



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CONTAMINACION POR METALES PESADOS EN TRES UNIDADES DE SUELO, OCASIONADA POR DERRAMES DE PETROLEO EN EL DISTRITO DE AGUA DULCE, TABASCO.

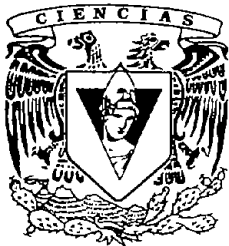
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

B I O L O G A

P R E S E N T A :

MARIA FLOR SOLEDAD NAVARRETE CISNEROS

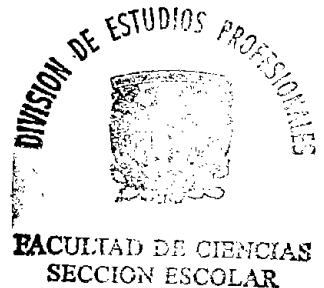


FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

DIRECTORA DE TESIS: DRA. CHRISTINA DESIRE SIEBE GRABACH

2005

m34 0063





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Autorizo a la Unidad de Gestión de Recursos  
UNAR a retirar los fondos de mi cuenta  
compartido de mi trabajo <sup>receptivo</sup> a cargo de Salgado

NOMBRE: Juan Carlos Salgado

FECHA: 19 Mayo 2025

FIRMA: Juan Carlos Salgado



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Contaminación por metales pesados en tres unidades de suelo ocasionada por derrames de petróleo en el distrito de agua dulce, Tabasco"

realizado por María Flor Soledad Navarrete Cisneros.

con número de cuenta 7728219-8 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis Dra. Christina Desire Siebe Grabach.

*Christina Siebe*

Propietario

Propietario Dra. Silke Cram Heydrich.

*Silke Cram*

Propietario Dra. María Aurora Armienta Hernández.

*María Aurora Armienta H*

Suplente M en C. Irene Sommers Cervantes.

*Irene Sommers Cervantes*

Suplente Bióloga. Claudia Vallejo Albarrán

*Claudia Vallejo Albarrán*

Consejo Departamental de Biología

*Juan Manuel Rodríguez Chávez*

M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez.

FACULTAD DE CIENCIAS



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO  
DEPARTAMENTO DE  
BIOLOGÍA

Dedicado a:

**MIS PADRES:**

Ángel e Isaura.

Por apoyarme en los momentos difíciles y por enseñarme el camino a seguir, ya que construyeron al ser humano que soy ahora.

**En Especial a:**

*J. Zidencio, Francisco, Tomás, Ernestina, Blanquita, Josefina I. Teresa y Ángel de Jesús.*

**A MIS HERMANOS:**

*Ma. del Carmen, Angeles, Enrique, Genoveva, Ángel, Guadalupe y J. Martín†*

**SOBRINOS:**

*J. Martín, Ángel de Jesús, C. Balan, Mariana P, Ma. de la Luz, Gabriela, Jesús y Ángel E.*

**A MIS AMIGOS**

## **MI AGRADECIMIENTO:**

*A la Facultad de Ciencias de la UNAM por mi formación académica.*

*Al H. Instituto de Geología de la UNAM por todas las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.*

*Y a todas las personas que me apoyaron durante el desarrollo de este trabajo. De forma especial a:  
Dra. Ofelia Mortón, M en C. Elizabeth Hernández, Biólogo Daniel Hernández, M en C. J. Adolfo  
Ramírez.*

*De forma especial al jurado evaluador de la tesis. Por su apoyo, dirección, colaboración, comentarios y sugerencias .*

*Dra. Christina Desire Siebe Grabach*

*Dra. Silke Cram Heydrich.*

*Dra. Ma. Aurora Armenta Hernández.*

*M. en C. Irene Sommer Cervantes.*

*Biologa. Claudia Vallejo Albarrán.*

# INDICE

Página

## RESUMEN

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	4
2.1 General.	
2.2 Particular.	
<b>3. HIPÓTESIS</b> .....	5
<b>4. FUNDAMENTO TEORICO</b> .....	6
<b>4.1 EL SUELO</b> .....	6
4.1.1 Fases del suelo .....	6
4.1.2 Factores formadores del suelo .....	6
4.1.3 Funciones del suelo .....	8
<b>4.2 METALES PESADOS</b> .....	8
4.2.1 Fuentes de metales pesados en suelo .....	10
4.2.2 Comportamiento de metales en suelo .....	13
4.2.3 Efecto de metales en suelo .....	14
4.2.4 Contenidos normales y límites permisibles de metales en suelo .....	15
<b>4.3 PETROLEO</b> .....	16
4.3.1 Características y composición del petróleo .....	16
4.3.2 Comportamiento y destino del petróleo en suelo .....	19
4.3.3 Efectos de los derrames de petróleo en suelo .....	19
<b>5. ANTECEDENTES</b> .....	22
5.1 Revisión bibliográfica del contenido de metales en suelo del estado de Tabasco .....	22
<b>6. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO</b> .....	26
6.1 Localización geográfica .....	26
6.2 Geología y Fisiografía .....	28

	<b>Página</b>
<b>6.3</b> Clima .....	28
<b>6.4</b> Vegetación .....	29
<b>6.5</b> Suelo .....	30
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	35
7.1 Selección de sitios de muestreo .....	35
7.2 Toma de muestra .....	35
7.3 Procesamiento de las muestras .....	35
7.4 Análisis de laboratorio .....	36
<b>8. RESULTADOS</b> .....	38
<b>8.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS EN SUELOS</b> .....	38
8.1.1 Potencial de Hidrógeno (H <sub>2</sub> O) .....	38
8.1.2 Potencial de Hidrógeno (KCl) .....	39
8.1.3 Fósforo Bray I .....	39
8.1.4 Nitrógeno total .....	40
8.1.5 Materia Orgánica .....	40
8.1.6 Relación Carbón/Nitrógeno .....	42
8.1.7 Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) ...	43
8.1.8 Sulfatos Extractables .....	43
<b>8.2 METALES PESADOS EN SUELOS</b> .....	44
8.2.1 Cromo .....	44
8.2.2 Cobre .....	45
8.2.3 Vanadio .....	46
8.2.4 Níquel .....	47
8.2.5 Zinc .....	48
8.2.6 Plomo .....	49
8.2.7 Cadmio .....	50
<b>9. DISCUSIÓN</b> .....	52
<b>10. CONCLUSIONES</b> .....	55
<b>11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	57



**12. ANEXOS**

ANEXO 1 .....	61
ANEXO 2 .....	62
ANEXO 3 .....	63
ANEXO 4 .....	64

## INDICE DE CUADROS

	<b>Página</b>
<b>Cuadro 1</b> Contenidos de vanadio y níquel en los diferentes tipos de petróleo mexicano y en diferentes regiones del mundo.	2
<b>Cuadro 2</b> Clasificación de los principales grupos de elementos en metales, no-metales y metaloides.	9
<b>Cuadro 3</b> Metales considerados muy tóxicos en plantas o animales, relativamente solubles y los esenciales.	10
<b>Cuadro 4</b> Metales generados por diversas actividades industriales.	12
<b>Cuadro 5</b> Fuentes naturales y antropogénicas de metales.	12
<b>Cuadro 6</b> Movilidad de diversos metales en suelos ácidos y alcalinos.	14
<b>Cuadro 7</b> Contenido normal y valor límite permisible en suelos de algunos metales pesados.	15
<b>Cuadro 8</b> Los diferentes productos del petróleo crudo.	17
<b>Cuadro 9</b> Datos climáticos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.	29
<b>Cuadro 10</b> Principales características de los suelos de la zona de estudio.	34
<b>Cuadro 11</b> Promedio y desviación estándar de las concentraciones de metales en los sitios de estudio en el estado de Tabasco.	53

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> Comportamiento del petróleo en el suelo.	20
<b>Figura 2</b> Los sitios de muestreo de la zona de la Petroquímica La Venta y el Campo Petrolero Blasillo en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	26

<b>Figura 3</b>	Los sitios de muestreo de la zona del Campo Petrolero Cinco Presidentes y Pailebot, el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	27
<b>Figura 4</b>	Las tres unidades de suelo del área de estudio en el estado de Tabasco, México.	31
<b>Figura 5</b>	Valores promedio de pH en muestras de suelo extraídas con agua en las tres unidades de suelo y comparando zonas control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	38
<b>Figura 6</b>	Valores promedio de pH en muestras de suelo extraídas con KCl en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	39
<b>Figura 7</b>	Valores promedio de fósforo disponible en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	40
<b>Figura 8</b>	Valores promedio de nitrógeno total en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zonas contaminadas en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	41
<b>Figura 9</b>	Valores promedio de materia orgánica en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zonas contaminadas en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	41
<b>Figura 10</b>	Valores promedio de la relación C/N en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	42
<b>Figura 11</b>	Valores promedio de la capacidad de intercambio catiónico efectiva en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	43
<b>Figura 12</b>	Valores promedio de sulfatos extractables en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	44
<b>Figura 13</b>	Valores promedio de las concentraciones de cromo en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	45

<b>Figura 14</b>	Valores promedio de las concentraciones de cobre en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	46
<b>Figura 15</b>	Valores promedio de las concentraciones de vanadio en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	47
<b>Figura 16</b>	Valores promedio de las concentraciones de níquel en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	48
<b>Figura 17</b>	Valores promedio de las concentraciones de zinc en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	49
<b>Figura 18</b>	Valores promedio de las concentraciones de plomo en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	50
<b>Figura 19</b>	Valores promedio de las concentraciones de cadmio en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	51

## INDICE DE ANEXOS

	<b>Página</b>
<b>Anexo 1</b> Actividades petroleras con sus diferentes fuentes emisoras y contaminantes generados en ellas.	61
<b>Anexo 2</b> Características químicas de muestras compuestas en la profundidad de 0-15 cm en suelos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	62
<b>Anexo 3</b> Contenidos de metales pesados totales de muestras compuestas en la profundidad de 0-15 cm en suelos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.	63
<b>Anexo 4</b> Contenido de metales pesados por diferentes autores y campos petroleros en el estado de Tabasco.	64

## RESUMEN

En el presente trabajo se llevó a cabo la evaluación de tres unidades de suelo (Gleysol, Histosol y Regosol) contaminados por derrames de petróleo. Para realizar este trabajo se llevó a cabo la caracterización física y química de estas tres unidades de suelo, obteniendo datos relacionados al potencial de hidrógeno, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), el contenido de fósforo disponible (método Bray I), contenido de nitrógeno total y de sulfatos extractables. Se cuantificaron los contenidos de metales pesados totales Ni, V, Cu, Cr, Cd, Pb y Zn mediante el uso de la espectrofotometría de absorción atómica.

Como resultado de las características físicas más importantes en las unidades de suelo fueron: en Histosol son más ácidos (4.55 a 6.25), tienen mayor cantidad de materia orgánica (2.40 a 90.00%) y la CICE es intermedia (3.60 a 39.31 meq/100g). Los de tipo Gleysol son menos ácidos (5.00 a 7.45), la CICE es alta (21.46 a 47.32 meq/100g) e intermedios en la cantidad de materia orgánica (29.80 a 44.40%). En el tipo Regosol son ligeramente ácidos (5.16 a 6.67), la CICE es baja (1.70 a 30.48 meq/100g) y pobres en materia orgánica (0.30 a 1.90%). Por otro lado, los metales pesados en los suelos de La Venta (zona contaminada) tienen los mayores contenidos en Cr, Cu, Cd, Zn y Pb, de manera particular el V y Ni, con respecto a los de la zona control. La mayoría de ellos se encuentran por debajo de los límites permisibles, también, los contenidos de metales son menores que los reportados por otros autores. A excepción de los Gleysoles de La Venta, donde si rebasan ligeramente los contenidos normales establecidos para vanadio y níquel (50-100 y de 5-50, respectivamente). El análisis de las características químicas y el contenido de los metales pesados en las tres unidades de suelo permite concluir que las descargas de petróleo crudo y aguas congénitas, emitidas por la petroquímica influyen en el aporte no sólo de níquel y vanadio, sino también de otros metales que presentan concentraciones elevadas en esta zona con actividad petrolera. En los suelos de tipo Histosol se puede esperar una mayor biodisponibilidad ya que muchos de los metales son relativamente más móviles bajo condiciones de acidez.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Se considera contaminación a la presencia en el ambiente de uno o más sustancias y/o elementos o combinaciones de ellos que perjudiquen o provoquen alteraciones a la salud humana, o a la flora o fauna, o degraden la calidad de los recursos naturales (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1993). Un grupo de estos contaminantes que impacta y provoca serios problemas es el de los metales pesados. Los metales pesados son elementos que tienen una densidad superior a los 5 g/cm<sup>3</sup> (Barceló, 1989).

El petróleo crudo está formado en un 90% por hidrocarburos (identificándose más de 600 compuestos de hidrocarburos). También se hallan pequeñas cantidades de compuestos heterocíclicos con núcleos de nitrógeno (0 al 0.5%), oxígeno (0 al 3.5%) y azufre (0 al 6%) y también algunos metales pesados, como V, Ni, Fe, Al, Cu, Co y U. El contenido de metales pesados en los diferentes tipos de petróleo de México y de algunas regiones del mundo varía considerablemente como se muestra en el Cuadro 1. Por ejemplo, el petróleo Crudo Mexicano Cantarell contiene en comparación con todos los demás crudos una concentración mayor de vanadio (excepto el de South Louisiana, E.U.) (Spiro, 1996; Stephen, 1991; Paasivirta, 1991; Freedman, 1989; PEMEX, 1986).

El estado de Tabasco es una de las entidades que mayor volumen de petróleo produce a nivel nacional. En la década de los 70's se registró un incremento considerable en las labores de exploración y explotación de hidrocarburos debido al descubrimiento de los yacimientos del Mesozoico. La explotación del petróleo ha traído beneficios económicos y sociales, pero también problemas de contaminación. La depositación o el derrame accidental de los diversos productos generados a partir del petróleo, pueden influir negativamente en la calidad de los suelos.

La contaminación de los suelos es considerada como la introducción de diferentes sustancias tóxicas, que una vez en ellos, degradan su fertilidad, ya que alteran sus características físicas, químicas o biológicas. Las propiedades que condicionan la vulnerabilidad de los suelos frente a la contaminación son la textura, permeabilidad,

porosidad, dinámica del agua, pH, capacidad de intercambio iónico, potencial redox, sales, mineralogía de arcillas, materia orgánica, microorganismos y nutrientes.

**Cuadro 1.** Contenidos de vanadio y níquel en los diferentes tipos de petróleo mexicano y en diferentes regiones del mundo.

Tipos de Petróleo	Metales Pesados	
	V ( mg kg <sup>-1</sup> )	Ni
<b>Mexicanos</b>		
Crudo Cantarell	288 - 295	42 - 50
Crudo Maya	288.0	59.0
Tipo Minatitlán	35.0	10.0
Petróleo Cretácico	17.0	2.0
<b>Diferentes Regiones del Mundo</b>		
South Louisiana ( E.U.)	1.90	2.20
Prudhoe Bay ( Alaska )	20.0	10.0
Kuwait	28.0	7.70
Gach Saran, Irán	148.0	49.0

Fuente: Cruz, 1979; Freedman;1989; Paasivirta, 1991.

Las principales fuentes de contaminación de la industria petrolera que afectan al suelo son: lodos de perforación, "tiraderos" de desechos semisólidos, sitios contaminados por descargas de petroquímicas y refinerías, suelo contaminado por derrames de hidrocarburos en tuberías corroídas y aguas congénitas. Los *tiraderos* son áreas de suelo que se utilizan para vertir, depositar o acumular los desechos ó residuos del petróleo, generados principalmente por la perforación de pozos (Adams,1999). Las aguas congénitas son agua salada contenida en condiciones naturales en algunos yacimientos. Representan uno de los contaminantes más importantes que originan ataques corrosivos a líneas y equipos al formar compuestos ácidos producto de su hidrólisis. Las sales de sodio representan el 75% de las sales totales, las de magnesio el 15% y las del calcio el 10% en promedio<sup>1</sup>. Las aguas congénitas también pueden contener metales pesados.

El procesamiento de gas natural y su separación del petróleo crudo pueden generar emisiones de gases tóxicos a la atmósfera, principalmente de SO<sub>2</sub>, que generalmente se

<sup>1</sup> (<http://www.imiq.org/leon99/memorias/trabajos/Jt8/jt8-4.htm>) 27/02/2002.

emite en los quemadores de los pozos o baterías (Anexo 1). El  $\text{SO}_2$  se oxida en la atmósfera a través de diferentes reacciones para formar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  o también pueden sufrir este proceso de oxidación sobre la superficie del suelo. Los derrames de petróleo pueden deberse al descontrol de un pozo que está en perforación, a la extracción, conducción, separación, o ruptura de ductos transportadores, ver Anexo 1 (PEMEX, 1986; Tudela, 1989; García, 1994).

La presente investigación se planteó con el objetivo de evaluar el impacto de derrames de petróleo, con respecto a la contaminación con metales pesados en tres diferentes unidades de suelo en el Distrito de Agua Dulce (hoy día, llamado Activo Cinco Presidentes), Tabasco.



## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL.**

Diagnosticar el impacto de derrames de petróleo con respecto a su aporte de metales pesados a los suelos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### **2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.**

Cuantificar los contenidos de metales pesados totales (Cu, Cr, Ni, Cd, Pb, V y Zn) en las tres unidades de suelo de la zona de estudio Gleysol, Histosol y Regosol en áreas con y sin influencia de actividades petroleras.

Comparar los contenidos de metales pesados de los suelos con límites permisibles de referencia, con contenidos normales reportados para suelos y derivados de sitios de muestreo en zonas control sin contaminación evidente.

Determinar algunas características físicas y químicas de las tres unidades de suelo a una profundidad de 0.15 cm en la zona del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### **3. HIPOTESIS**

El desarrollo de las diferentes actividades de la industria petrolera afectan negativamente al entorno físico y ocasionan problemas ecológicos. Particularmente los derrames de petróleo contaminan al suelo con metales pesados, principalmente V y Ni. Las concentraciones acumuladas dependerán de la cantidad de petróleo derramado y de las características del suelo circundantes.

## 4. FUNDAMENTO TEÓRICO.

### 4.1 EL SUELO

El suelo es un sistema biogeoquímico complejo, heterogéneo, abierto y dinámico que cambia con el tiempo y en el espacio ya que continuamente intercambia materia y energía con el medio. El suelo es uno de los componentes de la biosfera en él se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos, de tal forma que cualquier alteración en sus características se ve reflejada en dicho sistema. El suelo es frágil, su proceso de formación es largo, tarda desde cientos a miles de años en formarse, es de difícil y larga recuperación, por lo que es considerado un recurso natural no renovable (Alloway, 1993; Pierzynski, 1993).

#### 4.1.1 Fases del suelo.

El suelo está compuesto por tres fases las cuales están en contacto entre sí y son:

- **Sólida.** Formada por arcillas minerales, óxidos de hierro y aluminio, sales, materia orgánica en diferentes estados de descomposición, así como también de rocas intemperizadas que consisten de minerales primarios (cuarzo, muscovita, biotita, olivino, etc.) y secundarios (calcita, dolomita, vermiculita, hematita, etcétera).

- **Líquida.** Esta fase también es llamada *solución del suelo*, formada por agua, iones disueltos procedentes de otras fases y compuestos orgánicos solubles. La concentración de iones en dicha solución es determinada por los procesos de oxidación, reducción, adsorción, precipitación y desorción.

- **Gaseosa.** Conjuntamente, las fases líquida y gaseosa, ocupan los espacios libres y se hallan en constante cambio. Los gases son de diversa composición el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$ . La concentración de  $\text{CO}_2$  es más alta en esta fase del suelo que la de la atmósfera (Alloway, 1993; Fergusson, 1990; Thornton, 1983; Lindsay, 1979).

#### 4.1.2 Factores formadores del suelo.

Las principales propiedades que determinan el comportamiento de los metales y su

distribución en el suelo son el resultado de la interacción de los factores formadores del suelo:

**Material Parental.** Se refiere a la composición y la naturaleza de la roca, de la cual se han desarrollado los suelos determinando el contenido de minerales y materiales orgánicos que son física, química y biológicamente intemperizados para formar a los suelos. El material parental se clasifica como: **transportado** (puede ser acarreado por viento o agua) o **residual** (formado por el intemperismo de rocas confinadas a las que se clasifica como ígneas, metamórficas o sedimentarias).

