

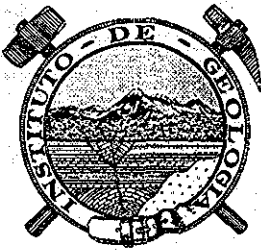
03060  
8



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONAL  
Y DE POSGRADO DEL CCH  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
SEDE: INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Origen de Cr, Ni y V en suelos de Cd. Pemex,  
Tabasco



T E S I S  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
(GEOQUÍMICA Y PETROLOGÍA)  
PRESENTA:  
MANUEL HERNÁNDEZ QUIROZ

ASESOR: Dra. CHRISTINA SIEBE GRABACH

CIUDAD UNIVERSITARIA

2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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.

A mis padres...

... a mi esposa Aída y a mis hijos Carlos y Diego  
(gracias por concederme su tiempo)

...a mis hermanas

...con todo mi amor.

...A ti "pepe" José Goycochea Pineda  
(por brindarme tu apoyo y confianza)

## INDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo general</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivos particulares	3
<b>3. Hipótesis</b>	<b>3</b>
<b>4. Marco teórico</b>	<b>4</b>
4.1. Origen de los metales pesados en el suelo	4
4.2. Comportamiento de los metales pesados en el suelo	10
<b>5. Descripción de la zona de estudio</b>	<b>12</b>
5.1. Desarrollo de la industria petrolera en la zona de estudio	12
5.2. Límites del área de estudio	12
5.3. Historia geológica	13
5.4. Estratigrafía	15
5.5. Fisiografía	16
5.6. Hidrografía	18
5.7. Clima	18
5.8. Vegetación	19
5.9. Suelos	20
5.10. Uso del suelo	20
<b>6. Metodología</b>	<b>21</b>
6.1. Estrategias de la investigación	21
6.2. Método de campo	21
6.3. Método de laboratorio	23
6.3.1. Análisis físicos	23
6.3.2. Análisis químicos	23
6.3.3. Análisis mineralógicos	25
6.3.4. PIXE	26
<b>7. Resultados</b>	<b>27</b>
7.1. Descripción de los perfiles tipo	27
7.1.1. Localidad de Cd. Pemex	27
7.1.2. Localidad de Vernet	29
7.2. Propiedades físicas y químicas generales	31
7.3. Fraccionamiento de metales pesados en suelos	37
7.3.1. Cromo	37
7.3.2. Vanadio	40
7.3.3. Níquel	42
7.3.4. Cobre	46
7.3.5. Zinc	49
7.3.6. Plomo	52

7.4.	Fraccionamiento de metales pesados en nódulos de Cd Pemex	55
7.5.	Análisis mineralógicos	56
7.5.1	Análisis mineralógico en la fracción de arena fina	56
7.5.2.	Morfología y mineralogía de los nódulos	58
7.5.3.	Análisis a la microsonda electrónica	59
7.5.3.1.	Composición química de nódulos	59
7.5.3.2.	Morfología y composición química de concreciones	62
7.6.	Determinaciones de Ti y Zr	70
7.7.	Análisis de elementos totales por PIXE	71
<b>8.</b>	<b>Discusión</b>	<b>73</b>
8.1.	Aportes de metales pesados	73
8.1.1.	Material parental de los suelos	73
8.1.2.	Actividad Volcánica	75
8.1.3.	Actividad petrolera	76
8.2.	Procesos pedogenéticos	76
8.2.1.	Neoformación de óxidos de Fe	76
8.2.2.	Neoformación de arcillas	77
8.2.3.	Óxido-reducción	77
8.2.4.	Acumulación en materia orgánica	79
8.2.5.	Iluviación de arcillas	80
8.2.6.	Lixiviación de bases y ácido silícico	80
8.3.	Origen del cromo	80
<b>9.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>82</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>84</b>
<b>11.</b>	<b>ANEXOS</b>	

## Agradecimientos

Agradezco de manera especial a mi asesora de tesis, la Dra. Christina Siebe Grabach, por su tiempo y dedicación. Siempre tomaré en cuenta sus palabras "el saber pensar, expresarse y escribir son parte de una buena formación".

Agradezco el apoyo y motivación de la M. en C. Andrea Herre compañera, amiga y siempre una maestra.

Agradezco la gentileza de todos los integrantes del Laboratorio de Edafología Ambiental (LEA) por cederme su tiempo en el uso de los equipos y la preparación de muestras.

A los miembros del jurado de examen de grado integrado por la Dra. Silke Cram, la Dra. Anne Hansen, el Dr. Juan Carlos Mora y el Dr. Sergey Sedov les agradezco la minuciosa revisión, aportes y sugerencias que hicieron a toda la tesis.

Agradezco al Dr. Gustavo Tolson Jones por su atención, interés y a sus valiosos comentarios y a la Dra. Ma. Aurora Armienta sus observaciones y recomendaciones durante los exámenes intermedios anuales.

El presente trabajo fue posible gracias a las siguientes instituciones que permitieron el uso de sus instalaciones y servicios: Instituto de Geología con la invaluable colaboración del Departamento de Edafología, el Instituto de Geofísica y el Instituto de Geografía de la UNAM, el Instituto Mexicano del Petróleo, Battelle y las bibliotecas de las instituciones mencionadas.

Agradezco a la M. en C. Angélica Herrerías por su contribución en el análisis de las muestras por difracción de rayos X, al Químico Rufino Lozano Santa Cruz, por su contribución en el análisis de las muestras por fluorescencia de rayos X, al Dr. Eduardo Andrade Ibarra, la Dra. Corina Solís y el Dr. Giraldo Murillo por la asistencia en el análisis de las muestras usando la técnica de "PIXE". También agradezco al M. en C. Eustacio Pérez Zavala por su contribución en el mantenimiento y la operación del Acelerador Van De Graaff, a mis amigos y compañeros de batalla: Lucy Mora, Ma. del Pilar Ortega, Norma Fernández y Yaan Rene Ramos y todas las personas, profesores y amigos que de distinta manera motivaron y ayudaron a concluir este trabajo.

