

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Estudio de Laboratorio en Desorción Térmica para Restauración de
Suelos Contaminados por Hidrocarburos.

POR:

EDUARDO VARGAS FLORES

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Marzo del 2005

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Estudio de Laboratorio en Desorción Térmica para Restauración de
Suelos Contaminados por Hidrocarburos.

POR:

EDUARDO VARGAS FLORES

TESIS

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR,
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

APROBADA

DR. EDMUNDO PEÑA CERVANTES
PRESIDENTE

M.C. ANTONIO ILIZALITURRI VERÁSTEGUI	M.C. IDALIA MA. HERNÁNDEZ TORRES
SINODAL	SINODAL

M.C. LUIS EDMUNDO RAMÍREZ RAMOS
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA; MÉXICO.
MARZO DEL 2005

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en especial a “MIS PADRES” y HERMANOS.

Lo dedico a todas aquellas personas que me han brindado su amistad.

A la persona con quien he compartido alegrías y tristezas, me ha brindado su cariño y comprensión, a mi novia .

Me resulta difícil mencionar a todas aquellas personas que han formado parte en esta etapa de mi vida, la cual se sintetiza en este documento. A todas ellas dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

AL DR. EDMUNDO PEÑA CERVANTES

Por el apoyo, consejo recibido y darme la oportunidad de realizar esta investigación.

AL M.C. ANTONIO ILIZALITURRI VERÁSTEGUI

Por su participación en este trabajo.

A LA M.C. IDALIA HERNÁNDEZ TORRES

Por las sugerencias y ayuda durante el proyecto, realizadas para la mejora de este trabajo.

A MI UNIVERSIDAD.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Página

ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
1. Técnicas de aislamiento	9
1.1. Solidificación / estabilización	9
1.2. Confinamiento	10
1.3. Vitrificación	10
2. Técnicas de descontaminación	11
2.1 Biorremediación	11
2.2 Arrastre por aire	13
2.3 Extracción al vacío	13
2.4 Lavado de suelos	13
2.5 Por arrastre de vapor	14
2.6 Desorción térmica	14
2.7 Incineración	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
1. Localización del experimento	18

1.1 Suelo	18
1.2 Diesel	19
2. Métodos	20
2.1 Propiedades Físicas.....	20
2.2 Propiedades Químicas	20
2.3 Tratamientos	22
2.4 Parámetros evaluados	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
1.1 Efecto sobre densidad aparente	24
1.2 Efecto en la textura	27
1.3 Efecto sobre materia orgánica (% carbono).....	29
1.4 Efecto sobre pH	33
1.5 Efecto sobre conductividad eléctrica.....	35
1.6 Efecto sobre carbonatos totales.....	37
1.7 Hidrocarburos Totales del Petróleo (TPH's)	39
V. CONCLUSIONES	40
VI. RECOMENDACIONES.....	42
VII. LITERATURA CITADA	43

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro No.1 Funcionamiento de las diferentes tecnologías de biorremediación. -----	12
Cuadro No.2 Características físicas y químicas de los dos suelos en estudio.-----	18
Cuadro No. 3 Tratamientos, suelo del campo experimental “ Bajío”(suelo 1).-----	22
Cuadro No. 4 Tratamientos, suelo de terrazas(suelo 2). -----	22
Cuadro No. 5 Resultados de análisis de densidad aparente y textura suelo 1. -----	25
Cuadro No. 6 Resultados de los análisis de densidad aparente y textura en el suelo 2.-----	26
Cuadro No. 7 Resultados de análisis de textura (muestras contaminadas sin desorción térmica). -----	27
Cuadro No. 8 Resultados de análisis % de materia orgánica, % de carbono suelo 1 y suelo 2 . -----	30
Cuadro No. 9 Comparación para materia orgánica en muestras contaminadas sin someter a desorción térmica. -----	31

VII

Cuadro No. 10 Resultados de pH y clasificación del suelo 1.-----	34
Cuadro No. 11 Resultados de análisis de pH y clasificación del suelo 2. -----	34
Cuadro No. 12 Resultados del análisis conductividad Eléctrica en el suelo 1.-----	36
Cuadro No. 13 Resultados del análisis de C.E. en el suelo 2. -----	36
Cuadro No. 14 Resultados del análisis de carbonatos totales del suelo 1.-----	38
Cuadro No.15 Resultados del análisis de carbonatos totales en el suelo 2 . -----	38
Cuadro No.16 Resultados del análisis de TPH's en los dos tipos de suelos tratados y sin tratar con desorción térmica. -----	39

VIII

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Variación de la densidad aparente por diesel y desorción térmica en el suelo 1. -----	24
Figura 2. Variación de la densidad aparente en el suelo 2. -----	26
Figura 3. Variación de la textura del suelo 1 y 2, contaminado sin tratar con desorción térmica. -----	28
Figura 4. Variación de % de carbono en el suelo 1, a concentraciones diferentes y temperaturas. -----	29
Figura 5. Variación de % de carbono en el suelo 2, a concentraciones diferentes y temperaturas. -----	31
Figura 6. Variación de % de carbono en el suelo 1 y 2, sin aplicar Desorción térmica.-----	32
Figura 7. Variación del pH en el suelo 1, a diferente concentración de contaminante y temperatura. -----	33
Figura 8. Variación del pH por diesel y aplicación de temperatura	

en suelo 2. -----35

Figura 9. Variación de la conductividad eléctrica por diesel y

temperatura en suelo 1. -----36

IX

I. INTRODUCCIÓN

La industria moderna depende en gran medida del petróleo y sus productos, ya que se usan en gran escala como combustibles para el transporte y para generar electricidad, y como materia prima en la manufactura de medicinas, fertilizantes, plásticos, materiales de construcción, pinturas y telas; pero junto con su amplio uso han aparecido problemas de contaminación cada vez más frecuentes y graves, debidos principalmente a derrames del petróleo durante su extracción o transporte, o en los sitios como gasolineras y talleres mecánicos.

En 1995 se extrajeron en el mundo más de 313,052 millones de barriles (barril=160 litros), y de acuerdo con datos del INEGI, México produjo aproximadamente el 10%.

Las descargas accidentales de crudo al medio ambiente, especialmente de los buques tanque, son la causa mas importante de contaminación de las costas; algunos de los derrames más importantes que han producido desastres ecológicos han sido los del Amoco Cadiz en la costa Francesa en 1978 (1.6 millones de barriles), el del pozo Iztoc I, en el Golfo de México en 1979 (3.3 millones de barriles), y el del Exxon Valdez, en Alaska en 1989, también fue muy importante el daño causado en el Golfo Pérsico durante el conflicto Irán – Irak en 1983. En los talleres y gasolineras existen derrames, frecuentemente se han encontrado fugas en los

tanques de almacenamiento, en algunos casos del orden de 200 a 300 mil litros que se acumulan en el subsuelo y en ocasiones llegan a los mantos freáticos, pudiendo producir no solo efectos tóxicos en el ambiente.

El grave problema que representa la contaminación de los suelos es un aspecto que sólo recientemente está siendo reconocido. Antes de la década de los 70' se hablaba de la contaminación del aire y del agua, pero al suelo se le consideraba con una capacidad de autodepuración casi infinita. La sensibilidad mundial comienza a cambiar a partir de la declaración de la "Carta Europea de Suelos" desarrollada por la Comunidad Europea en 1972.

En (1987-1992) en la Comunidad Europea se elabora una normativa donde se propone "salvaguardar las propiedades y condiciones que aseguren el cumplimiento de las funciones del suelo". Considerándose como principales funciones: el crecimiento vegetal, la producción de alimentos, la filtración del agua, y la participación del suelo de forma activa en los ciclos geoquímicos de los elementos.

En [México](#), la industria petrolera en su conjunto ha tenido un gran impacto negativo en [materia](#) ambiental. Por la amplia gama de [productos derivados del petróleo](#), no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos (Saval, 1995).

En un estudio de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por [hidrocarburos](#) a nivel nacional son la refinería "Lázaro Cárdenas" y el Pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México (Veracruz y Tabasco) .

Los daños causados por el petróleo al medio van desde la contaminación de mares y lagos, provocando la muerte de animales y desaparición de la vegetación. sin embargo no debemos olvidar los efectos negativos que causa a los suelos agrícolas cercanos a puntos de extracción, almacenamiento y refinación de hidrocarburo (Freedman, 1989 e INEGI, 1994).

Los hidrocarburos son compuestos muy peligrosos para la salud por su efecto oncógeno y cancerígeno. El benceno, por ejemplo, actúa sobre los órganos Hematopoyéticos, provocando anemia y también pueden producir necrosis de ciertos tejidos.(Seoáñez, 1998).

Por lo anterior, una de las principales labores del hombre debe ser la conservación de su propio hábitat, recuperando su entorno y evitando su creciente desgaste. Tal es el caso de la rehabilitación de suelos contaminados con hidrocarburos o sus derivados. Las diversas técnicas utilizadas con esta finalidad permiten disminuir el grado de contaminación y reutilizar el suelo en el cultivo de plantas.

Las técnicas de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos son muy variadas pueden ser físicas, químicas y biológicas, una alternativa que puede dar resultados dependiendo, del grado de contaminación y del manejo que se le dé al suelo es la desorción térmica lo cual es un proceso de separación física donde los residuos se calientan para volatilizar los contaminantes de forma que el sólido es restituido a su situación original. Cabe señalar que existen varias técnicas dependiendo de la temperatura que se aplica, en este caso se escogió la desorción térmica tomando en que la disminución del grado de contaminación estará en función de la temperatura aplicada al suelo, siempre en baja temperatura relativamente.

OBJETIVOS:

- Establecer una Metodología de desorción térmica para suelos contaminados con diesel.
- Evaluar, la eficiencia de los tratamientos a diferente temperatura en la restauración de dos suelos contaminados por diesel.

- Conocer la variación de algunas características físicas y químicas del suelo después de someterlo a la desorción térmica.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El [suelo](#) y subsuelo constituyen un recurso natural difícilmente renovable que desempeña [funciones](#) entre las que destaca su [papel](#) como medio filtrante durante la recarga del manto acuífero y la protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y las [redes](#) tróficas, además de ser el espacio donde se realizan las actividades agrícolas, ganaderas y soporte de la vegetación. Por lo que para eliminar los contaminantes de un sitio afectado, deben buscarse alternativas factibles y económicas que no lleven a la destrucción y confinamiento del suelos al menos que sea el ultimo recurso.

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

En la misma publicación se comento que el desarrollo de las tecnologías de remediación a nivel mundial, se inició en los países desarrollados hace más de 10

años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados peligrosos en concentraciones que sobrepasaban los límites permitidos. Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de países desarrollados establecieron como una actividad prioritaria, la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos.

Las fuentes de contaminación que pueden afectar los suelos y sistemas de agua subterránea pueden ser "*puntuales y no puntuales*". Se consideran *fuentes puntuales* a las fábricas, refinerías, tintorerías, gasolineras, aeropuertos, tiraderos de basura, tanques enterrados, así como derrames que suceden al transportar compuestos químicos, entre otras. Como fuentes *no puntuales* -difusas- se consideran la aplicación de plaguicidas en zonas agrícolas, los canales de drenaje, los oleoductos para hidrocarburos, entre otros.