**Relieve.** Las variables más importantes que describen al relieve son el ángulo de inclinación, la longitud de la pendiente y la elevación respecto al nivel medio del mar. Estas variables influyen en el escurrimiento y en las condiciones de drenaje. El relieve controla principalmente:

- a) la velocidad del escurrimiento superficial de la precipitación, y por lo tanto la proporción de humedad infiltrada en el suelo y hasta la roca parental,
- b) la velocidad de drenaje subsuperficial, y por lo tanto la velocidad de filtración de los componentes solubles,
- c) la velocidad de erosión de los productos del intemperismo que lleva a la exposición de la roca fresca en la superficie.

**Clima.** Tiene un efecto directo e indirecto sobre la formación del suelo, controlando tipos de procesos y su intensidad. La precipitación y la temperatura son las dos principales variables del clima que influyen en la formación del suelo; varían con la elevación y la latitud y determinan el tipo de vegetación y la cantidad de biomasa superficial, así como la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo. La precipitación controla la cantidad de agua que entra al suelo y ésta es el principal agente en el intemperismo químico. También es esencial para las reacciones de oxidación y reducción. La temperatura determina la evaporación y la congelación.

**Actividad Biológica (organismos).** También llamado "*intemperismo biológico*", la actividad biológica es importante en los procesos de intemperismo, es generalmente restringida a la superficie del suelo. Las plantas, animales y microorganismos son considerados parte de los

organismos que intervienen en la formación del suelo y los productos formados por estos procesos interactúan con los materiales de la roca (Fergusson, 1990; Levison, 1989; Thornton, 1983).

#### **4.1.3 Funciones del suelo.**

El suelo actúa como barrera protectora de otros medios más sensibles, como los hidrológicos y los biológicos. La mayoría de los suelos presentan una capacidad de depuración y ésta tiene un límite, la cual es diferente para cada unidad de suelo y también para cada situación en la que ellos estén involucrados. Los suelos son parte del ecosistema y tienen diferentes funciones importantes entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Sustentan la vida vegetal y animal; las plantas obtienen soporte mecánico del suelo, y el suelo constituye el habitat de muchos organismos.
- Proporcionan los nutrientes esenciales para la planta macronutrientes y micronutrientes.
- Funcionan como un sumidero para los contaminantes orgánicos e inorgánicos; debido a los procesos de adsorción que aglutinan a dichos contaminantes.
- Con relación al transporte y remoción de los contaminantes tienen funciones de filtración, actúan como un amortiguador y transformador en el sistema.
- Constituyen un importante regulador biogeoquímico de los flujos de sustancias dentro y fuera del ecosistema, y también como un regulador del balance hídrico en las cuencas hidrológicas.
- Los suelos albergan una gran biodiversidad de microorganismos localizados dentro y encima de ellos (Snakin, 1996; Alloway, 1993; Connel y Miller, 1984).

#### **4.2 METALES PESADOS**

Los procesos de intemperismo químico, siendo procesos naturales, liberan los elementos contenidos en la corteza terrestre (litósfera) hacia los demás compartimentos del ambiente (pedósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera). El transporte y transformación de estos elementos, incluyendo los metales y sus sales, generalmente involucran procesos cíclicos geoquímicos y biológicos.

La civilización moderna utiliza un gran número de metales para varios aspectos de la vida diaria y los introduce a través de sus diferentes actividades (deposición de residuos industriales, quema de combustible fósil, explotación de minerales, la agricultura, aplicación de fertilizantes, etc.) al ambiente, modificando los ciclos biogeoquímicos de los metales. Estas modificaciones se dan por dos formas: la alteración en la proporción con la cual los metales son transportados entre los diferentes compartimentos del ambiente y por la modificación de la forma química en la que se encuentran en ellos (McEldowney, 1993; Stewart, 1989). Los 108 elementos que existen hoy en día, se han clasificado en: metales (84), no metales (17) y metaloides (7) (Cuadro 2). Los metales son definidos como cualquier elemento que tiene un lustre, es un buen conductor del calor y la electricidad, y presentan una densidad, maleabilidad y ductibilidad alta. Se han utilizado muchos términos para describir a los metales: traza, de transición, micronutrientes, tóxicos y metales pesados. Los metales pesados tienen una densidad real mayor a 5 g/cm<sup>3</sup> (Barceló, 1989).

**Cuadro 2.** Clasificación de los principales grupos de elementos en metales, no-metales y metaloides.

<b>Metales</b>		<b>Metaloides</b>			<b>No-Metales</b>			
1	2	12	13	14	15	16	17	18
Li	Be		B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg		Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Fuente: Merian, 1991.

Todos los suelos naturalmente contienen metales, los cuales están presentes en ellos:

- a) como parte de la estructura de minerales primarios o secundarios,
- b) precipitados con otros compuestos del suelo,
- c) adsorbidos a los sitios de intercambio: óxidos de metal o hidróxidos, minerales arcillosos y materia orgánica que puede servir como intercambiador,
- d) disueltos en la solución del suelo, en forma iónica o de complejos solubles con ligandos orgánicos e inorgánicos,
- e) embebidos en microorganismos, plantas o animales.

Sin embargo, la presencia de metales no es indicativa de contaminación. La concentración de metales en suelos no contaminados está relacionada principalmente con el tipo de material parental del cual los suelos fueron formados (Boulding, 1996; Merian, 1991). La mayoría de los metales que se encuentran en los sistemas biológicos, están ubicados en la familia de los de transición de la tabla periódica (sólidos y líquidos), tienen propiedades en común, no todos son altamente tóxicos y algunos son necesarios.

Por ejemplo, como se indica en el Cuadro 3 algunos de estos metales son considerados muy tóxicos y relativamente solubles: Mercurio, Plomo y Cadmio (Botello y Paéz, 1986). La Agencia para la Protección Ambiental (EPA), definió como metales peligrosos al Berilio y Mercurio, ya que una ligera exposición puede causar daños a la salud humana; otros metales son considerados como potencialmente peligrosos y deben de mantenerse bajo control, son: Bario, Cadmio, Cobre, Plomo, Manganeso, Niquel, Estaño, Vanadio y Zinc.

**Cuadro 3. Metales considerados muy tóxicos en plantas o animales, relativamente solubles y los esenciales.**

<b>No críticos</b>	Na C F K P Li Mg Fe Rb
	Ca S Sr H Cl Al O Br Si N
<b>Esenciales</b>	Co Cu Fe Mn Mo Ni Zn
<b>Tóxicos pero muy insolubles y raros</b>	Ti Ga Hf La Zr Os W
	Rh Nd Ir Ta Ru Re Ba
<b>Muy tóxicos y relativamente solubles.</b>	Be As Au Co Se Hg Ni Te Ti
	Cu Pd Pb Zn Ag Sb Sn Cd Bi
<b>Contaminantes vegetal/animal</b>	Ag Bi Cd Cr Hg La Pb Ni Ti Th Sn U W Z

Fuente: Botello y Paéz, 1986; Davis, 1980.

#### 4.2.1 Fuentes de metales pesados en suelo.

Los metales pesados entran al suelo por dos tipos de fuentes, ya sea por procesos naturales o a través de actividades antrópicas. El conjunto de las actividades antrópicas pueden alterar a los suelos e incrementar el nivel de metales tóxicos en ellos, lo que a su vez aumenta la cantidad de metales absorbidos por las plantas y su transferencia hacia la cadena alimenticia.

##### Fuentes Naturales.

Son aportaciones naturales que provienen de las emisiones volcánicas, erosión e

intemperización de rocas y la mineralización del material parental del suelo. Las primeras son las principales fuentes de depositación atmosférica. El intemperismo de rocas metalíferas (Ígneas y metamórficas) son una de las aportaciones naturales que contienen altas concentraciones de metales (Freedman, 1989).

#### **Fuentes Antropogénicas.**

Una fuente importante de metales al ambiente son algunas actividades realizadas por el hombre. Estas actividades son diversas y provocan efectos tanto a corto como a largo plazo. La composición, las cantidades y las formas de estos suministros varían mucho.

Las principales fuentes antrópicas de metales para los suelos se describen a continuación:

**Actividades Industriales:** Entre ellas figura la industria química, el suministro de gas y electricidad, la extracción y refinación de productos del petróleo (quema de combustibles fósiles, carbón y petróleo, los metales pesados liberados al ambiente pueden ser: Pb, Cd, Cr, Zn, As, Sb, Se, Ba, Cu, Mn, U y V, estaciones de servicio, fundidoras, curtidoras, astilleros, depósitos residuales. Las diversas actividades industriales son fuentes potenciales de metales a los suelos (Cuadro 4). Las fuentes antropogénicas puede ser 100 veces mayor que el de las fuentes naturales (Freedman, 1989).

**Actividades mineras:** La exploración y explotación de yacimientos minerales los expone a la superficie terrestre. Por su naturaleza involucra la remoción, extracción, procesamiento, eliminación y disposición que genera grandes volúmenes de rocas y residuos (jales), que son depositados directamente en los suelos donde se acelera su intemperización. La exposición de la pirita y otros minerales de sulfuro al oxígeno y humedad atmosféricas provoca su oxidación y la formación de ácidos, generando el llamado " drenaje o lixiviado de mina ácido (ADM) ", el cual involucra metales como As, Pb, Zn, Fe, Cu, Ni y Co en cantidades relativamente altas.

**Actividades agrícolas:** Diversas prácticas agrícolas son una importante fuente no-puntual de metales y contribuyen en forma importante en su concentración total en los suelos. Entre ellas figuran lo siguientes:

Aplicación de fertilizantes: Cd, Cr, Mo, Pb, U, V y Zn.

Aplicación de plaguicidas: Pb, As, Hg, Br, Cu, F, Mn, V y Zn.



Aplicación de lodos residuales: especialmente Cd, Ni, Cu, Pb y Zn.

**Cuadro 4.** Metales generados por diversas actividades industriales.

Industria	Cu	Cr	Ni	Cd	Pb	Zn
Papel	x	x	x		x	x
Fertilizantes	x	x	x	x	x	x
Químicas		x		x	x	x
Refinería del petróleo	x	x	x	x	x	x
Fundidoras de acero	x	x	x	x	x	x
Petroquímica y productos		x		x	x	x
Automotriz	x	x	x	x		x
Termoeléctricas	x	x	x	x		x
Textil y curtidoras.		x				

Fuente: Klein and Russel, 1973; Dean *et al.*, 1972.

**Actividades urbanas y domésticas:** Disposición de sólidos y sedimentos residuales, empleo de sedimentos y cultivos, descargas de motores de vehículos, uso de productos químicos. Cualquiera de estos metales son emitidos al ambiente y pueden interactuar, transportarse e infiltrarse, contaminando a los suelos. De esta manera se transfieren a los diversos compartimentos ambientales de los ecosistemas y también al hombre (Alloway, 1990; Connell y Miller 1984). Elevadas concentraciones de muchos de los metales pesados en suelos pueden tener origen natural o antropogénico (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Fuentes naturales y antropogénicas de metales.

Fuente		
Natural	Antropogénica	
	Puntual	Difusa
Intemperismo	Aguas Residuales	Emissiones de tránsito de automotores
Emisión volcánica	Minería, fundidoras	Fertilizantes
	Emisiones de industrias y fundidoras	Plaguicidas
	Termoeléctricas	Irrigación

Fuente: Thornton, 1983.

La entrada de metales a los suelos por ambos orígenes puede ocurrir a distancias considerables, clasificándose de la siguiente manera:

**Fuente Puntual.** Son aquellas fuentes de punto de descarga que están bien identificadas o localizadas y se señalan como un claro punto de contaminación. Por ejemplo, la contaminación por metales en la vecindad de fundidoras que causan daños a los ecosistemas acuáticos y terrestres.

**Fuente Difusa.** Son muchas fuentes de punto simple de descarga, dispersas o difusas, de distribución irregular no identificables; por ejemplo, las actividades agrícolas son fuentes difusas.

#### 4.2.2 Comportamiento de metales en suelo.

La movilidad, actividad, solubilidad y biodisponibilidad de los metales en los suelos está influenciada por sus características, como: pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica, competencia con otros iones de metales, ligadura con aniones (Ross, 1994; Merian, 1991). Los principales procesos asociados con la liberación y movilidad de metales en suelos son:

- intemperismo del material parental *in situ*,
- disolución de minerales y complejos, acompañados por precipitación y co-precipitación de especies inorgánicas insolubles, tales como carbonatos y sulfuros,
- absorción por raíces de plantas e inmovilización por organismos del suelo,
- intercambio sobre sitios de interacción de cationes de arcillas o materia orgánica del suelo,
- quimioadsorción específica y adsorción/desorción sobre óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso,
- quelación y complejación por diferentes fracciones de materia orgánica del suelo,
- filtración de iones móviles y quelatos organometálicos solubles.

El pH es uno de los parámetros más importantes que influyen en la adsorción de los metales, ya que pequeños cambios de pH, pueden incrementar o disminuir la concentración de metal soluble. A pH bajo se encuentran preferentemente en forma iónica, a pH neutro predominan carbonatos (Salomons, 1994; Margalef, 1983). Según Fuller (1977) muchos de los metales son relativamente más móviles bajo condiciones de acidez (Cuadro 6) y de reducción. La capacidad del suelo para inmovilizar a los metales se incrementa con el aumento del pH a condiciones ligeramente alcalinas.

**Cuadro 6.** Movilidad de diversos metales en suelos ácidos y alcalinos.

<b>Suelos ácidos</b> ( pH 4.2 a 6.6 )	Cd, Hg, Ni, Zn. As, Be, Cr. Cu, Pb, Se.	Relativamente móviles. Moderadamente móviles. Baja movilidad.
<b>Suelos alcalinos</b> ( pH 6.7 a 8.8 )	As, Cr. Be, Cd, Hg, Zn. Co, Pb, Ni.	Relativamente móviles. Moderadamente móviles. Baja movilidad.

Fuente: Fuller, 1977.

Los metales potencialmente tóxicos pueden estar en forma de cloruros, sulfuros, carbonatos, hidruros o formando combinaciones con compuestos queladores orgánicos. Cuando el pH es bajo se encuentran preferentemente en forma iónica, a pH neutro suelen predominar en forma de carbonatos y a pH altos normalmente existen hidróxidos (Margalef, 1983). Otros factores que influyen sobre el comportamiento de los metales son la presencia de otros elementos; por ejemplo, el calcio en altas concentraciones puede disminuir la disponibilidad de varios metales. Los suelos orgánicos y los arcillosos inmovilizan parcialmente los metales, y la acidez frecuentemente aumenta la solubilidad y la toxicidad; la presencia de dos o más metales puede ocasionar sinergismo. Las arcillas minerales, los óxidos de metal hidratado y la materia orgánica son considerados los grupos más importantes que determinan la sorción de los metales en los suelos (Alloway, 1990).

#### 4.2.3 Efecto de metales en suelo.

El contenido total de metales de un suelo es el resultado de las entradas de metales de origen natural y antropogénico: material parental, depositación atmosférica, fertilizantes, agroquímicos, residuos orgánicos e inorgánicos, filtración y volatilización. Los efectos de la contaminación del suelo por metales son evaluados, por ejemplo, por sus impactos sobre plantas y organismos del suelo. Las plantas requieren algunos de los metales para su crecimiento (Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, Co, Na, B, y posiblemente V) en cantidades traza, pero son sensibles a altas concentraciones (Stewart, 1990). Los metales pueden movilizarse en el suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas y si éstas son extraídas para usos domésticos o agrícolas pueden afectar a plantas, animales y seres humanos. A diferencia de la contaminación del aire y del agua; la del suelo, puede ser un proceso irreversible, especialmente si es por metales pesados, dado que la completa remoción de éstos es casi

imposible (Gutiérrez, 1990).

#### 4.2.4 Contenidos normales y límites permisibles de metales en suelo.

Kabata-Pendias y Pendias (op, cit.) indicó que los niveles de tolerancia permisibles de un metal pesado dependen de los siguientes criterios:

- contenido inicial en el suelo,
- cantidad total de un solo elemento y de todos los metales pesados,
- umbral de toxicidad de metales pesados.

Algunos metales pesados son principalmente reconocidos como altamente tóxicos y peligrosos. Se tienden a acumular en el suelo y no pueden degradarse biológica ni químicamente en la naturaleza. Para evaluar su peligrosidad debe de tomarse en cuenta su origen, la forma química en la que se encuentran en el ambiente, la concentración del metal y la duración del período de la exposición (Bohn, 1993; Ross, 1994). Organizaciones internacionales como la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre otras, son responsables de vigilar la ejecución y cumplimiento de las leyes federales promulgadas para la protección del ambiente. También proponen criterios respecto a establecer la normatividad para las dosis máximas permisibles de los diferentes contaminantes. El Cuadro 7 muestra los valores límites permisibles en suelos.

**Cuadro 7.** Contenido normal y valor límite permisible en suelos de algunos metales pesados.

Metal	Contenido Normal	Concentración Crítica (mgkg <sup>-1</sup> )	Límites Permisibles Comunidad Europea *
Cu	2 - 40 <sup>a</sup>		50 - 140 <sup>c</sup>
Cr	5 - 100 <sup>a</sup>		100 - 200 <sup>c</sup>
Ni	5 - 50 <sup>a</sup>		30 - 75 <sup>c</sup>
Cd	< 0.5 <sup>a</sup>		1 - 3 <sup>c</sup>
Pb	2 - 60 <sup>a</sup>		50 - 300 <sup>c</sup>
V	0 - 50 <sup>b</sup>	50 - 100 <sup>b</sup>	
Zn	10 - 80 <sup>a</sup>		150 - 300 <sup>c</sup>

Fuente: LFU, 1989<sup>a</sup>; Kabata-Pendias, 1984<sup>b</sup>; Zartner-Nyilas, 2002<sup>c</sup>.

**Nota \*:** Los límites deben bajarse a pH de suelo menores de 6.0. Se permite sobrepasar los límites en un 10%.

En la actualidad pueden distinguirse estrategias básicas para establecer los límites para metales (McGrath, 1994).

- Un análisis de las rutas de transferencia de contaminación hacia los organismos blanco seleccionados, y una evaluación de los efectos dañinos probables que los metales pueden tener sobre los blancos.
- El establecimiento de límites consistentes con las concentraciones más bajas que tengan efectos adversos observados.

Albert (op. cit.) indicó que los efectos adversos de las sustancias ocurren cuando éstas no pueden eliminarse fácilmente del sistema y exceden el nivel basal, o bien por que sólo pasan sin cambio de un sistema a otro, lo que da como resultado acumulaciones excesivas en un punto final. Con relación a la salud humana, el incremento de la contaminación de los metales pesados en suelos conduce al establecimiento de pautas para la protección de poblaciones presentes y futuras para los efectos adversos que provocan dichos metales.

### 4.3 PETRÓLEO.

La palabra petróleo es una castellanización del latín *petra* "roca", y *oleum* "aceite"; que significa, "*aceite de roca*". El petróleo se formó a partir de restos orgánicos depositados originalmente en un ambiente marino sedimentario, los cuales se transformaron durante largos períodos de tiempo geológico, por reacciones complejas que ocurren bajo condiciones de alta presión y temperaturas extremas. Es un importante recurso natural no renovable, dado que es la principal fuente de energía en la actualidad. Además es materia prima de numerosos productos de la industria química. El petróleo es químicamente complejo y puede estar compuesto de cientos de especies de moléculas, ver cuadro 8 (Freedman, 1993; Doménech, 1994). El petróleo es un líquido de olor fuerte, aspecto aceitoso de color variable que va de incoloro a negro, su densidad es menor a 1 g/cm<sup>3</sup>, es insoluble en agua y varía en composición en las diferentes partes del mundo<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> (<http://www..energia.gob.mx/energia/petroleo.htm>) 2/03/2002.

**4.3.1 Características y composición del petróleo.**

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos; éstos son compuestos orgánico. Cuantitativamente los más importantes constituyentes del petróleo, son los átomos de carbono e hidrógeno. El número de átomos de carbono y la forma en que están colocados dentro de las moléculas de los diferentes compuestos proporciona al petróleo diferentes propiedades físicas y químicas; así se tiene que los hidrocarburos compuestos por uno a cuatro átomos de carbono son gaseosos, los que contienen de 5 a 20 son líquidos, y los de más de 20 son sólidos a temperatura ambiente<sup>3</sup>.