## Resumen

En estudios anteriores se han reportado altos contenidos de Cr, Ni y V en suelos de zonas aledañas al Complejo Procesador de Gas Ciudad Pemex, Tabasco. Como probables fuentes se identifican las siguientes: i) Antropogénea, por la actividad petrolera que se encuentra establecida en la región desde 1958 ii) Geogénea, heredada del material de origen (sedimentos de antiguas terrazas marinas miocénicas). iii) Volcánica, por la relativa cercanía del volcán "El Chichón". El objetivo general de este trabajo fue determinar el origen de Cr, Ni y V en zonas aledañas al Complejo Procesador de Gas de Ciudad Pemex, Tabasco.

Se seleccionaron dos perfiles de suelo de tipo Acrisol dentro de la misma unidad ecogeográfica, uno en una zona inmediata al complejo petroquímico Cd. Pemex (localidad de Cd. Pemex) y otro en una zona alejada, pero relativamente más cerca, que el sitio anterior, del volcán El Chichón (localidad de Vernet). En los métodos de investigación se combinaron análisis físico-químicos p.e.: Extracciones secuenciales y totales de metales pesados Cr, Ni, V, Cu, Zn y Pb y multielementales (PIXE) con análisis mineralógicos (microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX), microsonda y microscopía electrónica) de diferentes estructuras del suelo como: nódulos, revestimientos y la matriz del suelo.

Los resultados muestran que las emisiones del CPG Cd. Pemex no influyen en las altas concentraciones y disponibilidad del Cr, Ni y V en los suelos, debido a que no se observó una mayor concentración de los metales totales en el suelo inmediato al CPG en comparación con el suelo distante (Vernet) Tampoco se observó un incremento en las fracciones relativamente más disponibles. Los aportes volcánicos influyen principalmente en la localidad de Vernet en las concentraciones totales de Cu, Zn y V y en el incremento de formas relativamente más móviles de Cu, Zn, Ni, en el horizonte superficial. La estratificación del material de ambos perfiles es una limitante para relacionar la distribución vertical y horizontal de los metales pesados con procesos pedogenéticos. Los sedimentos de origen fluvial depositados en la superficie de ambos suelos contienen una gran cantidad de nódulos. El análisis micromorfológico de estos nódulos permite concluir que son materiales lateríticos transportados de suelos preexistentes en otra posición en el relieve (antigua terraza alta). Los análisis semicuantitativos con microsonda permitieron identificar que las concentraciones más altas de Cr se encuentran en pequeñas concreciones de origen pedogenético ubicadas mayoritariamente en las superficies de los fragmentos lateríticos. La similitud en la distribución de Cr y V con la profundidad del suelo sugieren que ambos metales tienen el mismo origen.



## 1. Introducción

El presente trabajo formó parte de un proyecto realizado dentro del marco de la alianza UNAM-IMP-Battelle en el cual se analizaron los efectos ambientales de la industria petrolera en la Región Sur del Golfo, específicamente en el estado de Tabasco y en el Norte de Chiapas (UNAM-IMP-Battelle, 1999). Por parte de la UNAM participaron en el proyecto los institutos de Geología, Biología y Ciencias del Mar y Limnología coordinados por el Programa Universitario del Medio Ambiente.

Una de las áreas estudiadas dentro del marco del proyecto fue el área circundante al Centro Procesador de Gas (CPG) Cd. Pemex en el municipio de Macuspana, Tabasco. En las investigaciones de posibles afectaciones del suelo por actividades petroleras, llevadas a cabo por el instituto de Geología, se observaron contenidos elevados de metales pesados totales en los suelos comparados con los reportados en la literatura como concentraciones normales en suelos, en particular de cromo, níquel y vanadio.

Los metales pesados forman parte del suelo de manera natural, dado que se heredan del material de origen, sin embargo, existen también otras posibles fuentes para estos metales, como se detalla a continuación:

1. Su origen podría deberse a la actividad petrolera que se encuentra establecida en esta región desde 1958, año durante el cual se empieza la construcción de la unidad petroquímica Cd. Pemex, Macuspana, Tabasco, para el control de los campos terciarios.

El petróleo crudo usualmente contiene cantidades altas de vanadio y níquel, que pueden encontrarse como iones libres ( $\text{VO}^{2+}$  (vanadyl) y  $\text{Ni}^{+2}$ ) o formando complejos en los núcleos de las metaloporfirinas o en compuestos no-porfirínicos que tienen grandes cadenas moleculares en fracciones no volátiles y residuales (Botello, 1996; Márquez *et al.*, 1999). Guzmán-Vega y Mello (1999) reportan en el petróleo de la cuenca de Macuspana concentraciones de níquel de 1 a 34  $\text{mg kg}^{-1}$  y de vanadio de trazas ( $< 5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y en la sierra entre los estados de Chiapas y Tabasco de 1 a 38  $\text{mg kg}^{-1}$  de níquel y de 5 a 48  $\text{mg kg}^{-1}$  de vanadio.

En el proceso de producción de gas natural desde la separación del crudo, el manejo del gas amargo y la remoción de  $\text{H}_2\text{S}$  (endulzamiento), es necesario contar con quemadores de seguridad para el control de presión durante el proceso (Bravo-Álvarez y Torres-Jardón, 1996). Es por ello que el níquel y vanadio incluidos en partículas sólidas pueden ser emitidos a la atmósfera por medio de los quemadores de gas. La quema de crudo al aire libre en fosas inmediatas al CPG también puede contribuir a la emisión de partículas que contengan metales pesados.