En un trabajo presentado a la SEMARNAP (1996) Elías y Martínez encontraron que las propiedades físicas del suelo más afectadas por derrames de hidrocarburos son:

- La estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados.
- Aumento en la retención de agua en la capa superficial.
- El potencial hídrico.

Probablemente el componente más importante del suelo en relación con la persistencia de sustancias tóxicas es la arcilla. La persistencia aumenta cuanto más pequeñas son las partículas debido a que aportan una área superficial mayor para la adsorción de los productos químicos.

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

- Aumento de carbono orgánico, ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable.
- Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos.
- Aumento del manganeso y hierro intercambiable.
- Aumento del fósforo disponible

La disyuntiva que se presenta frente a un suelo contaminado es recuperarlo o destruirlo. En un principio ha prevalecido la última opción, mientras que en los últimos años se ha prestado una especial atención a las técnicas de recuperación que posibilitan su reutilización.

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

- La cantidad y composición del petróleo.
- La frecuencia y tiempo de exposición.
- El estado físico del derrame.
- Las características del sitio donde sucedió el derrame.
- Variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno.

Es importante señalar que el carbono orgánico podría ser incrementado directamente, debido a la adsorción de gases propano y butano por las partículas del suelo. Suelos contaminados con gas natural o crudo mostraron incrementos en materia orgánica, carbono total y nitrógeno comparado con suelos normales (Ellis y Adams, 1960, citados por Martínez *et al*, 2001).

Es muy importante conocer las características físicas y químicas de un suelo que se ha impactado con hidrocarburos y que son básicos si se requiere diseñar alguna tecnología de restauración (Morgan y Watkinson, 1989, citados por Martínez *et al* , 2001).

En un estudio realizado por (Martínez, 2001) para medir los efectos de ciertos hidrocarburos sobre las propiedades físicas y químicas e un suelo arcilloso encontró efectos importantes sobre las propiedades de textura, materia orgánica, densidad real y porosidad de suelo arcilloso las cuales varían en función del tipo y concentración del contaminante.

Efecto sobre textura, las variaciones en las partículas del suelo (arena, limo, y arcilla) por efecto de la gasolina son poco notables y no provocan cambio en la textura. El diesel también provoca cambios importantes en los valores de arena, limo y arcilla conservándose aun la textura arcillosa. cuando el suelo esta contaminado con $150\ 000\ \text{mg Kg}^{-1}$ de combustóleo, las partículas de arcilla disminuyen y las de arena aumentan marcadamente. De manera general la arena tiende a aumentar y de la arcilla a disminuir con diesel y combustóleo, en tanto que los limos permanecen sin variación importante.

Sobre la Densidad aparente, encontró variaciones mínimas y el análisis de varianza muestra que no existe diferencia significativa en el tipo de hidrocarburo pero la concentración si causa una diferencia significativa esto puede provocar una tendencia a disminuir a concentraciones de $150\ 000\ \text{mg Kg}^{-1}$.

La Densidad real del suelo arcilloso disminuye y muestra una varianza tendiente a disminuir, donde el diesel y gasolina muestran mínima variación aún en concentraciones altas de hidrocarburo, el combustóleo si causa una variación en la densidad real tendiente a disminuir a partir de $30\ 000$ a $150\ 000\ \text{mg Kg}^{-1}$.

La porosidad no varia significativamente cuando el suelo esta contaminado con gasolina y diesel, con combustoleo disminuye drásticamente a partir de concentraciones de $20\ 000\ \text{mg Kg}^{-1}$, esta tendencia se origina a partir del efecto en la densidad real.

El pH prácticamente no tiene una variación en presencia de cualquier concentración y tipo de contaminante hidrocarburo.

Sobre el % de M.O. reporto que aumentó en forma proporcional con gasolina y combustóleo, el diesel es el hidrocarburo que causa mayor aumento, disparándose a partir de concentraciones de $30\ 00\ \text{mg Kg}^{-1}$ obteniéndose hasta 347 % incremento comparado con el suelo sin hidrocarburos.

La C.E. muestra una variación irregular (0.5 y $1.2\ \text{dS m}^{-1}$) ya que los valores aumentan y disminuyen en presencia de los tres hidrocarburos a diferentes concentraciones, cuando el contaminante es gasolina muestra una ligera tendencia a aumentar.

En investigaciones realizadas para conocer los tipos de hidrocarburos que se han acumulado en los suelos tropicales, han encontrado que los tipos de suelo tienen diferente capacidad de respuesta a la acumulación de contaminantes, encontraron que en la zona ocupada por instalaciones petroleras del campo petrolero Samaria, en el estado de Tabasco, hay dos clases de tierras: Barriales y arenillas son clasificados como Gleysoles y las arenillas como Fluvisoles, de acuerdo con la FAO/UNESCO, las Arenillas son textura media y presentan baja concentración de hidrocarburos totales a pesar de estar sometidas a derrames de petróleo, (Zavala, 1993) explicó que se debe a que las Arenillas se ubican en relieves altos (1 a $2\ \text{m}$ sobre los Barriales), exentos de inundación, con buen drenaje interno que facilita el lavado de hidrocarburos, mientras que los Barriales tienen ligeras a altas concentraciones de hidrocarburos totales, presentan texturas arcillosas, drenaje pobre y son susceptibles a inundaciones, (Zavala, 1993, Bocks, 1996, Zavala y Botello, 1997, Palma *et al*, 1997, citados por Gutiérrez *et al* 2001).

La problemática de la descontaminación de los suelos podemos tratarla bajo dos perspectivas: técnicas de aislamiento de la contaminación y técnicas de descontaminación.

En función de como se apliquen las técnicas depuradoras se habla de:

- Tratamientos *in situ*
- Tratamientos *on site*
- Tratamientos *ex situ*

Las tecnologías de remediación pueden aplicarse *in situ* ó *ex situ* . generalmente las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de la contaminación se extienda en todo el acuífero. Las tecnologías *ex situ* se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo o bien en la zona no saturada hasta donde la maquinaria pesada permita la extracción del material.

El procedimiento *in situ* es el que requiere menos manejo, pero su aplicación resulta frecuentemente difícil de llevar a la práctica, dada la dificultad que representa el poner en íntimo contacto a los agentes limpiadores con la masa del suelo. En el tratamiento *on site* el suelo se excava y se trata en el propio terreno. El método *ex situ* requiere las etapas de excavación, transporte, tratamiento en las plantas depuradoras, devolución y enterramiento. Este proceso exige mayor inversiones pero es más rápido y con él se consiguen recuperaciones más completas.

1. Técnicas de aislamiento

1.1. Solidificación / estabilización

Las tecnologías de solidificación y estabilización son empleadas para la inmovilización de los contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados. Como es el caso de los compuestos inorgánicos.

El origen de las tecnologías de solidificación es muy antiguo, se conocen como mezclas suelo-cemento y se han empleado para mejorar el soporte de carga de un terreno. Dada la experiencia de su uso en la construcción de terraplenes y su facilidad de manejo, fueron adaptadas posteriormente a la remediación de suelos. Para que estas tecnologías tengan éxito, se debe asegurar un perfecto mezclado entre el cemento y el suelo y la humedad necesaria para lograr fraguado. No son adecuados para suelos con alto contenido de grasas y aceites, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con hidrocarburos. Las tecnologías de estabilización emplean productos químicos inertes que microencapsulan los compuestos contaminantes, dando como resultado un material sólido en forma de pequeñas partículas. El suelo contaminado debe mezclarse perfectamente para lograr que los contaminantes queden retenidos permanentemente. El material resultante puede utilizarse como suelo o mezclarse con tierra no contaminada para permitir el desarrollo de especies vegetales.

Estas tecnologías tienen la facilidad de aplicarse en el propio sitio y la ventaja de requerir muy cortos tiempos de tratamiento, aunque solamente se emplea para manchas de contaminación superficiales.

1.2. Confinamiento

El confinamiento no es precisamente una opción de remediación, se recomienda cuando se tienen residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acoplado a otros procesos como la incineración. Para esta opción debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el transporte al sitio de confinamiento. En México aún no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras opciones antes de pensar en el confinamiento.

1.3. Vitrificación

Consiste en introducir dos electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una muy alta carga eléctrica para lograr la vitrificación de los contaminantes. La tecnología solamente opera en la zona no saturada, es aún más costosa que la incineración por lo que no ha logrado llevarse a una escala mayor, solamente se ha operado a escala de demostración en campo. Sometiendo al suelo a altas temperaturas (1600-2300°C) se consigue su vitrificación con lo que se llegan a fundir los materiales del suelo, produciéndose una masa vítrea similar a la obsidiana. Durante el proceso hay que controlar la volatilización de numerosos compuestos. La propia filosofía de estas técnicas (persigue la eliminación del suelo) las hace sólo recomendable en situaciones extremas.

2.Técnicas de descontaminación

Básicamente se utilizan siete tecnologías para la recuperación de los suelos contaminados:

- 2.1. Biorremediación
- 2.2. Arrastre por aire
- 2.3. Extracción al vacío
- 2.4. Lavado de suelos
- 2.5. Por arrastre de vapor
- 2.6. Desorción térmica
- 2.7. Incineración

2.1. Biorremediación.

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos, esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de Biorremediación como alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente

se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar.

Cuadro No. 1. Funcionamiento de las diferentes tecnologías de Biorremediación.

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

En general las ventajas de la teoría de Biorremediación son:

- Los contaminantes son generalmente transformados y algunos completamente biodegradados.
- Se utilizan bacterias cuyo hábitat natural es el suelo, sin utilizar otras potencialmente peligrosas.
- Es una tecnología segura y económica.
- El suelo puede ser reutilizado.
- Las bacterias mueren cuando los nutrientes y los contaminantes se agotan.

Entre las desventajas de la biorremediación están:

- Que las bacterias pueden inhibirse por la presencia de tóxicos o altas concentraciones de contaminantes.
- El proceso no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad.

- Algunos aditivos como los surfactantes pueden tener efecto adverso en aplicaciones *in situ*.
- Requiere largos periodos de tiempo
- No es aplicable en sitios con muy altas concentraciones de hidrocarburos altamente halogenados, metales y desechos radioactivos.

2.2. Arrastre por aire

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

- Uso limitado a compuestos volátiles
- Generación de ruido.
- Los contaminantes no se destruyen por lo que necesita acoplarse a otro tipo de tecnología.

2.3. Extracción al vacío

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

2.4. Lavado de suelo

Se utiliza solamente para procesos *ex situ*. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos, puede permitirse una recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto los solventes como los hidrocarburos pueden separarse y reciclarse, sin embargo, implica un gasto importante de solventes, un costo de separación de estos y un alto riesgo de explosión.

Un solvente es un líquido que tiene la capacidad de disolver otra sustancia. la extracción de contaminantes con solventes no destruye aquellos, sino que los separa y los concentra, para que posteriormente puedan ser tratados con otra técnica. Las sustancias que se utilizan como solventes son: Dióxido de carbono líquido, acetona, metanol, éter dimetílico, propano, butano y hexano. (Seoáñez, 1999).