**Cuadro 8. Los diferentes productos del petróleo crudo.**

Producto	Número de átomos de carbono en la molécula	Temperaturas de ebullición (°C)	Usos
Gas	1 - 4	20	Gas combustible, negro de humo.
Gasolina	4 - 12	20 - 190	Combustible para motores.
Nafta	7 - 12	52 - 205	Solventes.
Kerosina	12 - 15	190 - 260	Combustible para tractores, motores diesel, calefacción y tinta de imprenta.
Diesel	14 - 18	260 - 360	Combustible diesel, aceite combustible.
Combustóleo	15 - 18	205 - 309	Combustible para calderas, motores diesel.
Aceite lubricante	16 - 20	> 345	Lubricación, grasas y ceras.
Petrolato	18 - 22	> 345	Lubricación, ungüentos.
Parafina	20 - 34	Se funde 52 - 55	Impermeabilizantes.
Asfalto	> 40	> 560	Telas, revestimiento de caminos, techados.

Fuente: Fetter, 1999; Doménech, 1994.

Los hidrocarburos que son más solubles en agua son menos tóxicos, mientras que los menos solubles son los más tóxicos. Los hidrocarburos del petróleo se agrupan en tres categorías, cada una con varias subclases, según su punto de ebullición y complejidad estructural y son: alifáticos, alicíclicos y aromáticos. La mayoría de ellos no pueden ser biosintetizados por los organismos y juegan un papel importante como contaminantes, ya que son relativamente estables en el medio ambiente natural y con frecuencia se acumulan

<sup>3</sup> (<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/072/htm/sec6.htm>) 05/03/2002.

en las comunidades biológicas y los ecosistemas. Son considerados peligrosos por su larga permanencia en el ambiente y porque pueden ser absorbidos, trasladarse, y acumularse en vegetales; también por su poder mutagénico, carcinogénico y teratogénico en animales y el hombre. Los hidrocarburos aromáticos son especialmente peligrosos a este respecto (Botello 1996; Connell y Miller, 1984; Duffus, 1983).

El petróleo se clasifica en *crudo* o *refinado*; ambos varían en sus propiedades físicas:

- su solubilidad en el medio acuoso,
- pueden ser separados en fracciones de acuerdo a su punto de ebullición,
- su coeficiente de difusión en el aire,
- su presión de vapor y,
- composición química.

**Petróleo Crudo:** Es la porción del petróleo que existe en la fase líquida en yacimientos naturales bajo tierra y la que permanece líquida bajo ciertas condiciones atmosféricas de presión y temperatura. En la industria petrolera en general existen dos tipos de crudo: ligero y pesado. En México, se considera al *petróleo crudo pesado*, a aquel cuya densidad es igual o inferior a 27° API (siglas del American Petroleum Institute). La mayor parte de la producción de este tipo de petróleo proviene de los yacimientos de la Sonda de Campeche. El *petróleo crudo ligero* es aquel cuya densidad es superior a 27° API; se produce tanto en la Sonda de Campeche como en otros yacimientos en explotación del país<sup>4</sup>.

En México se cuenta con ambos tipos de crudo y desde 1988 se han encontrado yacimientos de crudo muy ligero, al que se le ha denominado crudo Olmeca. Desde 1992 existen para el mercado de exportación, las tres variedades de petróleo crudo con las siguientes calidades típicas y las cifras alcanzadas de los 7400 millones de dólares:

- **Istmo.** Petróleo crudo ligero con densidad de 33.6° API, 1.3% de azufre en peso.
- **Maya.** Petróleo crudo pesado con densidad de 22° API, 3.3% de azufre en peso.
- **Olmeca.** Petróleo crudo muy ligero con densidad de 39.3° API, 0.8% de azufre en peso<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> (<http://www.iespaña.es/umbrella/ArchivosR/petroleo2.txt>) 05/02/2002.

<sup>5</sup> (<http://www.energia.gob.mx/energi/petroleo.htm>) 2/03/2002.

**Petróleo Refinado.** Son las fracciones que se obtienen al calentar el petróleo crudo y depende de la naturaleza del proceso de refinación.

Los contaminantes orgánicos, al ser alterados químicamente pierden con frecuencia su capacidad tóxica o la modifican. El petróleo crudo y sus productos de refinación empiezan a sufrir cambios en su composición al ser expuestos al aire, agua o a la luz solar.

#### **4.3.2 Comportamiento y destino del petróleo en suelo.**

El comportamiento físico y químico del petróleo derramado depende de las características del suelo, como: su textura y porosidad, la permeabilidad, el área superficial, el contenido de materia orgánica y su capacidad de intercambio iónico (Doménech, 1994). El derrame de petróleo crudo en el suelo puede ser accidental o intencional; por lo general, ocurre en forma puntual.

Doménech (1994) menciona que el petróleo crudo se desplaza en las capas inferiores del suelo por tres mecanismos:

- por ***difusión*** hacia zonas de más baja concentración,
- por ***advección*** hacia zonas de menor presión de vapor,
- por ***dispersión*** mecánica.

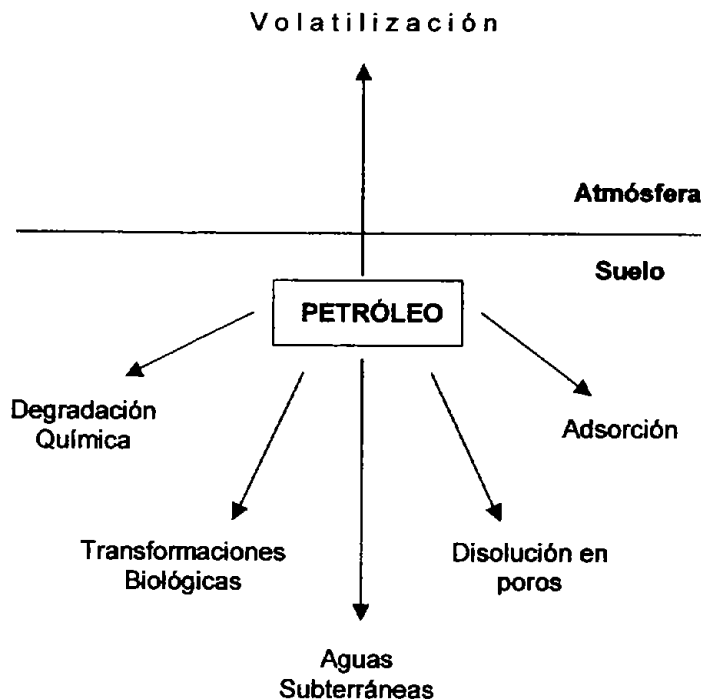
A través de estos mecanismos de desplazamiento los componentes del petróleo se volatilizan y escapan a la atmósfera, se adsorben en la fase sólida de los horizontes más superficiales del suelo y se disuelven en la solución del suelo. Por otra parte, si la densidad del componente orgánico es inferior a la del agua, pueden flotar en las aguas subterráneas. Por último, con el tiempo, el petróleo se va biodegradando en compuestos más simples y químicamente diferentes. También puede sufrir reacciones químicas abióticas (Figura 1).

Su destino y efectos dependen de las características del ambiente, así como de la concentración y la frecuencia de las descargas. El tiempo de residencia del petróleo en los suelos ha sido poco documentado, pero probablemente depende de condiciones como el tipo de sustrato, la disponibilidad de oxígeno, la temperatura y el rompimiento de la superficie.



### 4.3.3 Efectos de los derrames de petróleo en suelo.

De acuerdo a Elias-Murguía (1991), la propiedad física del suelo más afectada por los derrames de petróleo es el deterioro de la estructura del suelo, debido a la ruptura de los agregados.



**Figura 1.** Comportamiento del petróleo en el suelo.

Los componentes del petróleo más importantes que contaminan a los suelos son los hidrocarburos volátiles que se evaporan rápidamente, por la acción del sol y del viento, mientras que los otros se incorporan al suelo. Forman una capa impermeable que impide el flujo normal del agua, afectando las propiedades físicas, antes mencionadas. El porcentaje de evaporación varía de cerca del 10% en los derrames de petróleo de crudos pesados y productos no refinados, hasta más de 75% para crudos ligeros y productos refinados.

Menos del 5% del petróleo crudo y productos refinados (principalmente aromáticos de bajo peso molecular) se disuelven en el agua. Los hidrocarburos pesados penetran más lentamente en los suelos que los livianos. En suelos de texturas gruesas (arenas), el petróleo crudo penetra verticalmente y se distribuye rápidamente lateralmente, mientras que los suelos de texturas finas frenan y detienen la infiltración (Albers, 1995; Toledo, 1982).

Los derrames de petróleo afectan a los organismos que viven en el suelo, ya que deterioran su habitat, alteran el pH, disminuyen el oxígeno y la disponibilidad de alimento y tienen efectos tóxicos en el sistema (interfieren con las funciones de la membrana celular y el sistema enzimático).

## 5. ANTECEDENTES.

### 5.1 Revisión bibliográfica del contenido de metales en suelo del estado de Tabasco (Anexo 4).

En el Campo Petrolero Blasillo Trujillo *et al.* (1995) determinaron contenidos totales de metales pesados, encontrando en la capa superficial de 0 a 30 cm de los suelos, hasta 15 mg kg<sup>-1</sup> de Ni y de 5 a 65 mg kg<sup>-1</sup> de V en Histosoles; de 15 a 150 mg kg<sup>-1</sup> de Ni y de 110 a 160 mg kg<sup>-1</sup> de V en Vertisoles; de 28 a 150 mg kg<sup>-1</sup> de Ni y de 75 a 160 mg kg<sup>-1</sup> de V en Gleysoles; de 67 a 115 de Ni y de 110 a 145 mg kg<sup>-1</sup> de V en Fluvisoles. También evaluaron hidrocarburos aromáticos totales; los resultados obtenidos se encuentran en concentraciones consideradas como medias y altas.

Trujillo, Lagunez y Bocanegra (1995) determinaron contenidos totales de seis metales pesados en siete Campos Petroleros del estado de Tabasco. Los resultados fueron los siguientes: Cr se obtuvieron valores de 51, 15, 13, 51, 19, 32 y 22 mg kg<sup>-1</sup>, Cu de 10, 10, 27, 21, 25, 32 y 20 mg kg<sup>-1</sup>, Ni de 37, 61, 191, 173, 206, 142 y 157 mg kg<sup>-1</sup>, Pb los valores fueron de 16, 20, 11, 36, 15, 90 y 7 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente en Zn de 40, 34, 101, 60, 74, 467, y 74 mg kg<sup>-1</sup> en los campos Castarrical, Chinchorro, El Golpe, Marafión, Mayacaste, Tupilco y Yagual, respectivamente. Los niveles de Ni se consideraron críticos en cinco campos: Golpe, Marafión, Mayacaste, Tupilco y Yagual, con concentraciones de 191, 173, 206, 142 y 157 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. El Zn en los campos petroleros Castarrical, Chinchorro, Marafión, Mayacaste y Yagual no rebasó los contenidos normales para suelos reportados por la literatura, en tanto en el campo El Golpe, sí rebasó los contenidos normales con concentración de 101 mg kg<sup>-1</sup>. Solamente en el campo Tupilco fueron críticos los niveles del zinc con 467 mg kg<sup>-1</sup>.

En el Campo Petrolero Cinco Presidentes, unidad de suelo Regosol y los Campos Petroleros Castarrical y Cunduacán con unidad de suelo Fluvisol, Trujillo, Lagunez y González (1995) evaluaron en muestras compuestas las propiedades físicas y químicas, contenidos totales de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) e hidrocarburos poliaromáticos (PAHs), a una profundidad de 0-30 cm. En la unidad de suelo Regosol se obtuvieron contenidos pobres Fluvisoles de los otros dos campos tuvieron texturas de migajón-arcillo-arenoso y migajón-

arenoso presentando ricos contenidos de materia orgánica y mayor acidez. Los contenidos de los metales analizados no rebasaron los contenidos normales. Respecto a los valores de los PAHs, en el Campo Castarrical (Fluvisol) se encontraron contenidos elevados de benzoderivados con  $1.31 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $4.15$  de fenantreno. En el Campo Cunduacán se encontraron los niveles más bajos y en el Regosol se detectaron concentraciones  $2.00 \text{ mg kg}^{-1}$  de fluoranteno y  $0.85 \text{ mg kg}^{-1}$  de benzoderivados.

Trujillo, Lagunez y Zavala (1995) realizaron un estudio durante el período 1992-1994 para ver la afectación de la industria petrolera por residuos líquidos y de emisiones aéreas en suelos; evaluaron contenidos totales de siete metales pesados: cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo, vanadio y zinc; en cinco unidades de suelo: Fluvisoles, Gleysoles, Vertisoles, Histosoles y Regosoles, de trece campos petroleros del estado de Tabasco. Encontraron concentraciones críticas de *cadmio* en Fluvisoles de Cárdenas con  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  y en Vertisoles de Paredón con  $34 \text{ mg kg}^{-1}$ , *níquel* en Fluvisoles de Blasillo con  $125 \text{ mg kg}^{-1}$ , y en Marañon con  $173 \text{ mg kg}^{-1}$ , en Mayacaste con  $206 \text{ mg kg}^{-1}$ , en Tupilco con  $142 \text{ mg kg}^{-1}$  y Yagual con  $157 \text{ mg kg}^{-1}$ ; en Gleysoles de El Golpe con  $91 \text{ mg kg}^{-1}$  y Samaria con  $213 \text{ mg kg}^{-1}$ , de *plomo* en Fluvisoles de Cárdenas con  $340 \text{ mg kg}^{-1}$ , en Paredón con  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ , de *vanadio* en Fluvisoles de Blasillo con  $160 \text{ mg kg}^{-1}$  y Cárdenas con  $104 \text{ mg kg}^{-1}$ ; la unidad Gleysol de Blasillo con  $160 \text{ mg kg}^{-1}$ , en Paredón con  $204 \text{ mg kg}^{-1}$  y Samaria con  $128 \text{ mg kg}^{-1}$ , y finalmente de *zinc* en Gleysol de Samaria con  $451 \text{ mg kg}^{-1}$ , en Fluvisoles de Tupilco con  $467 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Zavala *et al.* (1995) evaluaron metales pesados (Pb, Cd, V, y Ni) e hidrocarburos aromáticos totales en dos Campos Petroleros (Cárdenas y Paredón) en tres unidades de suelo: Vertisol, Fluvisol y Gleysol. Los resultados fueron: Campo Petrolero Cárdenas con  $340 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb y el Campo Petrolero Paredón con  $240 \text{ mg kg}^{-1}$  de V. La unidad de suelo Vertisol mostró los valores más altos de metales y también de hidrocarburos, particularmente de criseno y fluoranteno.

Lagunez-Espinoza *et al.* (1995) en el municipio de Cunduacán analizaron los metales totales Cu, Cr, Ni, Pb, V y Zn y Al, en dos diferentes tipos de cultivos, maíz (*Zea mays L.*) y pasto egipcio (*Brachiaria mutica*). Hallaron niveles altos de Cu, Cr Zn totales, localizándose la

mayor concentración en suelos sin instalaciones petroleras (lo cual se atribuye a la topografía muy baja e inundable y posibles emisiones aéreas de campos petroleros aledaños). Ambos cultivos presentaron contenidos normales de Al, Cu y Zn y no se detectaron contenidos de Cr, Ni y Pb. Los contenidos de V en los dos cultivos superan el rango crítico de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ , presentando mayor concentración en las áreas sin actividad petrolera. A pesar de ello los cultivos no muestran síntomas de daños.

Gutiérrez y Zavala (2001) evaluaron hidrocarburos totales, alifáticos y aromáticos en el campo petrolero Samaria (localizado en los municipios de Cunduacán y del Centro). Se analizaron ocho perfiles pedológicos, cuatro en la unidad de suelo Gleysol y cuatro en la unidad Fluvisol. Las características en la unidad Fluvisol son de textura media y presentan baja concentración de hidrocarburos totales a pesar de estar sometida a derrames de petróleo. En la unidad Gleysol tiene ligeras a altas concentraciones de hidrocarburos totales, presentan texturas arcillosas, drenaje pobre y son susceptibles a inundaciones. En los tres perfiles de la unidad Gleysol el contenido de hidrocarburos totales variaron entre  $30.76 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $32.21 \text{ mg kg}^{-1}$ , excepto en el sitio dos que fue de  $88.47 \text{ mg kg}^{-1}$ , donde se rebasa el límite considerado como normal para suelos de zonas costeras sujetas a inundaciones (UNESCO, 1976; Botello y Paéz, 1987). En los hidrocarburos alifáticos los contenidos variaron entre  $16.15 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $34.56 \text{ mg kg}^{-1}$ , en los hidrocarburos aromáticos variaron de  $12.74 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $53.91 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial y, según MENVIQ (1993) y Doelman (1994), representan contaminación de ligera a moderada, en el cuarto perfil que fue muestreado como testigo (fuera del campo) los contenidos de hidrocarburos totales, alifáticos y aromáticos fueron de  $22.53 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $16.62 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $6.91 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. La presencia de hidrocarburos, hace suponer que las fuentes pueden ser vía atmosférica, ya que el área esta rodeada por petroquímicas, baterías de separación, deshidratadoras y estaciones de compresión, realizándose en cada una de ellas la quema de gases.

En los perfiles de la unidad Fluvisol su concentración en el suelo es baja de acuerdo con Olan (2000), a pesar de que algunos están cercanos a la fuente de emisión, en los tres primeros perfiles el contenido de hidrocarburos totales variaron entre  $31.73 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $38.84 \text{ mg kg}^{-1}$ , en los hidrocarburos alifáticos los contenidos variaron entre  $24.43 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $29.82$

mg kg<sup>-1</sup>, por último en los hidrocarburos aromáticos fueron entre 2.57 mg kg<sup>-1</sup> y 10.97 mg kg<sup>-1</sup>. El cuarto perfil que fue muestreado como testigo por no tener instalaciones petroleras cercas, presenta hidrocarburos en el suelo; los contenidos de hidrocarburos totales, alifáticos y aromáticos fueron de 74.38 mg kg<sup>-1</sup>, 66.00 mg kg<sup>-1</sup> y 8.38 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

## 6.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.

El área de estudio se localiza en la parte occidental del estado de Tabasco en los Municipios de Huimanguillo y Cárdenas (Figura 2 y 3).

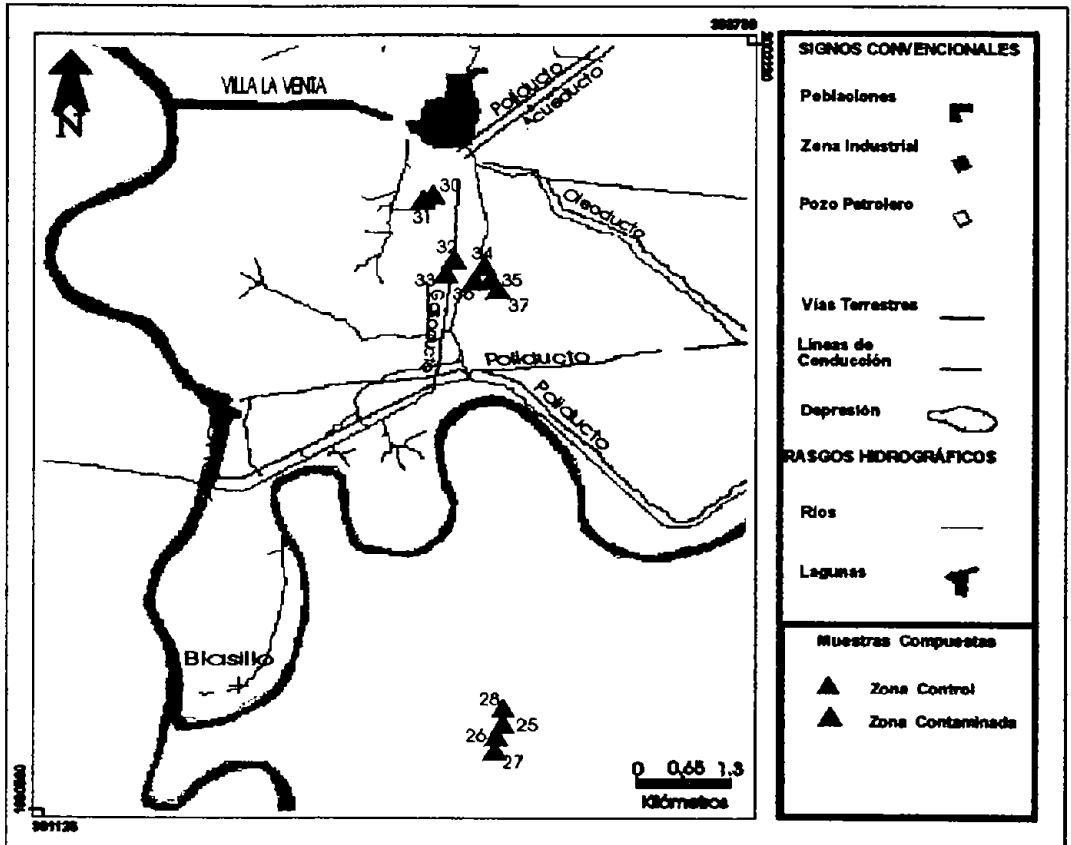


Figura 2. Los sitios de muestreo de la zona de la Petroquímica La Venta y el Campo Petrolero Blasillo en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

El Municipio de Huimanguillo se ubica entre los paralelos 17°50' de Latitud Norte y 93°23' de Longitud Oeste, con una altitud promedio de 20 msnm. La extensión territorial del municipio es de 3,757.59 km<sup>2</sup>, los cuales corresponden al 15.35% del total del estado, ocupa el primer lugar en la escala de extensión municipal. Limita al Norte con el municipio de Cárdenas, al

Sur con los estados de Chiapas y Veracruz, al Este con el estado de Chiapas y al Oeste con Veracruz. Los principales ríos de este municipio son Mezcalapa (proveniente del Estado de Chiapas), Blasillo y Tancochapa; así también, la principal laguna es la del Rosario.