El cromo, además de formar parte del crudo, puede asociarse también a actividades petroleras, debido a que en décadas pasadas se empleaban oxidantes y catalizadores en base a cromo para la limpieza de contenedores y como antioxidantes (UNAM-IMP-Battelle, 1999).

Por lo anterior, el origen del cromo, níquel y vanadio en los suelos cercanos al complejo procesador de gas de Cd Pemex podría derivarse de las actividades petroleras

2. El área de Cd Pemex se encuentra sobre sedimentos de antiguas terrazas marinas miocénicas. Castellanos-Trujillo en 1982 reporta altos contenidos de Cr en suelos de la parte central del estado de Chiapas y en el Flanco Sur de la Sierra de Chiapas, y propone que su origen es marino. Argumenta que el aporte de cromo pudo darse por medio de corrientes marinas hidrotermales provenientes de zonas de subducción oceánica o de actividad volcánica marina. Las corrientes que se generan en estas zonas debido a su alta temperatura y presión disuelven minerales e intercambian iones enriqueciendo en metales el área sobre todo de aquellos que conforman los basaltos oceánicos donde éstas se generaron. El cromo está contenido en arenas finas de color oscuro.

3. Por otro lado el origen del cromo, níquel y vanadio podría ser por adición volcánica, debido a la cercanía del volcán El Chichón (su más reciente erupción fue en 1982). Espíndola *et al.* (2000) reporta de 5 a 635 mg kg<sup>-1</sup> de cromo, de 4 a 206 mg kg<sup>-1</sup> de níquel y de 68 a 316 mg kg<sup>-1</sup> de vanadio, en piroclastos del volcán El Chichón.

4. Los sedimentos también pueden ser enriquecidos por corrientes fluviales que adquieren los elementos como resultado del intemperismo y la disgregación de las rocas en las partes altas y medias de la cuenca.

## 2. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es determinar el origen (geogéneo o antropogéneo) de Cr, Ni y V en zonas aledañas al Complejo Procesador de Gas Ciudad Pemex, Tabasco

### 2.1. Objetivos particulares.

1. Determinar los contenidos de Cr, Ni y V en los suelos en función de:
  - i) Su ubicación respecto al CPG y/o al volcán El Chichón.
  - ii) Su distribución en los diferentes horizontes del suelo.
  - iii) Su contenido en las estructuras (agregados y nódulos) y minerales del suelo.
2. Evaluar la movilidad de los metales a través de una extracción secuencial.

En este trabajo se decidió estudiar en detalle dos suelos ubicados en la unidad ecogeográfica donde se encuentra el CPG; uno de los suelos se encuentra a 450 m de distancia en dirección Noroeste del CPG (en dirección predominante del viento) y el otro se encuentra a 8 km de distancia en dirección Suroeste y en dirección hacia el volcán El Chichón

## 3. Hipótesis

1. La actividad petrolera es la principal fuente de metales pesados, los cuales se concentran en los suelos circundantes donde se desarrolla la misma. Si esto se cumple, se espera que su concentración sea mayor en la parte superficial del suelo localizado cerca del CPG; donde los metales estarán asociados a las fracciones relativamente más móviles (intercambiables o asociados a la materia orgánica).
2. Se propone a la actividad volcánica (tefras del Chichón) como la fuente de las concentraciones anómalas de los metales pesados. Si la hipótesis resulta cierta, la acumulación de metales será más alta en la localidad más cercana al volcán y los metales deberán estar asociados a minerales primarios de origen volcánico.
3. Los sedimentos miocénicos son el material de origen de las concentraciones de metales pesados. En esta hipótesis se espera, que la concentración sea similar en ambas localidades y que la distribución de los metales en los suelos esté correlacionada con procesos pedogenéticos.

## 2. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es determinar el origen (geogéneo o antropogéneo) de Cr, Ni y V en zonas aledañas al Complejo Procesador de Gas Ciudad Pemex, Tabasco

### 2.1. Objetivos particulares.

1. Determinar los contenidos de Cr, Ni y V en los suelos en función de:
  - i) Su ubicación respecto al CPG y/o al volcán El Chichón.
  - ii) Su distribución en los diferentes horizontes del suelo.
  - iii) Su contenido en las estructuras (agregados y nódulos) y minerales del suelo.
2. Evaluar la movilidad de los metales a través de una extracción secuencial.

En este trabajo se decidió estudiar en detalle dos suelos ubicados en la unidad ecogeográfica donde se encuentra el CPG; uno de los suelos se encuentra a 450 m de distancia en dirección Noroeste del CPG (en dirección predominante del viento) y el otro se encuentra a 8 km de distancia en dirección Suroeste y en dirección hacia el volcán El Chichón

## 3. Hipótesis

1. La actividad petrolera es la principal fuente de metales pesados, los cuales se concentran en los suelos circundantes donde se desarrolla la misma. Si esto se cumple, se espera que su concentración sea mayor en la parte superficial del suelo localizado cerca del CPG; donde los metales estarán asociados a las fracciones relativamente más móviles (intercambiables o asociados a la materia orgánica).
2. Se propone a la actividad volcánica (tefras del Chichón) como la fuente de las concentraciones anómalas de los metales pesados. Si la hipótesis resulta cierta, la acumulación de metales será más alta en la localidad más cercana al volcán y los metales deberán estar asociados a minerales primarios de origen volcánico.
3. Los sedimentos miocénicos son el material de origen de las concentraciones de metales pesados. En esta hipótesis se espera, que la concentración sea similar en ambas localidades y que la distribución de los metales en los suelos esté correlacionada con procesos pedogenéticos.

## 4. Marco teórico

### 4.1. Origen de los metales pesados en los suelos.

Se denominan metales pesados a aquellos elementos, cuya densidad real es mayor a  $5 \text{ g cm}^{-3}$  (Barceló y Charlotte, 1989; Alloway, 1990). Los metales pesados en los suelos se encuentran de forma natural en el material de origen y su concentración difiere en función de su composición mineralógica. En el cuadro 1, se presentan los intervalos de concentración de algunos metales pesados reportados como normales en diferentes tipos de rocas.