2.5. Por arrastre de vapor

Se basa en el mismo principio que la de arrastre con aire, la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desorberse del suelo son los que se recuperan. Pueden recuperarse para reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso para que puedan ser destruidos no es muy recomendable para suelos contaminados con petróleo.

2.6. Desorción térmica

El proceso se realiza *ex situ*, el suelo contaminado se introduce al sistema con ayuda de un tornillo sinfín y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera similar a una destilación. La desorción térmica tiene un menor costo que la incineración, el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante y tiene la ventaja de que el suelo puede ser reutilizado. Sin embargo no es una alternativa recomendable para suelos contaminados con petróleo, ya que cuando se va aumentando la temperatura

el manejo del material se hace muy difícil y no se logran recuperar los contaminantes (Saval, 1995).

La **desorción térmica** es un proceso térmico en el que se somete al suelo a unas temperaturas de (250-550°C) para conseguir la desorción en vez de la destrucción de los contaminantes. Con esta técnica se puede tratar la contaminación producida por compuestos orgánicos volátiles (con un peso molecular no muy elevado, como los lubricantes, aceites minerales, gasolinas, etc.) y determinados metales pesados volátiles como es el caso del mercurio. Con esta técnica hay que controlar el paso de los contaminantes a la fase gaseosa, por ejemplo se pueden eliminar en una cámara de combustión o fijarlos sobre carbono activado. Estos métodos presentan el inconveniente de que el suelo queda completamente transformado, sin materia orgánica, sin microorganismos, sin disoluciones.

La temperatura de desorción depende de los compuestos a tratar pero normalmente no supera los 540°C. Está técnica se distingue de la incineración en que usa el calor para separar los contaminantes del sólido y no para destruirlos.

En la desorción térmica se calienta el suelo contaminado a una temperatura que oscila entre 90 y 540°C, para conseguir así que los contaminantes que posean un punto de ebullición bajo, pasen a fase vapor, de esta forma se consigue separarlos para tratarlos adecuadamente. En este proceso, los dispositivos de desorción giratorios de calentamiento directo o indirecto producen la vaporización de los contaminantes y una corriente de aire los lleva a un mecanismo de tratamiento de gases, como pueden ser filtros de carbón activo, condensadores, quemadores auxiliares. La desorción térmica se puede aplicar a suelos contaminados por alquitranes, residuos de refinerías, desechos de tratamiento de maderas, esmaltes, plaguicidas, combustibles, bifenilos policlorados y solventes en general (Seoáñez, 1999).

Existen en el mercado diferentes sistemas de desorción térmica que pueden ser tanto móviles como estacionarios. Las tecnologías de desorción térmica se recomiendan y se usan por:

- 1.- El amplio rango de contaminantes orgánicos efectivamente tratados
- 2.- Disponibilidad y movilidad de los sistemas comerciales
- 3.- La aceptación pública del tratamiento.

La desorción térmica es aplicable a la mayoría de residuos orgánicos y generalmente no se usa para tratar inorgánicos y metales. La eficiencia de este método se comprueba comparando la concentración de contaminantes en la tierra tratada con la que contiene el suelo contaminado sin tratar.

Factores limitantes a la hora de aplicar la desorción térmica :

- Suelos con altos porcentajes de humedad, ya que se necesita más calor adicional.
- Suelos con alto contenido en limos y arcillas, pues estas partículas, cuando se calientan generan mucho polvo.(Seoáñez, 1999).

2.7. Incineración.

La incineración es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva para suelos con alta concentración de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándose en dióxido de carbono el cual se descarga a la atmósfera, pero se genera una alta concentración de partículas suspendidas por lo que un buen equipo debe contar con sistemas de control de emisiones para asegurar que se trata de una tecnología limpia.

El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles, cuando esto ocurre se debe enviar a confinamiento. La operación de un proceso de incineración

implica un alto costo, que esta influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento (Saval, 1995).

En la **incineración** la combustión de los contaminantes se consigue sometiendo al suelo a altas temperaturas (alrededor de 1000°C). El tratamiento se desarrolla en dos fases. En una primera se oxidan la mayor parte de los contaminantes. El proceso se completa en la segunda fase en la que se mantiene al suelo a altas temperaturas durante el tiempo necesario para conseguir la destrucción completa de los contaminantes y se eliminan todos los gases. Para depurar los gases residuales se incorpora un sistema de limpieza. Es un método muy útil para eliminar la contaminación producida por hidrocarburos poliaromáticos, PBC (policlorobifenilos) y clorofenoles.

Los residuos orgánicos suelen tener poderes caloríficos lo bastante grandes como para mantener la combustión. La combustión de hidrocarburos produce CO₂, vapor de agua y posiblemente algo de CO. (Seoáñez, 1999).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Localización del experimento

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Química de Suelos del Departamento Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; en el municipio de Saltillo; Coahuila. En el se utilizaron los siguientes materiales:

1.1. Suelo

Se trabajó con dos suelos representativos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y de características diferentes, las cuales se presentan en el Cuadro 2.

Las muestras fueron tomadas al azar, una se colectó en el Campo experimental llamado “Bajío” en la UAAAN (suelo 1). La otra muestra fue tomada a un lado de la carretera, Saltillo - Concepción del Oro, Zacatecas. Edificio del Instituto Mexicano del Maíz UAAAN (suelo 2). Ambas a una profundidad de 0-30 cm, se llevaron al Laboratorio de Química de Suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro para su análisis.

Cuadro No. 2. Características físicas y químicas de los dos suelos en estudio.

Parámetro	Suelo 1	Suelo 2
Densidad Aparente (g/cm ³)	1.45	1.35
Textura % (Arena/Limo/Arcilla)	20 / 28 / 52	28 / 38 / 34
Materia orgánica %		
Carbono %	2.36	6.53
pH	1.37	3.80
C.E. dS/m	7.8	7.4
Carbonatos Totales %	1.45	1.10
	34.5	22.04

Los resultados se muestran en el Cuadro 2. Donde se puede observar que el suelo del Bajío es de textura fina con 52% de arcilla, medianamente rico en M.O., medianamente alcalino, no salino y mediano contenido de carbonatos. De acuerdo a la clasificación de suelos de la FAO es un suelo Xerosol Haplico de textura media. Son suelos secos de regiones semiáridas con presencia de horizontes con arcilla iluvial, suelos profundos.

El suelo de terrazas es de textura media (Migajón arcilloso), muy rico en M.O., Ligeramente alcalino, No salino y mediano contenido de carbonatos. Clasificación de la FAO Rendzina Feozem Calcarico, textura media: Son Suelos poco profundos sobre piedra caliza.

Los suelos se contaminaron con 10 000, 20 000, 30 000 mg Kg⁻¹ de diesel se colocaron en bolsas de polietileno, para incubar durante 8 días, se sometieron a las diferentes temperaturas 100, 200, 300 y 400 °C por un tiempo de 30 minutos.

1.2. Diesel

El diesel es una mezcla compleja de hidrocarburos, con un rango de ebullición entre 290 y 360°C , contiene moléculas de entre 10 y 20 carbonos. Esta formado principalmente por parafinas, entre un 65 y un 70 %.

Índice de Cetano (*n*-hexadecano) 35-65 así como el octano mide la calidad de ignición de la gasolina, el índice de cetano mide la calidad de ignición del diesel. Este depende principalmente del tipo de hidrocarburos que contenga, en general las parafinas tienen números de cetano altos, los aromáticos números bajos, las oleofinas y cicloparafinas números de cetano intermedios.

El azufre presenta un contenido de azufre de 0.05% la reducción del límite de azufre en el diesel a 500 ppm es una tendencia mundial, aunque las nuevas tecnologías necesitaran diesel de bajo contenido de azufre (15 ppm).

Contenido de aromáticos 30%(Palencia, 1997).

2. Métodos:

Los métodos para análisis de las muestras fueron los siguientes:

2.1. Propiedades Físicas

Densidad Aparente (Método de la probeta)

Se pesaron 40 g de suelo que se coloca en una probeta, sobre una franela húmeda se golpea la probeta 30 veces un golpe por segundo en una trayectoria vertical de 30 cm, después se mide el volumen ocupado por el peso del suelo (Gandoy, *et al* 1991).

Textura (Método del Hidrómetro de Bouyoucos)

La densidad de una suspensión de suelo a una profundidad determinada se va haciendo menor a medida que se sedimentan las partículas. Su valor en diferentes

tiempos se relaciona empíricamente con el tamaño de partícula, de modo que seleccionando los tiempos, una lectura de la densidad puede servir de medida de limo + arcilla o de arcilla. La densidad se determina con un hidrómetro especial, los suelos se dispersan sencillamente con hexametáfosfato de sodio, ayudado por una dispersión mecánica (Alcantar, *et al* 1992).

2.2. Propiedades Químicas

Materia Orgánica (Método Walkley-Black)

Consiste en una oxidación vía húmeda con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N (1 Volumen) en medio sulfúrico (2 volúmenes de H_2SO_4 concentrado) sin adición de calor externo y titulación del exceso de dicromato con una sal ferrosa. La cantidad de sustancia oxidada se calcula de la cantidad de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ reducida. El método está diseñado para determinar carbono en suelos minerales. Es rápido y se adapta bien a procedimientos de rutina. A partir del valor de carbono determinado, se puede calcular el contenido de materia orgánica del suelo (Dewis, *et al* 1984).

pH (potenciómetro)

Una cantidad medida de suelo se mezcla con un volumen de agua bajo condiciones consistentes y se determina el pH de la suspensión electrónicamente en un pH-metro de lectura directa, empleando un electrodo de vidrio con un electrodo de referencia de cloruro de potasio (Dewis, *et al* 1984).

Carbonatos Totales (Neutralización - ácida)

Se trata el suelo con exceso de ácido clorhídrico de concentración conocida destruyendo los carbonatos. El exceso de ácido se determina valorando con hidróxido sódico de concentración conocida, después de separación del suelo por filtración o por centrifugación (Gandoy, *et al* 1991).

Conductividad eléctrica (conductímetro).

La conductividad de un suelo es la conductividad específica a 25 °C de un extracto acuoso obtenido de una mezcla de suelo y se expresa generalmente en milimhos/ cm o dS/m, valor que da información sobre la cantidad total de sales solubles que hay en el suelo, es decir, el grado de salinidad. En este caso se utilizó el método del extracto de saturación(Dewis, *et al* 1984). .

Hidrocarburos totales del Petróleo (HTP's)

Debido a las carencias en el presente estudio y alto costo económico de estos análisis, se utilizó este método.

Los TPH's son mezclas extremadamente complejas de cientos de compuestos orgánicos alifáticos y aromáticos (Levin y Gealt, 1997). Fueron determinados en el suelo por extracción, Se pesan 50 g de suelo, agregar 100ml de una mezcla 1:1 de éter etílico y éter de petróleo en dos partes, se agrega 50 ml de solventes, se agita el suelo con los solventes (30 minutos) filtrar, el material extraído se deja evaporar a una temperatura de 37.5 °C por 48 Horas, se pesa el recipiente con material extractable y por diferencia obtenemos los HTP's.(Baldwin, I., 1922).