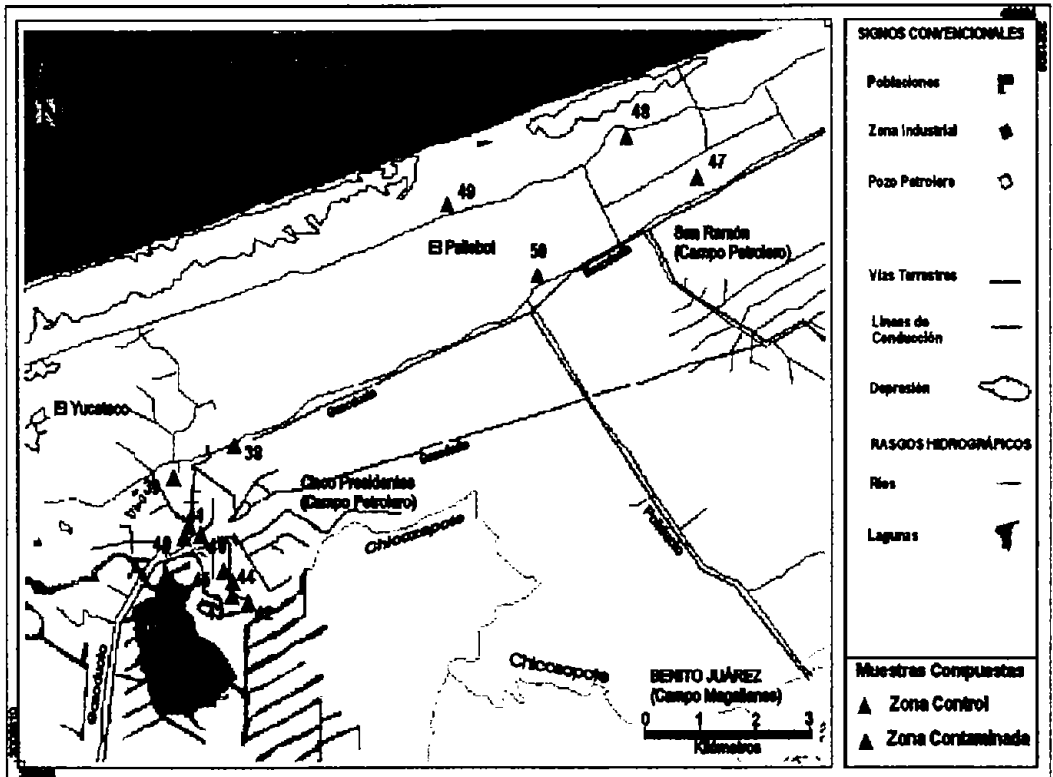


Figura 3. Los sitios de muestreo de la zona del Campo Petrolero Cinco Presidentes y Pailebot, en el Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

El Municipio de Cárdenas se ubica entre los paralelos 17°59' de Latitud Norte y 93°22' de Longitud Oeste, su altitud promedio es de 20 msnm. La extensión territorial del municipio es de 2,112.00 km<sup>2</sup>, los cuales corresponden al 8.63% respecto al total del estado, ocupa el quinto lugar en la escala de extensión municipal. En su tramo original el río Tonalá recibe el nombre de río Pedregal; la longitud total del cauce principal es de 150 km, de los cuales 120 km se desarrollan abajo de los 200 m de altitud. Los afluentes principales que recibe el río Tonalá en el territorio tabasqueño son los ríos Zanapa, el cual se considera el más



importante, el río Blasillo, que tiene un cauce activo de 35 m de ancho y una profundidad máxima de 6 m, y por último el Chicozapote. Este último se origina en la Laguna El Yucateco (INEGI 1986; Gallegos, 1986).

## 6.2 GEOLOGIA Y FISIOGRAFÍA.

La zona de estudio forma parte de la Provincia Fisiográfica denominada Llanura Costera del Golfo Sur, dividiéndose en dos Subprovincias: **Llanura Costera Veracruzana y Llanura y Pantanos Tabasqueños**; siendo ésta última donde se encuentra ubicada el área de estudio de este trabajo (INEGI, 1986).

**Llanura y Pantanos Tabasqueños:** Se caracteriza por su escaso relieve (casi plano), con una altitud menor de 20 m. Los pantanos están cortados por amplios valles; resultado de la acumulación de grandes depósitos fluviales en diferentes medios como el lacustre, el palustre y el litoral. Este relieve presenta extensas planicies de inundación y lagunas entre las que destacan La Machona, Mecoacán, Sitio Grande y El Rosario. La mayor superficie de la Subprovincia se encuentra cubierta por depósitos del Cuaternario el cual no ha sufrido deformaciones ni dislocaciones. En el subsuelo de esta región tabasqueña se han descubierto grandes estructuras subyacentes bajo los sedimentos terciarios (formada principalmente de rocas de tipo areniscas y lutitas) y estos conforman las trampas estructurales para los hidrocarburos que se explotan en la entidad. (INEGI, 1986).

## 6.3 CLIMA.

Por su ubicación geográfica dentro del Estado de Tabasco la zona de estudio se localiza bajo la influencia del tipo de clima **Am (f)** que pertenece al grupo del cálido húmedo con abundantes lluvias en verano. Este tipo de clima se distribuye en gran parte del estado. A lo largo de la costa las temperaturas son más altas, así como la precipitación anual total es mayor de los 1500 mm. En las estribaciones de las sierras las temperaturas son más bajas y la precipitación anual total se incrementa conforme se avanza hacia el sur. La precipitación pluvial presenta una distribución en tres períodos: lluvias de junio a finales de octubre; nortes de noviembre a enero y sequía que comprende de febrero a mayo. De manera general, el

período más lluvioso comprende de junio a noviembre con el 70% de lluvia anual, siendo septiembre el mes con más precipitación; y los meses más secos son de marzo a mayo, donde ocurre el 11% de la lluvia anual. En el Cuadro 9 se presentan algunos datos de las estaciones climatológicas más cercanas a la zona de estudio.

De marzo a mayo son dominantes los vientos secos y calientes que provienen del sur, denominados "sures". Durante la época de lluvia inciden los vientos frescos provenientes del norte, los llamados "nortes" por ser área de influencia de vientos alisios, monzones y boreales (Palma *et al.*, 1985; INEGI, 1986; Cardoso, 1979).

Cuadro 9. Datos climáticos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

Estación Climatológica	Encrucijada		La Venta	
	Latitud N	Longitud O	Latitud N	Longitud O
Coordenadas.	18° 18'	93° 29'	18° 08'	94° 01'
Altitud (m).	23.0		20.0	
Temperatura Media Anual (°C).	26.7		26.0	
Temperatura Máxima Extrema Anual (°C)	36.3		35.9	
Temperatura Mínima Extrema Anual (°C)	18.1		17.3	
Precipitación Anual (mm).	2020.0		2614.0	
Número de Días de Precipitación				
Apreciable (anual).	135.0		149.0	
Evaporación (anual) (mm).	1288.0		1230.0	

Fuente: Cardoso, 1979.

#### 6.4 VEGETACIÓN.

Dentro de la zona de estudio las comunidades vegetales son el tular, popal, palmar y manglar. El desarrollo de las comunidades hidrófitas -*tular* y *popal*- está condicionada fuertemente por la presencia de zonas pantanosas y de inundación, que han sido originadas por la abundante precipitación de 1500 a 2000 mm anuales sobre terrenos planos. Abarcan aproximadamente el 23% de la superficie total en la región de la Subprovincia (INEGI, 1986).

**TULAR:** Presenta plantas acuáticas de 1 a 3 m de alto, de hojas angostas carentes de

órganos foliares. Se encuentran arraigadas en el fondo poco profundo de cuerpos de agua con corrientes lentas y estacionarias, tanto de agua dulce como salobre. Forman masas densas que cubren importantes superficies de áreas pantanosas y lacustres. Los elementos del tular son: *Cyperus giganteus* ("molinillo"), *Eichornia crassipes* ("el jacinto", lirio acuático), *Cyperus articulatus*, *Paspalum vaginatum* (grama de agua), *Paspalum fasciculatum* (camalote), *Typha latifolia* ("espadañal") (Larios, 1987; INEGI, 1986).

**POPAL:** Son comunidades vegetales que habitan grandes extensiones pantanosas o de agua dulce que permanecen estancadas con una profundidad de 0.5 - 1.5 m. Se trata de llanuras aluviales, en declives atravesados por ríos cuyos cauces se encuentran a mayores elevaciones, llenan la zona de agua por medio de filtración e inundación. Las plantas que los forman son herbáceas de 1 a 3 m de altura con hojas grandes y anchas, que sobresalen del agua, constituyen una masa densa. Los elementos del popal son: *Thalia geniculata*, especies de *Galatea* y *Heliconia* (Larios, 1987; INEGI, 1986).

**PALMAR:** Asociación de plantas, conocidas como palmas en las zonas tropicales y que pueden alcanzar alturas considerables. Se les encuentra principalmente dentro de las áreas de distribución de las selvas con especies como *Bursera simaruba* (palo mulato) y *Bucida buceras* (INEGI, 1986).

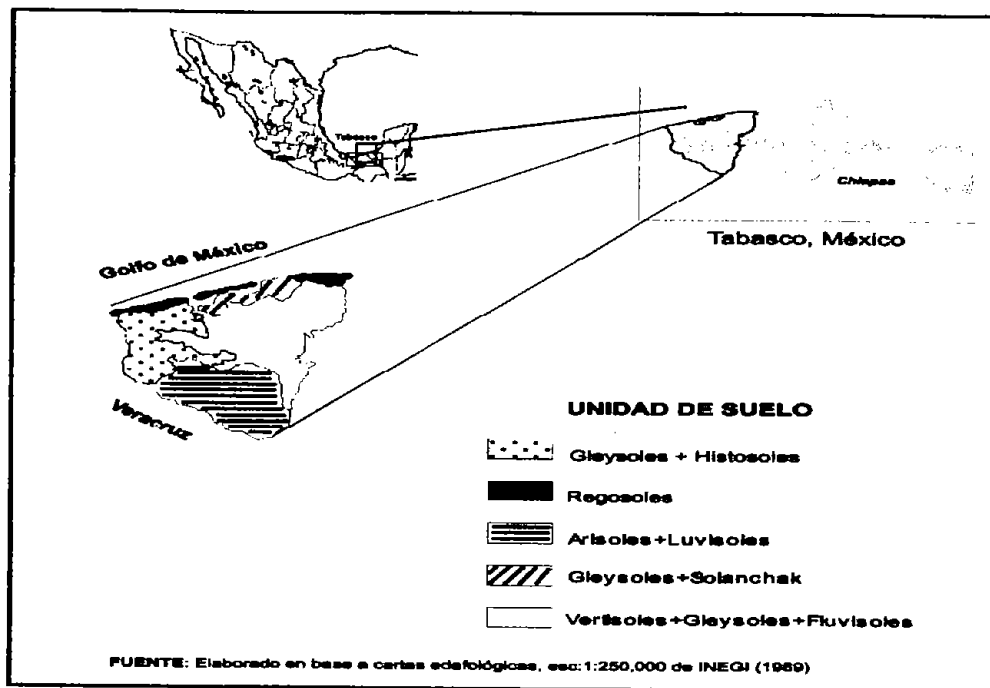
**MANGLAR:** Vegetación con especies características, árboles tropicales que tienen raíces adventicias de sostén tipo zanco, de varios metros de largo que ayudan a anclar con firmeza a los árboles en el suelo pantanoso en donde crecen. Es un tipo de vegetación muy común dentro de la zona de estudio. Alberga a una gran variedad de especies animales, donde sus raíces sirven de substrato a ostras, crustáceos y peces. El mangle también contribuye a fijar y retener el suelo, evitando la erosión. En las lagunas costeras y cerca de las desembocaduras de los ríos las especies dominantes son *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle prieto) y *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (botoncillo) (Larios, 1987; INEGI, 1986).

## 6.5 SUELO.

En la zona de estudio se identifican dos unidades geomorfológicas: la planicie aluvial y la

planicie costera (INEGI, 1986; Palma *et al.* 1985).

A). Planicie Aluvial. Está formada por depósitos de ríos de reciente desarrollo, actualmente pueden estar inactivos y en algunos lugares puede haber depósitos lacustres en forma muy localizada. Las unidades de suelo comprendidas dentro de la planicie aluvial son Gleysoles e Histosoles. En la Figura 4 se muestra el mapa edafológico de la zona de estudio.



**Figura 4** Las tres unidades de suelo del área de estudio en el estado de Tabasco, México.

**GLEYSOLES:** Se localizan en las partes más bajas de la planicie de inundación. Por su escasa o nula altura con respecto al nivel del mar, son las receptoras de la mayor parte de las precipitaciones que reciben las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta. Presentan problemas de exceso de humedad por drenaje deficiente, tanto superficial como interno. Durante casi todo el año presentan un estado de anegamiento, el nivel freático está en la superficie o muy cercano a ella por lo que su manejo es difícil. Los ambientes en donde éstos

podrían formarse son los pantanos y ciénagas, la precipitación excede la evaporación y el drenaje. Las condiciones en estos ambientes son generalmente reductoras y mucho del Fe puede estar en estado ferroso, el cual le confiere a la matriz del suelo colores verde-azulado o grises bajo la capa oscura de la zona superficial. Son de fertilidad moderada, en general sustentan vegetación hidrófita y pastizal. Representan el 29.84% de los suelos de Tabasco (INEGI, 1986; Palma *et al.*, 1985).

**HISTOSOLES:** Estos suelos son muy diferentes por su génesis y constitución a todas las demás unidades, ya que su origen es lacustre. Son suelos orgánicos formados de material orgánico con propiedades físicas, químicas y mecánicas que se diferencian de aquellos suelos de material mineral, localizados en áreas bajas con pendiente cóncava cercana a lagunas. Son suelos extremadamente ricos en materia orgánica (> 30% hasta, algunos casos, del 90 a 95%) en diferentes estados de descomposición y se forman siempre que la acumulación de materia orgánica sobrepasa a su mineralización. Las características químicas del suelo, por ejemplo, la capacidad de intercambio catiónico, son controladas por el contenido y propiedades del componente orgánico, como también las propiedades mecánicas de esta unidad de suelo.

Las condiciones en las cuales se desarrolla el material orgánico de los histosoles son el producto de una adaptación de la vegetación (clima), la descomposición bioquímica de los detritus de las plantas es retardada, ya sea por temperaturas, anegamientos, intemperismo o extrema acidez. Durante la mayor parte del año se encuentran en estado de anegamiento e inundación y tienen una capacidad extremadamente alta de retención de agua, su uso es limitado para el cultivo de plantas. Cuando en estos suelos se introduce un drenaje, el material orgánico se oxida y el suelo se hunde, la saturación casi continua con agua que impide la circulación de oxígeno en el suelo. Los Histosoles incluyen una amplia variedad de suelos de turbas, tienen una alta capacidad de retención acuosa y pueden presentarse en varios grados de descomposición. Actualmente su vegetación es ocupada con pastos resistentes al exceso de humedad. Tienen una representación de 1.74% de extensión de los suelos en el estado de Tabasco (FAO, 1994; Buckman, 1993).

**B). Planicie Costera.** Se origina por el choque de la energía proveniente de los desbordes de

los ríos y la acción del oleaje marino. El material que la conforma es no consolidado y de mineralogía mezclada. La unidad de suelos dominante es la de los Regosoles (Figura 4) (INEGI, 1986).

**REGOSOLES:** Se localizan en la franja costera de Tabasco (Golfo de México), y se caracterizan por ser suelos poco evolucionados. Se formaron a partir de material no consolidado (arenas marinas). Presentan texturas arenosas, por ello tienen el problema de baja retención de humedad y son pobres en materia orgánica (presentan restricciones para el almacenamiento de agua y nutrientes). Son suelos de grano suelto, que carecen de estructura y no presentan desarrollo de horizonte de diagnóstico.

Son suelos de moderada a baja fertilidad debido al bajo contenido de arcillas y materia orgánica, presentan buen drenaje interno (medio a rápido), aunque en ocasiones sufren de encharcamientos debido a las pocas pendientes superficiales. Son de agregación muy débil y son fácilmente erosionables, sustentan vegetación principalmente de pastizales y cocoteros. La extensión ocupada por esta unidad corresponde al 3.26% del total de los suelos de Tabasco (FAO, 1994; INEGI, 1986).

En el Cuadro 10 se presentan las principales características de las tres unidades de suelo de la zona de estudio.

**Cuadro 10.** Principales características de los suelos de la zona de estudio.

Características	Unidad de Suelo		
	Gleysol	Histosol	Regosol
Origen Material Parental	Transportado y Residual	Transportado y Residual	Transportado y Residual
Carácter	Suelos con propiedades gleyicas, saturación temporal o permanente con agua subterránea.	Suelos orgánicos.	Suelos sin agregación en los primeros 100 cm de profundidad.
Relieve	Plano a cóncavo Pendiente 0 - 2%	Plano a casi plano Pendiente 0 - 0.5%	Plano a bordos costeros Pendiente 5 - 25%
Material Parental	Materiales (sedimentos y rocas) ricos en bases Intercambiables.	Material orgánico.	Material constituido por silicatos.
Vegetación	Pastizal, acahuales, popal y manglar.	Pastizal, popal y vegetación hidrófita diversa.	Acahuales y palmeras.
Restricción	Inundación y salinidad.	Inundación, capacidad de retención de agua alta.	Textura y fertilidad.
Textura	Fina.	Fina	Gruesa

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 1998; FAO-UNESCO, 1994; Larios, 1987.

## 7. METODOLOGÍA.

### 7.1 Selección de sitios de muestreo.

El muestreo de suelos dentro del Distrito de Agua Dulce se llevó a cabo a lo largo de transectos desde zonas de evidente contaminación por derrames de petróleo hacia zonas sin contaminación visible. Además, se muestrearon dos zonas que no presentan actividades petroleras que se tomaron como control: éstas fueron al sur del Campo Petrolero Blasillo y Pailebot, localizada en la parte norte del área de muestreo. El tipo de suelo característico de cada sitio de muestreo, se determinó con barrenaciones de profundidad de 0.5 a 1.0 m. Las unidades de suelo predominantes en las diferentes zonas de estudio fueron: **Gleysoles**, Petroquímica La Venta (Figura 2)(muestra 30a a 33a); **Histosoles**, Campo Petrolero Blasillo (muestra 25a a 28a), Petroquímica La Venta (Figura 2) (muestra 34a a 37a) y Campo Petrolero Cinco Presidentes (Figura 3)( muestra 42a a 46a); **Regosoles**, Pailebot (muestra 47a a 50a) y Campo Petrolero Cinco Presidentes (Figura 3) ( muestra 38a a 40a). También se tomó una muestra de suelo en un Tiradero (**Regosol**, Campo Petrolero Cinco Presidentes, (T 41).

