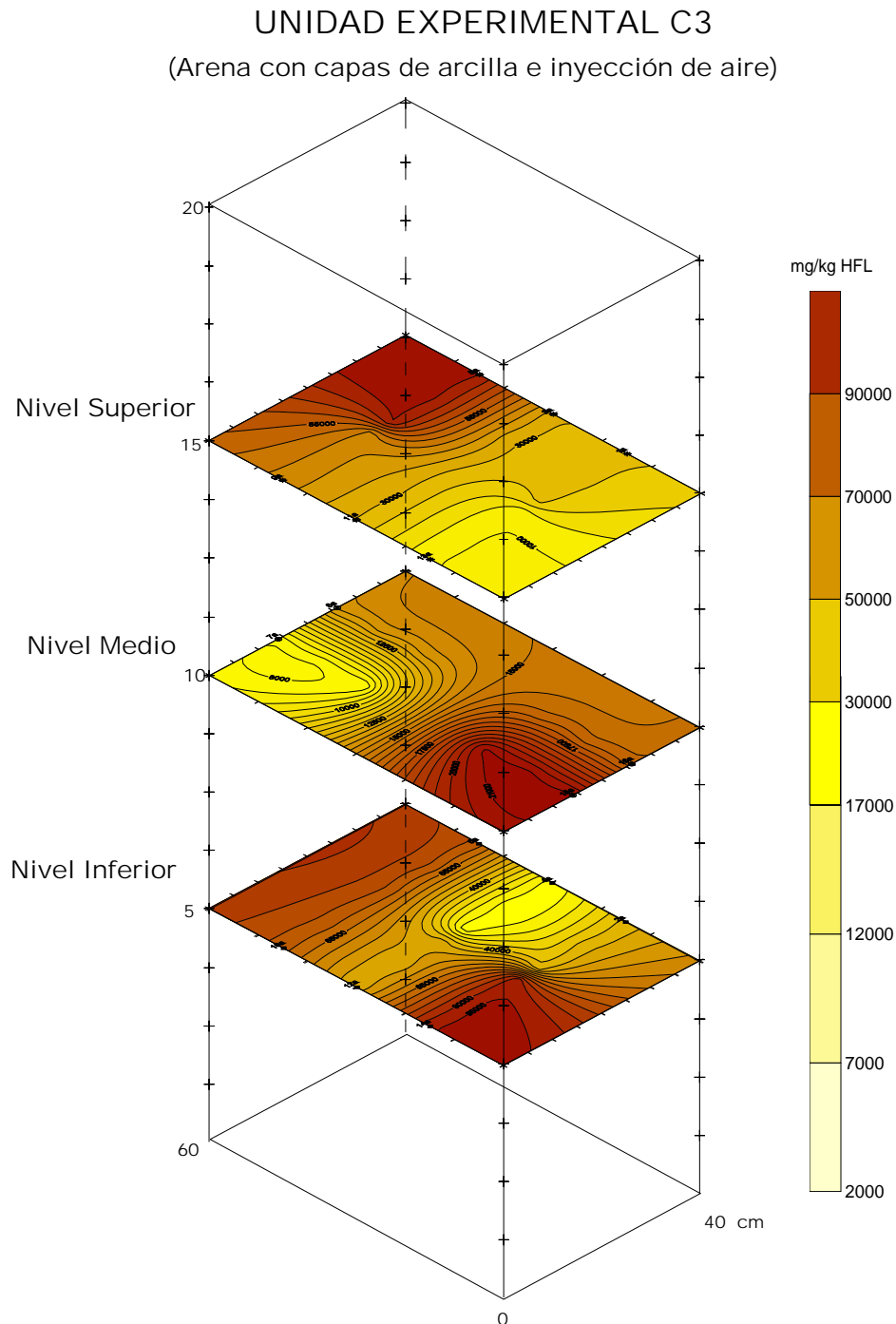


Fig. 5.7 Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para la unidad experimental C3. La escala vertical a la izquierda del modelo, representa los 20cm de suelo empacado y la ubicación a partir del piso de los puertos de muestreo.

5.3.2 Remoción de contaminante

La Tabla 5.9 presenta el resultado de las cinco campañas de muestreo para la unidad experimental C3.

Tabla 5.9 Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C3.

Nivel	Número de muestreo	Fecha de muestreo	Tiempo efectivo de tratamiento (horas)	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)	Porcentaje de remoción
Superior	1°	10/03/08	0	36,186	0
	2°	10/04/08	14.5	14,198	60.8
	3°	26/04/08	28.5	3,151	91.3
	4°	13/05/08	42.5	1,905	94.7
	5°	29/05/08	56.5	1,050	97.1
Medio	1°	10/03/08	0	18,690	0
	2°	10/04/08	14.5	9,287	50.3
	3°	26/04/08	28.5	1,450	92.2
	4°	13/05/08	42.5	860	95.4
	5°	29/05/08	56.5	1,747	90.7
Inferior	1°	10/03/08	0	55,187	0
	2°	10/04/08	14.5	14,939	72.9
	3°	26/04/08	28.5	25,277	54.2
	4°	13/05/08	42.5	6,570	88.1
	5°	29/05/08	56.5	4,910	91.1

La siguiente gráfica representa la evolución del contaminante presente en la fase adsorbida dentro de la unidad experimental. La Fig. 5.8 representa la remoción del contaminante en términos de la concentración de éste. Por su parte, la Figura 5.9 representa el porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento.

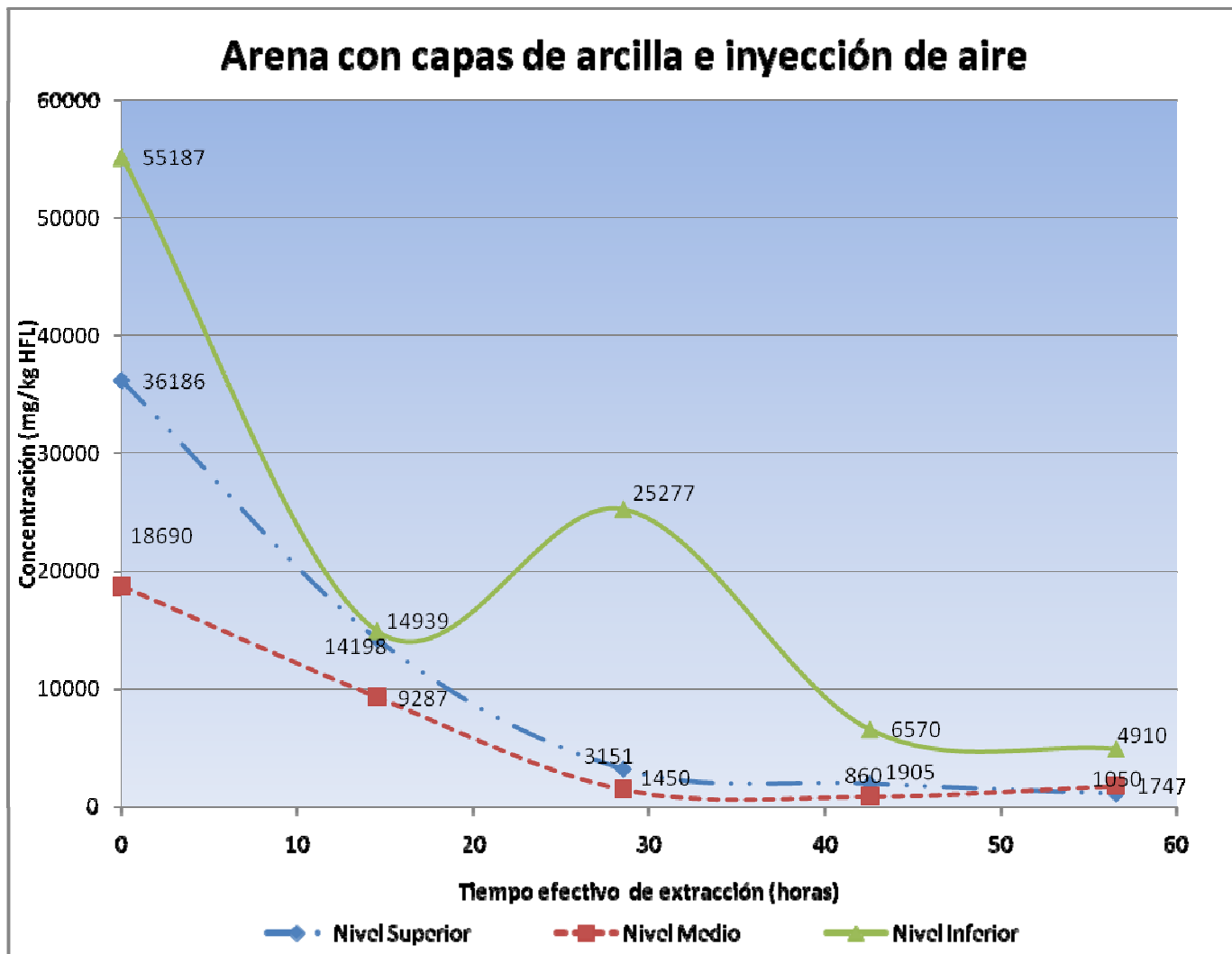


Fig. 5.8 Concentración vs el tiempo efectivo de tratamiento en la unidad experimental C3.

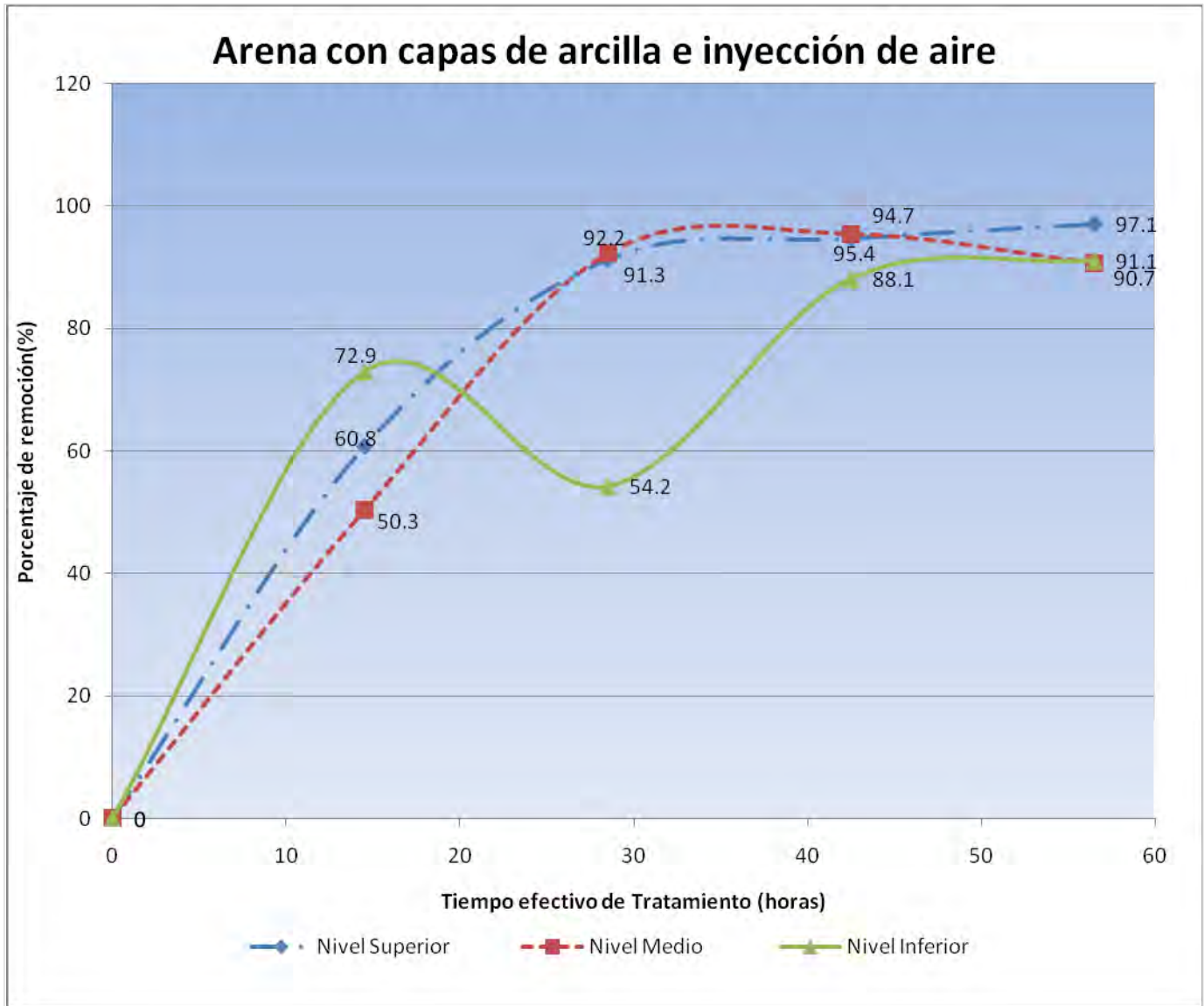


Fig.5.9 Porcentaje de remoción vs el tiempo efectivo de tratamiento en la unidad experimental C3.

5.4 Sistema experimental aplicado a un suelo arenoso con capas de arcilla e inyección de aire caliente, unidad experimental C4

5.4.1 Condición inicial

Para conocer los valores de concentración inicial dentro de la unidad experimental, se efectuó un muestreo puntual por cada uno de los puertos y por cada estrato o nivel para esta unidad experimental. Tales resultados se presentan en la Tabla 5.10

Tabla 5.10 Concentración inicial por niveles y por puerto de muestreo en la unidad experimental C4.

Nivel	Puerto de muestreo	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	1a	2,613
	9a	6,841
	3a	5,432
	11a	8,252
	5a	19,815
	13a	6,147
Medio	15a	14,784
	7a	13,039
	16a	6,720
	8a	15,921
Inferior	4a	26,180
	12a	81,780
	2a	53,585
	10a	52,671
	14a	102,225
	6a	16,356

De igual forma, se tomó una muestra compuesta para cada uno de los niveles. Los valores obtenidos para esta unidad experimental se muestran en la Tabla 5.11

Tabla 5.11 Concentración inicial por niveles en la unidad experimental C4.

Nivel	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)
Superior	8,183
Medio	10,574
Inferior	49,411

Con los valores de concentración inicial obtenidos de forma puntual, se efectuó un modelado, con la finalidad de esquematizar la distribución inicial de contaminación por

cada uno de los niveles o estratos, la Fig. 5.10 presenta el resultado del modelo para la unidad experimental C4.

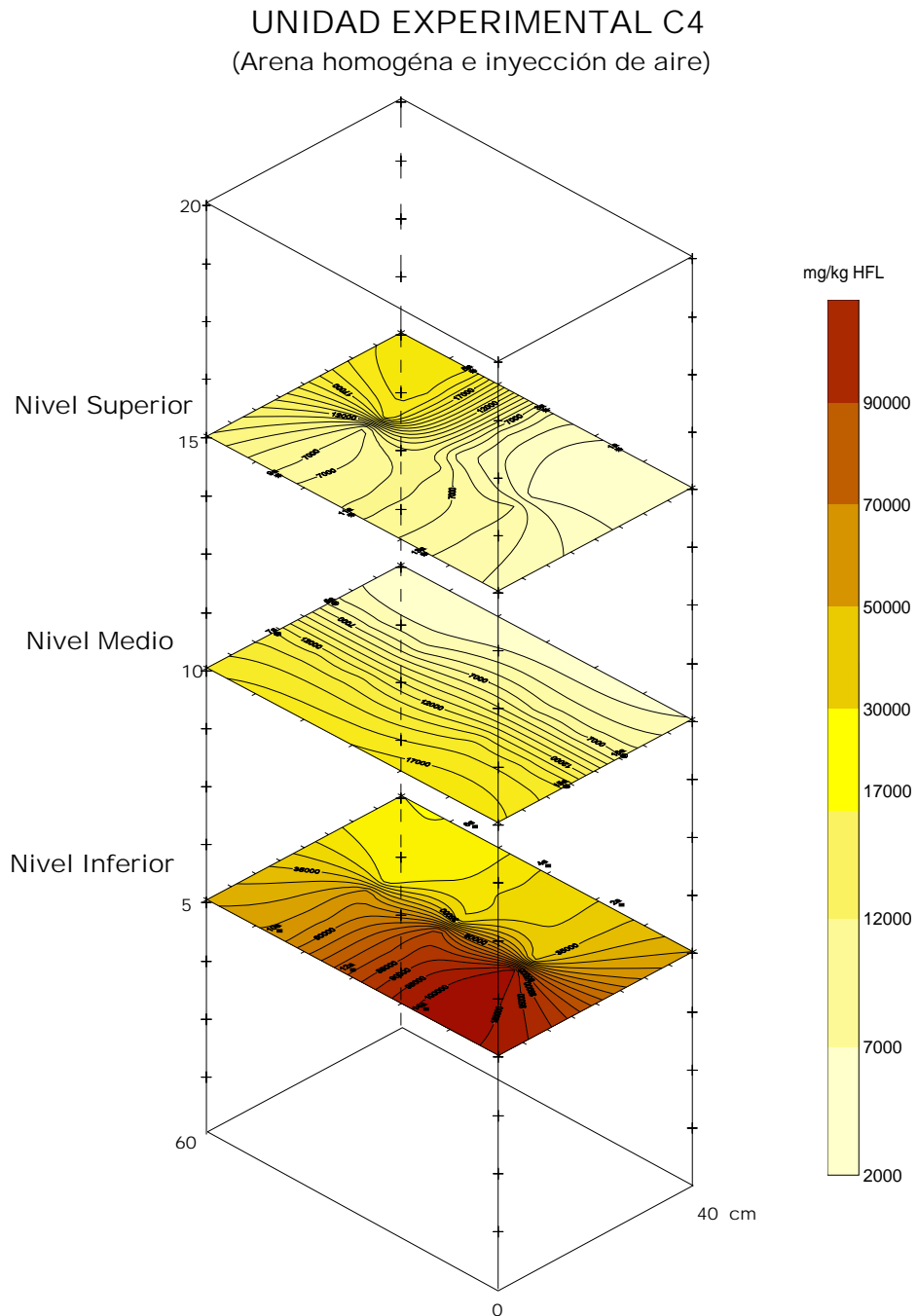


Fig. 5.10 Modelo de la distribución del contaminante en la condición inicial por niveles, para la unidad experimental C4. La escala vertical a la izquierda del modelo, representa los 20 cm de suelo empacado y la ubicación a partir del piso de los puertos de muestreo.