2.3. Tratamientos

Cuadro No. 3.Suelo del campo experimental "Bajío" (Suelo 1)

Tratamiento	Suelo	Diesel (mg/Kg)	Temperatura °C
T ₁	S1	0	100
T ₂	S1	0	200
T ₃	S1	0	300
T ₄	S1	0	400
T ₅	S1	10000	100
T ₆	S1	10000	200
T ₇	S1	10000	300
T ₈	S1	10000	400

Cuadro No. 4 Suelo de Terrazas (Suelo 2)

T ₉	S1	20000	100
T ₁₀	S1	20000	200
T ₁₁	S1	20000	300
T ₁₂	S1	20000	400
T ₁₃	S1	30000	100
T ₁₄	S1	30000	200
T ₁₅	S1	30000	300
T ₁₆	S1	30000	400
Tratamiento	Suelo	Diesel (mg/Kg)	Temperatura °C

T ₁	S2	0	100
T ₂	S2	0	200
T ₃	S2	0	300
T ₄	S2	0	400
T ₅	S2	10000	100
T ₆	S2	10000	200
T ₇	S2	10000	300
T ₈	S2	10000	400
T ₉	S2	20000	100
T ₁₀	S2	20000	200
T ₁₁	S2	20000	300
T ₁₂	S2	20000	400

T ₁₃	S2	30000	100
T ₁₄	S2	30000	200
T ₁₅	S2	30000	300
T ₁₆	S2	30000	400

2.4. Parámetros evaluados:

- Densidad Aparente
- Textura
- Materia orgánica
- pH
- Carbonatos Totales
- Conductividad eléctrica
- Hidrocarburos Totales del Petróleo HTP's

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo sin contaminar se analizó (Cuadro 2), para determinar sus características físicas y químicas para realizar las comparaciones respectivas con el mismo suelo contaminado y tratado con desorción térmica.

Los resultados y discusión se orientaron básicamente en la comparación de valores obtenidos de los parámetros en suelos con concentraciones de 0, 10 000, 20 000 y 30 000 mg Kg⁻¹ del hidrocarburo diesel sometidos a desorción térmica con 100, 200, 300 y 400 °C y el testigo absoluto, contaminado sin recibir desorción térmica.

El efecto de diferentes concentraciones de hidrocarburo y temperaturas distintas en los dos tipos de suelo probado, se reflejó con variaciones en los valores de algunos parámetros. En las discusiones siguientes, se indican aquellos valores de los parámetros que presentaron variaciones importantes.

1.1. Efecto sobre Densidad Aparente.

La densidad aparente nos indica el peso de suelo entre el volumen total, en este estudio se utilizó el método de la probeta y los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5 y Figura 1 donde podemos ver que los valores obtenidos en Da. del suelo 1.

En la Figura 1, se observa que las variaciones de densidad aparente son mínimas en el suelo 1. De manera general el incremento en la temperatura afecta sobre este parámetro, ya que tiende a aumentar sin influir las diferentes concentraciones de contaminante, sin embargo su clasificación se mantiene como suelo limoso, (Morales, 1995).

Los resultados de densidad aparente del suelo 1 concuerdan con los resultados obtenidos por(Martínez, *et al* 2001).

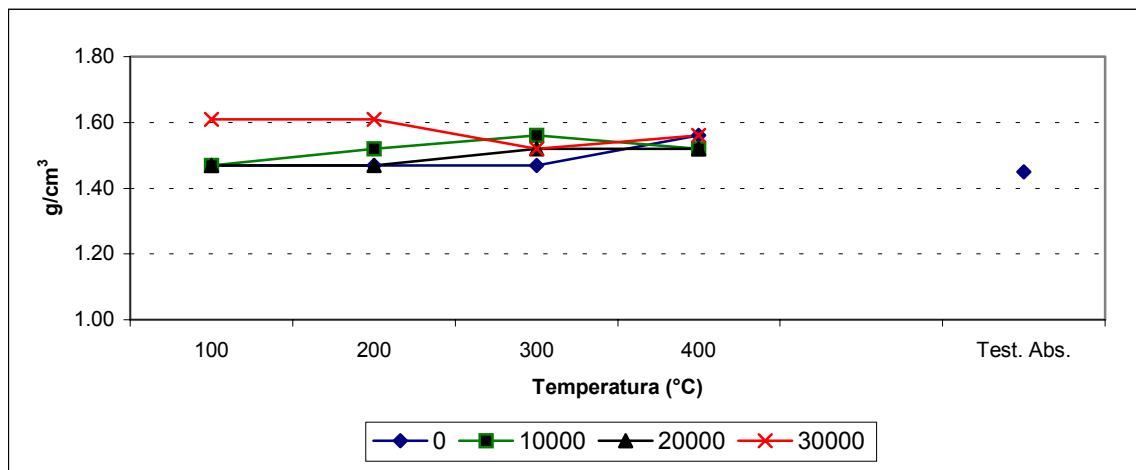


Figura 1. Variación de la densidad aparente por diesel y desorción térmica en el suelo 1.

Cuadro No. 5. Resultados de análisis de densidad aparente y textura, suelo 1

Trat.	Clasificación			Clasificación
	Da (g/cm ³)	Arena, Limo Arcilla	%	

T1	1.47	Suelo Limoso	24 / 26 / 50	Arcilla
T2	1.47	Suelo Limoso	18 / 30 / 52	Arcilla
T3	1.47	Suelo Limoso	22 / 32 / 46	Arcilla
T4	1.56	Suelo Limoso	28 / 32 / 40	Migajón arcilloso
T5	1.47	Suelo Limoso	22 / 26 / 52	Arcilla
T6	1.52	Suelo Limoso	20 / 28 / 52	Arcilla
T7	1.56	Suelo Limoso	38 / 34 / 28	Migajón arcilloso
T8	1.52	Suelo Limoso	36 / 36 / 28	Migajón arcilloso
T9	1.47	Suelo Limoso	22 / 24 / 54	Arcilla
T10	1.47	Suelo Limoso	20 / 28 / 52	Arcilla
T11	1.52	Suelo Limoso	30 / 36 / 34	Migajón arcilloso
T12	1.52	Suelo Limoso	34 / 34 / 32	Migajón arcilloso
T13	1.61	Suelo Limoso	22 / 28 / 50	Arcilla
T14	1.61	Suelo Limoso	22 / 28 / 52	Arcilla
T15	1.52	Suelo Limoso	48 / 30 / 22	Migajón
T16	1.56	Suelo Limoso	44 / 32 / 24	Migajón

Laboratorio Química de suelos UAAAN, 2005.

En la Figura 2 y Cuadro 6 puede apreciarse la variación de la densidad aparente en el suelo 2, el suelo a concentraciones de diesel de 0 y 10 000 mg Kg⁻¹ se comportan estables, sin que afecte el elevar la temperatura de desorción, se mantienen como suelos arcillosos (Morales, 1995), los tratamientos con 20 000 y 30 000 mg Kg⁻¹ de diesel al aplicar temperatura de 300 y 400 ° C aumentan de 1.35 a 1.43 g cm⁻³ comparado con el testigo, cambian de suelo arcilloso a suelo limoso (Morales, 1995). Lo cual nos indica que la temperatura y la concentración de contaminante influyeron sobre este parámetro.

Los resultados del suelo 2 no concuerdan con los de (Martínez, 2001). Esto puede deberse que el suelo 1 es arcilloso y el autor trabajo con suelo arcilloso, el suelo 2 es migajón y tiene mas % de materia orgánica, al elevar la temperatura se quema la M.O. y puede influir en el valor de la densidad aparente.

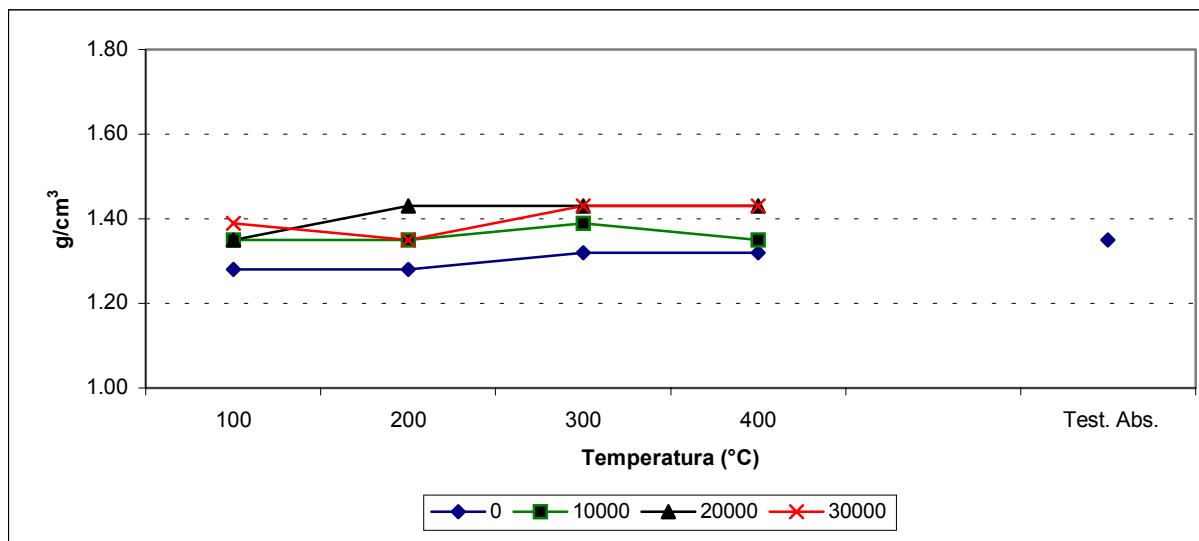


Figura 2. Variación de la densidad aparente en el suelo 2.

Cuadro No. 6. Resultados de los análisis físicos, densidad aparente y textura en el suelo 2.