Las rocas ígneas básicas y ultrabásicas (Cuadro 1) contienen cantidades importantes de metales pesados, como Cr, Ni y V. Debido a la analogía que existe entre sus radios atómicos con los del  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , pueden inducir a una sustitución isomórfica en las estructuras de algunos minerales (olivino, hornblenda, biotita, titanita, ilmenita, magnetita, circón y cuarzo) producida por la cristalización fraccionada del enfriamiento progresivo del magma (diferenciación magmática) y está regida por la carga iónica, el radio iónico y la electronegatividad de los elementos (Alloway, 1990; Porta *et al.*, 1994). El Pb tiende a tener mayor afinidad con la sílice, incrementando así su concentración en rocas ácidas (Nriagu, 78: en Alloway, 1990).

Entre las rocas sedimentarias, las pizarras y lutitas son las más comunes y sus contenidos de metales pesados están condicionados por su composición mineralógica (minerales de arcilla, cuarzos, feldespatos, micas, carbonatos, fragmentos de rocas metamórficas y minerales accesorios pesados como: zircón, magnetita, hematita etc.) (Porta *et al.*, 1994). Las areniscas constituyen el 15 % de la corteza terrestre y generalmente contienen promedios bajos de metales pesados (Cuadro 1).

Las rocas evaporíticas conforman el 5% de rocas sedimentarias y su contenido en metales pesados es muy variable. Metales como el Cu y el Zn se encuentran principalmente asociados a sulfuros como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) respectivamente (Jeffery y Hutchison, 1986; Alloway, 1990).

**Cuadro 1: Concentraciones de algunos metales pesados reportados en rocas ( $\text{mg kg}^{-1}$ ):**

Elemento	Rocas ígneas:				Sedimentarias:		
	Ultrabásicas	Básicas	Intermedias	Graníticas	Calizas	Areniscas	Pizarras
Zn	25-100	50-200	50-100	10-100	20	30	120 (<1000)
Cu	10-50	10-100	30-100	5-50	5.5	30	39 (<300)
Ni	1000-1500	5-300	10-30	10-20	7	9	68 (<300)
Cr	500-15000	100-1000	20-100	3-30	11	35	9 (<500)
Pb	-	1-5	2-20	5-100	5.7	10	23 (<400)
V	20-30	10-1000	10-300	3-300	45	20	130 (<2000)

Valores entre paréntesis = promedios. Fuente: para rocas ígneas Jeffery y Hutchison, 1986; en sedimentarias Alloway, 1990.

pesados (Figura 1) debido a la disponibilidad de estas sustancias en el agua marina provenientes de rocas cercanas a zonas de subducción oceánica, de actividad volcánica marina o por aporte continental que influyen en la composición química de los precipitados pero son las condiciones fisico-químicas en el ambiente marino las que controlan la formación de las fases minerales

Especies enriquecidas en zonas oxigenadas como los óxidos e hidróxidos, de acuerdo con su carga superficial, forman mezclas coloidales como:  $MnO_2/Fe(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_3/Ti(OH)_4$  y  $Fe(OH)_3/Al(OH)_3/SiO_2$ . Estas mezclas, atrapan metales traza por procesos de sorción, por ejemplo (Figura 1): metales de V ( $HVO_4^{2-}$  y  $H_2VO_4^-$ ) y Cr ( $CrO_4^{2-}$ ) que podrían estar enriquecidos en el ambiente. Los aniones son fuertemente adsorbidos por la carga positiva de la superficie de coloides de  $Fe(OH)_3$  ( $pH_{pzc}$  8.5). Por su parte, los óxidos de Mn cargados negativamente atraen cationes. La mezcla de coloides y metales coprecipitan a óxidos amorfos y oxihidróxidos que se incrustan sobre los sedimentos marinos (Koschinsky y Halbach, 1995)

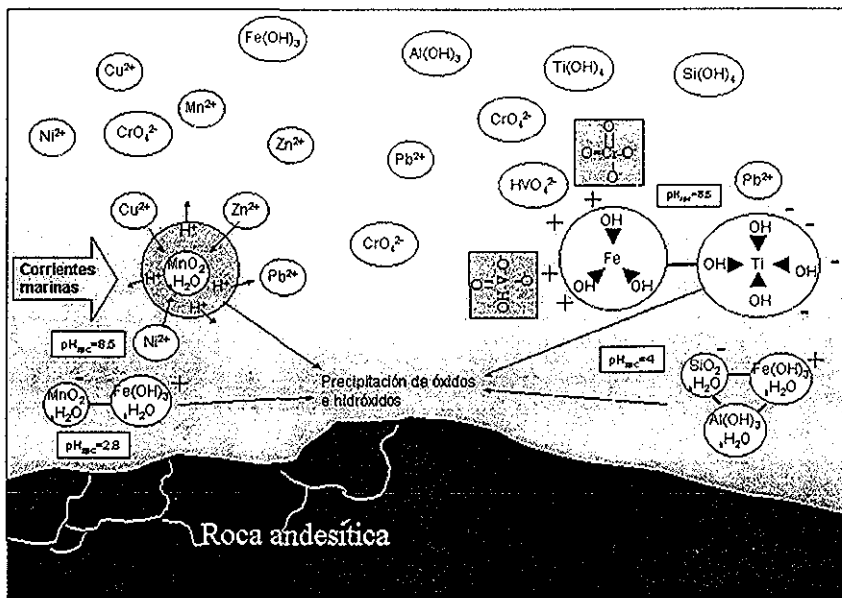


Figura 1: Precipitación de mezclas coloidales y formación de concreciones de Fe y Mn en ambientes marinos. Tomado y modificado de Koschinsky y Halbach (1995).