5.4.2 Remoción del contaminante

La siguiente tabla presenta el resultado de las cinco campañas de muestreo para la unidad experimental C4.

Tabla 5.12 Comportamiento del contaminante, sometido al sistema de tratamiento en la unidad experimental C4.

Nivel	Número de muestreo	Fecha de muestreo	Tiempo efectivo de tratamiento (horas)	Concentración (mg/kg Hidrocarburos Fracción ligera)	Porcentaje de remoción
Superior	1°	10/03/08	0	8,183	0
	2°	10/04/08	14.5	4,256	48.0
	3°	26/04/08	28.5	103	98.7
	4°	13/05/08	42.5	353	95.7
	5°	29/05/08	56.5	160	98.0
Medio	1°	10/03/08	0	10,574	0
	2°	10/04/08	14.5	7,308	30.9
	3°	26/04/08	28.5	380	96.4
	4°	13/05/08	42.5	257	97.6
	5°	29/05/08	56.5	172	98.4
Inferior	1°	10/03/08	0	49,411	0
	2°	10/04/08	14.5	10,567	78.6
	3°	26/04/08	28.5	6,054	87.7
	4°	13/05/08	42.5	1,025	97.9
	5°	29/05/08	56.5	521	98.9

La siguiente gráfica representa la evolución del contaminante presente en la fase adsorbida dentro de la unidad experimental. La Fig. 5.11 representa la remoción del contaminante en términos de la concentración de éste, por su parte, la Fig. 5.12 representa el porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento.

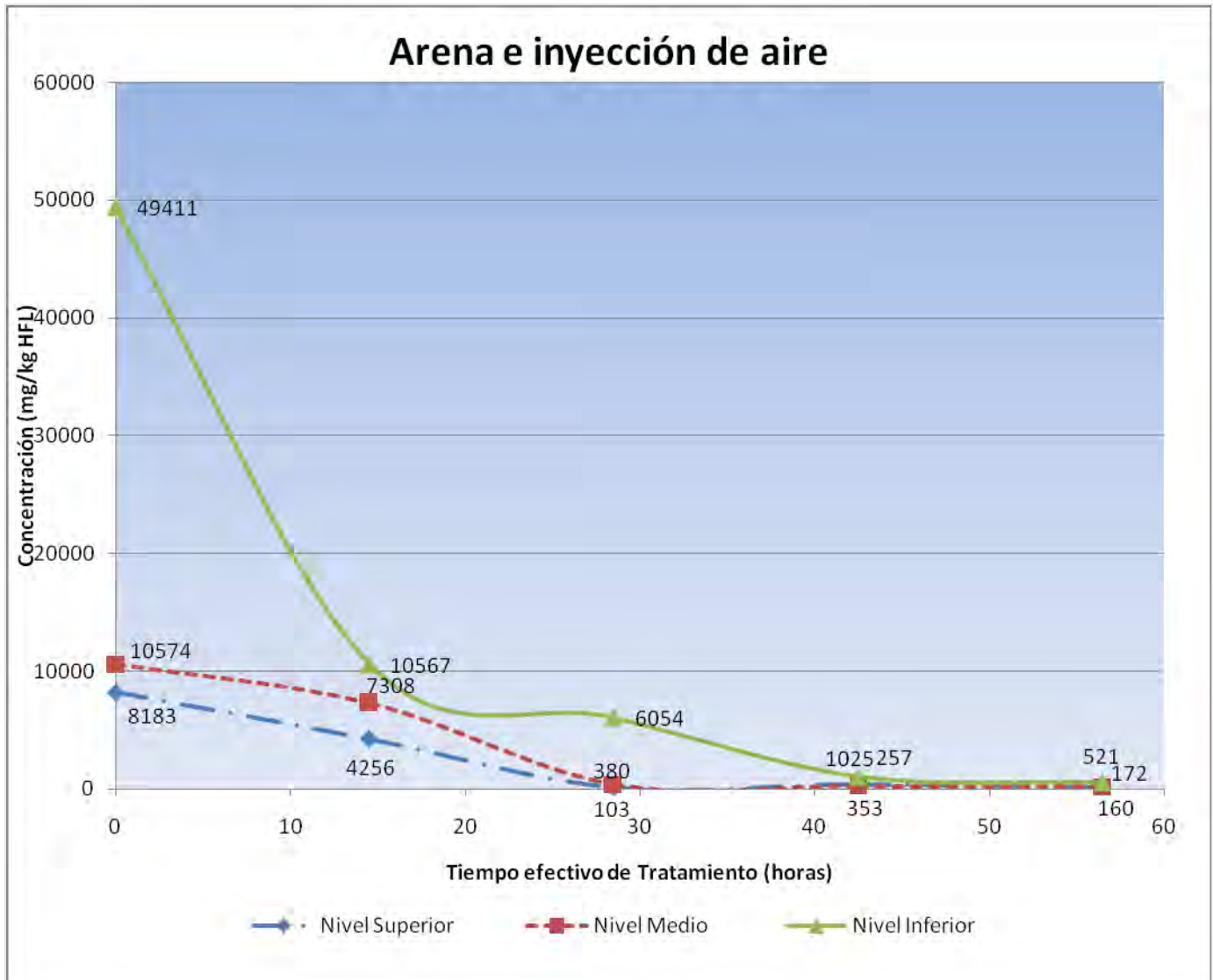


Fig. 5.11 Concentración vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C4.

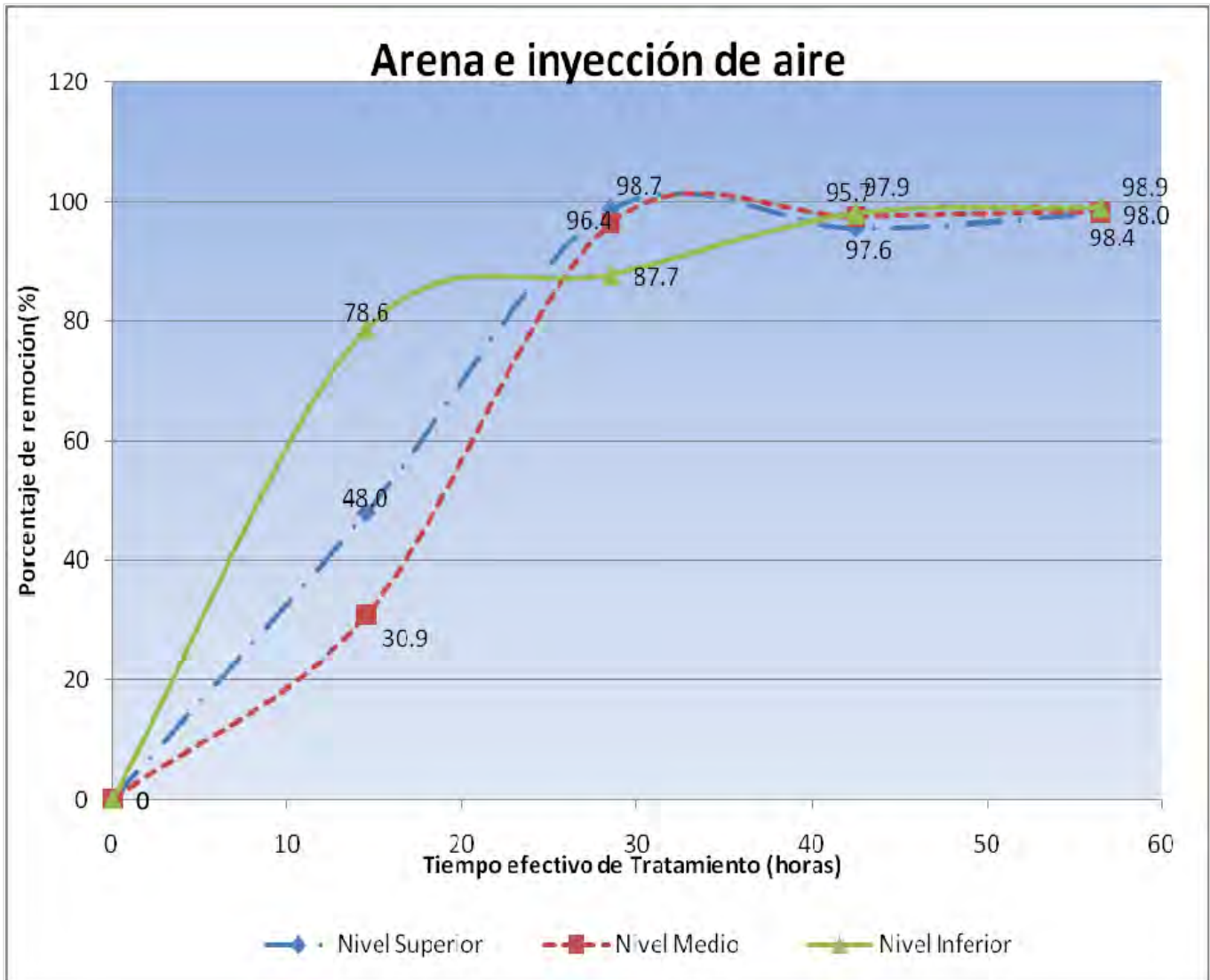


Fig. 5.12 Porcentaje de remoción vs tiempo efectivo de tratamiento en unidad experimental C4.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

PAGINA EN BLANCO

6.1 Consideraciones Generales

La remoción del contaminante, con respecto a la concentración inicial, presentó diferencias significativas a lo largo del tiempo, de acuerdo con los tres estratos considerados en cada unidad experimental.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se presenta el análisis de resultados considerando cada estrato. Con este análisis se observa claramente la evolución de la remoción de la gasolina. Para la representación se utilizan gráficas de concentraciones de gasolina, en función del tiempo, así como del porcentaje de remoción, con respecto al tiempo.

El análisis del comportamiento del contaminante a través del tiempo, se llevó a cabo en función de las horas efectivas de extracción de vapores. Los tiempos de referencia correspondieron con la hora de cada uno de los cinco muestreos (0, 14.5, 28.5, 42.5 y 56.5 h) a lo largo de todo el experimento.

El tratamiento de extracción de vapores aplicado al sistema experimental de las cinco unidades experimentales C1(arena con capas de arcilla), C2(arena homogénea), C3(Arena con capas de arcilla e inyección de aire), C4(arena homogénea con inyección de aire) y C5(elemento testigo, arena homogénea sin extracción de vapores), se llevó a cabo hasta que se obtuvo un nivel de remoción asintótico, el cual es de esperarse en este tipo de tratamientos (Nyer,2001; Suthersan,1997; Malina et al., 1998, Albergaria et al., 2006). Este comportamiento se obtuvo en la mayoría de los casos, con excepción del nivel inferior en las unidades C1 y C3. El comportamiento asintótico fue evidente a partir de la hora 28.5 y se mantuvo constante hasta la hora 56.5, en la que se detuvo la extracción de vapores.

Es importante destacar que el porcentaje de remoción fue muy considerable, ya que en todas las unidades se alcanzó una remoción mayor a 90% en sus niveles superior y medio y, en la mayoría de los inferiores. Sólo en un caso, en la unidad experimental C1, no se obtuvo este porcentaje en el nivel inferior. Sin embargo, la remoción obtenida no fue despreciable, pues se obtuvo un porcentaje de remoción del 88.8 %.

El desempeño del proceso de tratamiento de remediación de suelo por cada uno de los niveles y unidades experimentales se detalla más adelante.

Al evaluar el comportamiento de la remoción del contaminante con respecto al tiempo, se observó que a pesar de que el suelo fue preparado en las mismas condiciones, con el mismo contenido de agua y volumen de contaminante, las concentraciones iniciales variaron significativamente. De forma especial, se encontró diferencia entre las unidades con arena homogénea y aquellos en los que se intercalaron capas de suelo arcilloso; tal situación no resultó extraña, considerando que la capacidad de adsorción

del suelo arcilloso es muy superior a la de la arena (Reddi,2000); de esta forma, al momento de analizar la fase adsorbida del contaminante en el suelo, las muestras que contenían arcilla reportaron una mayor concentración inicial (Fig. 6.1 y 6.2).

Para la comprensión del proceso de remediación, cobra relevante interés tomar en consideración la diferencia del comportamiento entre el suelo arenoso y el arcilloso. La arena presentó un drenaje rápido que favoreció la acumulación de los contaminantes en los estratos inferiores aun después de iniciado el tratamiento; esto permitió que se presentara una concentración más alta en el segundo muestreo que la registrada inicialmente; tal particularidad no impactó de forma significativa en el resultado final de la remediación; este fue el caso del nivel inferior de la unidad C2 (Fig. 6.5), en donde el suelo arenoso homogéneo permitió el flujo del contaminante hacia el estrato más profundo, alcanzando un máximo de concentración varios días después de iniciado el tratamiento (14.5 h).

A partir de la hora 28.5, la remoción del contaminante se volvió asintótica en la mayoría de los casos (con excepción del nivel inferior en C1 y C3), así que para evaluar la diferencia entre las eficiencias de remoción a lo largo del tiempo, se trabajó con un análisis estadístico de varianza para un diseño experimental factorial de tres factores sin réplica, considerando al tiempo como uno de los factores y tomando como nivel bajo la hora 28.5 (inicio de comportamiento asintótico) y nivel alto la hora 56.5 (fin de la extracción), ya que estas son las eficiencias de remoción consideradas como mínima y máxima dentro del comportamiento asintótico. Esto permitió conocer si existía diferencia significativa entre las eficiencias de remoción de estos dos tiempos.

6.2 Análisis comparativo de los estratos superiores

El nivel superior, fue el estrato encontrado entre el suelo superficial y los 6 cm de profundidad. En la Figura 6.1, se aprecia la diferencia de concentraciones iniciales entre las unidades experimentales que cuentan con capas de arcilla y las que no. Por un lado, las que presentaron capas de arcilla, tuvieron concentraciones por arriba de los 35,000 mg/kg HFL, mientras que en las de arena homogénea, no se rebasaron los 10,000 mg/kg HFL. Este fenómeno fue atribuible a la permeabilidad del medio, la cual permitió el flujo del contaminante a los estratos más profundos en el caso del suelo arenoso y un bloqueo al flujo en aquellos que contaban con capas de arcilla. Sin embargo, en todos los casos se obtuvieron altas remociones de la masa contaminante (más de 60%) alrededor de la hora 28.5.

En el estrato superior, influyeron varios efectos físicos en una menor concentración del contaminante en relación con la presentada en los estratos subyacentes; por un lado, la cercanía de este estrato con la superficie del empaque del suelo, facilitó la transferencia de la fase adsorbida de la masa contaminante a la fase vapor (Mihelcic, 2001); se debe destacar el hecho de que todos los orificios de extracción se encontraron por debajo del nivel superficial; sin embargo, los vapores acumulados por encima de la superficie del

empaquete del suelo, fueron capturados por efecto de la extracción de vapores, ya que el medio permeable (arena) así lo permitió. El otro factor físico que influyó en la menor

concentración de contaminante en este estrato, con relación a los otros, fue la migración de la fase disuelta por efecto de la gravedad. Estos factores permitieron que la remoción del contaminante se facilitara, lo cual se reflejó en mayores porcentajes de remoción en menor tiempo de tratamiento, sin embargo, esta tendencia tuvo su límite, pues a partir de las 28.5 horas de tratamiento, los porcentajes de remoción ya no tuvieron cambios significativos.