Experimento 2:				
Trat.	Da (g/cm ³)	Clasificación	Arena, Limo Arcilla %	Clasificación
T1	1.28	Suelo Arcilloso	32 / 36 / 32	Migajón arcilloso
T2	1.28	Suelo Arcilloso	30 / 46 / 24	Migajón
T3	1.32	Suelo Arcilloso	44 / 42 / 14	Migajón
T4	1.32	Suelo Arcilloso	46 / 40 / 14	Migajón
T5	1.35	Suelo Arcilloso	28 / 34 / 38	Migajón arcilloso
T6	1.35	Suelo Arcilloso	24 / 42 / 34	Migajón arcilloso
T7	1.39	Suelo Arcilloso	40 / 48 / 12	Migajón
T8	1.35	Suelo Arcilloso	52 / 36 / 12	Migajón
T9	1.35	Suelo Arcilloso	28 / 34 / 38	Migajón arcilloso
T10	1.43	Suelo Limoso	26 / 46 / 28	Migajón arcilloso
T11	1.43	Suelo Limoso	36 / 46 / 18	Migajón
T12	1.43	Suelo Limoso	52 / 36 / 12	Migajón
T13	1.39	Suelo Arcilloso	46 / 40 / 14	Migajón
T14	1.35	Suelo Arcilloso	52 / 36 / 12	Migajón
T15	1.43	Suelo Limoso	52 / 36 / 12	Migajón
T16	1.43	Suelo Limoso	50 / 40 / 10	Migajón

Laboratorio Química de suelos UAAAN, 2005

1.2. Efectos en la Textura

En el y Cuadro 5 puede verse que las variaciones en las partículas del suelo (arena, limo y arcilla) del suelo 1, por efecto de la temperatura y concentración de contaminante provocan cambios importantes en estas, modificando la textura de arcilla a migajón arcilloso y migajón, esto cuando se aplica temperaturas de 300 y 400 °C a concentración de 10 000, 20 000 y 30 000 mg Kg⁻¹ (diesel), en estos tratamientos las partículas de arcilla disminuyen y el de arena aumenta marcadamente, el limo se mantiene con tendencia estable. [En el suelo 1 si se modifica la textura y se puede atribuir este cambio a la temperatura elevada a la que fue sometida la muestra.](#)

En el Cuadro 6, nos muestra como se comporta el suelo 2 a la desorción térmica y las concentraciones de contaminante, las variaciones en las partículas del suelo (arena, limo y arcilla) muestran cambios importantes, cuando se somete el suelo a temperaturas de 300 y 400 °C en concentraciones de 0, 10 000, 20 000 mg Kg⁻¹ (diesel) cambia la textura de migajón arcilloso a migajón, el suelo a concentración de 30 000 mg Kg⁻¹ cambio a migajón en cada temperatura a la que fue sometido, las partículas de arcilla disminuyen y las de arena aumentan, las de limo presentan poca variación. La temperatura influye mas a medida que aumenta la concentración de contaminante. En el suelo 2 cambia la textura podría ser debido a ambos factores la temperatura elevada (300, 400 °C) y la concentración mas alta de diesel.

Cuadro No. 7. Resultados de análisis de Textura (Muestras contaminadas, sin desorción térmica).

Muestra	Diesel (mg/Kg)	Arena, Limo Arcilla %	Clasificación
S1	10000	22 / 28 / 50	Arcilla
S1	20000	24 / 26 / 50	Arcilla
S1	30000	26 / 26 / 48	Arcilla
S2	10000	30 / 32 / 38	Migajón arcilloso
S2	20000	32 / 28 / 40	Migajón arcilloso
S2	30000	32 / 32 / 36	Migajón arcilloso

Laboratorio Química de suelos UAAAN, 2005.

En la Figura 3, podemos ver que existe una mínima variación en las partículas del suelo 1 y suelo 2 a concentraciones del contaminante de 10 000, 20 000 y 30 000 mg Kg⁻¹ de diesel sin aplicar temperatura. El suelo 1 no cambia su textura arcilla, al igual el suelo 2 no cambia su textura migajón arcilloso. En

general al aumentar la concentración de 10 000 a 30 000 mg Kg⁻¹ se observa una ligera tendencia de la arcilla a disminuir y aumentan las partículas de arena.

En el suelo contaminado sin tratar con temperatura, nos muestra que el hidrocarburo diesel no influye en la textura y concuerda con los estudios realizados por (Martínez, 2001).

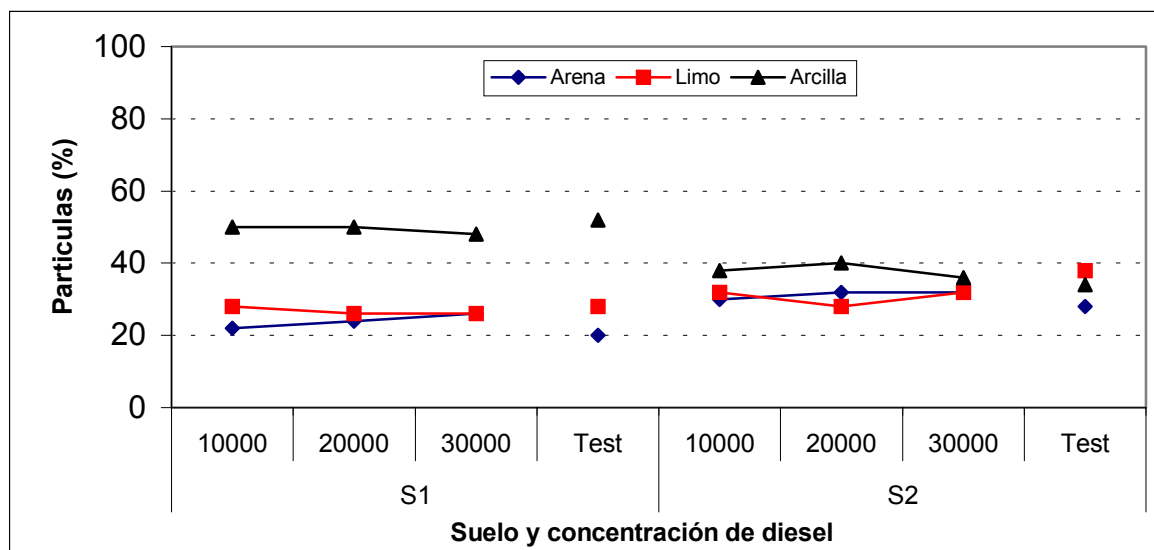


Figura 3. Variación de la textura en suelo 1 y 2 contaminados, sin tratar con desorción térmica

La textura se ve modificada debido a la adsorción de diesel y combustóleo por las partículas del suelo provocando efectos en la velocidad de sedimentación de las mismas establecidas en la Ley de Stokes (Brady, 1990), lo cual repercute en la determinación de la densidad del lodo formado por el suelo y agua durante el análisis, induciendo una lectura de partículas con el hidrómetro de Bouyoucos, que se interpretara como alterada (Martínez, 2001).

Puede ser que al aumentar la temperatura las partículas se fusionen y formen agregados de mayor densidad y peso, aumentan la velocidad al precipitar.

1.3. Efecto sobre Materia Orgánica (% carbono).

La desorción térmica aplicada al suelo 1 contaminado a diferentes concentraciones modifica el % de carbono (Figura 4 y Cuadro 8) este aumenta al elevar la concentración de hidrocarburo diesel a partir de 10 000 a 30 000 mg Kg⁻¹ y tiende a disminuir al incrementar la temperatura de desorción, al aplicar temperatura de 400 °C el suelo presenta el mas bajo % de carbono en las diferentes concentraciones de contaminante. Obteniéndose en los análisis 1.02 % de carbono, este valor es aun mas bajo que el testigo. En el suelo a 0 mg Kg⁻¹ de diesel al someterlo a temperatura también disminuye el % de carbono lo cual nos indica que la temperatura afecta el % de materia orgánica del suelo.

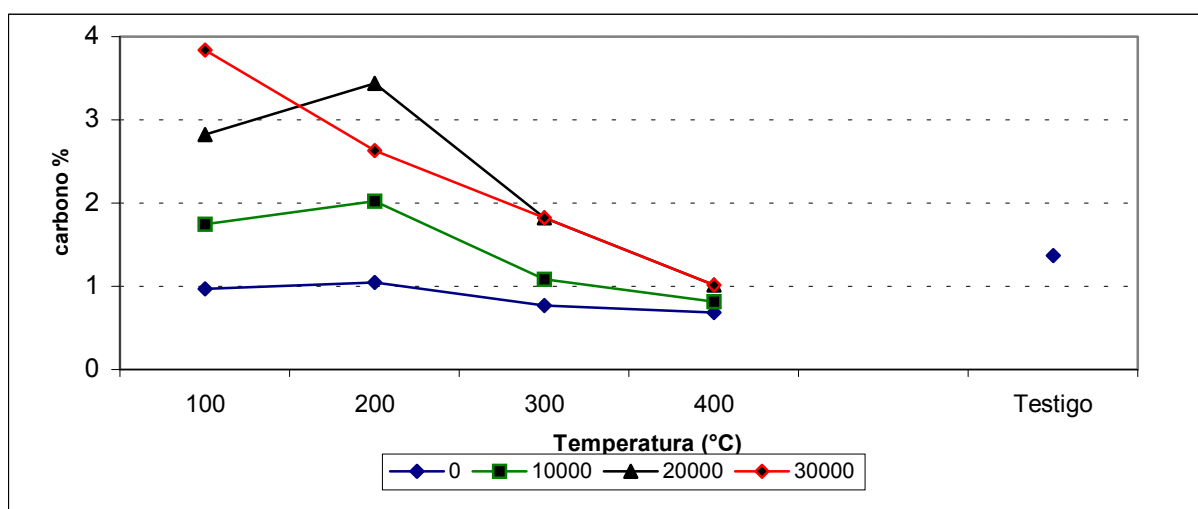


Figura 4. Variación del % de carbono en el suelo 1, a concentraciones y temperaturas diferentes.

Cuadro No. 8. Resultado de análisis % de Materia orgánica, % de Carbono. Suelo 1 y suelo 2.

Suelo 1				Suelo 2		
Trat.	M.O. %	Clasificación	Carbono %	M.O.%	Clasificación	Carbono %
T1	1.7	Pobre	0.97	7.9	Muy rico	4.60
T2	1.8	Pobre	1.05	7.8	Muy rico	4.52
T3	1.3	Pobre	0.77	7.9	Muy rico	4.60
T4	1.2	Pobre	0.69	4.9	Rico	2.83

T5	3.0	Medio	1.75	7.2	Muy rico	4.17
T6	3.5	Rico	2.02	10.0	Muy rico	5.78
T7	1.9	Pobre	1.08	3.7	Rico	2.16
T8	1.4	Pobre	0.81	3.5	Rico	2.02
T9	4.9	Rico	2.83	11.8	Muy rico	6.86
T10	5.9	Muy rico	3.44	8.7	Muy rico	5.05
T11	3.1	Rico	1.82	5.2	Muy rico	3.03
T12	1.8	Pobre	1.02	4.5	Rico	2.63
T13	6.6	Muy rico	3.84	10.8	Muy rico	6.39
T14	4.5	Rico	2.63	10.1	Muy rico	5.85
T15	3.1	Rico	1.82	3.8	Rico	2.23
T16	1.8	Pobre	1.02	4.9	Rico	2.83

Laboratorio Química de suelos UAAAN, 2005

El % de carbono en el suelo 2 (Figura 5 y Cuadro 8) se comporta diferente al suelo 1 ya que al aumentar la concentración solo aumentan las muestras contaminadas con 20 000 y 30 000 mg Kg⁻¹ de diesel, la muestra contaminada con 10 000 mg Kg⁻¹ de diesel al aplicarle temperatura de 100 °C resulta un 4.1 % de carbono y a 200°C aumenta a 5.78 % de carbono a 300 y 400 °C tiende a disminuir el % de carbono, a diferencia de las otras muestras que al incrementar la concentración aumenta el % de carbono y disminuye al elevar la temperatura de desorción térmica, todas las muestras sin importar la concentración de hidrocarburo a 400 °C de temperatura muestran valores mínimos de % de carbono.