### 7.2 Toma de muestras.

En cada transecto se abarcaron de 4 a 6 sitios de muestreo. En cada uno de éstos se tomaron 3 a 6 muestras compuestas de 12 núcleos de la capa superficial del suelo con una profundidad de 0 a 15 cm. Las muestras compuestas se homogenizaron en un recipiente de plástico, y se tomó aproximadamente 1 kg de muestra el cual se etiquetó con los datos correspondientes para su posterior análisis en el laboratorio. También se tomaron muestras para hidrocarburos y metales pesados de aproximadamente 200 g se depositaron en frascos de vidrio lavados con agua acidulada, secados con acetona y temperatura de 105° C.

### 7.3 Procesamiento de las muestras.

Los suelos colectados se extendieron sobre papel para secarlos a temperatura ambiente. Una vez secos se procedió a molerlos y tamizarlos. El tamiz utilizado fue de malla de 2 mm de abertura, se guardó la muestra en bolsa de polietileno para su fácil manejo. Para la



determinación del contenido de metales pesados los suelos fueron secados en la estufa, y molidos con mortero de ágata. Todas las determinaciones se realizaron por duplicado. Así mismo se trabajó con un testigo sin suelo y con una muestra patrón para el control de calidad.

#### 7.4 Análisis de laboratorio.

**Potencial de Hidrógeno (pH).** Se midió en dilución 1:2.5 con H<sub>2</sub>O destilada y KCl 1N a pH7. La determinación se realizó con un potenciómetro con electrodo de referencia y compensación de temperatura.

**Materia Orgánica (Carbón Orgánico).** Se determinó el carbón orgánico por oxidación húmeda con dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 2N. Se determinó por fotometría, el total de materia orgánica se calculó multiplicando el contenido de carbón orgánico por el factor 1.724 (Schlichting *et al.*, 1995). Las muestras de Histosoles con más de 30% de materia orgánica, se analizaron por el método de pérdida de peso por calcinación a temperatura de 375 °C .

**Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE).** Se intercambiaron los cationes Ca, Al, Mg, K, Na y H con cloruro de amonio (NH<sub>4</sub> Cl) 0.1N. Por espectrofotometría de absorción atómica se determinaron Ca, Al, y Mg por flamometría K y Na y con potenciómetro H y al final se sumaron para obtener la CICE (Schlichting *et al.*, 1995).

**Nitrógeno Total (Método de Kjeldahl modificado).** Se realizó una oxidación de la materia orgánica con Ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 96%. Al término de la digestión, el medio se alcaliniza añadiendo NaOH (Hidróxido de Sodio) al 40%, mediante el calentamiento se logra el desprendimiento de NH<sub>3</sub> el cual se recibe en Ácido Bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) al 4% formando (NH<sub>4</sub>). La cuantificación de NH<sub>4</sub> se realizó por titulación con Ácido Clorhídrico (HCl) al 0.1N (Black, 1965).

**Fósforo Disponible (Método Bray I).** Como solución extractora se utilizó fluoruro de amonio (NH<sub>4</sub>F) 0.03N y Ácido Clorhídrico (HCl) al 0.02N. La determinación del P se llevó a cabo por colorimetría, utilizándose como reductor al Cloruro Estanoso (SnCl<sub>2</sub>) (Bray-Kurtz, 1982).

**Sulfatos extractables.** Extracción con NaCl 0.1N y determinación turbidimétrica al precipitar con BaCl<sub>2</sub> (Cloruro de Bario) (Black, 1965).

**Metales Pesados Totales.** Se llevó a cabo una digestión ácida con agua regia (HCl: HNO<sub>3</sub>, relación 3:1, vol:vol) y se determinaron los metales Cu, Cr, Ni, Cd, Pb, V y Zn con un espectrofotómetro de absorción atómica con flama Modelo Perkin Elmer 3110 (Schlichting *et al.* 1995).

8. RESULTADOS.

Todos los datos obtenidos se presentan en el Anexo 2 y 3. En los sitios contaminados se realizó primero una evaluación de los datos de cada transecto muestreado, para analizar si se observan tendencias en función de la distancia del derrame. Como no se observaron tendencias claras en los datos de los distintos transectos, se decidió trabajar con los promedios y la dispersión de los valores por localidad y evaluar diferencias entre sitios con influencia de actividades petroleras y la zona control. Lo anterior se hizo considerando el tipo de suelo. A continuación se presentan los resultados de cada variable determinada.

8.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS SUELOS.

8.1.1 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (H<sub>2</sub>O). En el área de estudio todos los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea, variaron de 4.55 a 7.45 (Figura 5). Las muestras de suelo analizadas de la Petroquímica La Venta (zona contaminada) correspondientes a la unidad de suelo Gleysol, presentaron la mayor dispersión con valores entre 7.45 (valor más alto de toda el área de estudio) y 5.00.

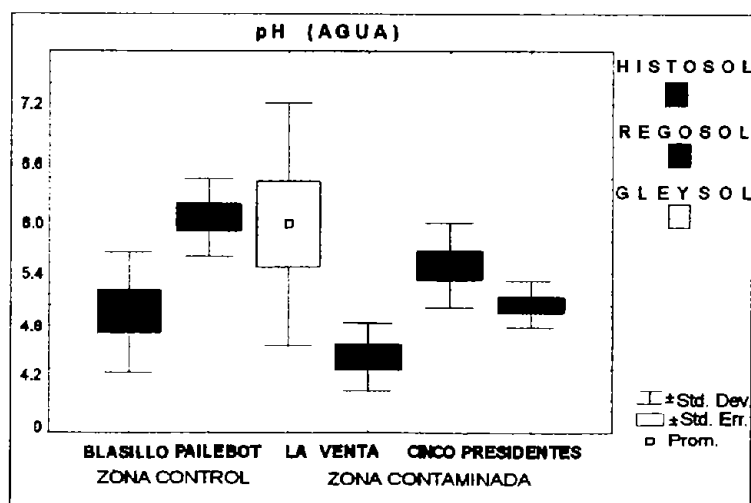


Figura 5. Valores promedio de pH en muestras de suelo extraídas con agua en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Estos valores son considerados de muy ligeramente alcalinos a moderadamente ácidos, respectivamente (Siebe *et al.*, 1996). En la unidad de suelo Histosol se presentan los valores más bajos de 4.55 (valores menores de toda el área de estudio) a 5.23, independientemente de la localidad. Son considerados de fuertemente ácidos a moderadamente ácidos (Siebe *et al.*, 1996).

**8.1.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (KCI).** En las dos zonas de muestreo los valores obtenidos de pH medido en KCl presentan una distribución heterogénea, variaron de 3.53 a 7.10, el pH medido en KCl sigue el mismo patrón descrito para el pH en agua (Figura 6). Los histosoles de la Venta y Blasillo tienen los valores de pH más bajos, seguidos de los Regosoles de Cinco Presidentes y los de Pailebot. Los Gleysoles de La Venta abarcan todo el intervalo encontrado en el área de estudio (Anexo 2).

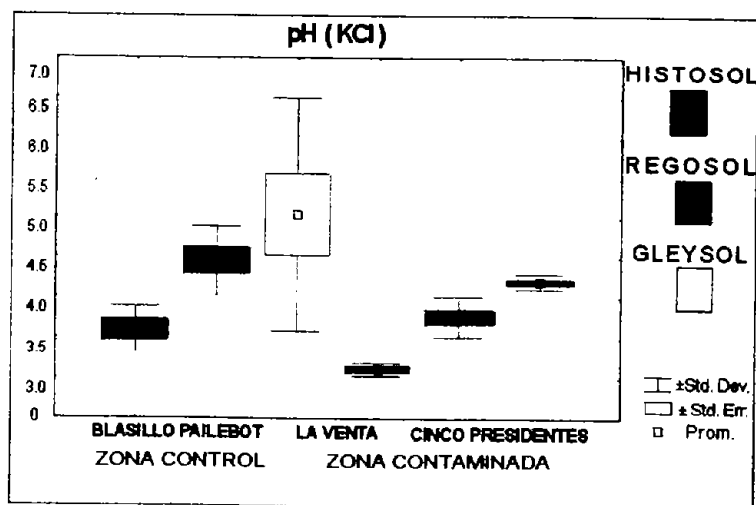


Figura 6. Valores promedio de pH en muestras de suelo extraídas con KCl en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

**8.1.3 FÓSFORO (BRAY I).** Los valores muestran una distribución heterogénea en el área de estudio, variaron de 2.30 a 12.00 de mg/kg (Figura 7). En la zona del Campo Petrolero Cinco Presidentes de la unidad de suelo histosol presentan valores que van de 5.30 a 12.00 mg/kg, estos valores son considerados bajos (Moreno, 1978). Los valores de la zona

contaminada de la Petroquímica la Venta de la unidad de suelo Gleysol variaron de 2.30 a 10.30 mg/kg (Anexo 2) y se consideran bajos (Moreno, 1978). Las unidades de suelo histosol de la Venta y regosol de Cinco Presidentes presentaron los valores más bajos en toda el área de estudio de 3.70 a 5.30 mg/kg.

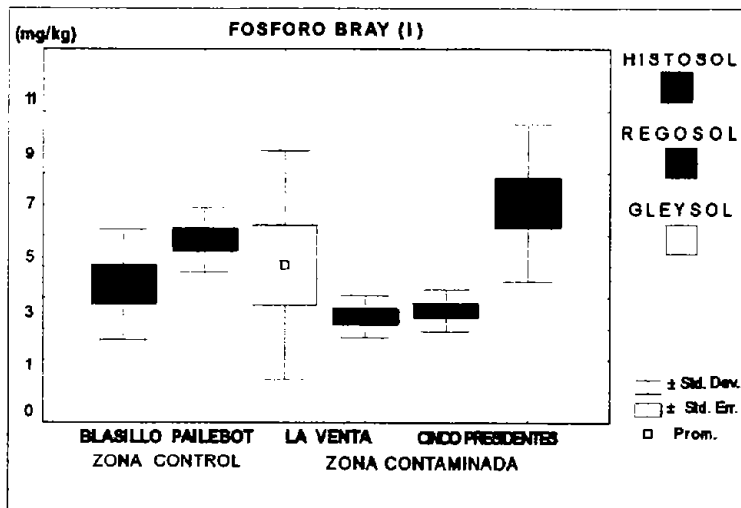


Figura 7. Valores promedio de fósforo disponible en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

**8.1.4 NITRÓGENO total.** El contenido de nitrógeno total en las muestras de suelo varió de 0.05 a 1.46 % (Figura 8). En los histosoles se obtuvieron los valores más altos, variaron de 0.58 a 1.46 %. Estos valores son considerados extremadamente ricos en el contenido de nitrógeno (Moreno, 1978). Así también, la zona contaminada de la unidad de suelo gleysol, presentó los valores medianamente altos que van de 0.83 a 1.19% (Anexo 2). En tanto, las muestras de suelo de la unidad regosol de la zona control (Pailebot) y contaminada (Campo Petrolero Cinco Presidentes) presentaron los valores más bajos de toda el área de estudio, variaron de 0.1 a 0.02 % y se evalúan como suelos pobres en el contenido de nitrógeno (Moreno, 1978).

**8.1.5 MATERIA ORGÁNICA.** Se observa que los valores de materia orgánica muestran una distribución heterogénea, variando de 0.30 a 90.00 % de materia orgánica (Figura 9).

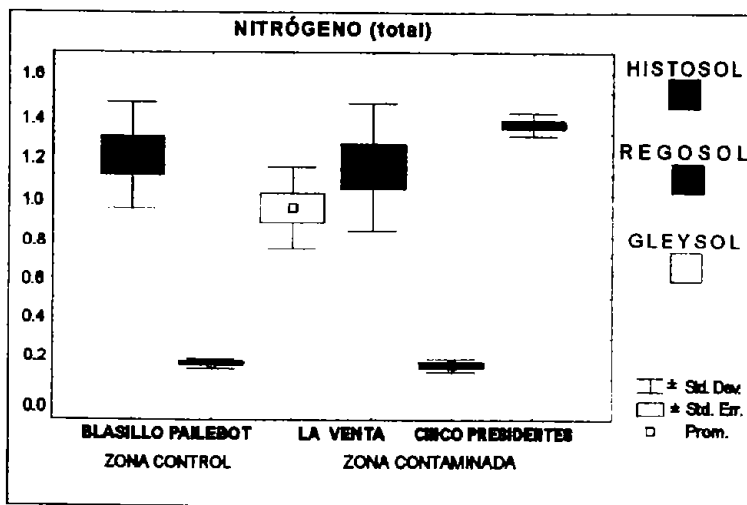


Figura 8. Valores promedio de nitrógeno total en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

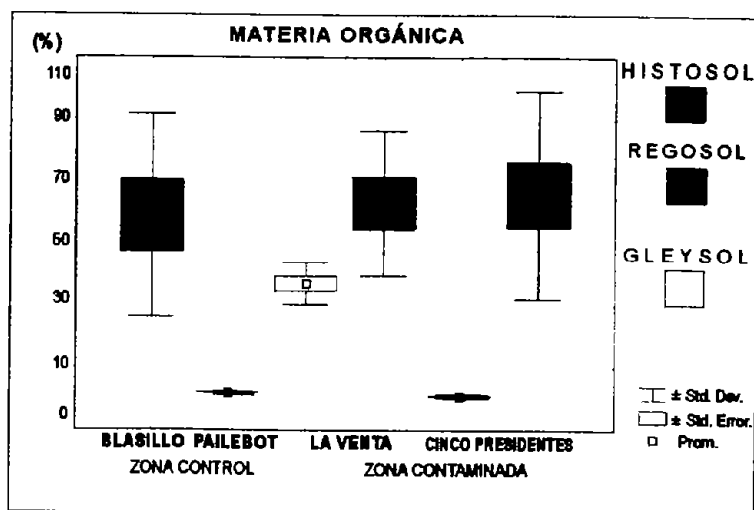


Figura 9. Valores promedio de materia orgánica en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Los histosoles presentan los valores más altos de 34.00 a 90.00 % en el contenido de materia orgánica. Estos valores son considerados de altos en materia orgánica (Siebe *et al*, 1996). Los gleysoles de la zona contaminada (Petroquímica La Venta), presenta valores medios de 29.80 a 44.40% (Anexo 2). Los regosol presenta los menores contenidos de materia orgánica de 0.30 a 1.90 % (Figura 9).

**8.1.6 RELACIÓN CARBÓN/NITRÓGENO (C/N).** Se observa que la relación C/N en las muestras analizadas de suelo muestran una distribución heterogénea, variaron de 6.00 a 57.10 (Figura 10). Se observa que en la unidad de suelo histosol presenta valores altos, variaron de 28.90 a 57.10 (valor más alto) en toda el área de estudio. Estos valores son considerados altos a muy altos (Moreno, 1978). En tanto, las muestras de suelo de la unidad regosol y gleysol de las zonas control (Pailebot) y la zona contaminada (Petroquímica La Venta) presentaron valores medianamente altos entre 16.00 a 38.00, comparándolos con los de la unidad de suelo regosol de la zona contaminada del Campo Petrolero Cinco Presidentes que fueron valores más bajos (Anexo 2).

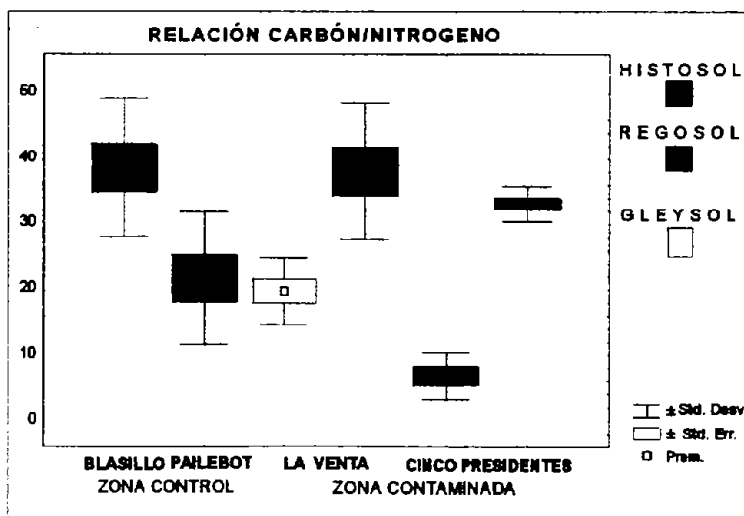
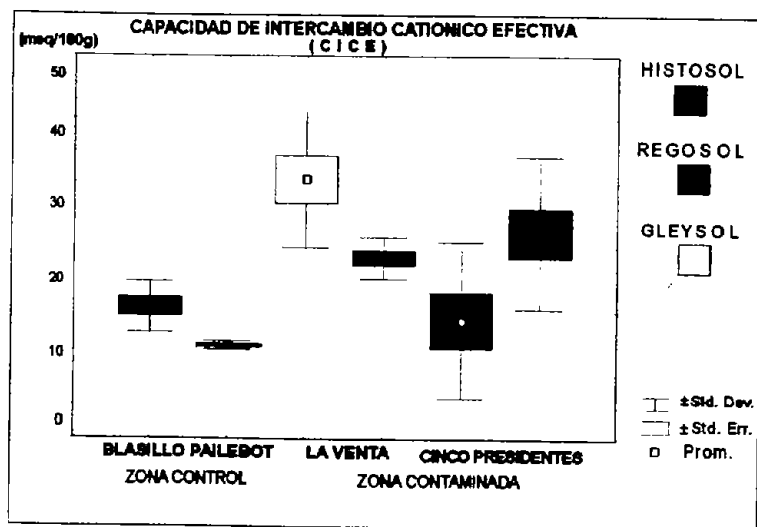


Figura 10. Valores promedio de la relación C/N en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

**8.1.7 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO EFECTIVA (CICE).** En el área de estudio los valores muestran una distribución heterogénea, variaron de 1.70 meq/100g a 47.32 meq/100g (Figura 11). Se observa que las muestras de suelo analizadas en gleysol (zona contaminada), presentaron valores entre 47.32 (valor más alto de toda el área de estudio) y 21.46 meq/100g. Así también, en los histosol tanto de la zona control como de la contaminada, presentaron valores relativamente altos, variaron de 7.86 a 39.31 meq/100g, (excepto el valor de 3.60 meq/100g de la zona contaminada). En tanto, la unidad de suelo regosol de la zona control y contaminada presenta los valores más bajos de toda el área de estudio; variaron de 1.70 a 5.48 meq/100g (Anexo 2).



**Figura 11.** Valores promedio de la capacidad de intercambio catiónico efectiva en las tres unidades de suelo y comparando zona control con zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

**8.1.8 SULFATOS EXTRACTABLES.** En el área de estudio los valores de sulfatos muestran una distribución heterogénea, variaron de 0.04 a 0.73 mg/g (valor más alto de toda el área de estudio) (Figura 12). La unidad de suelo gleysol (zona contaminada) presentó los valores más altos (0.20 a 0.73 mg/g). Se observa que en la unidad de suelo histosol de la zona control muestra valores más bajos que la zona contaminada. También en la unidad de suelo



regosol los valores en la zona control son menores a los de la contaminada (Anexo 2).