Como última fase en suelos minerales que han alcanzado un alto grado de desarrollo, la precipitación de óxidos de Mn y Fe es especialmente importante ya que pueden encontrarse como cementantes entre las partículas, como capas

sobre granos de arena y/o como partículas finas del tamaño de las fracciones de limos, sobre filosilicatos del tamaño de arcillas del tipo de la illita o caolinita y asociados a plagioclasas, cuarzo y carbonatos. También forman estructuras como agregados y concreciones o nódulos en el suelo, en las cuales pueden estar asociadas altas concentraciones de metales pesados, especialmente de Co, Ni y Cr (Koons *et al.*, 1980; Tucker *et al.*, 1994; Latrielle *et al.*, 2001). Además los óxidos son buenos indicadores ambientales de pedogénesis, ya que las especies varían con el ambiente pedogenético (Schwertmann, 1985; Singh y Gilkes, 1992).

La acumulación en el perfil de óxidos de Fe por el transporte vertical o lateral del Fe puede formar capas o estructuras endurecidas conocidas genéricamente como lateritas. Schellmann (1981) define el término de laterita como cuerpos producto del intemperismo subaéreo donde los contenidos de Fe y/o Al son más altos que el contenido de Si. Estos cuerpos consisten de la congregación de goetita, hematita, hidróxidos de Al, caolinita y cuarzo. Las lateritas pueden contener concentraciones importantes de muchos metales pesados (Evans, 1989; Braucher *et al.*, 1998; Beauvais, 1999; Hill *et al.*, 2000).

En general las lateritas son formaciones superficiales que resultan del intemperismo de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. Los factores que determinan su extensión y grado de formación, así como su textura y mineralogía son: la composición del material parental y sus transformaciones químicas y físicas que pueden variar con el clima, la topografía, el drenado, la química y movimiento de las aguas subterráneas, la posición del manto freático, la actividad biológica y la duración de los procesos de intemperismo (Hill *et al.*, 2000). Braucher *et al.* (1998) distinguieron dos tipos de cubiertas lateríticas en el Oeste de África:

- i) Con un bajo grado de poligenismo textural, debido a una historia de intemperismo simple.
- ii) Con un alto grado de poligenismo textural, con una compleja historia de formación debido a variaciones en las condiciones ambientales.

Las concreciones pedogenéticas autóctonas o de formación *in situ*, se diferencian de las alóctonas o transportadas, en que se encuentran dentro de la red porosa del suelo como resultado de cambios estacionales, condiciones redox y pH, su matriz concuerda con la matriz del suelo que le rodea en forma, mineralogía y abundancia; su forma puede ser irregular con límites difusos o gradual o bien lisas con límites definidos. Las concreciones alóctonas son de formas y límites definidos, su matriz es de composición variable y no corresponde con la matriz suelo (Vepraskas *et al.*, 1994; Tucker *et al.*, 1994; Palumbo *et al.*, 2001).

Ambos tipos de concreciones pueden estar enriquecidas con metales pesados comparados con la matriz del suelo circundante. Las concreciones alóctonas pueden enriquecer relativamente sus alrededores, mientras que las

concreciones autóctonas pueden enriquecerse por sorción de los elementos del medio que les rodea (Palumbo *et al.*, 2001)

Aparte de su formación durante la pedogénesis, las concreciones de Fe y Mn pueden formarse en ambientes marinos (Figura 1), arroyos y lagos. Ocurren a través de un amplio espectro de climas y están asociadas con el material de origen rico en Fe. Las concreciones pedogenéticas y de agua dulce se caracterizan por contener una menor concentración de elementos traza con respecto a las formadas en ambientes marinos (Palumbo *et al.*, 2001).

Además de los metales pesados heredados del material parental, los suelos pueden recibir aportes por actividades volcánicas (Cuadro 2) o de materiales transportados por la fuerza de gravedad, movimiento fluvial o eólico.

**Cuadro 2: Intervalos de concentración de algunos metales pesados reportados en piroclastos del volcán "El Chichón" (mg kg<sup>-1</sup>).**

	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni	V
Espíndola <i>et al.</i> , 2000	8-635	11-98	6-14	72-92	5-206	88-316
Varekamp, 1984.	-	40-187	14-26	64-1126	-	89-209
Mc Gee <i>et al.</i> , 1987.	6-7	45-34	7-8	100-90	9-2	190
William <i>et al.</i> , 1984.	15-32	10-130	-	51-68	<0.5-5	92-108
<b>Datos de Mc Gee <i>et al.</i> (1987):</b>						
<b>durante 1982</b>	6-9	14-47	<0.4-20	80-90	4-6	180-190
<b>y antes de 1982</b>	7	27-37	6-10	42-80	4-5	140-170

El material que resulta de la erosión y disgregación de las rocas, comienza a sufrir cambios debido a procesos formadores de suelo que varían acorde a los factores prevalecientes como son: el clima, la topografía (posición en el paisaje) los organismos, el hombre y el tiempo (Brady y Weill, 1996; Fujikawa *et al.*, 2000).

La persistencia de los minerales en el paisaje está en función a su resistencia al intemperismo. Debido a los procesos de intemperismo que ocurren en el suelo, los metales pesados se redistribuyen, hay disolución de minerales primarios y sus componentes elementales pueden volver a precipitar en minerales secundarios, acumularse formando complejos con superficies orgánicas e inorgánicas o permanecer temporalmente en la solución del suelo (Bruemmer *et al.*, 1986; Sposito en: Thornton, 1983). Esta redistribución de elementos se presenta tanto en forma horizontal como vertical:

La redistribución de los elementos en el paisaje de forma horizontal es promovida por procesos morfodinámicos y pedogenéticos a escala de paisaje, resultando una acumulación relativa en algunos sitios del paisaje (planicies), contra la pérdida relativa en otros (vertientes) (Figura 2).