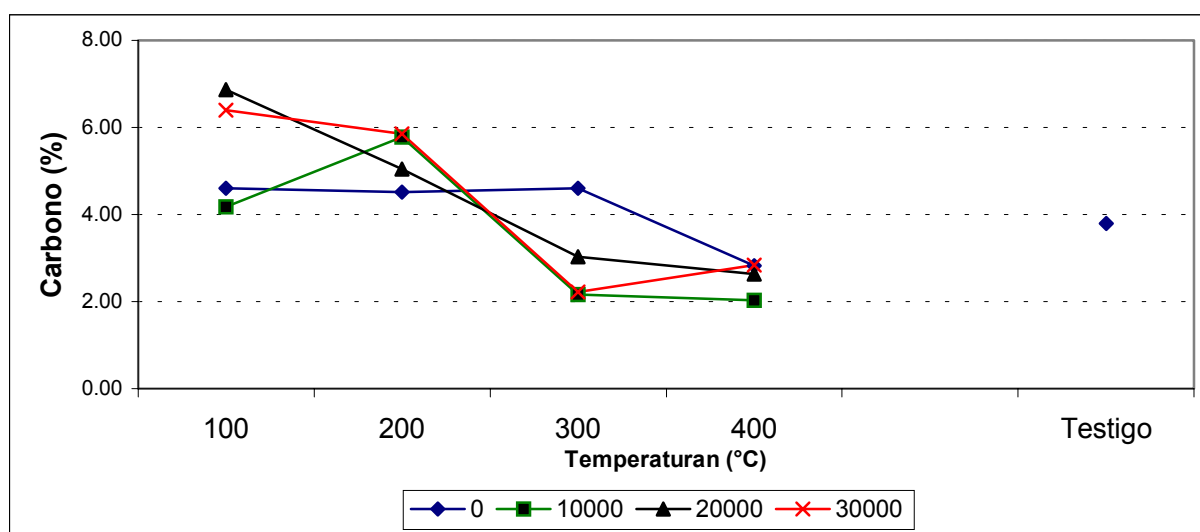


Figura 5. Variación del % de carbono en el suelo 2, a diferentes concentraciones de contaminante y temperatura.

Cuadro No. 9. Comparación para materia orgánica en muestras contaminadas sin someter a desorción térmica.

Muestra	Diesel (mg/Kg)	M.O. %	Clasificación	Carbono %
S1	10000	4.68	Rico	2.72
S1	20000	6.69	Muy rico	3.89
S1	30000	10.02	Muy rico	8.35
S2	10000	11.34	Muy rico	9.45
S2	20000	12.02	Muy rico	10.02
S2	30000	12.69	Muy rico	10.58

Laboratorio Química de suelos UAAAN,2005.

En la Figura 6 y Cuadro 9, se aprecia que el aumento del % de carbono es proporcional al aumento de concentración del contaminante en los dos tipos de suelos, el aumento comienza desde la concentración de 10 000 mg Kg⁻¹ de diesel que es la mas baja concentración.

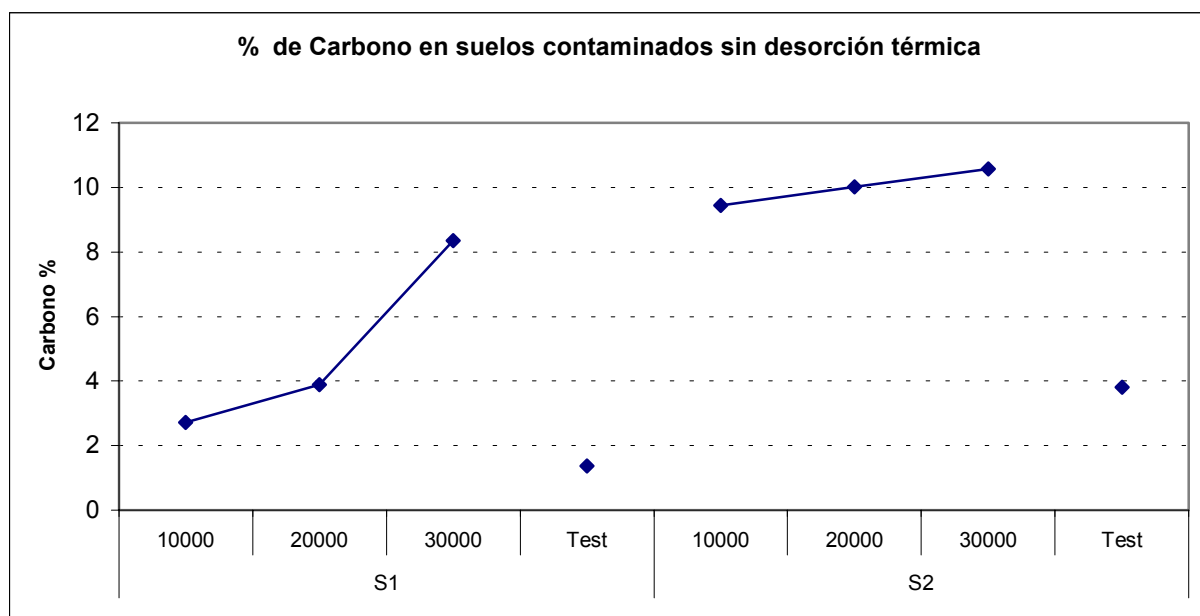


Figura 6. Variación del % de carbono en suelo 1 y 2 sin aplicar desorción térmica.

Los resultados obtenidos en el suelo contaminado no tratado con desorción térmica, suelo 1 y suelo 2, coinciden con los estudios realizados por (SEMARNAP, 1996 y Martínez, 2001). El contenido de materia orgánica del suelo contaminado es la suma de materia biogénica (por la descomposición de vegetales y animales) y materia petrogénica (por hidrocarburos), (Martínez,

2001). El diesel (cuyos compuestos tienen una estructura C_{10} a C_{23}) y con mínimos contenidos de compuestos volátiles se oxida en su mayor parte, reflejándose en valores altos de materia orgánica (Rontani *et al.*, 1985, citado por Martínez, 2001). El % de materia orgánica se puede usar como referencia para saber cuando un suelo está contaminado por diesel analizando con el Método de Walkley – Black, ya que el 70% del petróleo crudo es carbono oxidable, en este estudio nos muestra como al aumentar la temperatura de desorción, disminuye el % de carbono en el suelo 1 y 2 sin importar las concentraciones de diesel, lo cual nos indica que la desorción térmica tiene efecto positivo al disminuir el % de carbono que se relaciona con el grado de contaminación por diesel en ambos tipos de suelos.

1.4. Efecto sobre pH.

Los valores de pH en el suelo 1 y suelo 2, prácticamente no muestran una variación importante en presencia de cualquier concentración de diesel y aplicación de diferente temperatura.

En la Figura 7 y Cuadro 10 se aprecia que el suelo 1, presenta variación en el valor de pH. Por lo que cambia de medianamente a ligeramente alcalino. La contaminación a diferentes concentraciones y temperatura a la que se realizó la desorción térmica causan efecto en este parámetro, tiende a disminuir el valor de pH.

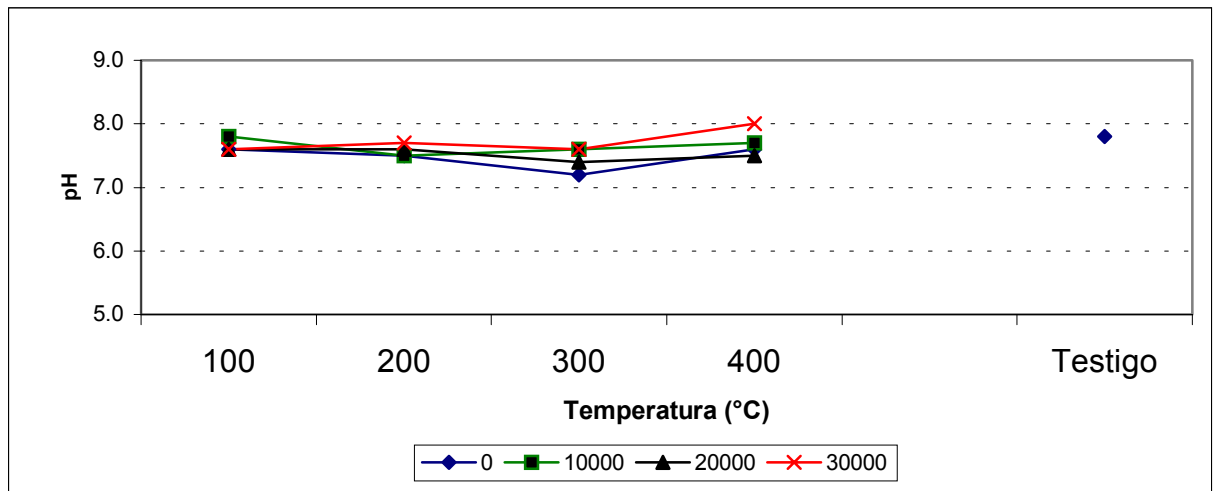


Figura 7. Variación del pH en el suelo 1, a diferente concentración de contaminante y temperaturas.

Cuadro No.10 Resultados de pH de y clasificación del suelo 1.

Trat.	pH	Clasificación
T1	7.6	Ligeramente alcalino
T2	7.5	Ligeramente alcalino
T3	7.2	Muy ligeramente alcalino
T4	7.6	Ligeramente alcalino
T5	7.8	Medianamente alcalino
T6	7.5	Ligeramente alcalino
T7	7.6	Ligeramente alcalino
T8	7.7	Ligeramente alcalino
T9	7.6	Ligeramente alcalino
T10	7.6	Ligeramente alcalino
T11	7.4	Ligeramente alcalino
T12	7.5	Ligeramente alcalino
T13	7.6	Ligeramente alcalino
T14	7.7	Ligeramente alcalino
T15	7.6	Ligeramente alcalino

Cuadro No. 11 Resultados de análisis pH y clasificación del suelo 2.

Trat.	pH	Clasificación
T1	7.6	Ligeramente alcalino
T2	7.4	Ligeramente alcalino
T3	7.2	Muy ligeramente alcalino
T4	7.6	Ligeramente alcalino
T5	7.4	Ligeramente alcalino
T6	7.6	Ligeramente alcalino
T7	7.6	Ligeramente alcalino
T8	7.8	Medianamente alcalino
T9	7.4	Ligeramente alcalino
T10	7.4	Ligeramente alcalino
T11	7.6	Ligeramente alcalino
T12	7.6	Ligeramente alcalino
T13	7.4	Ligeramente alcalino
T14	7.4	Ligeramente alcalino
T15	7.5	Ligeramente alcalino

T16	8.0 Medianamente alcalino
Laboratorio Química de suelos y Pedología UAAAN, 2005.	

T16	7.7 Ligeramente alcalino
-----	--------------------------

Los valores de pH encontrados en el suelo 2, presentan muy poca variación como se muestra en la Figura 8 y Cuadro 11, independientemente de la concentración de diesel y aplicación de diferente temperatura, se mantiene en ligeramente alcalino.

Los resultados obtenidos a través de esta investigación nos muestran que en el suelo 1 los valores de pH se asemeja a las investigaciones realizadas por (SEMARNAP, 1996), los resultados del suelo 2 son similares a los publicados por (Martínez, 2001).