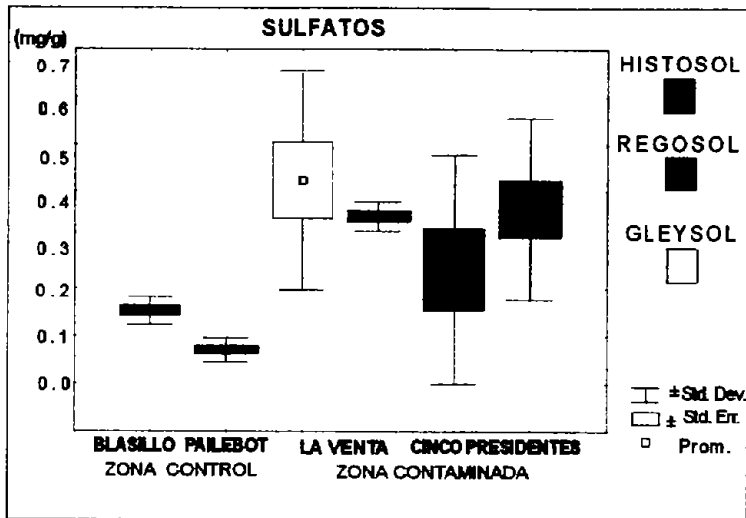


Figura 12. Valores promedio de sulfatos extractables en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

## 8.2 METALES PESADOS EN SUELOS.

### 8.2.1 CROMO

De acuerdo con Zartner-Nyilas (2002) las concentraciones de Cr en los suelos de las dos zonas no rebasan los valores considerados como límites permisibles (100 - 200 mg kg<sup>-1</sup>) (Cuadro 7).

En el área de estudio del Distrito de Agua Dulce, los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea y variaron de 1.07 a 45.50 mgkg<sup>-1</sup> (Figura 13) (Anexo 3). Se observa que las más altas concentraciones de Cr total y los valores promedio de toda el área de estudio se encuentran en la zona cercana a la Petroquímica La Venta, las dos unidades de suelo gleysol e histosol, obtuvieron valores altos que fueron de 34.28 a 45.01 mgkg<sup>-1</sup> (excepto el valor 11.81 mgkg<sup>-1</sup> en gleysol). En tanto, la zona control en las dos unidades de suelo histosol y regosol presentan valores medianamente altos que van de 8.88 a 33.80

mgkg<sup>-1</sup>, comparándolos con los valores de la zona contaminada del Campo Petrolero Cinco Presidentes.

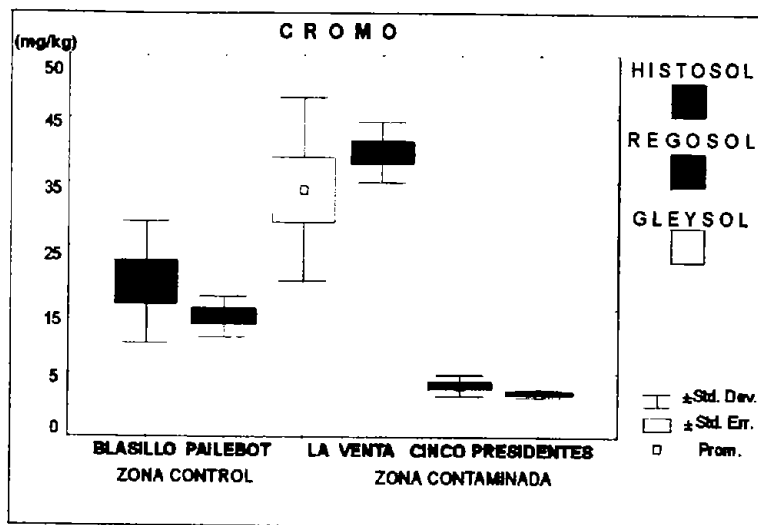


Figura 13. Valores promedio de las concentraciones de cromo en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### 8.2.2 COBRE

Las concentraciones de Cu que muestran las dos zonas de estudio no rebasan los valores límites permisibles de 50-140 mg kg<sup>-1</sup>, clasificación de acuerdo con Zartner-Nyilas (2002) (Cuadro 7).

En las dos zonas de muestreo los valores obtenidos presentan una distribución heterogénea y variaron de 1.95 a 33.43 mgkg<sup>-1</sup>, (Figura 14) (Anexo 3). La zona contaminada de la Petroquímica La Venta en las dos unidades de suelo gleysol e histosol presenta los valores más altos, que van de 5.44 a 33.43 mgkg<sup>-1</sup>. La unidad de suelo histosol en la zona control de Blasillo presenta valores intermedios de 5.87 a 14.25 mgkg<sup>-1</sup>. La unidad de suelo regosol de Pailebot y las dos unidades de suelo regosol e histosol de la zona de Cinco Presidentes muestran concentraciones muy bajas que variaron de 1.95 a 5.97 mgkg<sup>-1</sup> (Anexo 3).

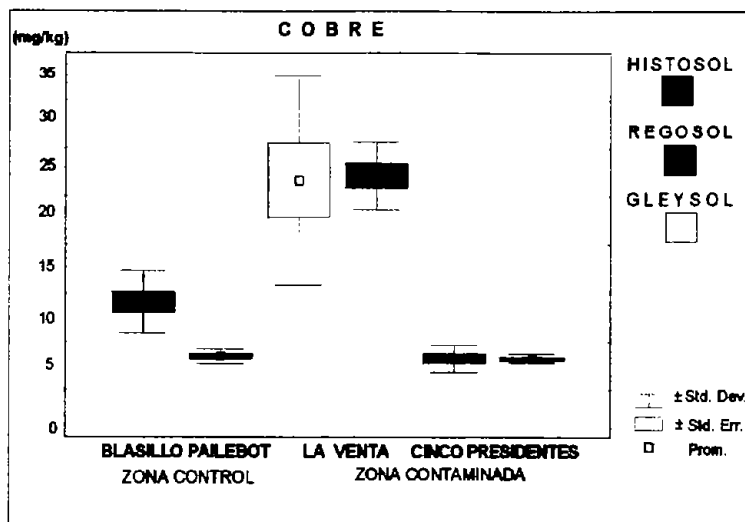


Figura 14. Valores promedio de las concentraciones de cobre en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### 8.2.3 VANADIO

Las dos zonas de estudio presentan algunos sitios en los que las concentraciones de V rebasan los valores de contenido normal de 0-50 mg kg<sup>-1</sup>, clasificación de acuerdo con Kabata-Pendias (1984) (Cuadro 7).

En el área de estudio todos los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea, variaron de 12.77 a 85.00 mgkg<sup>-1</sup> (Figura 15) (Anexo 3). Las muestra de suelo de la zona del Campo Petrolero Cinco Presidentes de la unidad de suelo regosol presentaron los valores más altos entre 23.88 y 85.00 mgkg<sup>-1</sup> (valor más alto de toda el área de estudio, correspondiente a la muestra 41 del tiradero). La zona contaminada de la Petroquímica La Venta en la unidad de suelo gleysol también presentó valores relativamente elevados comparados con los de la zona control. Los suelos de la unidad histosol del Campo Petrolero Cinco Presidentes presentaron los menores contenidos de vanadio de toda el área de estudio (Figura 15) (Anexo 3).

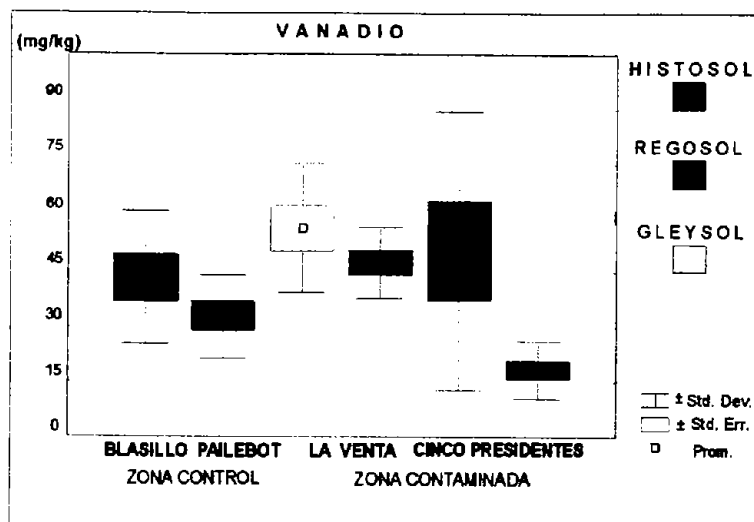
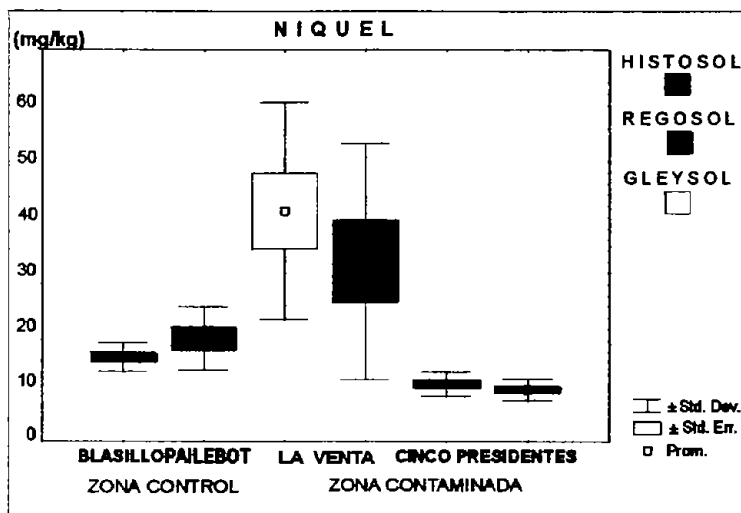


Figura 15. Valores promedio de las concentraciones de vanadio en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### 8.2.4 NIQUEL

De acuerdo con LFU, (1989) las concentraciones de Ni en algunos suelos de las dos zonas sí rebasan ligeramente los valores considerados como contenido normal de 5 - 50 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 7).

En las dos zonas de muestreo los valores obtenidos presentan una distribución heterogénea y variaron de 7.07 a 58.77 mgkg<sup>-1</sup>, (Figura 16) (Anexo 3). Se observa que la zona de la Petroquímica La Venta en las dos unidades de suelo gleysol e histosol, obtuvieron los valores más altos que van de 9.63 a 58.77 mgkg<sup>-1</sup> (Anexo 3). La zona control de Blasillo y Pailebot de las unidades de suelo histosol y regosol presentaron valores intermedios que van de 11.19 a 23.56 mgkg<sup>-1</sup> y la del Campo Petrolero Cinco Presidentes en las dos unidades de suelo regosol e histosol tienen los valores más bajos (7.07 a 13.67 mgkg<sup>-1</sup>).



**Figura 16.** Valores promedio de las concentraciones de níquel en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### 8.2.5 ZINC

Las concentraciones de Zn que muestran las dos zonas de estudio no rebasan los valores límites permisibles de 150 - 300 mg kg<sup>-1</sup>, clasificación de acuerdo con Zartner-Nyilas (2002) (Cuadro 7).

Los valores obtenidos en las dos zonas de muestreo presentan una distribución heterogénea y variaron de 8.20 a 62.30 mgkg<sup>-1</sup>, (Figura 17) (Anexo 3). Se observa que la zona contaminada de la Petroquímica La Venta en las dos unidades de suelo gleysol e histosol, presenta los valores más altos de 18.00 a 62.30 mgkg<sup>-1</sup>. Se observa que la zona control de Blasillo y Pailebot de las unidades de suelo histosol y regosol presentaron valores medianamente altos que van de 18.20 a 25.80 mgkg<sup>-1</sup>, comparándolos con los de la zona del Campo Petrolero Cinco Presidentes de las dos unidades de suelo regosol e histosol que sus valores fueron menores y variaron de 8.20 a 34.40 mgkg<sup>-1</sup> (Anexo 3).

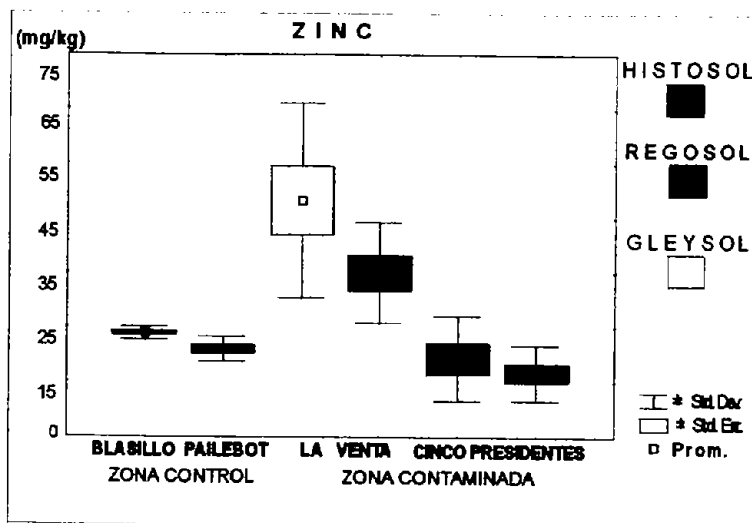


Figura 17. Valores promedio de las concentraciones de zinc en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### 8.2.6 PLOMO

Las dos zonas de estudio presentan concentraciones de Pb que no rebasan los valores límites permisibles de 50 - 300 mg kg<sup>-1</sup>, clasificación de acuerdo con Zartner-Nyilas (2002) (Cuadro 7).

En el área de estudio del Distrito de Agua Dulce, los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea y variaron de 3.11 a 18.43 mgkg<sup>-1</sup> (Figura 18). Se observa que las más altas concentraciones de Pb total y los valores promedio de toda el área de estudio se encuentran en la zona contaminada de la Petroquímica La Venta. Las dos unidades de suelo gleysol e histosol, muestran valores de 12.05 a 18.43 mgkg<sup>-1</sup>. La unidad de suelo histosol en la zona control de Blasillo y en la del Campo Petrolero Cinco Presidentes presenta valores intermedios de 6.94 a 13.32 mgkg<sup>-1</sup>, mientras que las unidades de suelo regosol presentan valores menores que variaron de 3.11 a 5.67 mgkg<sup>-1</sup> (Anexo 3).

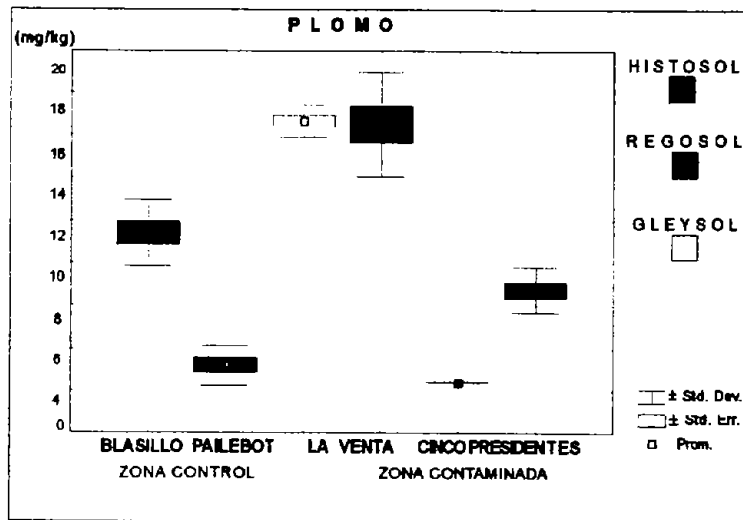
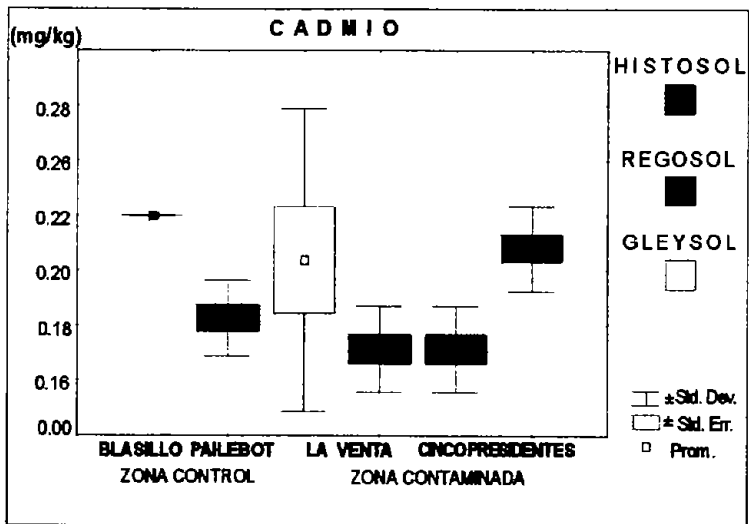


Figura 18. Valores promedio de las concentraciones de plomo en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

### 8.2.7 CADMIO

Las concentraciones de Cd que muestran las dos zonas de estudio no rebasan los valores límites permisibles de 1 - 3 mg kg<sup>-1</sup>, clasificación de acuerdo con Zartner-Nyilas (2002) (Cuadro 7).

En las dos zonas de muestreo los valores obtenidos presentan una distribución heterogénea y variaron de 0.16 a 0.29 mgkg<sup>-1</sup> (Figura 19). Se observa que la zona contaminada de la Petroquímica La Venta de la unidad gleysol tiene los valores más altos de toda el área de estudio (variaron de 0.16 a 0.29 mgkg<sup>-1</sup>). Estos valores abarcan todo el intervalo encontrado en el área de estudio (Anexo 3). La unidad de suelo histosol en la zona control de Blasillo y la contaminada del Campo Petrolero Cinco Presidentes presenta los valores relativamente más altos en promedio de 0.19 a 0.26 mgkg<sup>-1</sup>. Las muestras de la unidad regosol de la zona control (Pailebot) y las contaminadas (Campo Petrolero Cinco Presidentes) presentan valores menores y variaron de 0.16 a 0.22 mgkg<sup>-1</sup> (Figura 19) (Anexo 3).



**Figura 19.** Valores promedio de las concentraciones de cadmio en las tres unidades de suelo y comparando zona control con la zona contaminada en el área del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.



## 9. DISCUSIÓN

### 9.1 Diferencias entre unidades de suelo

En la zona de estudio se tomaron muestras de tres unidades de suelo distintas: Histosol, Gleysol y Regosol.

Las tres unidades se diferencian principalmente en su contenido de materia orgánica, textura y drenaje. Los suelos de tipo Histosol tienen mayor contenido de carbón orgánico y nitrógeno total, seguidos de los suelos de tipo Gleysol, mientras que los de tipo Regosol son pobres en ambos elementos. La capacidad de intercambio catiónico es mayor en los suelos de la unidad gleysol, seguidos por los de la unidad histosol. Los regosoles tienen una capacidad de intercambio catiónico baja. Lo anterior se debe a que tienen poca materia orgánica y a que su textura es gruesa (UNAM-IMP-Battelle, 1999). La alta capacidad de intercambio catiónico de los histosoles está relacionada con su alto contenido de materia orgánica, mientras que la de los gleysoles se debe no sólo a su medianamente alto contenido de materia orgánica, sino también a su textura arcillosa (UNAM-IMP-Battelle, 1999). Otra diferencia importante entre las unidades de suelos es su valor pH. Los suelos de tipo histosol son moderada a fuertemente ácidos, mientras que, los suelos de tipo regosol y gleysol son ligeramente ácidos.

### 9.2 Contenido de metales pesados en los suelos

Los suelos de La Venta, que se encuentran influenciados por descargas de la petroquímica, tienen los mayores contenidos de metales pesados en la zona de estudio. Particularmente tienen claramente más cromo, cobre, níquel, zinc y plomo que los suelos de la zona control. También los contenidos de vanadio y cadmio son en promedio mayores que los de la zona control (Cuadro 11).

La Petroquímica descarga tanto petróleo crudo como aguas congénitas, lo que explica que no sólo níquel y vanadio, si no también otros metales presenten concentraciones elevadas en comparación con unidades de suelo similares en zona sin actividad petrolera (Blasillo). Las muestras del Campo Cinco Presidentes tienen contenidos bajos de metales.

**Cuadro 11.** Promedio y desviación estándar de las concentraciones de metales en los sitios de estudio en el estado de Tabasco.