A continuación se describe el comportamiento de cada unidad experimental en la capa superior.

La unidad C1 inició en 70,000 ppm, a las 14.5 horas de tratamiento, la concentración de HFL fue de 57,275 mg/kg. Lo que llama la atención es la reducción que se obtuvo a las 28.5 horas en donde la concentración fue menor a 500 mg/kg. Esta situación se explica por la facilidad que se permitió al flujo de los vapores de gasolina, al formarse huecos y fracturas en el medio, una vez que se efectuaron los primeros muestreos, en la capa arcillosa.

La unidad C2 presentó las menores concentraciones desde el inicio, debido a que la gasolina migró rápidamente a las capas inferiores.

En la unidad C3, donde existe mayor presencia de aire caliente, hubo una disminución importante a las 14.5 horas, aunque aumentó de forma significativa a las 28.5 horas.

La unidad C4 presentó un comportamiento muy similar a C2. Es decir, que no pareció influir la *inyección de aire caliente*.

El caso de C5 (elemento testigo), reflejó de manera más evidente el fenómeno de migración del contaminante y el de evaporación de forma conjunta, pues en este estrato superior, se obtuvo al final del periodo de tratamiento una concentración relativamente pequeña (2,740 mg/kg HFL) atribuible a estos dos factores.

El análisis comparativo de los estratos superiores permitió identificar una clara diferencia entre el comportamiento de las unidades con arena únicamente y las que contienen arcilla, ya que las primeras perdieron concentración desde el inicio debido a la facilidad de migración hacia estratos inferiores, manteniéndose sin cambios bruscos aunque la remoción fue muy alta. Las unidades con capas de arcilla presentaron cambios muy fuertes entre las 14.5 y las 28.5 horas, con porcentajes de remoción mayores al 90%.

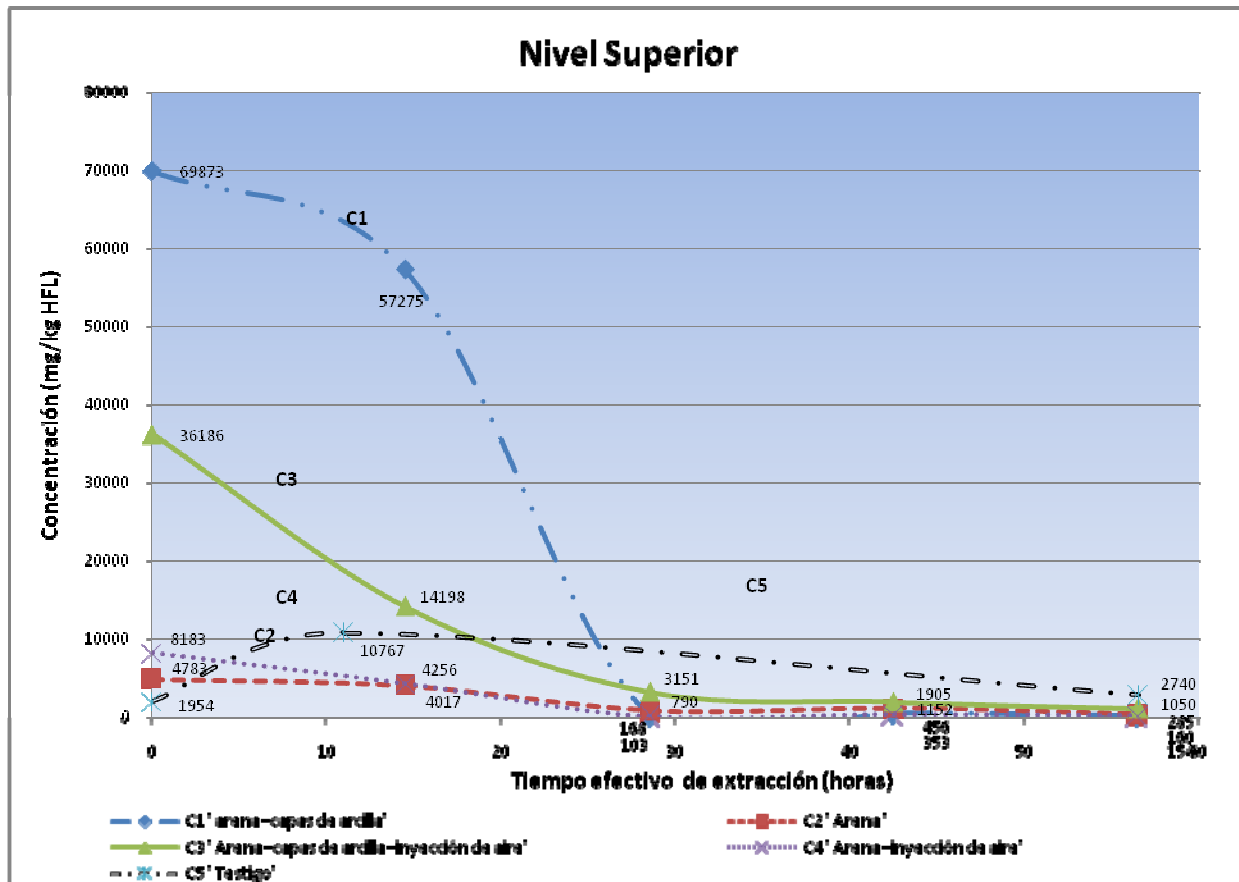


Fig. 6.1 Concentración del contaminante en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel superior de las cuatro unidades experimentales.

La Fig. 6.1, permitió observar con mayor claridad los efectos del tratamiento de remediación. En esta Figura se aprecia el proceso de remoción de la gasolina en términos de porcentaje y es aquí, donde se hace más evidente el comportamiento asintótico que presenta la fase adsorbida de la masa contaminante conforme el tiempo de extracción de vapor avanzó.

La unidad C1 presentó una remoción del 18% a las 14.5 horas y del 97% a las 28.5 horas.

La unidad C2 presentó una remoción del 91% a las 14.5 horas y de 98.7% a las 28.5 horas.

La unidad C3 presentó una remoción del 61% a las 14.5 horas y a las 28.5 horas la remoción fue del 91%.

La unidad C4 presentó una remoción del 48% a las 14.5 horas y a las 28.5 horas la remoción fue de 98%.

Cabe resaltar que la unidad C2, si bien no tenía la concentración más alta de contaminante, fue la que obtuvo una remoción más rápida. Por otro lado, es claramente destacable que la unidad C1, que contaba con capas de arcilla y no recibió inyección de aire caliente, tiene un atraso en la velocidad de remoción; sin embargo, hacia la hora 30 de tratamiento, se acercó a niveles superiores al 90% como el resto de los tratamientos. De lo anterior se desprende que, si bien la extracción de vapor fue el factor dominante en la remoción de la contaminación, para el caso de este nivel, interfirieron otros aspectos, como fueron la facilidad de transferencia de la fase adsorbida a la fase vapor y la migración del contaminante a mayor profundidad cuando el medio lo permitía.

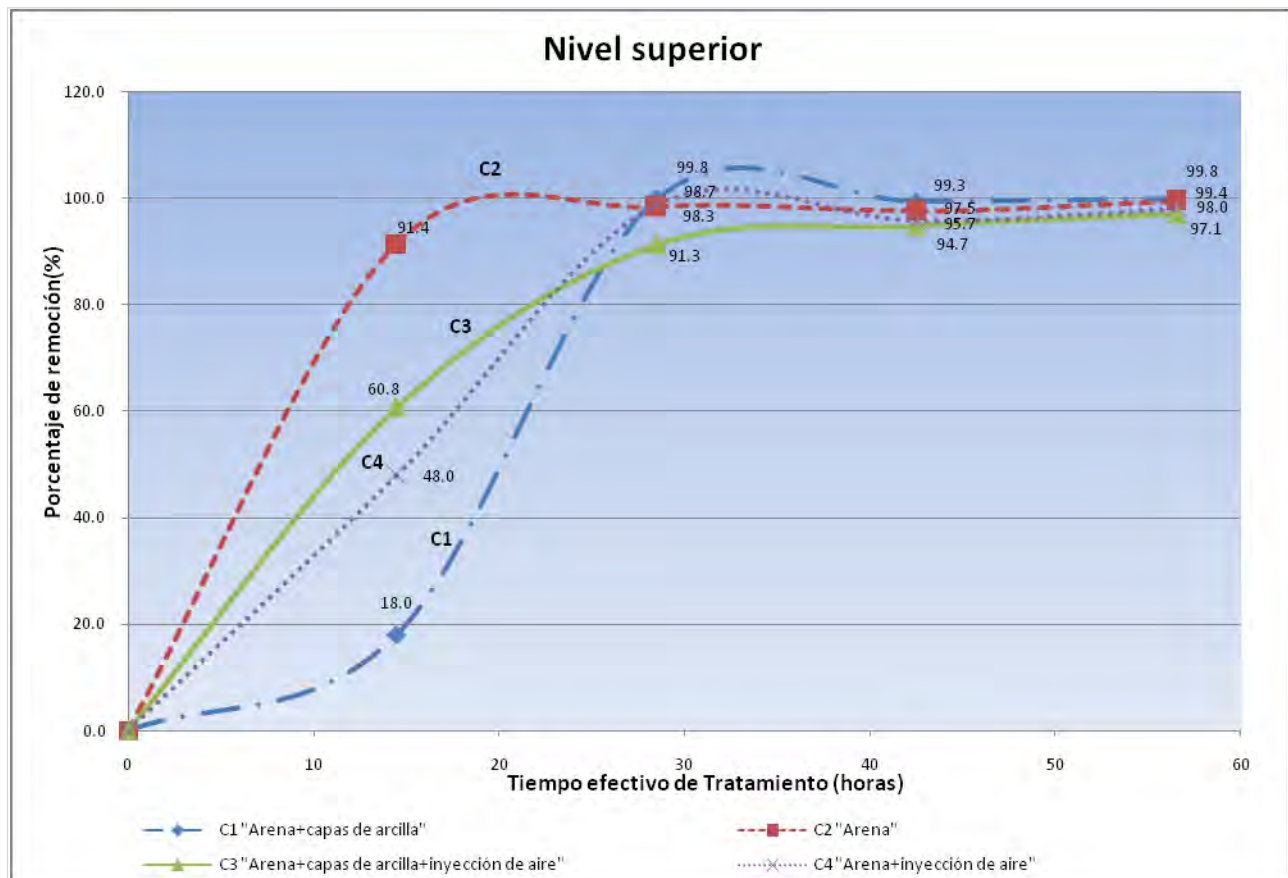


Fig. 6.2 Porcentaje de remoción del contaminante en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel superior de las cuatro unidades experimentales.

6.3 Análisis comparativo de los estratos medios

El nivel medio, es el estrato que se encuentra comprendido entre 6 y 12 cm de profundidad. En la Figura 6.3 se puede apreciar la diferencia de concentración inicial que presentó C1 con respecto al resto de las unidades experimentales. La concentración más elevada que presentó C1 con respecto a las otras, fue atribuible al muestreo, ya que siendo ésta una unidad que contaba con capas de arcilla al momento

de obtener la muestra, se extrajo de forma conjunta una parte considerable de suelo arcilloso, el cual por su propiedades de muy baja permeabilidad permitió la acumulación del contaminante que había migrado desde la capa superior.

A partir de la hora 14.5 de tratamiento, la presencia del contaminante en la unidad C1 experimentó un descenso considerable ya que disminuyó de 45,891 mg/kg HFL, a 3,000 mg/kg a las 28.5 h. Es importante resaltar para C1, que la tendencia de remoción del contaminante fue la de mayor rendimiento neto; es decir, la remoción fue más significativa con respecto a su concentración inicial. De igual manera, es notorio que a partir de la hora 30 de tratamiento efectivo, la unidad C1, que hasta horas antes presentaba la concentración más alta con respecto al resto de las unidades experimentales, se acercó a los niveles que las otras unidades tenían en ese instante (menor a 10000 mg/kg HFL). A a partir de ahí, el comportamiento del nivel medio en esta unidad, siguió la tendencia asintótica que presentaron el resto de los tratamientos.

En cuanto al comportamiento de las otras unidades experimentales, se puede apreciar, que presentaron una tendencia semejante. La concentración inicial en estos casos estuvo en el intervalo entre 10,000 a 20,000 mg/kg HFL, y al finalizar el tratamiento llegó a niveles por debajo de 1,000 mg/kg HFL.

A esta profundidad, en el elemento testigo la disminución de concentración se debió a la permeabilidad del medio que permitió el flujo del contaminante al nivel más profundo, dando la apariencia de una remoción inducida (extracción de vapor). Debido a que se trata de un sistema cerrado, lo fenómenos que actuaron fueron los de volatilización dentro de la cámara y de migración del contaminante hacia una mayor profundidad.

La Figura 6.4 muestra los porcentajes de remoción de los cuatro tratamientos y en esta se aprecia que en todos los casos se presentaron remociones mayores al 90%. La remoción de la unidad C1 fue más lenta al principio y es notable que a incluso a las 14.5 horas no se había presentado ninguna remoción, esto es atribuible al efecto ya mencionado, el incremento de la concentración inicial en las primeras horas debido a la adsorción de la arcilla de la capa superior, la cual retardó la migración del contaminante a la capa media. Sin embargo, a las 28.5 horas se presentó aproximadamente un 80% de remoción. Las unidades C2 y C4 presentaron incremento en la remoción durante todo el tiempo. Es claro que la presencia de arcilla indujo un comportamiento de altas y bajas en la remoción del contaminante.

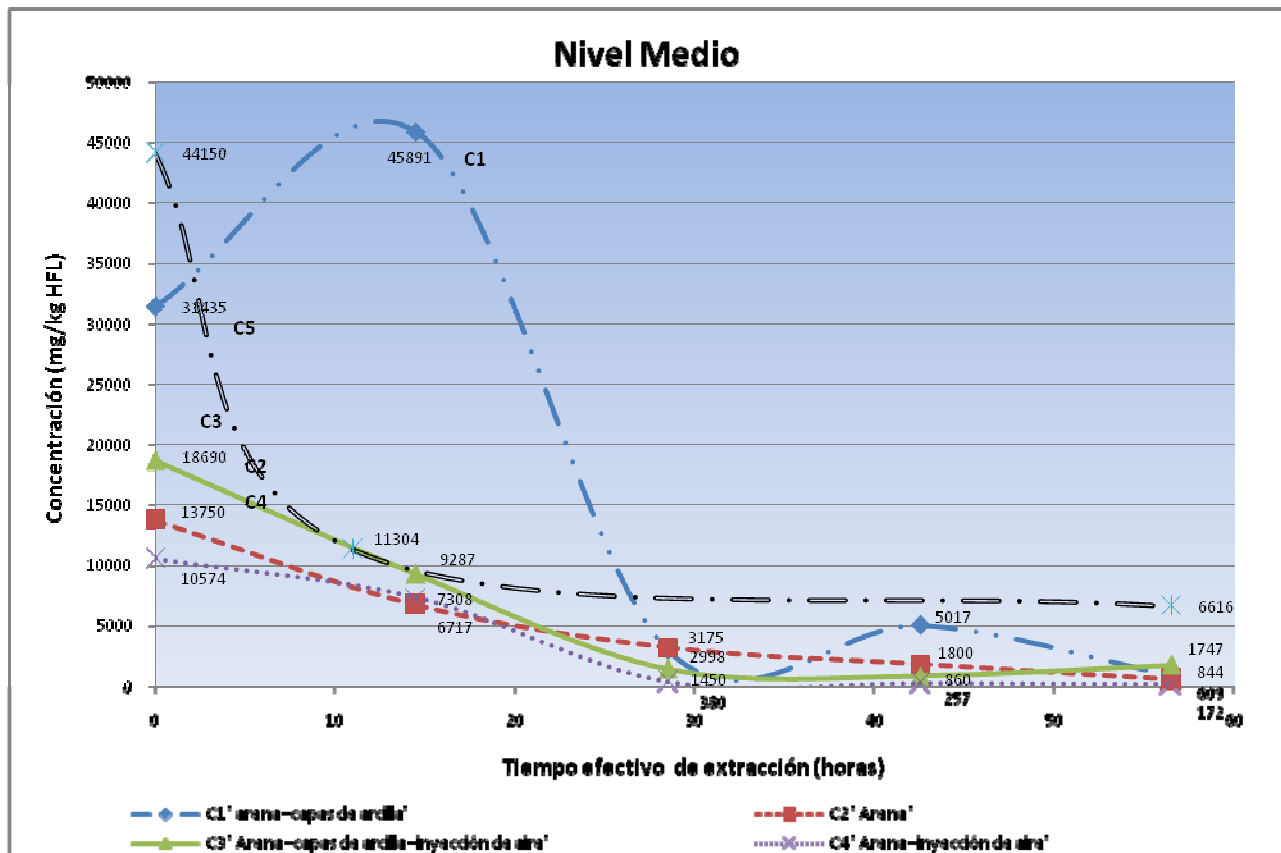


Fig. 6.3 Concentración de contaminante en función de tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel medio de las cuatro unidades experimentales.