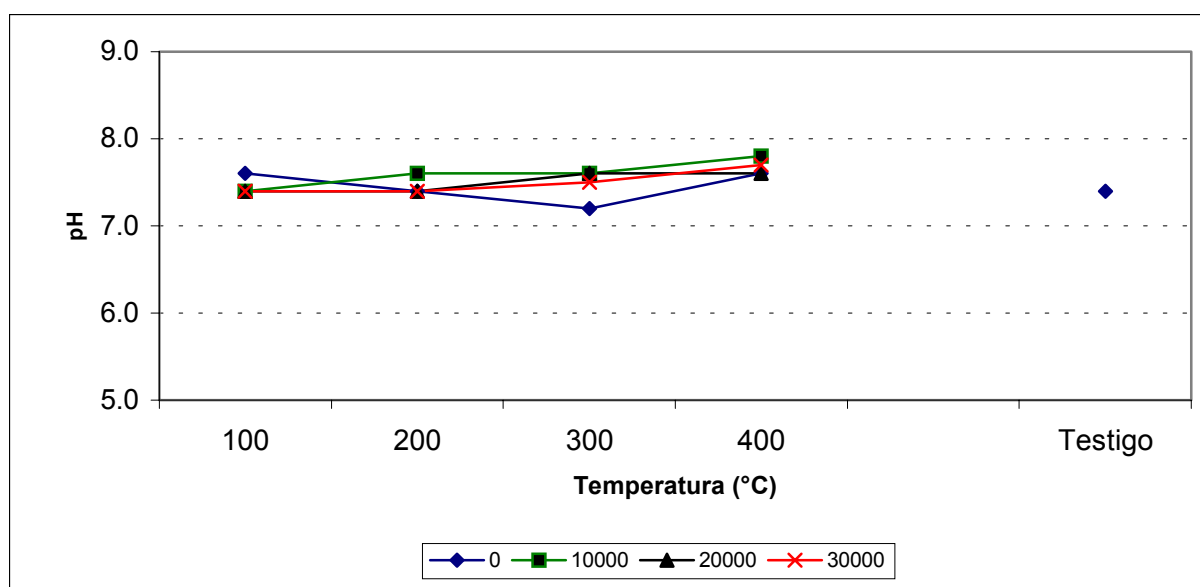


Figura 8. Variación del pH por diesel y aplicación de temperatura en el suelo 2.

1.5. Efecto sobre Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es uno de los parámetros que presenta mayor variación en ambos tipos de suelo.

Como se puede observar en la Figura 9 y Cuadro 12, el suelo 1 contaminado a concentraciones de 10 000, 20 000 y 30 000 mg Kg⁻¹ aumenta en forma proporcional al aumentar la temperatura de desorción, cambia de no salino a ligeramente y medianamente salino. En general la C.E. del suelo 1 tiende a

incrementar al elevar la temperatura, excepto el suelo de concentración de 0 mg Kg⁻¹ que se comporta de forma irregular (3.23 a 4.42 dS m⁻¹), ya que aumenta y disminuye al aplicar la temperatura, en 100 y 200 °C se mantiene como no salino pero al aplicar 300 y 400 °C cambia de no salino a ligeramente y medianamente salino comparado con el testigo.

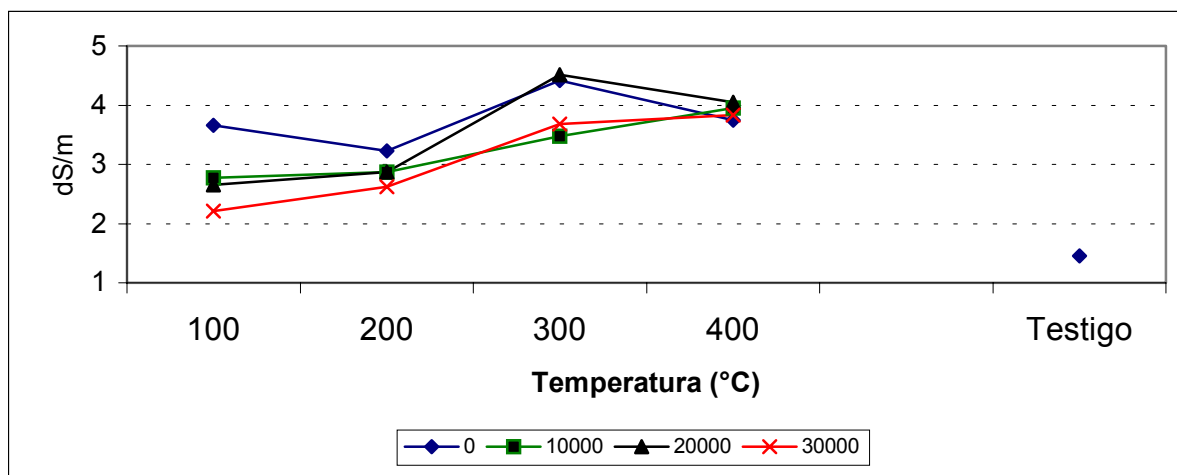


Figura 9. Variación de la conductividad eléctrica por diesel y temperatura en suelo 1.

Cuadro No. 12 Resultados del análisis De C.E. en el suelo 1.

Trat.	C.E.	Clasificación
T1	3.66	Medianamente salino
T2	3.23	Ligeramente salino
T3	4.42	Medianamente salino
T4	3.75	Medianamente salino
T5	2.77	Ligeramente salino
T6	2.87	Ligeramente salino
T7	3.48	Medianamente salino
T8	3.95	Medianamente salino
T9	2.65	Ligeramente salino
T10	2.87	Ligeramente salino
T11	4.51	Medianamente salino
T12	4.05	Medianamente salino
T13	2.21	No salino
T14	2.62	No salino

Cuadro No. 13 Resultados del análisis de C.E. en el suelo 2.

Trat.	C.E.	Clasificación
T1	1.53	No salino
T2	2.21	No salino
T3	5.40	Medianamente salino
T4	5.56	Medianamente salino
T5	1.24	No salino
T6	2.11	No salino
T7	4.80	Medianamente salino
T8	3.85	Medianamente salino
T9	1.14	No salino
T10	3.08	Ligeramente salino
T11	4.76	Medianamente salino
T12	4.53	Medianamente salino
T13	1.09	No salino
T14	2.95	Ligeramente salino

T15	3.68	Ligeramente salino	T15	4.97	Medianamente salino
T16	3.83	Medianamente salino	T16	4.92	Medianamente salino

Laboratorio Química de suelos y Pedología UAAAN, 2005.

En el suelo 2 la conductividad eléctrica presento variación, como se puede observar en la Figura 10 y Cuadro 13, la C.E. se incrementa en las diferentes concentraciones al aumentar la temperatura de 100 a 300 °C cambia de no salino a medianamente salino y a los 400°C se mantiene estable , con excepción del suelo con la concentración de 10 000 mg Kg⁻¹ que a 400°C disminuye, pero aun es medianamente salino. El suelo tratado con temperatura de 100 °C se mantiene como no salino sin importar la concentración de diesel.

El incremento de la conductividad eléctrica puede ser afectada por la temperatura ya que al elevarla puede aumentar la solubilidad de iones o puede ser causado por la descomposición de la materia orgánica.

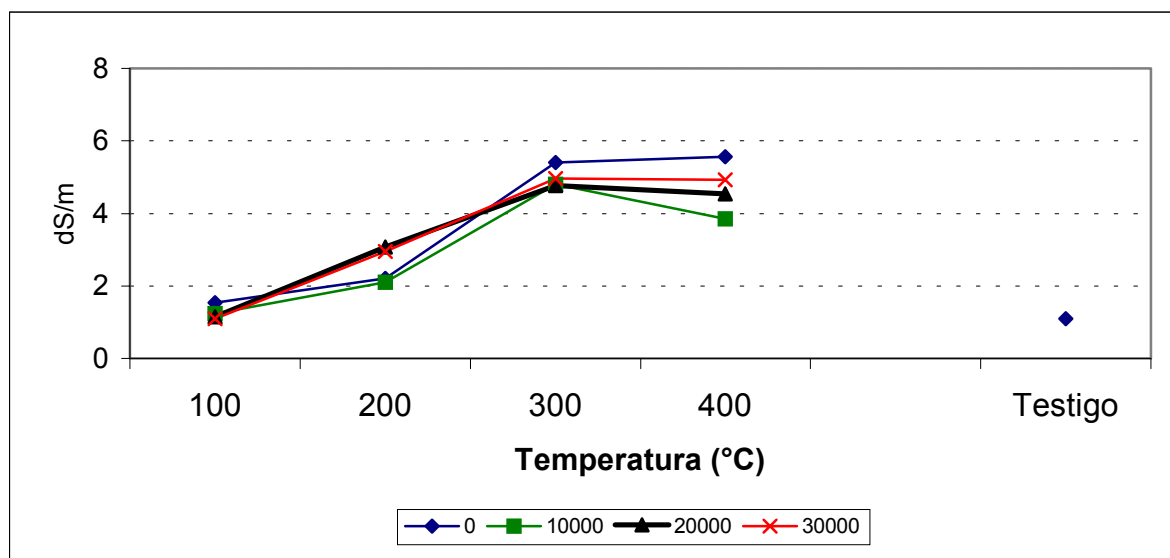


Figura 10. Variación de la conductividad eléctrica por diesel y temperatura en suelo 2.

1.6. Efecto sobre los Carbonatos Totales

El efecto sobre el % de carbonatos totales en el suelo 1 puede apreciarse en la Figura 11 y Cuadro 14, donde la variación de este parámetro tiende a

aumentar al incrementar la temperatura sin importar la concentración de diesel, cambia de mediano a alto el nivel de carbonatos comparado con el testigo.

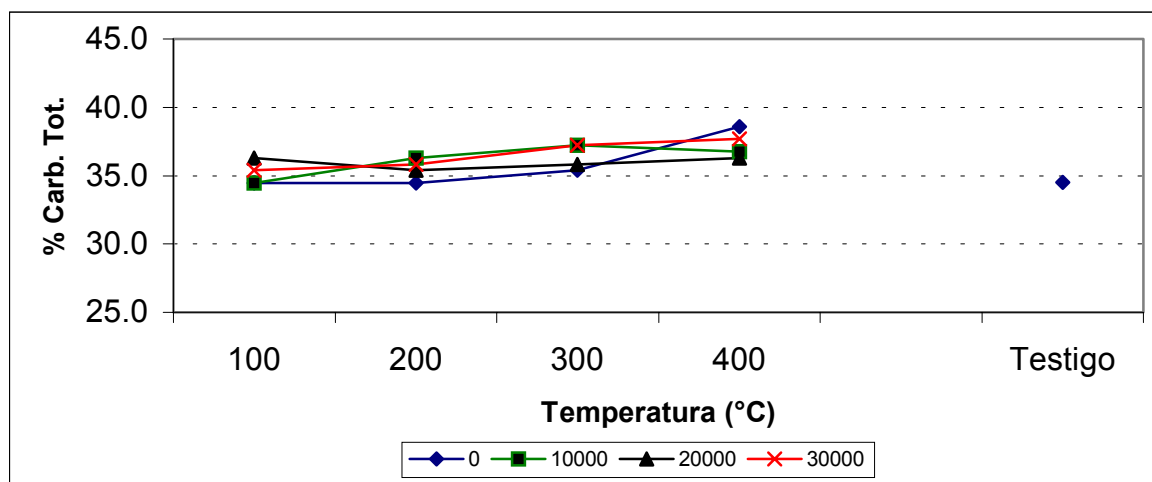


Figura 11. Variación en el % de carbonatos en el suelo 1, por concentraciones de diesel y temperatura.