La redistribución de los elementos en el paisaje de forma horizontal es promovida por procesos morfodinámicos y pedogenéticos a escala de paisaje, resultando una acumulación relativa en algunos sitios del paisaje (planicies), contra la pérdida relativa en otros (vertientes) (Figura 2).

Clima tropical húmedo

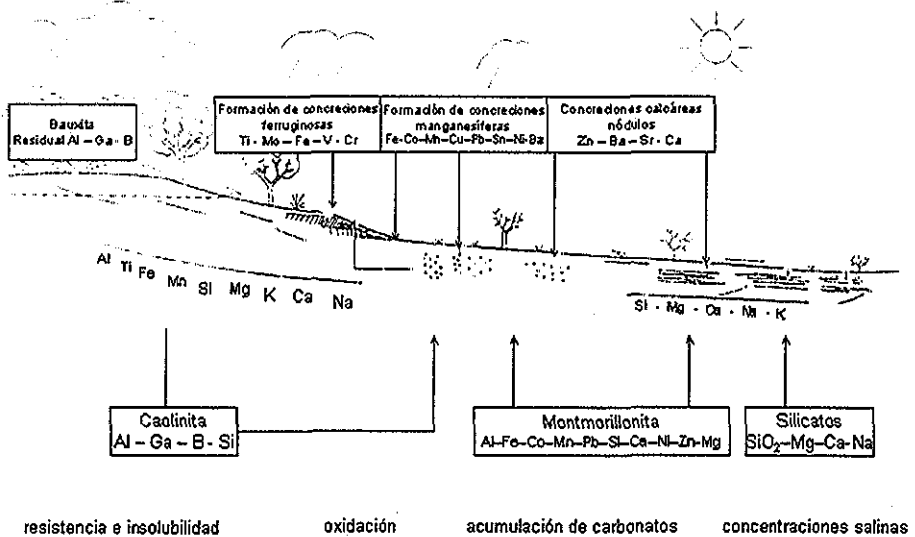
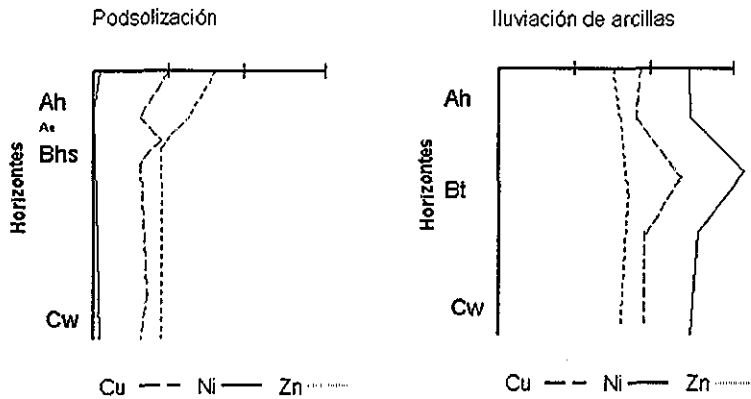


Figura 2: Distribución de algunos elementos en el paisaje.

La redistribución vertical de los metales pesados en un perfil depende de los procesos pedogenéticos (Figura 3). Para el proceso de podsolización se reporta, por ejemplo, una acumulación de Cu en horizontes de iluviación de humus (Bhs) debido a la afinidad de este elemento con la materia orgánica (Balasoiu *et al.*, 2001). Para el proceso de iluviación de arcillas se reporta, por ejemplo, la acumulación de Ni en horizontes de iluviación (Bt) (Schlichting *et al.*, 1995). En comparación, los metales pesados que entran al suelo por depositación aérea de manera natural o antropogénica se encuentran característicamente acumulados en los horizontes superficiales del suelo (A) y con el tiempo (cientos a miles de años) su distribución se somete a los procesos pedogenéticos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Ah = Horizonte mineral con acumulación de materia orgánica.  
 Ae = Horizonte mineral con moderada eluviación de compuestos orgánicos.  
 Bhs = Horizonte mineral de iluviación con acumulación de materia orgánica.  
 Bt = Horizonte mineral de iluviación con acumulación de arcillas.  
 Cw = Horizonte mineral no consolidado con alteración *in situ*.

Figura 3: Ejemplo de la distribución de algunos metales pesados ( $\text{g kg}^{-1}$ ) en horizontes del suelo, como resultado de procesos de podsolización e iluviación de arcillas (Schlichting *et al.*, 1995).

En el Cuadro 3 se presentan las concentraciones totales de los metales pesados presentes en los suelos de forma natural. Dependiendo si un elemento es esencial o no para los seres vivos, tiene dos umbrales; uno de deficiencia y uno de concentración crítica (Barceló y Charlotte, 1989; Alloway, 1990).

Cuadro 3: Intervalos de concentración de algunos metales pesados reportados en suelos ( $\text{mg kg}^{-1}$ ):

Elemento	Texturas de suelos sin influencia antrópica:	
	Gruesas	Finas
Zn	10-100 (50)	100-300
Cu	5-30 (20)	30-80
Ni	5-50 (20)	50-500
Cr	100 (30)	100-300 (200)
Pb	5-40 (15)	40-200
V	5-100 (20)	100-200

Fuente: Fiedler y Roessler (1988).  
 Valores entre paréntesis = promedios.

## 4.2. Comportamiento de los metales pesados en el suelo

La toxicidad de un elemento en el suelo no depende únicamente de su concentración total, sino de su disponibilidad, ya que ésta determina su efecto sobre organismos y su translocación hacia el acuífero.

Los metales pesados se encuentran en diferentes formas en los suelos, que dependen de la mineralogía, del tipo y cantidad de materia orgánica, de la concentración de sales solubles, del pH y del Eh. Éstos pueden estar en la fase acuosa del suelo en forma de iones libres ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  etc.) o formando complejos inorgánicos y orgánicos.