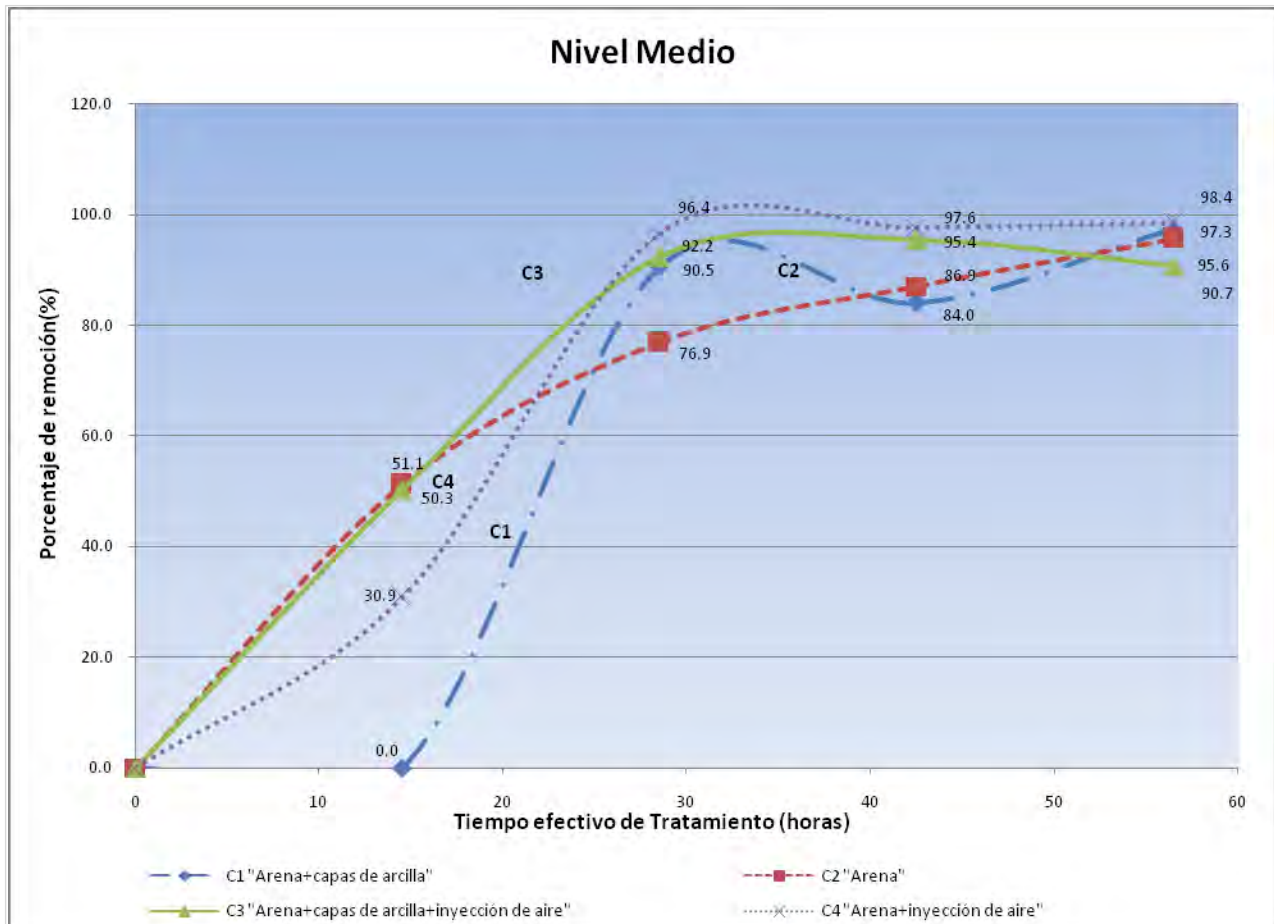


Fig. 6.4 Porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel medio de las cuatro unidades experimentales.

6.4 Análisis comparativo de los estratos inferiores

El estrato inferior se encontró entre los 12 y 20 cm de profundidad y fue donde se presentó la mayor concentración inicial en todas las unidades experimentales, debido esencialmente a la migración de la gasolina proveniente de niveles superiores.

Como se puede apreciar en la Figura 6.5, las unidades que contaban con arena, la cual facilitaba la migración del contaminante, se alcanzaron concentraciones iniciales mayores. El caso fue evidente para C2 (arena homogénea); sin embargo, es donde se presentó el descenso más drástico de la concentración, pues la concentración disminuyó de un valor cercano a los 80,000 mg/kg HFL al inicio, y a 4,000 mg/kg HFL al finalizar el tratamiento, esto significó una remoción de veinte veces la inicial. En los

otros casos (C1, C3 y C4), la concentración inicial fue aproximadamente de 50,000 mg/kg HFL, con concentraciones finales de 500 a 5,000 mg/kg HFL. Es significativo que después de las primeras 28.5 horas de tratamiento, ya se contaba con concentraciones inferiores a 10,000 mg/kg HFL con excepción de C3; a partir de ahí, el tratamiento requirió de más tiempo para obtener concentraciones más bajas.

Otro aspecto a destacar, es lo referente al comportamiento del contaminante en los medios de diferente permeabilidad ya que para las unidades con arena homogénea (C2 y C4), la remoción del contaminante fue uniforme con respecto al tiempo, mientras que en las unidades con capas de arcilla, se presentaron fluctuaciones durante el tratamiento, sobre todo a partir de la hora 28.5. Estas variaciones son evidencia de un proceso de dispersión y difusión, por medio del cual las capas de arcilla, por su mayor capacidad de adsorción, retuvieron al contaminante, el cual fue transferido por mecanismos de dispersión y difusión hacia la arena, una vez que ésta disminuía su concentración previa (Farhan, 2001a; Yang, 1999).

En la Figura 6.6, se aprecia con mayor claridad la influencia que tuvo la inyección de aire en aquellas unidades experimentales que recibieron este tratamiento ya que, los porcentajes de remoción rebasaron el 70% antes de la hora 15 de tratamiento, mientras que las unidades sin inyección de aire requirieron un mayor tiempo para alcanzar esos niveles (28.5 h).

La unidad C4 alcanzó una remoción del 98.9 % como resultado final y es la que presentó una remoción que se incrementó uniformemente con el tiempo.

Las unidades con arena (C2 y C4) presentaron un comportamiento uniforme a lo largo del tiempo y las unidades que contienen arcilla presentaron fluctuaciones con respecto al tiempo debido a la adsorción.

De nuevo es claro que la variable de mayor influencia fue el tipo del suelo mientras que la inyección de aire no fue significativa.

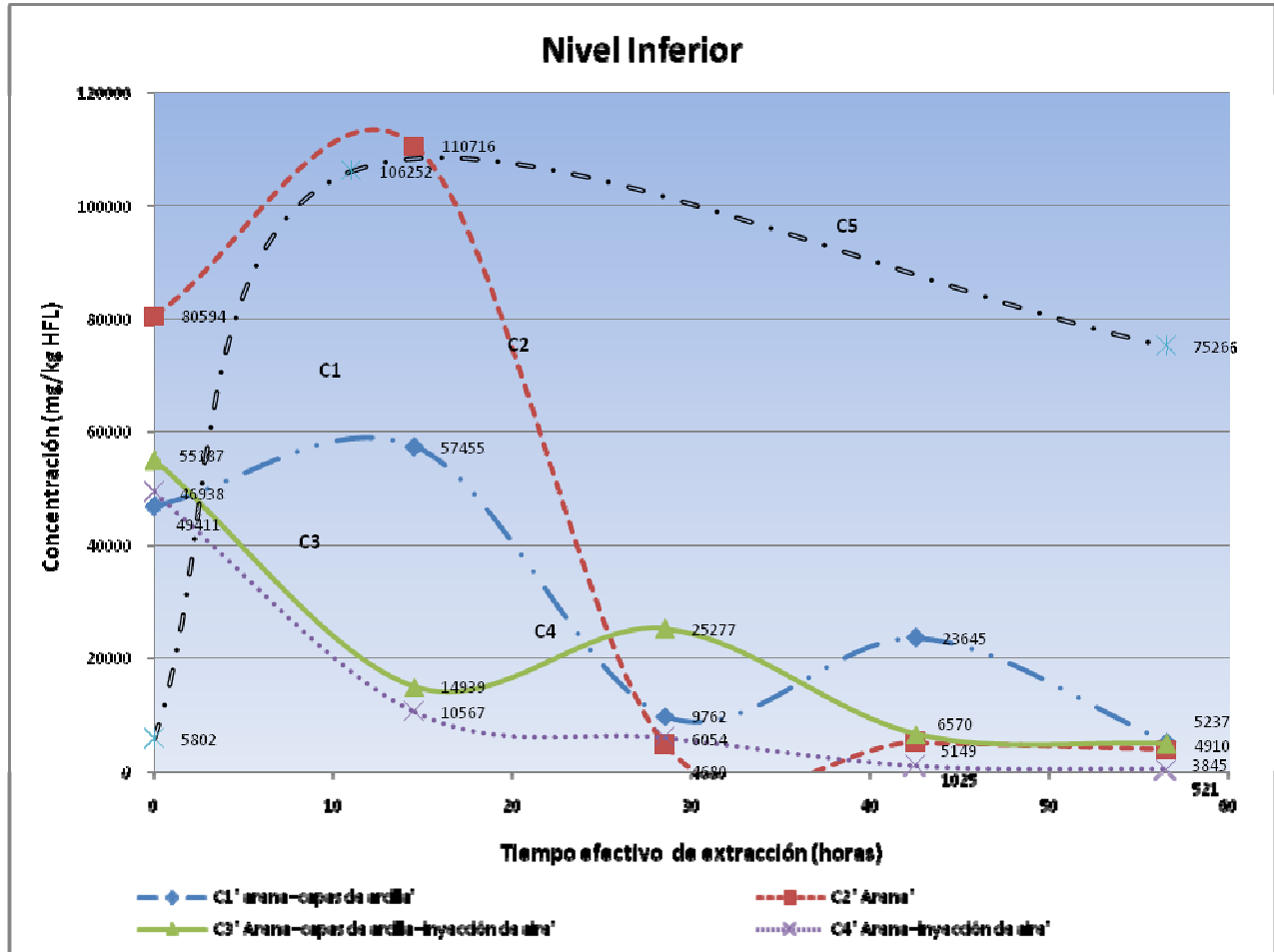


Fig. 6.5 Concentración en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel inferior de las cuatro unidades experimentales.

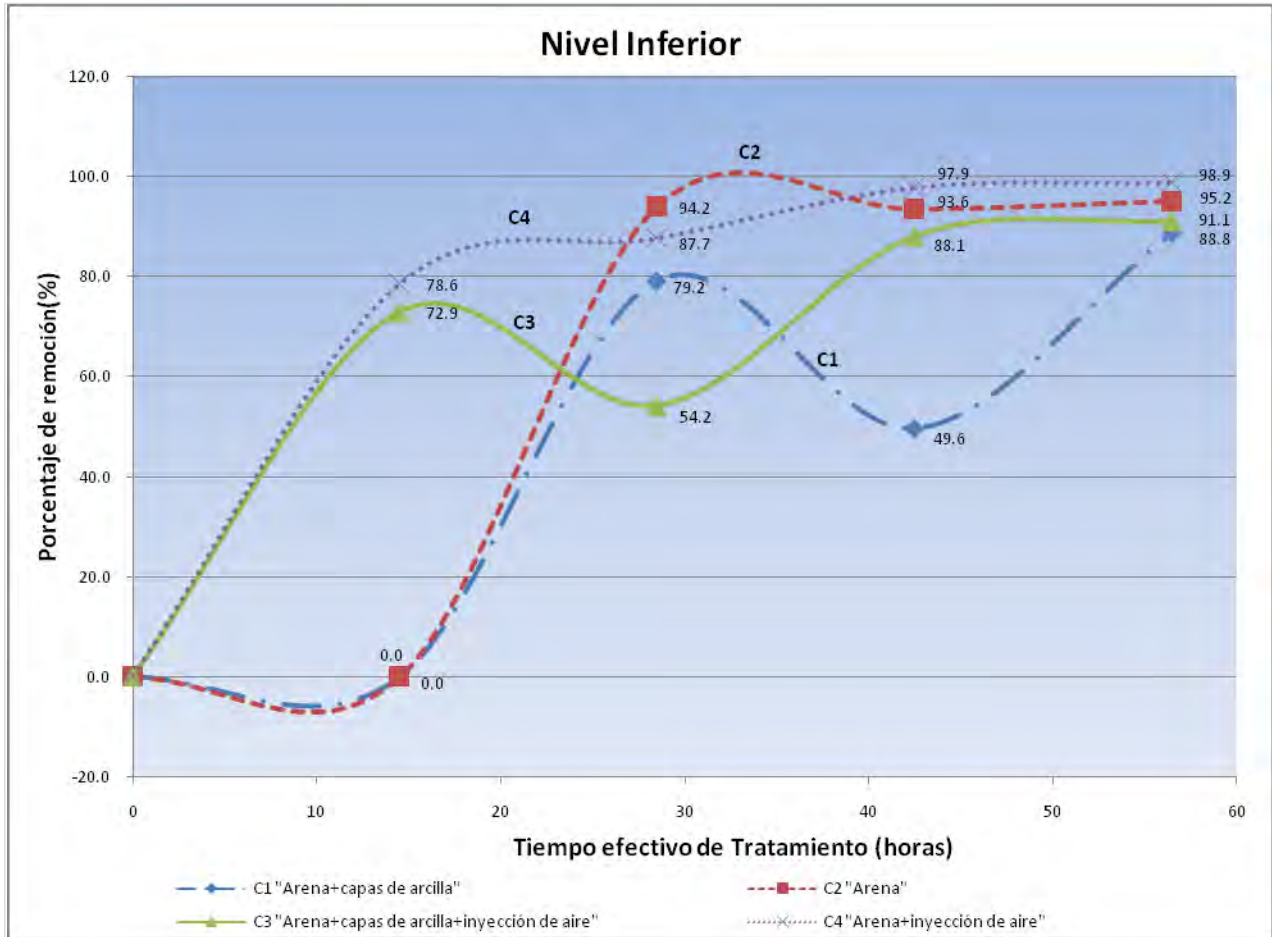


Fig. 6.6 Porcentaje de remoción en función del tiempo efectivo de tratamiento, para el nivel inferior de las cuatro unidades experimentales.

6.5 Evaluación de la eficiencia de remoción

6.5.1 Diseño experimental

Para evaluar el comportamiento del sistema con respecto a la eficiencia de remoción de interés (Fracción Ligera de Hidrocarburos), se aplicó un diseño experimental factorial de tres factores sin réplica; esto es, un diseño factorial 2^k . En este caso de 2^3 ; es decir, con 8 combinaciones posibles de los factores de interés involucrados. Los factores considerados para este experimento son los que se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Factores considerados en el experimento

Factor	Definición	Valor +	Valor -
A	Inyección de aire caliente	Unidades con inyección de aire	Unidades sin inyección de aire
B	Presencia de capas de arcilla	Unidades que cuenta con dos capas de suelo arcilloso	Unidades que no cuenta con capas de suelo arcilloso
C	Tiempo	Al tiempo mínimo de tratamiento 28.5 horas	Al tiempo máximo de tratamiento 56.5 horas

Los niveles “+” y “-” para el factor C (tiempo), se establecieron al alcanzar la hora 28.5 (definida como tiempo mínimo de tratamiento) en virtud de que a este tiempo se obtuvo una eficiencia de remoción superior al 90% en la mayoría de los casos.

Con el objetivo de demostrar si un tiempo superior a éste (en este caso, el doble de tiempo) tenía un efecto significativo para alcanzar una mayor y considerable eficiencia de remoción, se estableció el tiempo máximo de remoción en 56.5 horas de tratamiento efectivo. Considerando que se cuenta con cuatro unidades experimentales físicas, cada una de ellas permite evaluar el efecto de los factores A y B de forma simultánea y el factor C (tiempo), a dos diferentes tiempos de tratamiento. De esta forma, es posible considerar 8 unidades experimentales.

Como se ha explicado previamente, el análisis más apropiado fue comparar los ocho diferentes tratamientos para cada profundidad o niveles de los que se componía cada unidad experimental. De esta forma, se tuvo el siguiente diseño por cada uno de los estratos o niveles y del cual se presenta las diferentes combinaciones posibles (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Combinaciones de los factores.