LUGAR	Cr	Cu	V	Ni	Zn	Pb	Cd	Intervalo de concentraciones en otros estudios.
<b>Datos obtenidos en este trabajo</b>								
<b>Petroquímica La Venta</b>								
<b>Gleysol</b>								
Promedio	33.91	21.69	48.19	41.12	48.25	16.66	0.20	
Desviación Estándar	14.39	10.85	11.85	19.42	17.81	0.78	0.06	
<b>Histosol</b>								
Promedio	39.72	22.11	41.82	32.05	34.94	16.50	0.17	
Desviación Estándar	4.70	3.48	6.51	21.04	9.25	2.46	0.02	
<b>Campo Petrolero Blasillo</b>								
<b>Histosol</b>								
Promedio	19.28	9.10	39.16	15.01	23.93	11.39	0.23	
Desviación Estándar	9.70	3.21	12.15	2.59	1.20	1.55	0.01	
			5-65	15.00				Trujillo <i>et al.</i> , (1995).
<b>Campo Petrolero Cinco Presidentes</b>								
<b>Histosol</b>								
Promedio	1.89	3.27	22.22	9.22	16.30	8.60	0.21	
Desviación Estándar	0.59	0.51	5.27	1.91	5.60	1.21	0.02	
<b>Regosol</b>								
Promedio	3.15	3.24	44.03	10.23	19.40	4.39	0.17	
Desviación Estándar	1.62	1.42	25.54	2.16	7.82	0.00	0.02	
	11.00	2.00		19.00	26.00	16.00		Trujillo, Lagunes y Gonzalez (1995).
<b>Pailebot</b>								
<b>Regosol</b>								
Promedio	13.83	3.51	32.22	18.3	21.10	5.19	0.18	
Desviación Estándar	3.17	0.80	7.86	5.63	2.22	0.95	0.01	

En general los contenidos son menores que los de la zona control, sólo el sitio del tiradero presenta contenidos relativamente elevados de vanadio. Para la mayoría de los metales estudiados los contenidos se encuentran por debajo de límites permisibles. Sólo algunos suelos, principalmente los gleysoles de La Venta rebasan ligeramente los contenidos normales establecidos para vanadio de 0 - 50 mg kg<sup>-1</sup> y níquel de 5 - 50 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 7). Los contenidos de vanadio y níquel encontrados en este estudio fueron de 35 a 63 mgkg<sup>-1</sup> y de 12 a 59 mgkg<sup>-1</sup>, respectivamente. Son menores que los reportados por otros autores

(Zavala *et al.*, 1995; Lagunez *et al.*, 1995; Trujillo *et al.*, 1995) en otros campos petrolero de la zona, con excepción de los del Campo Cinco Presidentes, para los que Trujillo *et al* (1995) reportan contenidos similares (Anexo 4)

Para evaluar la relevancia en términos ecológicos de la introducción de los metales a los suelos de La Venta, es necesario determinar si los metales se encuentran en formas biodisponibles o móviles. Es de esperarse que en suelos de tipo gleysol e histosol los metales se encuentren asociados a la materia orgánica. En los suelos de tipo histosol se puede esperar una mayor biodisponibilidad, dado que estos suelos tienen valores de pH más ácidos. También pueden formarse complejos organometálicos solubles, propiciando una movilidad de los metales. En los suelos de tipo regosol en el tiradero de Cinco Presidentes es importante evaluar la biodisponibilidad del vanadio. Estos suelos tienen poca materia orgánica y bajos contenidos de arcilla. Son moderadamente ácidos y muy permeables. Bajo estas condiciones es más probable que el vanadio se encuentre en formas móviles que pueden ser, o bien, absorbidos por las plantas o lixiviados al acuífero.

**10. CONCLUSIONES**

- En el Distrito de Agua Dulce los suelos de cada unidad geomórfica poseen distintas propiedades físicas y químicas que influyen en la intensidad del impacto de las actividades petroleras. En las tres unidades de suelo existen diferencias en sus características químicas evaluadas en este estudio, el suelo de tipo Histosol tiene mayor contenido de materia orgánica, que esta relacionado con su alta CIC y es más ácido. La unidad Gleysol es menos ácido, la alta capacidad de intercambio catiónico está relaciona no solo su medianamente alto contenido de materia orgánica, y también con su textura arcillosa. Los Regosoles son suelos de textura gruesa, tienen poca materia orgánica, su capacidad de intercambio catiónico baja y son ligeramente ácidos.
- En la zona de La Venta se encontró un aporte de metales pesados hacia los suelos, debido a la actividad de la petroquímica por descargas que contienen petróleo crudo y aguas congénitas. Principalmente, en la concentración total de Vanadio con intervalos de 35 a 63  $\text{mgkg}^{-1}$  y Niquel en el intervalo de 10 a 59  $\text{mgkg}^{-1}$  (Anexo 4) en las dos unidades de suelo de esta zona, aunque también en otros metales que presentan concentraciones elevadas.
- El contenido de la mayoría de los metales, se encuentra por debajo de límites permisibles. Los contenidos de Vanadio y Niquel son menores a los reportados por otros autores. A excepción de los Gleysoles de La Venta que rebasan ligeramente los contenidos normales de 0 - 50 y 5 - 50  $\text{mgkg}^{-1}$  establecidos para estos metales.
- En suelos de tipo Histosol se puede esperar una mayor biodisponibilidad ya que muchos de los metales son relativamente más móviles bajo condiciones de acidez y también pueden formarse complejos organometálicos solubles, propiciando una mayor movilidad de los metales.
- Es importante evaluar la biodisponibilidad del Vanadio en los suelos de tipo Regosol (tiradero de Cinco Presidentes) ya que es probable que se encuentre en formas móviles. Estos suelos tienen poca materia orgánica y bajos contenidos de arcilla, son moderadamente ácidos y de textura gruesa (muy permeables). Dadas estas condiciones es más probable que el V pueda ser, o bien, absorbido por las plantas o lixiviado al acuífero.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, R. H., O. Castillo, J. Zavala y D. Palma. 1999 *Recuperación con mangle blanco (Laguncularia racemosa) de áreas impactadas por hidrocarburos y su manejo como agrosilvo-ecosistema en la zona costera de Huimanguillo y Cárdenas, Tabasco*. Reporte final de proyecto relativo al uso sustentable y conocimiento de recursos biológicos de la zona Maya de México. CONABIO/Fundación MacArthur No. Ref. MO76.

Albers, H. P. 1995 *Petroleum and Individual Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. In: Barnett A. R., G. Allen and B. Jhon (Eds). Handbook of Ecotoxicology. Lewis Publishers. Boca Ratón. Pág. 330-335.

Alloway, J. B. 1990 *Heavy metals in soils*. 2ª. Edition Elsevier Scientific Publishing Company. New York. Pág. 395.

Alloway, J. B., Ayres, C. D. 1993 *Chemical Principles of Environmental Pollution*. 1ª. Edition. Blackie Academic & Professional. London. Pág. 291.

Anónimo. 1993 *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. 1ª. Edición. Editorial Delma. Pág. 220.

Barceló, J. Y Charlotte, P. 1989 *Estrés Vegetal* Investigación y Ciencia No.154 Prensa Científica. Calabria. Barcelona, España. Pág. 54-63.

Black, C. A., Evans, D. D., White, J. L., Clark, F. E. And Ensminger, L. E. 1965 *Methods of Soils Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., Publisher. USA.

Bohn, L.H., McNeal, L.B., O'Connor A.G. 1993 *Química del suelo*. 1ª. Edición. Editorial Limusa. México. Pág. 370.

Botello, V. A., Rojas, J. L., Benítez, J. A. Y Zárata-Lomeli. 1996 *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. EPOMEX: Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche. Campeche, México. Pág. 203-210

Botello, V. A., Paéz, F. 1986 *El problema crucial: La contaminación*. Serie Medio Ambiente en Coatzacoalcos. Vol.1, Centro de Ecodesarrollo. 1ª. Edición. México, D. F. Pág. 180.

Boulding, J. R. 1996 *Environmental Assessment Sourcebook*. Ann Arbor Press, Inc. Chelsea, Michigan. Pág. 386.

Bray-Kurtz 1982 *Methods of Soils Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., Publisher. USA.

Buckman, O, H.; Brady, C. N. 1993 *Naturaleza y Propiedades de los Suelos*. UTEHA, Noriega Editores. México. Pág. 590.

- Buckman, O. H.; Brady, C. N. 1993 *Naturaleza y Propiedades de los Suelos*. UTEHA, Noriega Editores. México. Pág. 590.
- Cardoso C. Ma. Dolores. 1979 *El Clima de Chiapas y Tabasco*. 1ª. Edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 99.
- Connell, D. W. and Miller, G. J. 1984 *Chemistry and ecotoxicology of pollution*. John Wiley & Sons, Inc. Pág. 506.
- Cruz, C.M., Roldán, P.R. y Avila, M.A. 1979 *Deshidratación del Crudo Cantarell en mezclas con el crudo Cretácico*. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo. XI: 74-78.
- Davis, B. 1980 *Applied soil trace elements*. John Wiley & Sons Ltd. USA. Pág. 351.
- Dean, J. G., Bosqui, F. L. and Lanouette, K. H. 1972 *Removing heavy metals from waste water*. Environ. Sci. Tech. (6) 359-363.
- Doelman, P. 1994 *European perspectives of field research on bioremediation: Special attention to the Wetlands*. In: 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Pág. 307-321.
- Doménech, Xavier. 1994 *Química Ambiental: El impacto ambiental de los residuos 2ª*. Edición. Miraguano, España. Pág. 254.
- Duffus, J. H. 1983 *Toxicología ambiental*. Omega. Barcelona, España. Pág. 144.
- Elias-Murguía, R.L., Martínez. V. 1991 *Suelos contaminados con hidrocarburos*. In: F.J. Ruiz. Causas y consecuencias de la contaminación del suelo, mesa redonda. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Pág. 46-93.
- Fergusson, J. E. 1990 *The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact And Health Effects*. Pergamon Press. USA. Pág. 614.
- FAO-UNESCO. 1989 *Mapa Mundial de Suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. Pág. 68.
- FAO. 1994 *World Reference Base for Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia. Pág. 161.
- Fetter, C. W. 1999 *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc. 2ª. Edition. Pág. 500.
- Freedman, B. 1989 *Environmental ecology: the impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function*. Academic Press, Inc. San Diego, California. Pág. 424.
- Fuller, W. H. 1977 *Movement of select metals, asbestos and cyanide in soil, application to waste disposal problem*. EPA 600/2-77-20 Solid and Hazatdous Waste

Research Division, US-EPA, Cincinnati, OH.

Gallegos, M. 1986 *Petróleo y Manglar*. Centro de Ecodesarrollo. Medio Ambiente en Coatzacoalcos. México. Pág. 102.

García, V. P. 1994 *Efectos de la Industria Petrolera en la Agricultura del Estado de Tabasco, específicamente en el cultivo del cacao*. Tesis Universidad Autónoma de Chapingo. Pág. 98.

Gutiérrez, C. M., Zavala, C. J. 2001 *Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos*. Terra 20: 101-111.

Gutiérrez, E. M. 1990 Los residuos sólidos peligrosos (¿un riesgo sin solución?). Ciencias (20): 31-36.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1986 *Síntesis geográfica nomenclator y anexo cartográfico del Estado de Tabasco*. México. D. F. Pág. 116.

Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. 1998 *Génesis; Identificación y Uso de los Suelos de México; Distribución, Propiedades, Clasificación y Manejo de Suelos Residuales y Transportados con Aplicaciones a la Ingeniería Civil*. Documento Técnico No. 19. Sanfandila, Querétaro. Pág. 222.

Kabata-Pendias, A and Pendias, H. 1984 *Trace Elements In Soils and Plants* CRC. Press, Boca Raton. Pág. 315.

Klein, D. H., and Russel, P. 1973 *Heavy metals: Fallout Around Power Plant*. Environ. Sci. Tech (7), 357-358

Lagunez, E. L. C., Méndez González, J. C., Zavala, C. J. y Palma, L. D. J. 1995 *Cuantificación de metales pesados en suelos y cultivos del ejido Cumuapa, Tabasco*. En Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Pág. 44.

Larios, R. J., Hernández, J. 1987 *Fisiografía, ambientes y uso agrícola de la tierra en Tabasco, México*. Universidad Autónoma de Chapingo. Teapa, Tabasco. Pág. 130.

Levinson, A. A. 1983 *Introduction to Exploration Geochemistry*. Illinois, Applied Publishing Company. Pág. 924.

LFU. 1989 *Grenz-und Richtwerte fur die Umweltmedien Luft, Wasser, Boden*. Landesanstalt fur Umweltdhutz, Karlsruhe.

Lindsay, W. L. 1979 *Chemical Equilibria In Soils*. Edited by John Wiley & Sons, Inc. Pág. 449.

Margalef, R. 1983 *Limnología* Ediciones Omega Barcelona España. Pág. 1010.

- McEldowney, S., Hardman, D. J., Waite, S. 1993 *Pollution: Ecology and Biotreatments*. Longman Scientific & Technical. Singapore. Pág. 233-262.
- McGrath, S.P., Chang, A.C., Page, A. L. and Witter, E. 1994 *Long-term effects of metals in sewages sludge on soils, microorganisms and plants*. Journal of Industrial Microbiology (14), 94-104
- Merian, E. 1991 *Metals and their compounds in the environment*. VCH. Alemania. Pág. 1438.
- MENVIQ. 1993 *Problématique des sols et des eaux souterraines pour des produits pétroliers*. Ministère de l'Environnement du Québec. Québec, Canadá. Pág. 120.
- Moreno, D. R. 1978 *Clasificación del pH del suelo, contenido de sales y nutrientes asimilables*. INIA-SARH, México, D. F. Pág. 12-15.
- Paasivirta, Jaakko. 1991 *Chemical Ecotoxicology* Lewis Publishers. Boca Ratón, Florida. Pág. 210.
- Palma, L., D. J. Cisneros D. J., Trujillo N. A., Granados, A. N. y Serrano B. J. E. 1985 *Caracterización de los suelos de Tabasco. Uso actual, potencia y taxonomía. Villahermosa, Tabasco*. Dirección de Educación Superior e Investigación Científica. Secretaría de Educación, Cultura y Recreación. DESIC: SECUR. Gobierno del Estado de Tabasco. Pág. 40.
- PEMEX. 1986 *Brevarios de términos y conceptos sobre ecología y protección ambiental*. México, D. F. Pág. 300.
- Pierzynski, G. M., Sims, T. J., Vance, G. F. 1993 *Soils and Environmental Quality*. Lewis Publishers. Boca Ratón, Florida. Pág. 313.
- Ross, M.S. 1994 *Toxic metals in Soil-Plant Systems*. Edited by S. M. Ross. John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, England. Pág. 469.
- Salomons, W. 1994 *Environmental impacts of metals derived from mining activities: Processes, prediction, prevention*. Journal of Geochemical Exploration (52): 5-23
- Schlichting, E. 1995 *Funktionen von Böden in der Ökosphäre*. Institut für Landes Kultur und Pflanzennökologie der Unier sität Hohenhein. Stuttgart, Deutschland.
- Siebe, Ch., Jahn, R. and Stahr, K. 1996 *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Instituto de Geología. UNAM. México. Pág. 53.
- Snakin, V. V., Krechetov, P. P., Kuzovnikova, T. A., Alyabina, I. O., Gurov, A. F., and Stepichev, A. F. 1996 *The system of assessment on soil degradation*. Soil Technol. (8): 331-343.



- Spiro, T.M., William M. S. 1996 *Chemistry of the Environmental*. Prentice-Hall, Inc. USA. Pág. 449.
- Stephen, M. T., Duane, L. W. 1991 *Restoration of Petroleum Contaminated Aquifers*. Lewis Publishers. Boca Ratón, Florida. Pág. 269.
- Stewart, B. A. 1990 *Advances in Soil Science*. Springer-Verlag. New York Inc. Pág. 219.
- Thomton, I. 1983 *Applied Environmental Geochemistry* Academic Press Geology Series. London. Pág. 309-331
- Toledo, A. 1982 *Petróleo y ecodesarrollo en el sureste de México*. 1ª. Edición. Centro de Ecodesarrollo. México, D. F. Pág. 152.
- Trujillo, N. A., Lagunez, E. L. y Bocanegra, A. J. A. 1995 *Dinámica de metales pesados en suelos y ríos en Comalcalco, Tabasco*. En Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Pág. 42.
- Trujillo, N. A., Lagunez, E. L. y Zavala, C. J. 1995 *Afectaciones petroleras en suelos y cultivos en el estado de Tabasco*. En Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Pág. 40.
- Trujillo, N. A., Lagunez, E. L., González, R. G. 1995 *Metales pesados e hidrocarburos en suelos del estado de Tabasco*. En Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Pág. 41.
- Trujillo, N. A., Zavala, C. J. y Bucio, A. L. 1990 *Evaluación de la contaminación por hidrocarburos aromáticos y metales pesados en los suelos del Ejido La Ceiba, Huimanguillo, Tabasco*. Colegio de Posgraduados. Centro de Enseñanza, Investigación y Capacitación para el Desarrollo del Sur. Cárdenas, Tabasco. Pág. 43
- Tudela, F. 1989 *La modernización forzada del trópico: El caso de Tabasco*. Proyecto Integrado del Golfo. 1ª. Edición. El Colegio de México. INRISD-IFIAS-CINVESTAV. México, D. F. Pág. 475.
- UNAM-IMP-Battelle, 1999 *"Diagnóstico de los efectos ambientales de la Industria Petrolera asociados a la región sur PEMEX Exploración y Producción"*. Fase I. Instituto Mexicano del Petróleo, UNAM y Batelle. Programa Universitario del Medio Ambiente.
- UNESCO. 1976 *Guide to operational procedures for the Igoos pilot project on marine pollution (petroleum)*. Monitoring Manual and Guides 7. Rome, Italy.
- Zartner-Nyilas G and Deutsch. 2002 *Grenzwerte: Kennzahlen zur Umwelt-belastung in Deutschland und in der EG*. Ecomed Verlag, Germany.
- Zavala, C. J., Salgado, G. S., Lagunez, E. L. C., Aceves, N. L. A. y Ruiz, B. A. 1995 *Metales pesados e hidrocarburos en suelos del Plan Chontalpa, Tabasco*. En Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Pág. 43.

**A N E X O S**

**Anexo 1. Actividades petroleras con sus diferentes fuentes emisoras y contaminantes generados en ellas.**

FUENTE EMISORA	CONTAMINANTE
<b>Explotación</b>	
Perforación de pozos.	Derrame de petróleo, aceites, aguas congénitas (cloruros, carbonatos y sulfatos de sodio, sales de magnesio) y lodos.
Quemadores o "mechones".	Emisiones de gases tóxicos: Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S), dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) y óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), anhídrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) y carbónico (CO <sub>2</sub> ) y monóxido de carbono (CO).
<b>Extracción</b>	
Perforación de pozos.	Derrame de petróleo (los indicados en explotación).
Baterías de separación.	Emisiones de gases tóxicos (los indicados en quemadores), hidrocarburos, agua congénita, (los indicados en perforación de pozos).
Estaciones de compresión.	Emisiones de gases tóxicos: (los indicados en quemadores).
Plantas deshidratadoras y desalación.	Hidrocarburos, agua congénita (los indicados en perforación de pozos).
Centros Procesadores de Gas. (CPG)	Emisiones de gases tóxicos: Dióxidos de azufre (SO <sub>2</sub> ) y óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) y monóxido de carbono (CO).
Centros Petroquímicos.	Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), anhídrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) y carbónico (CO <sub>2</sub> ), monóxido de carbono (CO), benceno, etilbenceno, xilenos, glicoles, dietanolamina, ácido carbónico, carbonato de potasio, cloruro de acetaldehído, derrames de hidrocarburos y sales, vertimiento de grasas y aceites.
Purgas: tanques de almacenamiento de crudo, torres de enfriamiento, plantas de tratamiento de agua cruda.	Descargas de aguas residuales (compuestos orgánicos, metales pesados, hidrocarburos, sólidos disueltos y en suspensión).
<b>Movimiento del Producto</b>	
Ductos: roturas, mantenimiento deficiente de gasoductos, poliductos, combustoleoductos.	Derrames de petróleo, aceite, emulsiones, sal, combustóleo, crudo, turbocinas, propeno, gas natural y diesel.

Fuente: Pemex, 1986; Tudela, 1989.