En los complejos inorgánicos puede haber dos tipos de asociaciones: i) Las asociaciones débiles o externas a partir de un enlace de fuerzas electrostáticas entre un catión hidratado con la esfera de coordinación de un ion central. ii) Las asociaciones internas fuertes que son enlaces covalentes entre un metal y el ligando acomplejado de un ion central.

Ejemplos de complejos inorgánicos en solución son los complejos hidróxidos como el  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{ZnOH}^+$ , donde el  $\text{OH}^-$  es el ion más activo. Algunos metales fuertemente hidrolizados existen como aniones como el Cr ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) y V ( $\text{H}_2\text{VO}_4^-$ ) (Evans, 1989; Bohn *et al.*, 1993).

En los complejos solubles órgano-minerales los cationes metálicos forman complejos con ligandos orgánicos que pueden ser fuertes (dependiendo del metal y del complejo orgánico) y tienen generalmente al oxígeno como donador de átomos en compuestos alifáticos o aromáticos como ácidos cítrico, oxálico y gálico (Tessier *et al.*, 1979; Evans, 1989).

Los metales pueden formar complejos con los grupos funcionales de la materia orgánica sólida del suelo. Los ligandos contienen más de un elemento donador de átomos, como es el O, N y S, estos elementos usualmente están contenidos en grupos básicos como:  $-\text{NH}_2$  (amino),  $=\text{O}$  (carbonil),  $-\text{OH}$  (alcohol) y  $-\text{S}$  (thioether) o con grupos ácidos como  $-\text{COOH}$  (carboxilo),  $-\text{OH}$  (enólico o fénolico) y  $-\text{SH}$  (thiol) (Tessier *et al.*, 1979; Evans, 1989; Bohn, 1993).

Los metales intercambiables se encuentran asociados a las superficies activas de la fracción coloidal o asociados a la fase sólida del suelo por fuerzas electrostáticas. La capacidad de intercambio iónico se relaciona con la carga intrínseca y la superficie específica de la fase sólida.

Los óxidos de Fe son excelentes cazadores de metales pesados, dada su alta área superficial y capacidad de adsorción. Los óxidos tienen una carga variable y por lo tanto la adsorción de metales depende del pH del suelo.

Los óxidos de Mn tienen un bajo punto de carga cero (pH 2 a 4.5) y están cargados negativamente a los valores de pH de la mayoría de los suelos. Por

ello atraen elementos como el Zn, Cu, Ni y Ba que existen predominantemente como cationes. Los óxidos de Fe, por su parte, tienen un punto cero de carga más alto (pH 6.8 a 8) lo cual atrae los aniones de P ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), Mo ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ), V ( $\text{HVO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{VO}_4^-$ ), S ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Cr ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) que usualmente existen como oxianiones en la solución del suelo y que forman complejos específicos con la superficie de los sesquióxidos (Childs y Leslie, 1977; Tessier *et al*, 1979; Tessens y Zaugah, 1982; Hickey y Kittrick, 1984; Palumbo *et al.*, 2001) .

Los metales también pueden formar parte de la estructura cristalina de los minerales por sustitución isomórfica. Las sustituciones isomórficas pueden ocurrir durante la pedogénesis durante la formación de arcillas minerales, donde cationes metálicos reemplazan al silice ( $\text{Si}^{+4}$ ) en la lámina tetraédrica o al  $\text{Al}^{3+}$  en la lámina octaédrica o por ejemplo el  $\text{Ti}^{+4}$  se puede encontrar en capas octaédricas de algunas caolinitas (Tessens y Zaugah, 1982); durante la formación de carbonatos de  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ , el  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ , o  $\text{Cu}^{2+}$  pueden reemplazar al  $\text{Ca}^{2+}$ ; durante la formación de goetita  $\alpha\text{FeO}(\text{OH})_{(\text{c})}$ , el  $\text{Fe}^{+3}$  puede ser reemplazado por  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$  ( $\text{Cr}_2\text{OOH}$ ) y V ( $\text{VOOH}$ ) y en hematita por Cr ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) y V ( $\text{V}_3\text{O}_3$ ) formando especies análogas; durante la formación de hidroxyapatita  $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3(\text{c})$ , el  $\text{Ca}^{+2}$  puede ser reemplazado por  $\text{Pb}^{+2}$  (Tessier *et al*, 1979; JCPDS, 1983; Sposito en: Thornton, 1983; Hickey y Kittrick, 1984; Bruemmer *et al.*, 1986; Evans, 1989; Singh y Gilkes, 1992; Charlet y Manceau, 1992)

## 5. Descripción de la zona de estudio

### 5.1. Desarrollo de la industria petrolera en la zona de estudio

La región sur del Golfo de México tiene un alto potencial petrolero y ha atraído la atención nacional y extranjera desde mediados del siglo pasado. Su aprovechamiento data desde 1863 con la utilización de las chapopoterías naturales del municipio de Macuspana (Benavides, 1956; Trujillo-Narcía *et al.*, 1999).

La producción de hidrocarburos en esta región se realiza en aproximadamente 105 campos, que abarcan ocho estados, aunque operativamente sus actividades se concentran en tres estados: Veracruz (parte Sur), Tabasco y Chiapas (parte Norte). Los estados de Tabasco y Chiapas son los de mayor producción dentro del continente, Veracruz y Campeche su mayor producción es sobre plataformas marinas.

Morales-Gil (1999) menciona que el desarrollo petrolero en la zona sur del golfo inició en las últimas décadas del siglo pasado. El primer periodo tiene lugar a fines de los años 50's y principios de los 60's con el desarrollo del área de Agua Dulce como productora de crudo y el área de Ciudad Pemex como productora de gas. En los años 70's la Región Sur tiene su máximo desarrollo con el descubrimiento de los campos del Mesozoico: Samaria, Sitio Grande, Cunduacán y Cactus. Este desarrollo se mantuvo durante los años 80's con los campos Jujo-Tecominoacán, Agave, Girdaldas, Cárdenas, Luna, Sen y Caparroso.