Combinación	Factor			Definición
	A	B	C	
I	-	-	-	Unidad experimental sin inyección de aire caliente, sin capas de arcilla y en tiempo mínimo de tratamiento (28.5h)
a	+	-	-	Unidad experimental con inyección de aire caliente, sin capas de arcilla y en tiempo mínimo de tratamiento (28.5h)
b	-	+	-	Unidad experimental sin inyección de aire caliente, con capas de arcilla y en tiempo mínimo de tratamiento (28.5h)
ab	+	+	-	Unidad experimental con inyección de aire caliente, con capas de arcilla y en tiempo mínimo de tratamiento (28.5h)
c	-	-	+	Unidad experimental sin inyección de aire caliente, sin capas de arcilla y en tiempo máximo de tratamiento (56.5h)
ac	+	-	+	Unidad experimental con inyección de aire caliente, sin capas de arcilla y en tiempo máximo de tratamiento (56.5h)
bc	-	+	+	Unidad experimental sin inyección de aire caliente, con capas de arcilla y en tiempo máximo de tratamiento (56.5h)
abc	+	+	+	Unidad experimental con inyección de aire caliente, con capas de arcilla y en tiempo máximo de tratamiento (56.5h)

6.5.2 Resultados de las eficiencias por combinación de factores y nivel o estrato

Las Tablas 6.3, 6.4 y 6.5, presentan los resultados de las eficiencias de remoción en porcentaje, ordenados de acuerdo con la combinación de factores que le corresponde y de acuerdo con los tres niveles en los que se dividió la unidad experimental para su análisis.

Tabla 6.3 Resultados de eficiencia de remoción para el nivel superior de acuerdo a las posibles combinaciones de factores del experimento.

Nivel Superior	
Combinación	Eficiencia (%)
l	98.3
a	98.7
b	99.8
ab	91.3
c	99.4
ac	98.0
bc	99.8
abc	97.1

Tabla 6.4 Resultados de eficiencia de remoción para el nivel medio de acuerdo a las posibles combinaciones de factores experimento.

Nivel Medio	
Combinación	Eficiencia (%)
l	76.9
a	96.4
b	90.5
ab	92.2
c	95.6
ac	98.4
bc	97.3
abc	90.7

Tabla 6.5 Resultados de eficiencia de remoción para el nivel inferior de acuerdo a las posibles combinaciones de factores experimento.

Nivel Inferior	
Combinación	Eficiencia (%)
l	94.2
a	87.7
b	79.2
ab	54.2
c	95.2
ac	98.9
bc	88.8
abc	91.1

De las tablas anteriores, se aprecia que sólo se cuenta con una réplica por tratamiento, así que para evaluar el efecto que presentó cada uno de los factores, se analizaron las eficiencias considerando que un factor a la vez no aportaba efecto significativo en la eficiencia de tratamiento.

De esta forma, se ordenaron los datos en dos réplicas. La primera, considera las combinaciones en donde un factor tenía un valor negativo (-) y en la segunda donde ese factor tenía un valor positivo (+). En las Tablas 6.6, 6.7 y 6.8 se resume el ordenamiento de los datos tomando en consideración el criterio mencionado.

Tabla 6.6 Ordenamiento de datos, considerando que un factor no presentó un efecto significativo para el nivel superior.

Eficiencias de Tratamiento en Nivel Superior					
Factor A sin efecto significativo		Factor B sin efecto significativo		Factor C sin efecto significativo	
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
98.3	98.7	98.3	99.8	98.3	99.4
99.8	91.3	98.7	91.3	98.7	98
99.4	98	99.4	99.8	99.8	99.8
99.8	97.1	98	97.1	91.3	97.1

Tabla 6.7 Ordenamiento de datos, considerando que un factor no presentó un efecto significativo para el nivel medio.

Eficiencias de Tratamiento en Nivel Medio					
Factor A sin efecto significativo		Factor B sin efecto significativo		Factor C sin efecto significativo	
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
76.9	96.4	76.9	90.5	76.9	95.6
90.5	92.2	96.4	92.2	96.4	98.4
95.6	98.4	95.6	97.3	90.5	97.3
97.3	90.7	98.4	90.7	92.2	90.7

Tabla 6.8 Ordenamiento de datos, considerando que un factor no tiene efecto significativo para el nivel inferior.

Eficiencias de Tratamiento en Nivel Inferior					
Factor A sin efecto significativo		Factor B sin efecto significativo		Factor C sin efecto significativo	
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
94.2	87.7	94.2	79.2	94.2	95.2
79.2	54.2	87.7	54.2	87.7	98.9
95.2	98.9	95.2	88.8	79.2	88.8
88.8	91.1	98.9	91.1	54.2	91.1

Con los datos de eficiencia de remoción ordenados como se muestran en las Tablas 6.6, 6.7 y 6.8, se llevó a cabo un análisis de varianza tomando los valores de los conjuntos definidos como réplica 1 y 2 para cada una de los posibles casos; es decir, tomando como ejemplo las eficiencias de tratamiento en el nivel inferior y considerando el caso de que el factor B no aportara un efecto significativo al tratamiento, se tendría el siguiente conjunto de datos ordenados (Tabla 6.9).

Tabla 6.9 Ejemplo de datos ordenados que permitieron realizar un ANOVA.

Caso donde el factor B no tiene efecto significativo	
Réplica 1 (% de remoción)	Réplica 2 (% de remoción)
94.2	79.2
87.7	54.2
95.2	88.8
98.9	91.1

Con ello se estableció la hipótesis nula H_0 , de que no existe un factor que tenga un efecto significativo en la eficiencia de tratamiento. Efectuado el análisis de varianza para los nueve casos planteados, los resultados de significación se resumen en la Tabla 6.10

Tabla 6.10 Resultados del ANOVA.

Nivel o estrato	Considerando	Resultado ANOVA con un nivel de significación de 0.05, y valor F de contraste para 7 y 4 grados de libertad = $F_{7,1,0.05}$
superior	Factor A sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
	Factor B sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
	Factor C sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
Medio	Factor A sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
	Factor B sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
	Factor C sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
inferior	Factor A sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
	Factor B sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos
	Factor C sin efecto significativo	No hay evidencia de diferencia significativa atribuible a un factor entre los 8 tratamientos

6.6 Evaluación Global

Los resultados del análisis de varianza, permitieron concluir que estadísticamente, la diferencia entre los valores promedios de los diferentes tratamientos, no es suficientemente grande para rechazar la hipótesis nula de que no existen efectos significativo de alguno de los factores involucrados y, por lo tanto no se puede descartar la idea de que las diferencias presentadas se deban a la aleatoriedad del muestreo.

La evaluación anterior permite destacar que una vez que se ha alcanzado un tiempo de remoción de 28.5 horas de tratamiento efectivo así como una eficiencia de remoción del contaminante del 90%, si bien se alcanzan en algunos casos porcentajes de eficiencia superiores, ya no es posible distinguir que factor juega un papel relevante en el tratamiento o lo que es más importante de resaltar, que el tiempo de tratamiento (el doble de tiempo en este experimento) no representó un avance considerable en la eficiencia de remoción. De forma que la inversión en energía y recursos para mantener el sistema de tratamiento activo más allá de la hora 28.5 o 90% de eficiencia en promedio, no redituó en mejores resultados de la remediación del caso de estudio.

PAGINA EN BLANCO

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

PAGINA EN BLANCO

El sistema experimental de extracción de vapores propuesto, presentó las características técnicas suficientes que permitieron realizar estudios del comportamiento de la masa contaminante bajo diferentes condiciones de operación y características del medio, llevando a cabo la extracción de la fase vapor tal y como lo demostraron las pruebas de funcionamiento efectuadas en el experimento.

En el experimento, el comportamiento del contaminante a lo largo del proceso de saneamiento, varió de acuerdo con la capa o nivel analizado. Consecuentemente la evaluación de la remoción del contaminante en el suelo de estudio se llevó a cabo tomando tres capas de suelo o niveles (superior, medio e inferior).

La variación del comportamiento entre las tres diferentes capas de cada una de las cuatro cámaras experimentales, se debió a las condiciones y características del medio, así como a los mecanismos de transporte del contaminante o el equilibrio entre las tres fases (disuelta, adsorbida y vapor).

El nivel de saneamiento de suelo alcanzó porcentajes superiores al 90% (99.8% el más alto registrado), esto se presentó en todos los casos (cámaras y niveles) con excepción de la cámara 1, en donde había capas de arcilla presentes sin inyección de aire, lo que se reflejó en una inhibición del proceso de remoción del contaminante, aún así, al final del experimento, el porcentaje de remoción en esta cámara fue notoriamente alto (88.8%).

El parámetro de control elegido para las pruebas de funcionamiento fue el de hidrocarburos de fracción ligera en suelo, de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. El método resultó adecuado para evaluar la remoción del contaminante, pues permitió conocer el nivel de saneamiento de acuerdo con la presencia del contaminante en la fase adsorbida.

En cuanto a lo que se refiere a la influencia de la inyección de aire, ésta no fue significativa en la remoción del contaminante en el nivel superior de las cámaras, puesto que aquellas que recibieron el tratamiento (C3 y C4) no manifestaron un comportamiento distinto respecto al resto de ellas (C1, C2). En el nivel superior influyeron otros fenómenos físicos para la disminución de la contaminación en fase la adsorbida, como son la migración del contaminante por efecto de la gravedad y la facilidad que representó la superficie para que se llevara a cabo la transferencia de masa de la fase adsorbida a la fase vapor.

En el nivel medio se hizo evidente el efecto que produjo la inyección de aire, esto se pudo observar en el comportamiento del contaminante en la cámara 4 (arena + inyección de aire), pues aquí, a pesar de recibir la migración de gasolina proveniente de estratos superiores, se alcanzaron niveles de saneamiento de suelo superiores en menor tiempo. No fue el caso de aquellas cámaras que no recibieron inyección de aire (C1 y C2), ni aún de aquella a la que se le inyectó aire y que tenía capas de arcilla (C3).

En el nivel inferior, la inyección de aire representó el factor fundamental en la remoción del contaminante durante las primeras 28.5 horas de tratamiento efectivo, que fue el tiempo en el que se alcanzaron porcentajes de remoción superiores al 90%. A partir de ahí, el factor decisivo en la obtención de los mayores porcentajes de remoción de la masa contaminante fue la presencia de capas de arcilla. Lo anterior permitió concluir que la inyección de aire más allá del 90 % de remoción de masa contaminante, no se justificaron técnica ni económicamente debido al considerable gasto de energía, recursos y tiempo para elevar en unos cuantos puntos porcentuales la remoción del contaminante. Debe mencionarse que en este nivel, la diferencia entre las cámaras que recibieron inyección de aire y las que no, fue evidente, pues la reducción de la concentración del contaminante en aquellas que recibieron inyección de aire (C3 y C4) fue mucho más rápida que en C1 y C2.

En cuanto al papel que jugó el factor tiempo en el proceso de remoción de contaminante, se destaca que éste no tuvo una influencia significativa, tomando en cuenta que se consideraron dos tiempos (28.5 h el mínimo y 56.5 h el máximo), ya que los cambios significativos en cuanto al porcentaje de remoción del contaminante, se llevó a cabo dentro de las primeras 28.5 horas de tratamiento, de ahí en adelante, el comportamiento fue asintótico en la mayoría de los casos, manteniendo un nivel de saneamiento por arriba del 90%, una vez que se rebasaron las 28.5 h de tratamiento.

Las capas de arcilla fueron un factor inhibitor del proceso de saneamiento de suelo que se hizo evidente una vez que se alcanzó un 90% de remoción del contaminante, lo cual sucedió transcurridas 28.5 h de tratamiento efectivo, a partir de ahí se observaron fluctuaciones en la determinación de la concentración del contaminante en fase adsorbida, principalmente en aquellas cámaras que presentaban capas de suelo arcilloso, lo que es atribuible al transporte del contaminante por un mecanismo de difusión que impulsó la migración del contaminante del suelo arcilloso, donde se encontraba atrapado, hacia el material más permeable (arena).

De los tres factores analizados en el proceso de remoción de contaminante (tiempo, inyección de aire y capas de arcilla), el que influyó de forma más importante durante las primeras 28.5 horas de tratamiento, fue la inyección de aire, así lo demostró el comportamiento observado en las cámaras que recibieron este tratamiento. Sin embargo, a partir de la hora 28.5 y hasta el final del experimento (56.5 horas de tratamiento) el factor que jugó el papel más relevante fue la presencia de capas de arcilla. El experimento se llevó a cabo bajo un diseño experimental de tres factores (inyección de aire, capas de arcilla y tiempo) sin réplica.

El manejo estadístico que se llevó a cabo (considerando que un factor a la vez no tiene efecto significativo y así contar con una réplica más) y el análisis de varianza correspondiente, no demostró una diferencia significativa en los tratamientos. Ésto es atribuible a las características muy particulares del experimento, y en general a todos los estudios que se hacen con suelos contaminados.

Como se puede observar en el comportamiento del proceso saneamiento, al tiempo mínimo (la primera mitad del experimento) el factor significativo en la remoción fue la inyección de aire y en la segunda mitad del experimento, el factor que definió el avance en la remoción del contaminante fueron las capas de arcilla presente.

El caso del elemento testigo, permitió identificar y descartar otros factores involucrados mas allá de los tres planteados para el experimento. Al elemento testigo no se le aplicó extracción de vapores, ya que no contaba con inyección de aire o presencia de capas de arcilla, de ahí que fue posible observar con mayor claridad el efecto que tuvo la migración del contaminante hacia la capa inferior por efecto de la gravedad primordialmente de la gasolina proveniente del nivel medio. Debe mencionarse que el contenido de agua facilitó la migración del contaminante en el sentido gravitacional, el mecanismo de transporte involucrado en este caso fue la advección. En el elemento testigo se pudo observar también de forma clara que en el nivel superior, se alcanzó un equilibrio entre las fases, lo que derivó en una aparente estabilidad en la concentración presente en la fase adsorbida durante el tiempo que duró el experimento.

El sistema de extracción de vapores diseñado tiene una capacidad limitada de cámaras experimentales que pueden instalarse simultáneamente; sin embargo, se ha demostrado que cuenta con la solvencia técnica para efectuar pruebas de tratabilidad de suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, así como desarrollar estudios más profundos sobre los efectos que pueden aportar otros factores que interfieren en el tratamiento de suelos contaminados por medio de extracción de vapores, como son la influencia de materia orgánica o humedad.

PAGINA EN BLANCO

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS

PAGINA EN BLANCO

Albergaria, J.T., Alvim-Ferraz, M y Cristina Delerue-Matos, D. (2006). Remediation efficiency of vapour extraction of sandy soils contaminated with cyclohexane: Influence of air flow rate, water and natural organic matter content, *Environmental Pollution* 143,146-152.

Armstrong, J. E., Frind, E. O., y McClellan, R.D. (1994), Nonequilibrium mass transfer between the vapor, aqueous, and solid phases in unsaturated soils during vapor extraction, *Water Resour. Res.*, 30(2), 355–368.

Barnes, D.L. et al. (2002). *Operation of soil vapor extraction in cold climates*. En Kelly S. Merrill, (Eds.), *Cold Regions Engineering: Cold Regions Impacts on Transportation and Infrastructure*. Proceeding of the Eleventh International Conference, (pp. 956-967), Anchorage, Alaska: ASCE.

Barnes, D. L. (2003), Estimation of Operation Time for Soil Vapor Extraction Systems, *Journal of Environmental Engineering*, 9(129), 873-878.

Brusseau, M.L., Jessup, R.E., y Rao, P.S.C. (1991), Nonequilibrium sorption of organic chemicals: Elucidation of rate-limiting processes, *Environmental Science and Technology*, 25(1), 134-142.

DOF(Diario Oficial de la Federación). (2002), “Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis”, SEMARNAT, Diario Oficial de la Federación, México D.F.

DOF(Diario Oficial de la Federación)(2005), “Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación”, SEMARNAT, Diario Oficial de la Federación, México D.F.

Domínguez, R.I. y Aguilera H.N. (1990), *Manual de Prácticas de laboratorio*, Facultad de Ciencias, México D.F.:Universidad Nacional Autónoma de México.

Falta *et al*, (1989). Density-driven flow of gas in the unsaturated zone due to the evaporation of volatile organic compounds, *Water Resources Research*, 28(2), 323-335.

Gierke, J. S., Hutzler, N.J., y McKenzie, D.B. (1992), Vapor Transport in Unsaturated Soil Columns: Implications for Vapor Extraction, *Water Resour. Res.*, 28(2), 323–335.

Gierke, J.S., Powers, S.E. (1997). Increasing implementation of in situ treatment technologies through field-scale performance assessments, *Water Environment Research*, 69(2), 196-205.

Gierke, J. S., N. J. Hutzler, y D. B. McKenzie (1992), Vapor Transport in Unsaturated Soil Columns: Implications for Vapor Extraction, *Water Resour. Res.*, 28(2), 323–335.