Cuadro No. 14 Resultados del análisis de análisis carbonatos totales del suelo 1.

Trat.	Carb.Tot.	Nivel
T1	34.5	Mediano
T2	34.5	Mediano
T3	35.4	Alto
T4	38.6	Alto
T5	34.5	Mediano
T6	36.3	Alto
T7	37.2	Alto
T8	36.8	Alto
T9	36.3	Alto
T10	35.4	Alto
T11	35.8	Alto
T12	36.3	Alto
T13	35.4	Alto
T14	35.8	Alto
T15	37.2	Alto
T16	37.7	Alto

Cuadro No. 15 Resultados del de carbonatos totales en el suelo 2.

Trat.	Carb. Tot.	Nivel
T1	24.3	Mediano
T2	22.5	Mediano
T3	26.2	Mediano
T4	25.3	Mediano
T5	23.0	Mediano
T6	24.3	Mediano
T7	25.3	Mediano
T8	23.9	Mediano
T9	23.0	Mediano
T10	23.9	Mediano
T11	23.9	Mediano
T12	24.3	Mediano
T13	22.5	Mediano
T14	23.0	Mediano
T15	23.9	Mediano
T16	23.4	Mediano

Laboratorio Química de suelos y Pedología UAAAN, 2005.

En el suelo 2 el % de carbonatos totales se mantiene estable como se observa en la Figura 12, Cuadro 15 y no cambia se mantiene con nivel mediano sin importar las concentraciones de diesel y las diferentes temperaturas de desorción.

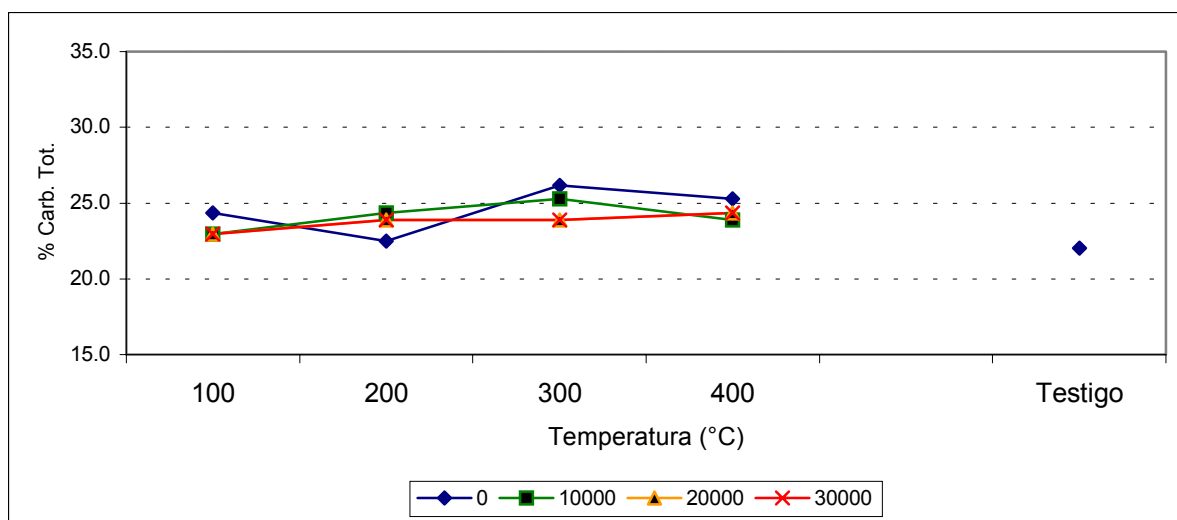


Figura 12. Variación en el % de Carbonatos Totales en el suelo 2 por concentraciones de diesel y temperatura.

1.7. Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP's)

Cuadro No. 16 Resultados de análisis de TPH's en los dos tipos de suelos tratados y sin tratar con desorción térmica.

Suelos contaminados con 30 000 (mg/Kg) de diesel	HTP's ($\mu\text{g} / \text{g}$)	
	Sin Tratar	Tratado a (300 °C)
Suelo 1	29 942	300
Suelo 2	22 996	700

En el Cuadro 16, se observa como en los suelos disminuye considerablemente el contenido de TPH's al tratarlos con desorción térmica a 300 °C. Debido a la falta de reactivos no se analizo TPH's en todos los tratamientos.

V. CONCLUSIONES

Debido a la falta de equipo y tecnología, para el análisis de hidrocarburos como el cromatógrafo de gases, se utiliza un método muy antiguo, el de TPH's con una eficiencia de 35 % en nuestro estudio, sugiero que debe hacerse otros estudios para mejorar la eficiencia.

Como referencia de contaminación se tomó el % de carbono en el suelo, por el alto contenido de carbono que contiene los hidrocarburos (diesel), al contaminarse el suelo el contenido de carbono se incrementa es por ello que lo relacionamos, se puede inferir que al bajar el % de carbono baja también el contenido de hidrocarburos.

Después de los resultados encontrados en el estudio, este muestra que si produce efecto positivos en la restauración de suelos contaminados por diesel, sobre todo a temperaturas elevadas en las tres concentraciones del experimento, habría que realizar otros estudios para ver si funciona a mayores concentraciones de contaminante, a mayores temperaturas y analizar hidrocarburos si se pudiera con el cromatógrafo de gases o mejorar la eficiencia del usado en este estudio y así establecer la metodología para la desorción térmica.

Los tratamientos que mostraron mas eficiencia en la restauración de suelos contaminados por diesel fueron los que se trataron a temperatura de 300 y 400 °C en todas las concentraciones de contaminación en los dos tipos de suelos, el % de carbono baja de 3.84 a 1.02 en la muestra contaminada a 30 000 mg Kg⁻¹, en el suelo del campo experimental "bajío" y de a 2.23, en el suelo de terrazas. Los TPH's disminuye de 29 942 a 300 µg g⁻¹ suelo 1 y de 22 996 a 700 µg g⁻¹ en el suelo 2.

Algunas características físicas y químicas si presentan variación después de ser sometido a desorción térmica en los dos tipos de suelo.

En el suelo 1 los parámetros que sufren una alteración son: textura, materia orgánica (% carbono), conductividad eléctrica y carbonatos totales, no varían la densidad aparente y pH.

En el suelo 2 los parámetros que muestran cambio son: densidad aparente, textura, materia orgánica (% carbono), conductividad eléctrica, no varían pH y carbonatos.

La conductividad eléctrica y la materia orgánica (% carbono) presentan un cambio muy visible.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio similar utilizando repeticiones para realizar análisis estadístico de los datos y tener mas confiabilidad con esto, probar con un suelo contaminado por un derrame, continuar con trabajos para devolver las propiedades alteradas al suelo y experimentar con un cultivo.
- En caso de no contar con recursos y equipo para análisis de HTP's por cromatografía de gases, se recomienda realizar pruebas con otro extractante además del éter y sobre otro tipo de hidrocarburo.

VII. LITERATURA CITADA

Alcantar, G. G., Etchevers B. J. D. Y Aguilar S. A. 1992. Los Análisis Físicos y Químicos, Colegio de Posgraduados, México.

Baldwin I. L. 1922. Modifications of the Soil Flora Induced by Applications of Crude Petroleum, Soil Science, Vol. 14, Pag. 465.

- Bocks, Y. 1996. Efectos de la Extracción de Hidrocarburos sobre la Producción Agrícola en Cunduacan, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias. Campus Puebla, Colegio de Posgraduados. PUEBLA, Pue., México.
- Dewis J. Freitas F. 1984. Boletín de Suelos de la FAO, Métodos Físicos y Químicos de Análisis de Suelos y Aguas.
- Freedman, B. 1989. Environmental Ecology the Impacts of Pollution and other Stresses on Ecosystem Structure and Function. Academic Press, Inc. USA.
- Ellis, R., y R. S. Adams. 1960. Contamination of Soil Spill on Soil by Petroleum Hydrocarbons. Department of Agronomy, Kansas State University, Manhattan. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26:197-216.
- Gandoy B. W. 1991. Manual de Laboratorio para el Manejo Físico de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Serie Agronomía No.22.
- Gutiérrez C. Ma. Del C. Y Zavala C., J. 2001, Rasgos Hidromorficos de Suelos Tropicales Contaminados con Hidrocarburos. Terra 20:101-111.
- INEGI, 1994. Estadísticas del Medio ambiente. México.
- Levin M. y Gealt M. 1997. Biotratamiento de residuos Tóxicos y Peligrosos. Editorial McGraw-Hill.
- Martínez M. V. y López S. F. 2001, Efecto de Hidrocarburos en las Propiedades Físicas y Químicas de Suelo Arcilloso. Terra 19: 9-17.
- Morales H. M. 1995. Interpretación de Análisis Físicos y Químicos más Usuales en Muestras de Suelo. Saltillo, Coahuila; México. Monografía UAAAN.
- Ortiz V. B. Y Ortiz S. C. A. 1990. Edafología, Universidad Autónoma Chapingo.

7 ma. Edición. México.

Palencia H., 1997. Curso de Biorremediación de Suelos y Acuíferos: Química de Combustibles Destilados del Petróleo. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Palma- López, D. J. Y J. Cisneros D. 1997. Plan de Uso Sustentable de los Suelos de Tabasco. Volumen I. Fundación Produce Tabasco, AC. Villahermosa, Tabasco, México.

Saval B. S. 1995. Remediación y Restauración de Suelos. PEMEX Ambiente y Energía, los Retos del Futuro, UNAM-Petróleos Mexicanos, México.

Seoáñez C. M. 1998. Ecología Industrial, Ediciones Mundi-prensa, 2da Edición, España.

Seoáñez C. M. 1999. Contaminación del Suelo. Ediciones Mundi-prensa. España.

SEMARNAP. 1996. Los suelos de Tabasco Restauración Conservación y Uso. Gobierno Constitucional del Estado de Tabasco, México.

Zavala C.,J. Y V. Botello A. 1997. Hidrocarburos Aromáticos en las Tierras del Campo Petrolero Samaria, Tabasco. p. 47. *In*: V. M. Ordaz Ch., G. Alcántar G., C. Castro B. Y M. Mejía P. (eds.). La Investigación Edafológica en México 1996-1997. Memorias del XXVIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Fundación Produce Tabasco, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. ISPROTAB. San Vicente Chicoloapan, México.

Autores anónimos

<http://www.miliarium.com/Proyectos/Suelos/Manuales/Descsueloscont.asp>

http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/139/situacion.html?id_public=139&id_tema=9&dir=Consultas

<http://www.gtz.org.mx/sitios-contam/index.htm>

http://www.citma.net/proyectos_ficha.asp?id_global=11