Anexo 2. Características químicas de muestras compuestas en la profundidad de 0 - 15 cm en suelos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Muestra Compuesta	Ubicación	Unidad de Suelo	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KC)	Fósforo Bray (I) (mg/kg)	Nitrógeno (total) (%)	Materia Orgánica (%)	Relación C/N	Sulfato SO <sub>4</sub> (mg/kg)	Ca	Mg	K	Na	H	Al	CICE Suma			
										(mg/100g)									
ZONA CONTROL	CARPICO	BLASILLLO	25a	6.26	4.58	2.80	0.78	5.51	57.10	0.11	3.48	2.81	1.10	0.06	0.03	0.38	7.86		
			25a	6.24	4.55	2.80	0.78	5.47	56.64	0.11	4.44	2.73	1.09	0.06	0.03	0.38	8.73		
			26a	4.98	4.08	8.20	1.00	79.50	48.10	0.18	3.48	4.00	0.43	1.09	0.01	0.44	9.45		
			26a	4.98	4.08	7.00	1.00	79.50	48.30	0.16	3.48	4.00	0.42	1.09	0.01	0.44	9.42		
			27a	5.07	3.98	5.30	1.18	77.30	37.97	0.15	2.80	4.00	0.44	0.73	0.02	0.22	8.01		
			27a	5.07	3.98	5.30	1.17	77.30	38.29	0.15	2.64	4.00	0.44	0.73	0.02	0.22	7.96		
			28a	5.05	3.90	7.00	1.48	72.70	28.90	0.18	12.36	2.73	0.58	0.73	0.10	0.11	18.58		
			28a	5.03	3.91	7.00	1.40	72.70	30.74	0.18	13.43	2.73	0.57	0.73	0.09	0.11	17.98		
					P. D.E.	5.33	4.18	8.43	1.88	88.78	42.83	0.15							18.71
						8.88	8.28	1.77	0.28	32.91	19.82	0.83							4.82
ZONA CONTAMINADA	PETAQUIMICA	SLEVALLO	30a	7.00	6.84	2.20	0.83	41.70	29.18	0.20	27.98	3.93	0.31	14.38	0.00	0.11	48.88		
			30a	7.00	6.85	2.20	0.84	41.70	28.81	0.20	28.47	3.98	0.29	14.38	0.00	0.22	47.32		
			31a	7.43	6.63	4.30	0.74	31.80	25.00	0.24	12.84	4.02	0.18	5.09	0.00	0.22	22.35		
			31a	7.45	7.10	4.30	0.70	31.80	28.43	0.24	11.98	4.02	0.17	5.09	0.00	0.22	21.48		
			32a	5.22	4.22	7.00	0.88	29.80	28.20	0.73	20.48	4.82	0.20	4.18	0.00	0.11	29.87		
			32a	5.20	4.20	7.00	0.88	29.80	28.20	0.89	21.24	4.88	0.18	4.18	0.01	0.11	30.48		
			33a	5.00	4.18	10.20	1.08	44.40	23.80	0.55	14.40	5.07	0.58	3.27	0.00	0.11	23.41		
			33a	5.00	4.18	10.30	1.18	44.40	21.70	0.55	14.40	5.07	0.58	3.34	0.01	0.11	23.48		
					P. D.E.	6.18	6.94	4.81	0.84	36.98	28.88	0.43							36.88
						1.87	1.37	4.28	0.28	8.22	2.48	0.21							5.86
ZONA CONTAMINADA	SLEVALLO	SLEVALLO	34a	4.87	3.53	5.30	1.00	90.00	52.20	0.38	10.79	4.02	0.21	6.18	0.02	0.22	21.44		
			34a	4.85	3.53	5.30	0.98	90.00	55.00	0.33	10.88	3.98	0.21	6.18	0.03	0.22	21.51		
			35a	4.88	3.54	3.70	1.29	77.30	34.70	0.38	10.78	4.02	0.50	6.09	0.09	0.77	21.18		
			35a	4.85	3.54	4.80	1.28	77.30	35.80	0.40	10.79	4.10	5.08	6.09	0.13	0.77	21.38		
			36a	5.19	3.98	3.70	1.32	34.00	30.01	0.31	7.88	3.22	3.54	3.09	0.11	0.80	15.88		
			36a	5.21	3.98	3.70	1.30	34.00	30.54	0.31	8.55	3.25	3.54	3.88	0.12	0.80	18.38		
			37a	5.22	3.72	4.80	0.58	58.00	50.00	0.38	7.98	2.10	3.64	3.64	0.05	0.77	14.88		
			37a	5.23	3.70	4.50	0.80	58.00	48.70	0.38	7.98	2.27	3.64	3.64	0.08	0.77	15.94		
					P. D.E.	4.91	3.91	4.48	1.84	62.83	42.88	0.28							18.4
						8.33	8.88	0.67	0.31	23.88	18.38	0.88							3.18
ZONA CONTAMINADA	CINCO PRESIDENTES	REBOSOL	38a	6.15	4.84	5.30	0.11	1.70	15.45	0.15	0.88	0.72	0.13	0.05	0.02	0.80	2.48		
			39a	6.14	4.86	5.30	0.11	1.80	13.83	0.18	0.82	0.71	0.18	0.05	0.01	0.80	2.44		
			39a	5.82	4.14	5.30	0.04	0.80	12.80	0.11	1.02	0.41	0.08	0.02	0.03	0.22	1.78		
			40a	5.84	4.18	4.50	0.05	0.80	10.08	0.13	1.02	0.48	0.08	0.82	0.03	0.22	1.73		
			40a	5.88	4.17	4.50	0.04	0.30	7.58	0.07	0.80	0.88	0.83	0.04	0.04	0.11	1.70		
			T-41	5.88	4.20	4.50	0.05	0.30	8.00	0.05	0.80	0.86	0.83	0.04	0.03	0.11	1.77		
			T-41	5.18	4.08	3.70	N.D.	0.80	N.D.	0.88	15.78	3.98	0.32	5.82	0.01	0.44	28.28		
				5.18	4.08	3.70	N.D.	0.80	N.D.	0.58	18.88	3.98	0.32	5.82	0.01	0.44	30.48		
				5.78	4.37	4.88	0.87	8.73	18.88	0.34								3.87	
				6.37	6.38	8.82	0.88	8.81	3.88	0.22								11.48	
ZONA CONTAMINADA	REBOSOL	REBOSOL	42a	5.38	4.72	10.30	1.28	74.30	33.40	0.88	19.84	3.23	1.13	13.88	0.08	0.11	37.88		
			42a	5.38	4.72	10.30	1.20	74.00	35.80	0.82	19.84	3.23	1.13	14.88	0.08	0.11	38.31		
			43a	5.20	4.88	7.80	1.34	82.80	36.80	0.51	10.88	3.40	0.88	5.88	0.08	0.11	28.48		
			43a	5.20	4.84	7.80	1.34	82.80	36.70	0.47	10.88	3.48	0.87	5.88	0.08	0.11	28.47		
			44a	5.33	4.68	6.20	1.20	85.70	41.40	0.22	6.18	3.40	0.78	18.72	0.08	0.11	27.14		
			44a	5.31	4.68	5.30	1.20	85.80	41.40	0.28	6.78	3.54	0.77	18.72	0.08	0.11	27.84		
			45a	5.31	4.88	12.00	1.28	82.80	38.30	0.33	2.83	5.08	0.78	13.08	0.00	0.31	21.88		
			45a	5.34	4.88	10.30	1.24	83.00	38.80	0.33	2.83	5.08	0.78	13.08	0.00	0.11	21.88		
			46a	5.70	4.72	5.30	1.20	2.40	38.33	0.15	2.88	0.72	0.83	0.18	0.08	0.11	3.80		
			46a	5.80	4.72	5.30	1.21	2.40	36.04	0.11	2.88	0.72	0.82	0.18	0.08	0.11	3.73		
		P. D.E.	6.48	4.71	8.88	1.28	88.87	37.11	0.37							22.34			
			8.28	8.88	2.82	0.88	33.84	2.74	0.18							11.81			
ZONA CONTROL	FAILEBOT	REBOSOL	47a	5.88	4.70	7.00	0.05	1.90	38.00	0.88	4.38	0.78	0.02	0.18	0.00	0.11	6.48		
			47a	6.01	4.71	7.80	0.08	1.90	38.00	0.87	4.35	0.78	0.02	0.21	0.00	0.11	6.48		
			48a	6.42	5.08	7.00	0.08	1.80	32.00	0.97	3.88	0.77	0.03	0.12	0.00	0.11	4.88		
			48a	6.45	5.08	7.00	0.08	1.80	32.00	0.96	3.88	0.78	0.03	0.12	0.00	0.11	4.88		
			49a	5.80	4.48	7.80	0.10	1.70	17.00	0.84	2.88	0.73	0.38	0.06	0.02	0.11	3.81		
			49a	5.81	4.52	7.80	0.10	1.70	17.00	0.84	2.88	0.72	0.31	0.06	0.02	0.11	3.83		
			50a	6.67	5.57	5.30	0.10	1.80	18.00	0.88	3.84	0.73	0.28	0.13	0.00	0.11	4.27		
			50a	6.67	5.58	5.30	0.10	1.80	18.00	0.11	2.88	0.71	0.28	0.13	0.00	0.11	4.20		
					P. D.E.	6.23	4.88	8.88	0.88	1.78	28.78	0.87							4.88
						0.37	0.43	1.84	0.83	8.13	18.15	0.83							0.67

NOTA: Promedio (P.), Desviación Estándar (D. E.), Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE), Titulado (T).

Anexo 2. Características químicas de muestras compuestas en la profundidad de 0 - 15 cm en suelos del Distrito de Agua Dulce, Tabasco.

Muestra Compuesta	Ubicación	Unidad de Suelo	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	Fósforo Bray (I) (mg/kg)	Nitrógeno (total) (%)	Materia Orgánica (%)	Relación C/N	Sulfatos SO <sub>4</sub> (mg/g)	Ca	Mg	K	Na	H	Al	CRCE Suma		
										(meq/100g)								
ZONA CONTROL	BLASILLO CAMPIDO	HISTOSOL	25a	8.26	4.66	2.80	0.76	6.51	57.10	0.11	3.46	2.61	1.10	0.05	0.03	0.56	7.86	
			25b	8.24	4.66	2.80	0.78	5.47	55.84	0.11	4.44	2.73	1.08	0.05	0.03	0.39	8.73	
			26a	4.98	4.00	6.20	1.00	79.50	46.10	0.18	3.48	4.00	0.43	1.09	0.01	0.44	9.46	
			26b	4.98	4.00	7.00	1.00	79.50	46.30	0.16	3.46	4.00	0.42	1.08	0.01	0.44	9.42	
			27a	5.07	3.96	5.30	1.18	77.30	37.97	0.15	2.80	4.00	0.44	0.73	0.02	0.22	8.01	
			27b	5.07	3.96	5.30	1.17	77.30	38.28	0.15	2.64	4.00	0.44	0.73	0.02	0.22	7.96	
			28a	5.05	3.90	7.00	1.46	72.70	26.90	0.18	12.35	2.73	0.58	0.73	0.10	0.11	16.58	
			28b	5.03	3.91	7.00	1.40	72.70	30.74	0.18	13.43	2.73	0.57	0.73	0.09	0.11	17.66	
				5.33	4.46	5.43	1.89	88.79	42.83	0.15								16.71
				6.66	6.28	1.77	0.26	32.91	10.82	0.63								
ZONA CONTAMINADA	PETROQUIMICA VIENTA	HISTOSOL	30a	7.00	6.84	2.20	0.83	41.70	29.18	0.20	27.98	3.93	0.31	14.36	0.00	0.11	46.09	
			30b	7.00	6.85	2.20	0.84	41.70	28.81	0.20	28.47	3.98	0.29	14.36	0.00	0.22	47.32	
			31a	7.43	6.83	4.30	0.74	31.90	25.00	0.24	12.84	4.02	0.18	5.09	0.00	0.22	22.36	
			31b	7.46	7.10	4.30	0.70	31.90	26.43	0.24	11.96	4.02	0.17	5.09	0.00	0.22	21.46	
			32a	5.22	4.22	7.00	0.66	29.80	26.20	0.73	20.46	4.62	0.20	4.18	0.00	0.11	29.67	
			32b	5.20	4.20	7.00	0.66	29.80	26.20	0.69	21.24	4.66	0.18	4.18	0.01	0.11	30.40	
			33a	5.00	4.15	10.20	1.09	44.40	23.60	0.55	14.40	5.07	0.56	3.27	0.00	0.11	23.41	
			33b	5.00	4.15	10.30	1.19	44.40	21.70	0.55	14.40	5.07	0.55	3.34	0.01	0.11	23.48	
				6.16	6.94	4.81	0.94	38.96	25.99	0.43								38.89
				1.97	1.37	4.29	0.29	8.22	2.49	0.21								
ZONA CONTAMINADA	PETROQUIMICA VIENTA	HISTOSOL	34a	4.87	3.53	5.30	1.00	90.00	52.20	0.36	10.79	4.02	0.21	6.16	0.02	0.22	21.44	
			34b	4.66	3.53	5.30	0.96	90.00	56.00	0.33	10.89	3.98	0.21	6.16	0.03	0.22	21.51	
			35a	4.66	3.54	3.70	1.29	77.38	34.70	0.38	10.79	4.02	0.59	6.09	0.09	0.77	21.18	
			35b	4.55	3.54	4.50	1.28	77.38	36.60	0.40	10.79	4.10	0.59	6.09	0.13	0.77	21.30	
			36a	5.19	3.66	3.70	1.32	34.00	30.01	0.31	7.96	3.22	3.84	3.09	0.11	0.80	16.98	
			36b	5.21	3.66	3.70	1.30	34.00	30.54	0.31	8.55	3.25	3.54	3.66	0.12	0.80	16.30	
			37a	5.22	3.72	4.50	0.68	50.00	60.00	0.36	7.86	2.10	3.64	3.64	0.05	0.77	14.88	
			37b	5.23	3.70	4.50	0.69	50.00	48.70	0.39	7.86	2.27	3.64	3.64	0.08	0.77	15.04	
				4.91	3.81	4.49	1.04	62.83	42.99	0.38								18.4
				0.33	0.96	6.67	0.31	23.85	16.36	0.63								
ZONA CONTAMINADA	CAMPAMENTO PRESEMIERRES	HISTOSOL	38a	6.15	4.84	5.30	0.11	1.70	15.45	0.15	0.88	0.72	0.13	0.05	0.02	0.60	2.40	
			38b	6.14	4.86	5.30	0.11	1.59	13.63	0.18	0.92	0.71	0.15	0.05	0.01	0.60	2.44	
			39a	5.92	4.14	5.30	0.04	0.69	12.50	0.11	1.02	0.41	0.05	0.02	0.03	0.22	1.76	
			39b	5.94	4.15	4.50	0.05	0.59	10.00	0.13	1.02	0.40	0.05	0.02	0.03	0.22	1.73	
			40a	5.88	4.17	4.50	0.04	0.30	7.50	0.07	0.88	0.68	0.03	0.04	0.04	0.11	1.70	
			40b	5.86	4.20	4.50	0.05	0.30	6.00	0.05	0.80	0.85	0.03	0.04	0.03	0.11	1.77	
			T-41	5.16	4.08	3.70	N.D.	0.60	N.D.	0.66	15.76	3.90	0.32	5.82	0.01	0.44	26.25	
			T-41	5.16	4.08	3.70	N.D.	0.80	N.D.	0.66	19.93	3.96	0.32	5.82	0.01	0.44	30.48	
				6.78	4.27	4.99	0.97	0.73	19.88	0.34								8.87
				6.37	6.23	6.62	0.69	0.61	3.88	0.22								
ZONA CONTAMINADA	PETROQUIMICA VIENTA	HISTOSOL	42a	5.36	4.72	10.30	1.29	74.30	33.40	0.66	19.84	3.23	1.13	13.09	0.00	0.11	37.50	
			42b	5.36	4.72	10.30	1.20	74.00	35.80	0.62	19.84	3.23	1.13	14.90	0.00	0.11	39.31	
			43a	5.20	4.86	7.80	1.34	82.90	35.90	0.61	10.80	3.40	0.96	5.09	0.00	0.11	20.48	
			43b	5.20	4.84	7.88	1.34	82.80	35.70	0.47	10.80	3.40	0.97	5.09	0.00	0.11	20.47	
			44a	5.33	4.58	8.29	1.20	85.70	41.40	0.22	6.16	3.40	0.78	16.72	0.00	0.11	27.14	
			44b	5.31	4.58	5.30	1.20	85.60	41.40	0.26	6.70	3.54	0.77	16.72	0.00	0.11	27.84	
			45a	5.31	4.66	12.00	1.26	82.90	38.30	0.33	2.63	5.09	0.78	13.09	0.00	0.31	21.88	
			45b	5.34	4.66	10.30	1.24	83.00	38.80	0.33	2.63	5.09	0.78	13.09	0.00	0.11	21.89	
			46a	5.70	4.72	5.30	1.20	2.40	35.33	0.15	2.66	0.72	0.03	0.19	0.00	0.11	3.80	
			46b	5.80	4.72	5.30	1.21	2.40	35.04	0.11	2.69	0.72	0.02	0.19	0.00	0.11	3.73	
ZONA CONTROL	PAILEBOT	HISTOSOL		6.49	4.71	8.06	1.26	66.67	37.11	0.37							22.34	
				0.29	0.89	2.82	0.66	33.84	2.74	0.19								11.91
			47a	5.96	4.70	7.00	0.05	1.90	38.00	0.09	4.36	0.79	0.02	0.19	0.00	0.11	5.46	
			47b	6.01	4.71	7.86	0.05	1.90	38.00	0.07	4.36	0.79	0.02	0.21	0.00	0.11	5.48	
			48a	6.42	5.08	7.00	0.05	1.60	32.00	0.07	3.66	0.78	0.03	0.12	0.00	0.11	4.88	
			48b	6.45	5.05	7.00	0.05	1.60	32.00	0.06	3.66	0.78	0.03	0.12	0.00	0.11	4.88	
			49a	5.80	4.49	7.80	0.10	1.70	17.00	0.04	2.60	0.73	0.30	0.05	0.02	0.11	3.81	
			49b	5.81	4.52	7.80	0.10	1.70	17.00	0.04	2.60	0.72	0.31	0.05	0.02	0.11	3.83	
			50a	6.87	5.57	5.30	0.10	1.60	16.00	0.09	3.04	0.73	0.28	0.13	0.00	0.11	4.27	
			50b	6.87	5.56	5.30	0.10	1.60	16.00	0.11	2.99	0.71	0.28	0.13	0.00	0.11	4.20	
	6.23	4.96	6.98	0.88	1.78	26.76	0.67								4.89			
	6.37	6.43	1.04	0.83	0.13	16.16	0.83									0.67		

NOTA: Promedio (P.), Desviación Estándar (D. E.), Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CRCE), Traslado (T).

Anexo 4. Intervalo de valores de metales pesados por diferentes autores y campos petroleros en el estado de Tabasco.

CAMPO PETROLERO	UNIDAD SUELO	Cr	Cu	V	NI (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn	Pb	Cd	AUTOR
Blasillo	Histosol		5-65	15					Trujillo <i>et al.</i> , (1995)
	Vertisol		110-160	15-150					
	Fluvisol		110-145	67-115					
	Gleysol		75-160	28-150					
Cárdenas	Fluvisol		104			340	20		Trujillo, Lagunez, y Zavala (1995)
Blasillo			160		125				
Marañon					173				
Mayacaste					206				
Tuplico					142	467			
Yagual					157				
Paredón						200			
El Golpe	Gleysol				91				
Samaria			160		213				
Blasillo			204						
Paredón			128			451			
Samaria									
Paredón	Vertisol							34	
Cinco Presidentes	Regosol	11	2		19	26	16		Trujillo, Lagunez, y Gonzalez (1995)
Castarrical	Fluvisol	51	10		37	40	16		
Cundacán		30	6		36	40			
Castarrical	Sin Unidad	51	10		37	40	16		Trujillo, Lagunez y Bocanegra (1995)
Chinchorro		15	10		61	34	20		
El Golpe		13	32		191	101	11		
Marañon		51	21		173	60	36		
Mayacaste		19	25		206	74	15		
Tuplico		32	27		142	467	90		
Yagual		22	20		157	74	7		
Cárdenas	Gleysol		104		88		204		Zavala <i>et al.</i> , (1995)
Paredón			84		24		140		
Blasillo	Histosol	9-33	6-14	28-57	12-19	22-26	9-13	0.2-0.3	Datos obtenidos en este trabajo
Petroquímica La Venta	Gleysol	12-45	6-33	35-63	12-59	22-65	16-18	0.2-0.3	
	Histosol	34-46	19-27	35-52	10-54	16-43	12-18	0.20	
Cinco Presidentes	Histosol	1-3	2-4	13-29	7-13	12-26	7-9	0.20	
	Regosol	1-5	2-6	24-85	8-14	11-34	5	0.20	
Pailebot	Regosol	9-17	3-5	24-41	11-24	16-24	3-6	0.20	