Gregory, C. y Blanc, F. (2000). *Air Stripping and Soil Vapor Extraction as site Remediation Measures*. En D.L. Wise, D.J. Trantolo, E.J. Cichon, H.I. Inyang y U. Stottmeister (Eds.), *Remediation engineering of Contaminated Soils*, (pp. 473-489) USA: Marcel Dekker Inc.

Halmemies, S., Grondahl, S., Arffman, M., Nenonen, K., Tuhkanen, T. (2003). Vacuum extraction based response equipment for recovery of fresh fuel spills from soil. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1-4), 127-143.

Harper, B., Stiver, W.H. and Zytner, R.G. (2003). Quantification of Water and NAPL Contents on SVE Contaminant Mass Transfer in Silt Loam Soil, *ASCE: Journal of Environmental Engineering*, 129(8), 745-755.

Holbrook, T.M., Bass, D.H., Boersma, P.M., DiGiulio, D.C., Eisenbeis, J.J., Hutzler, N.J., Roberts, E.P. (1998). *Vapor Extraction and Air Sparging*, Annapolis, Maryland: American Academy of Environmental Engineers.

Hutzler, et al. (1989). *State of Technology Review: Vapor Extraction Systems*, EPA 600/2-89-024.

Johnson, P.C. et al. (1990)a. Quantitative analysis for the cleanup of hydrocarbon-contaminated soils by in-situ soil venting, *Ground Water*, 28(3), 413-429.

Jordan, D.L., Mercer, J.W., Cohen, R.M. (1995) *Review of Mathematical Modeling for Evaluating Soil Vapor Extraction Systems*, EPA/540/R-95/513

Khan F.I. et al. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies, *Journal of Environmental Management* 71 95-122, 96-98.

LaGrega, Michael D. et al. (1996). *Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, eliminación y Recuperación de Suelos*, Madrid: Mc Graw-Hill.

Malina, G., Grotenhuis, J.T.C., Mous, S.K.J., y De Wit, J.C.M. (1998), Soil vapour extraction versus bioventing of toluene and decane in bench-scale soil columns, *Environmental Technology* 19. 977-991.

Mattney G. (), *Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites*, USA: Lewis Publishers.

Nyer, Evan K, et al. (2001). *In Situ Treatment Technology*, USA: CRC Press LLC.

Rise-Roberts, Eve. (1998). *Remediation of petroleum contaminated soils: Biological, Physical, and Chemical Process*, USA: Lewis Publisher.

Sleep , B.E., Syikey, J.F. (1989). Modeling of Transport of Volatil Organics in Variable Saturated Media, *Water Resources Research*, 25 (1), 81.

Suthersan S. (1997). *Remediation Engineering Design Concepts*, New York USA: Lewis Publishers.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1991)a. *Soil Vapor Extraction Technology: Reference Handbook*. Cincinnati, OH: Office of Research and Development. EPA/540/2-91/003.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1991)b. *Guide for Treatability Studies Under CERCLA: Soil Vapor Extraction*. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response. EPA/540/2-91/019A.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1995), *Remediation Case Studies: Soil Vapor Extraction*, EPA542-R-95-004.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1996), *Guía del ciudadano: Técnicas de Tratamiento innovadoras*, Ficha tecnológica EPA 542-F-96-017.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1996). *Guía del ciudadano: La extracción de vapores del suelo*, Ficha tecnológica EPA 542-F-96-024.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1997), *Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction*, EPA542R97007, National Service Center for Environmental Publications, Cincinnati, Ohio.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1998), *Remediation Case Studies: In Situ Soil Treatment Technologies (Soil Vapor Extraction. Thermal Processes)*, Volume 8, EPA542-R-98-012.

Yeung, A.T., Hsu, H.T. (2002). Semi analytical simulation of soil vapor extraction. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 1(6), 14-22.

Zhan, H., Park, E., (2002). Vapor flow to horizontal wells in unsaturated zones. *Soil Science Society of America Journal* 66(3),710-721.

PAGINA EN BLANCO

ANEXOS

PAGINA EN BLANCO

ANEXO A

ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS

PAGINA EN BLANCO

MÉTODOS UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN

PROPIEDAD	MÉTODO
Densidad real	Método AS-4 (DOF, 2002)
Densidad aparente	Probeta (Domínguez y Aguilera, 1990)
Porosidad (%)	Calculado (de densidad real y densidad aparente)
Análisis Granulométrico	ASTM D 2487-98 (SUCS)
Contenido de humedad	Método AS-5 (DOF, 2002)
pH	Método AS-02 (DOF, 2002)
Materia Orgánica (%)	Método AS-07 (DOF, 2002)
Carbono Orgánico (%)	Método AS-07 (DOF, 2002)

**Determinación de la densidad real de suelo arenoso
 Método AS-4 de la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002)**

No. de muestra		1	2	3
Peso Picnómetro (g)	(1)	20.500	20.546	20.232
Peso Suelo(g)	(ps)	4.995	5.008	4.999
Peso Picnómetro + suelo (g)	(2)	25.495	25.555	25.232
Peso Picnómetro + suelo + agua (g)	(3)	48.722	48.877	48.505
Peso Picnómetro + agua (g)	(4)	45.638	45.722	45.293
Temperatura(°C)		21	21	20
Densidad(g/cm ³)	(pw)	0.997	0.997	0.998
Volumen de suelo	(Vs)	1.91	1.86	1.79
Densidad real (g/cm ³)	(ps)	2.61	2.69	2.79
Densidad real promedio (g/cm ³)	(ps)			2.70

Las siguientes formulas permitieron evaluar la densidad real:

$$v_s = \frac{4 - 1}{\rho_w} - \frac{3 - 2}{\rho_w}$$

$$Densidad\ real(\rho_s) = \frac{\rho_s}{V_s}$$

Donde:

vs.- volumen del suelo

pw.- densidad

ps.- densidad real

**Determinación de la densidad aparente de suelo arenoso
 Método de la probeta (Domínguez y Aguilera, 1990)**

No. de muestra	1	2	3
Peso de Suelo (ps)	40.842	40.811	40.819
Volumen (v)	26.5	26.5	26.2
Densidad Aparente (g/cm ³) (da)	1.54	1.54	1.56
Densidad Aparente promedio (g/cm ³)			1.55

La siguiente formula permitió determinar la densidad aparente

$$Densidad\ aparente\ (da) = \frac{ps}{v}$$

Donde: ps.- peso del suelo
 da.- densidad aparente
 v.- volumen

**Determinación de la porosidad de suelo arenoso
 a partir de densidades**

Densidad aparente promedio = 1.55

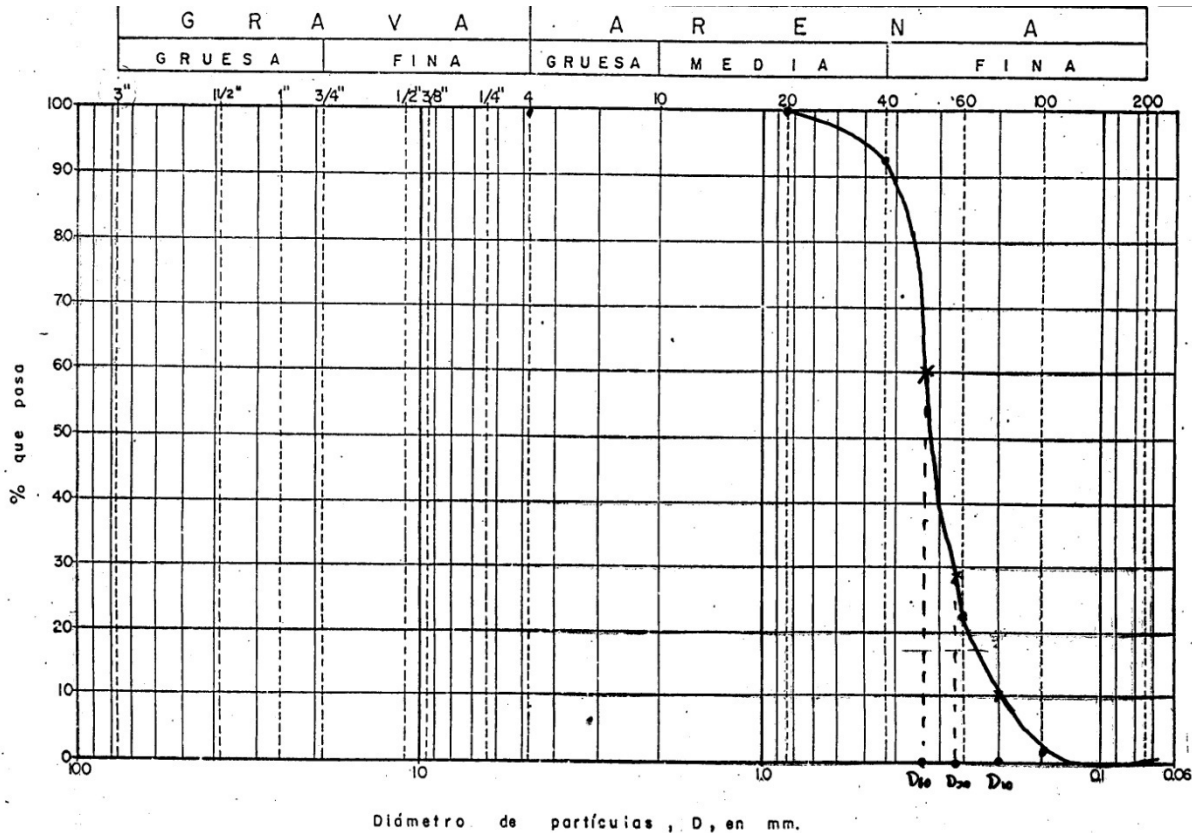
Densidad real promedio = 2.70

Porosidad = 0.43

La siguiente formula permitió obtener la porosidad:

$$Porosidad = 1 - \frac{Densidad\ aparente}{Densidad\ real}$$

Análisis granulométrico de suelo arenoso Método ASTM D2787-98 (SUCS)



De la gráfica se infiere:

$$D_{60}=0.34$$

$$D_{30}=0.28$$

$$D_{10}=0.2$$

Donde:

D60 : tamaño tal, que el 60 % en peso, del suelo, sea igual o menor.

D10 : llamado por Hazen diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10 % en peso del suelo.

Por lo tanto

El Coeficiente de uniformidad Cu es:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad Cu = \frac{0.34}{0.2} = 1.7$$

Y el Coeficiente de curvatura Cu:

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad Cc = \frac{(0.28)^2}{0.34 \times 0.2} = 1.15$$

Tomando en cuenta $Cu < 2$, se trata de una arena fina mal graduada o moderadamente uniforme.

**Análisis granulométrico de suelo arcilloso
Método ASTM D2787-98 (SUCS)**

Tamizado		%
Peso inicial (g)	1968.47	100
No. Malla	Peso retenido (g)	
4	1.32	0.07
8	2.31	0.12
20	11.08	0.56
40	36.88	1.87
60	128.06	6.51
100	93.1	4.73
200	91.62	4.65
Partículas que pasaron malla 200	1604.1	81.49

El mayor porcentaje de suelo pasó la malla 200 (81.49 %), el método SUCS establece que se deben determinar los límites líquido y plástico para poder hacer su clasificación.

Límite Líquido (LL)

1	No. de cápsula	664	468	558	1156	579
2	Peso de la cápsula (g)	19.01	19.19	19.07	18.51	19.44
3	No. de golpes	15	18	27	32	37
4	Peso del suelo húmedo + cápsula (g)	44.01	42.37	48.37	46.54	49.01
5	Hora del peso	15:00	14:07	16:41	16:14	18:03
6	Peso del suelo seco + cápsula (g)	35.56	34.69	38.39	36.95	39.27
7	Peso del suelo seco (g) (= 6-2)	16.55	15.5	19.32	18.44	19.83
8	Peso del agua (g) (= 4-2-7)	8.45	7.68	9.98	5.59	9.74
9	Contenido de humedad (%) (= $8 \cdot 100 / 7$)	51.05	49.54	51.65	52	49.11
	Promedio de contenido de humedad					50.67
	LL	51				

Para calcular el LL se deben graficar en papel semilogarítmico el número de golpes y el contenido de humedad y buscar el valor que corresponde a 25 golpes.

Límite Plástico (LP)

1	No. de cápsula	1015	980
2	Peso de la cápsula (g)	18	18.68
3	Peso del suelo húmedo + cápsula (g)	22.33	22.5
4	Hora del peso	17.42	17.43
5	Peso del suelo seco + cápsula (g)	21.58	21.86
6	Peso del suelo seco (g) (= 2)	3.58	3.18
7	Peso del agua (g) (= 3-2-6)	0.75	0.64
8	Contenido de humedad (%) (= 7*100/6)	20.94	20.12
	Promedio de contenido de humedad (LP)		20.53

El límite plástico es el promedio del contenido de humedad para cada una de las muestras.

Índice de plasticidad (IP)

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 51 - 20.53$$

$$IP = 30.47$$

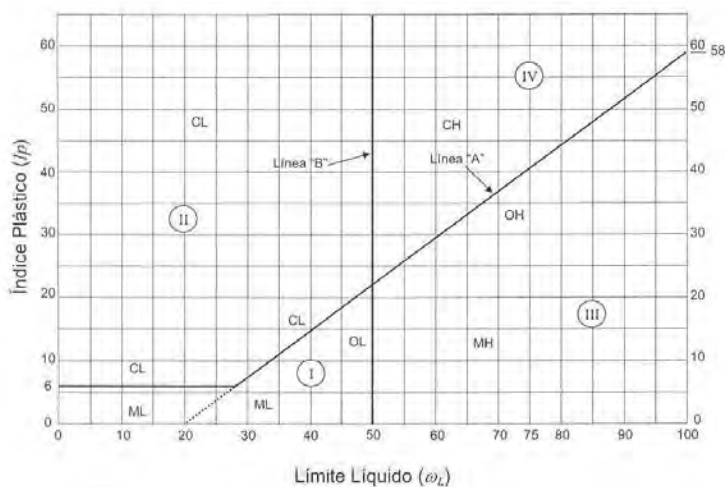
Donde :

IP.-Índice Plástico

LL.- Límite Líquido

LP.- Límite Plástico

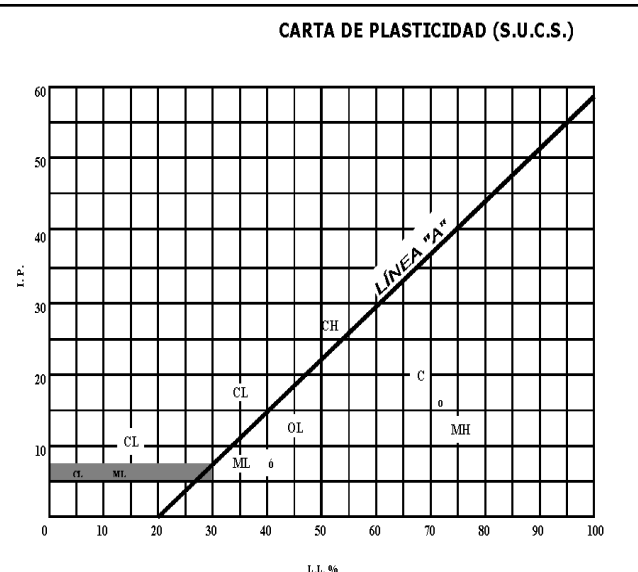
Los valores obtenidos para Límite líquido (LL) e Índice plástico se usan en la Carta de Plasticidad para la clasificación de suelos de partículas finas en laboratorio



Donde se observó que los valores se encuentran en la zona CH que corresponde a arcillas inorgánicas de alta plasticidad.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.) INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	DETERMÍNESE LOS PORCENTAJES DE GRAYA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW, GP, SW, SP; más del 12%: GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **	
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		* GM	d		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
			u		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	SW		Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.
	SP		Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	* SM		d		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
			u		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
	SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.		
	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.		Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.		
LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.		de símbolos dobles.			
$Cu = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.		No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW			
LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.		Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.			
LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.		de símbolos dobles.			
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕ Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad	
		CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas		
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		P		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.



** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAYA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.
 ⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.
 * LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS UNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

**Determinación de Contenido de Humedad suelos arenoso y arcilloso
 Método AS-5 de la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002)**

No.	Pc	Psh	Pc+Psh	Pc+Pss	%h		Promedio Humedad (g)
cápsula	peso cápsula	peso suelo	peso de cápsula + suelo húmedo	peso de cápsula + suelo seco			
1C	75.59	10.00	85.59	85.14	4.72	% H arcilla	4.51
2C	70.27	9.79	80.07	79.60	5.04		
3C	80.38	10.02	91.40	91.00	3.78		
1S	74.81	10.03	84.85	84.83	0.19	% H arena	0.19
3S	76.57	10.00	86.57	86.55	0.18		
2S	74.14	10.06	84.20	84.19	0.07		

$$\theta = \frac{(Pc + Psh) - (Pc + Pss)}{(Pc + Pss) - Pc} (100)$$

Donde:

Pc.- peso de la cápsula

Psh.- peso de suelo húmedo

Pss.- peso de suelo seco

.- humedad

Determinación de pH de suelo arenoso y arcilloso

Método AS-2 de la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002)

pH	31/07/2008			Promedio	Clasificación NOM-21
Arenoso	8	7.7	7.4	7.7	Medianamente alcalino
Arcilloso	6.9	6.9	7	6.9	Neutro

**Determinación de Materia orgánica de suelo arenoso y arcilloso
 Método AS-7 de la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002)**

			Sulfato Ferroso gastado (ml)	% C	% M.O.
	Muestra	Peso (g)			
Blanco	B1		9.7		
	B2		9.6		
	B3		9.6		
	Promedio		9.63		
Arena	S1	0.5	9.6	0.02	0.04
	S2	0.5	9.9	-0.21	-0.36
	S3	0.5	9.2	0.34	0.58
	Promedio				0.31
Arcilla	C1	0.5	8.9	0.60	1.03
	C2	0.5	9.4	0.19	0.32
	C3	0.5	9.4	0.19	0.32
	Promedio				0.56

$$\% C \text{ Orgánico} = \left(\frac{B - T}{g} \right) (N)(0.39)(mcf)$$

B = Sulfato ferroso gastado en blanco
 T = Sulfato ferroso gastado en muestra
 N = Normalidad del sulfato ferroso
 G = Peso de la muestra (g)
 Mcf (Factor de corrección de humedad)

$$\% M.O. = (\% C \text{ Orgánico})(1.724)$$

PAGINA EN BLANCO

ANEXO B

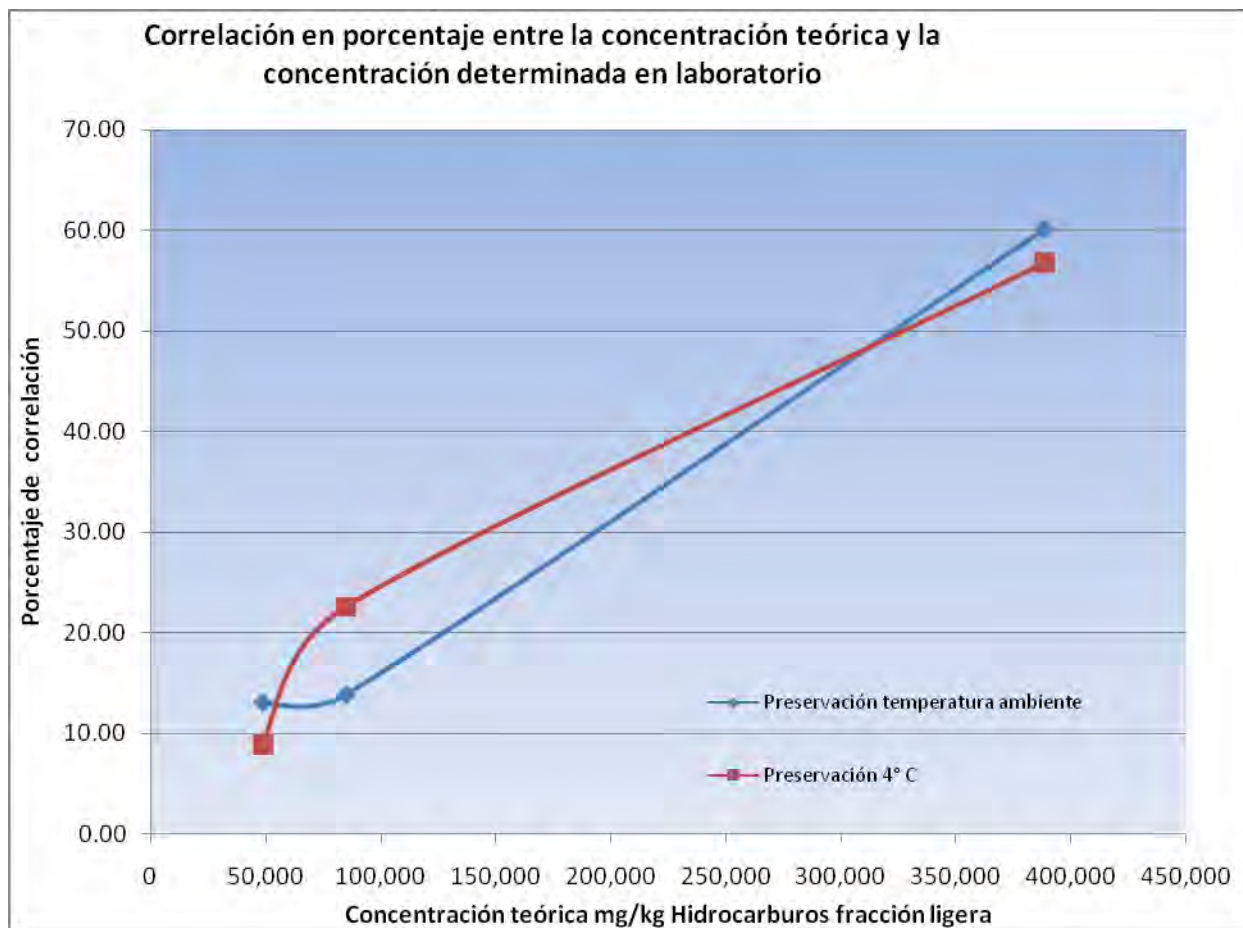
PRUEBAS DE CONTAMINACIÓN DEL SUELO

PAGINA EN BLANCO

Con el objetivo de minimizar las pérdidas de gasolina durante el proceso de mezclado, en el muestreo y el análisis de laboratorio, se desarrollaron pruebas para conocer la cantidad de gasolina que debía emplearse en la contaminación del suelo. Las pruebas permitieron conocer qué cantidad de gasolina presentaba menos pérdida con respecto a la concentración teórica. La siguiente tabla resume el resultado de dichas pruebas. Se prepararon seis frascos con la misma cantidad de arena y el mismo contenido de agua; a cada una se agregaron diferentes cantidades de gasolina y se llevó a cabo el mezclado; todos fueron preservados por cinco días; tres de ellos fueron preservados a 4°C y los otros tres a temperatura ambiente. Los resultados demostraron que la temperatura de preservación no tuvo un efecto significativo en la concentración encontrada.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CONTAMINACIÓN POR GASOLINA BAJO DIFERENTES CONCENTRACIONES Y TEMPERATURAS						
Densidad de Gasolina Empleada para todas las muestras		0.728	g/ml	OSERVACIONES		
Peso de Arena Tamizada para todas las muestras		275	g			
Agua Agregada a todas las muestras		25	g			
Peso de Arena + Agua en todas las muestras		300	g			
	Cantidad de Gasolina adicionada (ml)	Concentración Teórica HC Fracc. Ligera (mg/kg)	Concentración HC Fracc. Ligera Determinada en Laboratorio, 5 dias preservación Temp. Amb (mg/kg) B.S.	Humedad %	Concentración HC Fracc. Ligera Determinada en Laboratorio, 5 dias preservación Temp. 4°C (mg/kg) B.S	Humedad %
Muestra tipo 1	160	388,266.67	233,129.59	28.30	220,553.01	28.7
Muestra tipo 2	35	84,933.33	11,764.30	11.00	19,142.94	11.9
Muestra tipo 3	20	48,533.33	6,345.25	9.00	4,269.43	8.3

Con los datos obtenidos en la tabla anterior se desarrolló una gráfica que permitiera apreciar con mayor claridad qué cantidad de gasolina adicionada para contaminar el suelo arenoso utilizado en el experimento presentaba menos pérdidas en la concentración determinada en el laboratorio con respecto a la concentración teórica calculada. La siguiente gráfica demuestra que en los casos en donde se adicionó 20 y 35 mL de gasolina, la pérdida fue significativa, en la siguiente figura se puede identificar como concentración teórica entre 50 y 100 mil mg/kg de hidrocarburos fracción ligera; para el caso de la adición de 160 ml, lo que significaba un concentración teórica de aproximadamente 380,000 mg/kg, la pérdida durante el mezclado fue de tan solo 40%; por lo que se optó por trabajar en el experimento con la cantidad de gasolina que proporcionaba esta concentración teórica.




ANEXO C

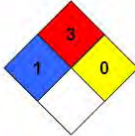
HOJA DE SEGURIDAD GASOLINA

PAGINA EN BLANCO

HDSS: PR-104/04 PEMEX PREMIUM (1) Z. M. V. M.

	SUBDIRECCIÓN DE AUDITORÍA EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y PROTECCIÓN AMBIENTAL
	GERENCIA DE SEGURIDAD INDUSTRIAL
	HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE SUBSTANCIAS

SECCIÓN I. DATOS GENERALES

HDSS: PR-104/04	PEMEX PREMIUM (1) Z. M. V. M.		GRADO DE RIESGO NFPA ³			
No. ONU ¹ : 1203	No. CAS ² : 8006-61-9		4	3	0	SEVERO
FECHA ELAB: 20/10/98	REV: 2	FECHA REV: 01/04/04	3	0	SERIO	
			2	0	MODERADO	
			1	0	LIGERO	
			0	0	MÍNIMO	

VER DESCRIPCIÓN DE RIESGOS EN SECCIÓN XIII (PÁGINA 7)

ANTES DE MANEJAR, TRANSPORTAR O ALMACENAR ESTE PRODUCTO, DEBE LEERSE Y COMPRENDERSE LO DISPUESTO EN EL PRESENTE DOCUMENTO.

FABRICANTE: PEMEX REFINACIÓN. Subdirección de Producción. Av. Marina Nacional No. 329, Colonia Huasteca. Delegación Cuauhtémoc, México, D. F., C. P. 11311 Teléfonos: (01-55) 1944 - 9365 y (01-55) 1944-8895 (horario oficina de lunes a viernes)	ASISTENCIA TÉCNICA: Gerencia de Control de Producción. Teléfonos: (01-55) 1944 - 8164 (horario oficina de lunes a viernes)
EN CASO DE EMERGENCIA LLAMAR A SETIQ⁴: (las 24 Hrs.) En el interior de la República: 01-800-00-214-00. En el Distrito Federal: 5559 - 1588. Para llamadas originadas en cualquier otra parte, llame a: (011-52) 5559 - 1588.	CONSULTA HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD: Gerencia de Seguridad Industrial. Teléfonos: (01-55) 1944 - 8628 y (01-55) 1944 - 8041 (horario oficina de lunes a viernes)
EN CASO DE EMERGENCIA LLAMAR A CENACOM⁵: (las 24 Hrs.) En el interior de la República: 01-800-00-413-00. En el Distrito Federal: 5550 - 1496 , (4885, 1552, 1485). Para llamadas originadas en cualquier otra parte, llame a: (011-52) 5550 - 1496 , (4885, 1552, 1485).	

SECCIÓN II. DATOS GENERALES DEL PRODUCTO

Familia química:	ND	Estado físico:	Líquido
Nombre químico:	ND	Clase de riesgo de transporte SCT ⁶ :	Clase 3 "líquidos inflamables"
Nombre común:	Gasolina Pemex Premium Z. M. V. M.	No. de Guía de Respuesta GRE ⁷	128
Sinónimos:	Pemex Premium. Gasolina Premium.		

Descripción general del producto: Mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena recta y ramificada, olefinas, cicloparafinas y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de combustión interna y es para uso obligatorio en la Zona Metropolitana del Valle de México.

SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES

COMPONENTE	% (Vol.)	NÚMERO ONU ¹	NÚMERO CAS ²	PPT ⁸ (ppm)	CT ⁹ (ppm)	IPVS ¹⁰ (mg/m ³)	P ¹¹ (ppm)	GRADO DE RIESGO NFPA ³			
								S ¹²	I ¹³	R ¹⁴	E ¹⁵
Gasolina.	100 % vol.	1203	8006-61-9	300	500	ND	ND	1	3	0	NA
Aromáticos.	25.0 % vol. max.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NA
Olefinas.	10.0 % vol. max.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Benceno.	1.0 % vol. max.	1114	71.43.2	0.5 ppm	2.5 ppm	ND	ND	2	3	0	NA
Oxígeno.	1.0 / 2.7 % vol.	7732-44-7	1072	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

SECCIÓN IV. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Peso Molecular	Variable	pH	ND
Temperatura de ebullición (°C)	38.8	Color	Sin anilina.
Temperatura de fusión (°C)	ND	Olor	Característico a gasolina.
Temperatura de inflamación (°C)	21	Velocidad de evaporación	ND
Temperatura de auto ignición (°C)	Aproximadamente 250	Solubilidad en agua	Insoluble
Presión de vapor @ 21°C (kPa)	45.0 – 54.0 (6.5/7.8 lb/pulg ²)	% de volatilidad	ND
Densidad (kg/m ³)	ND	Limites de explosividad inferior - superior	1.3 – 7.1

SECCIÓN V. RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN

Medio de extinción:

Fuegos pequeños: Utilizar agua en forma de rocío o niebla, polvo químico seco, Bióxido de Carbono o espuma química.

Fuegos grandes: Utilizar agua en forma de rocío o niebla, no usar chorro de agua directa, usar espuma química.

Equipo de protección personal para el combate de incendios:

El personal que combate incendios de esta sustancia en espacios confinados, debe emplear equipo de respiración autónomo y traje para bombero profesional completo; el uso de este último proporciona solamente protección limitada.

Procedimiento y precauciones especiales durante el combate de incendios:

Utilizar agua en forma de rocío para enfriar contenedores y estructuras expuestas, y para proteger al personal que intenta eliminar la fuga.

Continuar el enfriamiento con agua de los contenedores, aún después de que el fuego haya sido extinguido. Eliminar la fuente de fuga si es posible hacerlo sin riesgo. Si la fuga o derrame no se ha incendiado, utilice agua en forma de rocío para dispersar los vapores.

Debe evitarse la introducción de este producto a vías pluviales, alcantarillas, sótanos o espacios confinados.

En función de las condiciones del incendio, permitir que el fuego arda de manera controlada o proceder a su extinción con espuma o polvo.

En incendio masivo, utilice soportes fijos para mangueras o chiflones reguladores; si no es posible, retírese del área y deje que arda.

Aislar el área de peligro, mantener alejadas a las personas innecesarias, evitar situarse en las zonas bajas, mantenerse siempre alejado de los extremos de los contenedores. Retírese de inmediato en caso de que aumente el sonido de los dispositivos de alivio de presión, o cuando el contenedor empiece a decolorarse.

Tratar de cubrir el líquido derramado con espuma, evitando introducir agua directamente dentro del contenedor.

Condiciones que conducen a otros riesgos especiales:

La gasolina es un líquido extremadamente inflamable, puede incendiarse fácilmente a temperatura normal, sus vapores son mas pesados que el aire por lo que se dispersarán por el suelo y se concentrarán en las zonas bajas.

Esta sustancia puede almacenar cargas electrostáticas debidas al flujo o movimiento del liquido. Los vapores de gasolina acumulados y no controlados que alcancen una fuente de ignición, pueden provocar una explosión.

El trapo y materiales similares contaminados con gasolina y almacenados en espacios cerrados, pueden sufrir combustión espontánea.

Los recipientes que hayan almacenado este producto pueden contener residuos del mismo, por lo que no deben presurizarse, calentarse, cortarse, soldarse o exponerse a flamas u otras fuentes de ignición.

Productos de la combustión nocivos para la salud:

La combustión de esta sustancia genera Monóxido de Carbono, Bióxido de Carbono y otros gases asfixiantes, irritantes y corrosivos.

SECCIÓN VI. RIESGOS DE REACTIVIDAD

Estabilidad.-

En condiciones normales esta sustancia es estable.

Incompatibilidad (sustancias a evitar).-

Evitar el contacto con fuentes de ignición y con oxidantes fuertes como peróxidos, ácido nítrico y percloratos.

Descomposición en componentes o productos peligrosos:

Esta sustancia no se descompone a temperatura ambiente.

Polimerización espontánea / condiciones a evitar:

Esta sustancia no presenta polimerización.

SECCIÓN VII. RIESGOS A LA SALUD

EFFECTOS POR EXPOSICIÓN AGUDA:

La exposición extrema a esta sustancia deprime el sistema nervioso central; los efectos pueden incluir somnolencia, anestesia, coma, paro respiratorio y arritmia cardiaca.

Ingestión:

Produce inflamación y ardor, irritación de la mucosa de la garganta, esófago y estómago.

En caso de presentarse vómito severo puede haber aspiración hacia los bronquios y pulmones, lo que puede causar inflamación y riesgo de infección.

Inhalación:

La exposición a concentraciones elevadas de vapores causan irritación a los ojos, nariz, garganta, bronquios y pulmones; puede causar dolor de cabeza y mareos; puede ser anestésico y puede causar otros efectos al sistema nervioso central.

Causa sofocación (asfixiante) si se permite que se acumule a concentraciones que reduzcan la cantidad de Oxígeno por abajo de niveles de respiración seguros.

En altas concentraciones, los componentes de la gasolina pueden causar desórdenes en el sistema nervioso central.

Es asfixiante, la exposición a atmósferas con concentraciones excesivas de vapores de gasolina, puede causar un colapso repentino, coma y la muerte.

Piel (contacto y absorción):

El contacto de esta sustancia con los ojos causa irritación y/o quemadura de la córnea y/o conjuntiva, así como inflamación de los párpados.

Contacto con los ojos:

El contacto de esta sustancia con los ojos causa irritación, pero no daña el tejido ocular.

La gasolina causa sensación de quemadura severa, con irritación temporal e hinchazón de los párpados.

EFFECTOS POR EXPOSICIÓN CRÓNICA:

La exposición repetida a la gasolina puede causar efectos en el sistema nerviosos central: fatiga, trastornos de la memoria, dificultad de concentración y para conciliar el sueño, cefalea y vértigo, entre otros.

En la piel el contacto prolongado puede causar inflamación, resequedad, comezón, formación de grietas y riesgo de infección secundaria.

CONSIDERACIONES ESPECIALES:

Substancia carcinogénica: NO * Especifique:
 Substancia mutagénica: ND
 Substancia teratogénica: ND
 Otras * : ND

NOTAS:

La NOM-010-STPS-1999, "Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral", no incluye a la gasolina.

La American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) clasifica a la gasolina como una sustancia "cancerígena en animales" (clasificación A3), puntualizando que: "El agente es cancerígeno en animales de experimentación a dosis relativamente alta, por vías de administración en órganos, tejidos o por mecanismos que no son considerados relevantes para el trabajador expuesto. Los estudios epidemiológicos disponibles no confirman un aumento en el riesgo de cáncer en humanos expuestos. La evidencia sugiere que no es probable que el agente cause cáncer en humanos excepto bajo vías o niveles de exposición poco comunes e improbables. Para los A3 se debe controlar cuidadosamente la exposición de los trabajadores por todas las vías de ingreso para mantener esta exposición lo más abajo posible de dicho límite".

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA:

CL₅₀¹⁶ = ND DL₅₀¹⁷ = ND

Otra información:

ND

PROCEDIMIENTO DE EMERGENCIA Y PRIMEROS AUXILIOS:

El personal médico que atienda las emergencias debe tener en cuenta las características de las sustancias involucradas y tomar sus precauciones para protegerse a sí mismo.

Inhalación:

En situaciones de emergencia, utilice equipo de protección respiratoria de aire autónomo de presión positiva para retirar inmediatamente a la víctima afectada por la exposición.

Si la víctima respira con dificultad, administrar Oxígeno.

Si la víctima no respira, aplicar respiración artificial.

¡CUIDADO! el método de respiración artificial de boca a boca puede ser peligroso para la persona que lo aplica, ya que ésta puede inhalar materiales tóxicos.

Mantenga a la víctima abrigada y en reposo.

Las personas expuestas a atmósferas con altas concentraciones de vapores o atomizaciones de gasolina, deben trasladarse a una área libre de contaminantes donde respire aire fresco.

Solicitar atención médica.

Ingestión:

Mantener a la víctima abrigada y en reposo.

Mantener a la víctima acostada de lado, de esta manera disminuirá la posibilidad de aspiración de gasolina a los bronquios y pulmones en caso de vómito.

No provocar vómito por ser peligrosa la aspiración del líquido a los pulmones.

Si espontáneamente se presenta el vómito, observar si existe dificultad para respirar.

Solicitar atención médica inmediatamente.

Contacto con la piel:

Retirar inmediatamente y confinar la ropa y calzado contaminados.

Lavar la parte afectada con abundante agua abundante durante 20 minutos por lo menos.

Lavar ropa y calzado contaminados con gasolina antes de utilizarlos nuevamente.

Mantener a la víctima en reposo y abrigada para proporcionar una temperatura corporal normal.

En caso de que la víctima presente algún síntoma anormal o si la irritación persiste después del lavado, obtener atención médica inmediatamente.

Contacto con los ojos:

En caso de contacto con los ojos, lavar inmediatamente con agua abundante por lo menos durante 15 minutos, o hasta que la irritación disminuya.

Sostener los párpados de manera que se garantice una adecuada limpieza con agua abundante en el globo ocular.

Si la irritación persiste obtenga atención médica inmediatamente.

Si se producen quemaduras en conjuntiva y córnea, se requerirá atención médica especializada en forma inmediata.

OTROS RIESGOS O EFECTOS A LA SALUD:

La exposición prolongada a vapores de gasolina, puede producir signos y síntomas de intoxicación, tales como depresión del sistema nervioso central; sin embargo, estos síntomas pueden variar dependiendo del tiempo de exposición y de la concentración de vapores de gasolina.

DATOS PARA EL MÉDICO:

El personal médico debe tener conocimiento de la identidad y características de esta sustancia.

Si la cantidad de gasolina ingerida es considerable, el Médico debe practicar un lavado del estómago.

En tanto se aplica el lavado estomacal, debe colocarse a la víctima acostado de lado para que en caso de presentarse vómito, disminuya la posibilidad de aspiración de gasolina hacia los bronquios y pulmones.

Cuando la aspiración de vapores de gasolina causa paro respiratorio, procédase de inmediato a proporcionar respiración artificial hasta que la respiración se restablezca.

ANTÍDOTO (DOSIS, EN CASO DE EXISTIR):

No se tiene información.

SECCIÓN VIII. INDICACIONES EN CASO DE FUGA O DERRAME

Procedimiento, precauciones y métodos de mitigación en caso de fuga o derrame:

Llamar primeramente al número telefónico de respuesta en caso de emergencia.

Eliminar todo tipo de fuentes de ignición cercana a la emergencia.

No tocar ni caminar sobre el producto derramado.

Detener la salida de producto (fuga) en caso de poder hacerlo sin riesgo.

De ser posible, los recipientes que lleguen a derramarse (fugar) deben ser trasladados a un área bien ventilada y alejada del resto de las instalaciones y de fuentes de ignición; el producto debe trasegarse a otros recipientes que se encuentren en buenas condiciones, observando los procedimientos establecidos para esta actividad.

Mantener alejado al personal que no participa directamente en las acciones de control; aislar el área de riesgo y prohibir el acceso al área de la emergencia.

Permanecer fuera de las zonas bajas donde pueda acumularse el producto y ubicarse en un sitio donde el viento sople a favor.

Debe evitarse la introducción de este producto a vías pluviales, alcantarillas, sótanos o espacios confinados, ya que por su volatilidad desprende vapores que forman mezclas explosivas o inflamables, capaces de recorrer grandes distancias hasta encontrar una fuente de ignición.

En caso de fugas o derrames pequeños, cubrir con arena u otro material absorbente especializado.

En caso de ocurrir una fuga o derrame, aislar inmediatamente un área de por lo menos 50 metros a la redonda.

Cuando se trate de un derrame mayor, tratar de confinarlo, recoger el producto para su disposición posterior. En caso de emplear equipos de bombeo para recuperar el producto derramado, deben ser a prueba de explosión.

Ventile los espacios cerrados antes de entrar.

El agua en forma de rocío puede reducir los vapores, pero no puede prevenir su ignición en espacios cerrados.

Utilizar cortina de agua para reducir los vapores o desviar la nube de vapor.

Todo el equipo que se use para el manejo del producto, debe estar conectado eléctricamente a tierra.

Los materiales contaminados por fugas o derrames, deben considerarse como residuos peligrosos, si por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representan un peligro para el equilibrio ecológico o al ambiente.

Recomendaciones para evacuación:

Cuando se trate de un derrame grande, considere una evacuación inicial a favor del viento de por lo menos 300 metros.

En caso de que un tanque, carro tanque o auto tanque esté involucrado en un incendio, considere un aislamiento y evacuación inicial de 800 metros a la redonda.

SECCIÓN IX. PROTECCIÓN ESPECIAL EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

La selección del equipo de protección personal a utilizar dependerá de las condiciones que presente la emergencia.

Donde es probable el contacto con los ojos repetido o prolongado, utilice gafas de seguridad con protección lateral.

Si es probable el contacto con brazos, antebrazos y manos, es necesario utilizar mangas largas y guantes resistentes a productos químicos.

Donde la concentración en el aire puede exceder los Límites Máximos Permisibles indicados en la sección III, y donde la ingeniería, las prácticas de trabajo u otros medios para reducir la exposición no son adecuados, puede ser necesario el empleo de equipos de protección respiratoria de aire autónomo de presión positiva aprobados para prevenir la sobre exposición por inhalación.

No utilizar lentes de contacto cuando se trabaje con esta sustancia.

En las instalaciones donde se maneja esta sustancia, deben colocarse estaciones de regadera-lavaojos en sitios estratégicos, las cuales deben estar accesibles, operables en todo momento y bien identificadas.

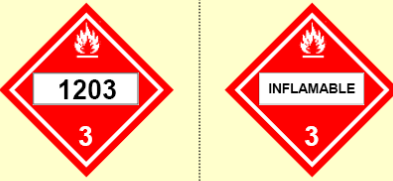

Ventilación.-

Debe trabajarse en áreas bien ventiladas.

Debe proveerse ventilación mecánica a prueba de explosión cuando se trate de espacios confinados.

Las muestras de laboratorio deben manejarse en una campana de extracción.

SECCIÓN X. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTACIÓN

Número ONU :	1203	
Clase de riesgo de transporte :	Clase 3 "líquidos inflamables"	
Guía de Respuesta en caso de Emergencia:	Guía número 128	
<p>Colocar el cartel que identifica el contenido y riesgo del producto transportado, cumpliendo con el color, dimensiones, colocación, etc., dispuestos en la NOM-004-SCT/2000 y empleando cualquiera de los dos modelos que se muestran en el recuadro de la derecha.</p>		
<p>1.-Las unidades de arrastre de auto transporte y ferroviarias empleadas en el transporte de sustancias peligrosas, deben cumplir lo dispuesto en las Normas Oficiales Mexicanas aplicables, emitidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.</p> <p>2.-Las unidades de auto transporte y ferroviarias empleadas en el transporte de sustancias peligrosas, deben usar carteles de identificación; y deben portar el número con el que las Naciones Unidas clasifica al producto que se transporta. Estas indicaciones deben apegarse a los modelos que se indican en la NOM-004-SCT-2000.</p> <p>3.-Antes de iniciar las operaciones de llenado, debe verificarse que el contenedor esté vacío, limpio, seco y en condiciones apropiadas para la recepción del producto.</p> <p>4.-Todos los envases y embalajes; así como las unidades destinadas al transporte terrestre de productos peligrosos, deben inspeccionarse periódicamente para garantizar sus condiciones óptimas. Para fines de esta inspección, deben emplearse como referencia las Normas Oficiales Mexicanas aplicables de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, entre las que se puede citar la NOM-006-SCT-2000.</p> <p>5.-Esta Hoja de Datos de Seguridad de Sustancias, debe portarse siempre en la unidad de arrastre.</p>		

SECCIÓN XI. INFORMACIÓN SOBRE ECOLOGÍA

Cuando se trate de un derrame mayor, tratar de confinarlo, recoger el producto y colocarlo en tambores para su disposición posterior.

El producto residual y material contaminado, debe considerarse residuo peligroso si su temperatura de inflamación es menor que 60° C y por tanto requerirá su disposición en una instalación aprobada para residuo peligroso.

El suelo afectado por fugas o derrames, así como los materiales contaminados por los trabajos de limpieza, requerirán tratamiento y/o disposición de acuerdo a lo establecido en la Norma de Restauración de Suelos y en el Reglamento de Residuos Peligrosos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

SECCIÓN XII. INFORMACIÓN SOBRE MANEJO Y ALMACENAMIENTO

El personal no debe ingerir alimentos, beber o fumar durante la manipulación de los contenedores de gasolina.

El personal no debe emplear lentes de contacto cuando manipula gasolina.

Las gasolinas son líquidos inflamables, por lo que existe el riesgo de incendio donde se almacenan, manejan o emplean. Deben tomarse precauciones para evitar que sus vapores formen mezclas explosivas.

Deben evitarse temperaturas extremas en su almacenamiento; almacenar en contenedores resistentes cerrados, fríos, secos, aislados, en áreas bien ventiladas y alejados del calor, fuentes de ignición y productos incompatibles como ácidos y materiales oxidantes.

No almacenar en contenedores sin etiquetas; los recipientes que contengan gasolina, deben almacenarse separados de los vacíos y de los parcialmente vacíos.

No debe emplearse gasolina para limpiar equipos, ropa o la piel.

El almacenamiento de pequeñas cantidades de gasolina debe hacerse en contenedores apropiados y seguros.

La ropa y trapos contaminados con gasolina deben estar libres de este producto antes de utilizarlos nuevamente.

Trabajar a favor del viento durante la limpieza de derrames.

Los equipos empleados para el manejo de esta sustancia, deben estar debidamente aterrizados.

SECCIÓN XIII. INFORMACIÓN ADICIONAL

FUENTES DE INFORMACIÓN Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NOM-018-STPS-2000 "Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo".

NOM-010-STPS-1999, "Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral".

NOM-004-SCT-2000 "Sistema de identificación de unidades destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos".

"Reglamento de transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos".

NOM-006-SCT2-2000 "Aspectos básicos para la revisión ocular diaria de la unidad destinada al autotransporte de materiales y residuos peligrosos".

Especificación No. 104/2004 "Pemex Premium (1) Zona Metropolitana del Valle de México", publicado por la Gerencia de Coordinación Comercial, dependiente de la Subdirección de Producción de PEMEX Refinación.

ACGIH: "Threshold Limit Values for Chemical Substance and Physical Agentes & Biological Exposure Indices", 2002.

NIOSH: "Pocket Guide to Chemical Hazards", "International Chemical Safety Cards".

NFPA 325 "Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids". 1994

OSHA: "Permissible Exposure Limits", 1988.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

- | | |
|---|--|
| ¹ ONU : Número asignado por la Organización de las Naciones Unidas. | ¹¹ P : Límite Máximo Permissible de Exposición Pico. |
| ² CAS : Número asignado por la Chemical Abstracts Service. | ¹² S : Grado de riesgo a la Salud. |
| ³ NFPA : National Fire Protection Association. | ¹³ I : Grado de riesgo de Inflamabilidad. |
| ⁴ SETIQ : Sistema de Emergencias en el Transporte para la Industria Química. | ¹⁴ R : Grado de riesgo de Reactividad. |
| ⁵ CENACOM : Centro Nacional de Comunicación.(Protección Civil) | ¹⁵ E : Grado de riesgo Especial. |
| ⁶ SCT : Secretaría de Comunicaciones y Transportes. | ¹⁶ CL₅₀ : Concentración Letal Media. |
| ⁷ GRE : Guía de Respuesta a Emergencia. | ¹⁷ DL₅₀ : Dosis Letal Media. |
| ⁸ LMPE-PPT : Límite Máximo Permissible de Exposición Promedio Ponderada en el Tiempo (TWA, siglas en ingles). | NA : No Aplica. |
| ⁹ LMPE-CT : Límite Máximo Permissible de Exposición de Corto Tiempo (STEL, en ingles). | ND : No Disponible. |
| ¹⁰ IPVS : Inmediatamente Peligroso para la Vida y la Salud. (IDLH, siglas en ingles). | |

NIVEL DE RIESGO

	(S) RIESGO A LA SALUD	(I) RIESGO DE INFLAMABILIDAD	(R) RIESGO DE REACTIVIDAD	(E) RIESGO ESPECIAL	
	4 Fatal.	4 Extremadamente inflamable.	4 Puede detonar.	OXY	Oxidante.
3 Extremadamente Riesgoso.	3 Inflamable.	3 Puede detonar pero requiere fuente de inicio.	ALC	Ácido.	
2 Ligeramente Riesgoso.	2 Combustible.	2 Cambio químico violento.	CORR	Alcalino.	
1 Riesgoso.	1 Combustible si se calienta.	1 Inestable si se calienta.	-W-	Corrosivo.	
0 Material Normal.	0 No se quema.	0 Estable.	☢	No use agua.	
				Material Radiactivo.	

CONTROL DE REVISIONES

REVISIÓN	FECHA	MOTIVO
1	20/10/98	Primera elaboración de la HDSS.
2	01/04/04	Modificación de la NOM-018-STPS-2000 y de la Hoja Técnica de Especificaciones No. 104/04 (1) "Pemex Premium Z. M. V. M."

Declaración:

Es responsabilidad del comprador juzgar si la información aquí contenida es adecuada para sus propósitos. PEMEX Refinación no asume ninguna responsabilidad por cualquier daño resultante del uso incorrecto del producto o de cualquier peligro inherente a la naturaleza del mismo.

PAGINA EN BLANCO