El ritmo continuo de producción petrolera de la Región Sur del Golfo de México permitió a principios del año 2000 producir un millón 200 mil barriles de crudo diarios y casi tres mil millones de pies cúbicos de gas por día (Morales-Gil, 1999).

### 5.2. Límites del área de estudio

Cd. Pemex (Figura 4) se localiza a 17° 53' latitud Norte y 92° 29' longitud Oeste a 10 msnm, se ubica aproximadamente a 14 km al Noreste de la ciudad de Macuspana que funge como cabecera municipal (SPP, CGSNEGI., 1982; INEGI, 1999).

Cd. Pemex se funda en 1958, año durante el cual se empieza la construcción de la unidad petroquímica Cd. Pemex para el control de los campos terciarios. Este desarrollo dió origen a la instalación de la primera planta procesadora de gas y a la construcción del gasoducto Cd. Pemex – Cd de México (Benavides, 1956; Morales-Gil, 1999).

El área de estudio de Cd Pemex - Vernet se localiza en la zona productora de hidrocarburos del Sur del Golfo de México, dentro de la cuenca Macuspana, situada en la porción austral media del estado de Tabasco

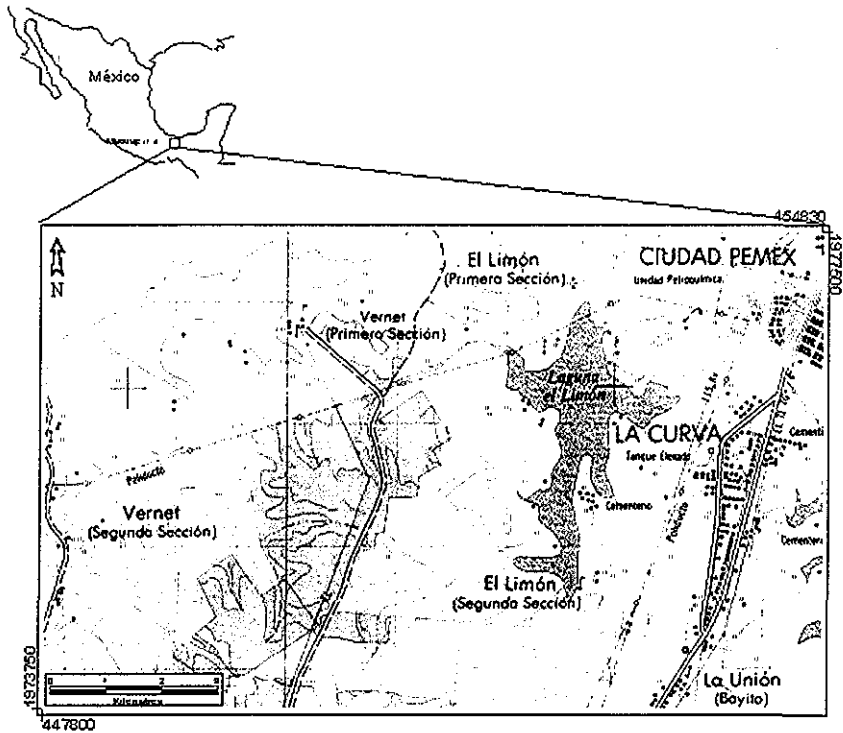


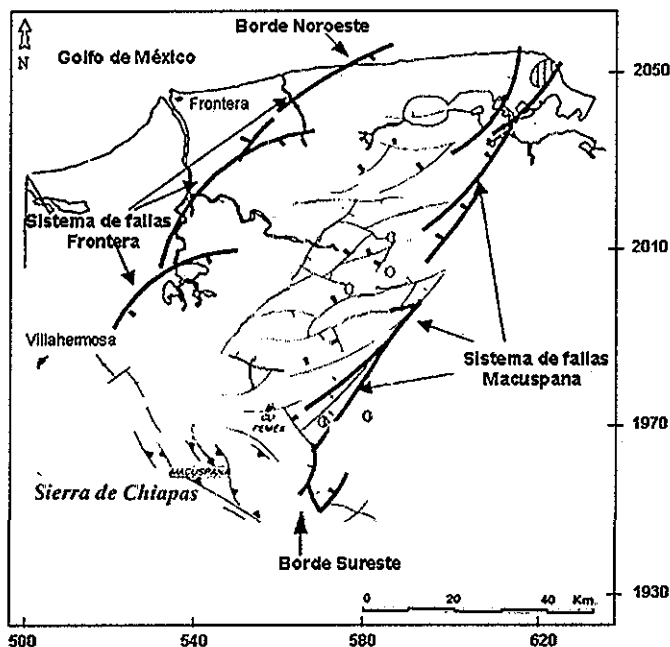
Figura 4: El mapa muestra la localización marginal de la cuenca sedimentaria en el Golfo de México, el área de estudio y la red principal de caminos de Cd. Pemex y Vernet Tab.

### 5.3. Historia geológica

A fines de la era Paleozóica el área Sureste del Golfo de México permaneció cubierta por un mar poco profundo, durante el cual hubo la formación de rocas masivas evaporíticas (Benavides, 1956). Los procesos volcánicos y tectónicos de finales del Terciario o Pliocuaternario (Cuadro 4) dieron origen a la Sierra de Chiapas, constituida por los sedimentos más antiguos de la cuenca: rocas marinas del Paleozóico Superior que afloran en la parte Sureste del estado de Chiapas y unidades sedimentarias marinas del Jurásico Superior (esquistos,

areniscas, carbonatos y anhidritas) así como de rocas volcánicas de tipo andesítico del Cuaternario producto de las erupciones del volcán Chichonal (lavas, brechas y cenizas) en su parte frontal (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992).

Prinzhofer *et al.* (2000) describe que los bordes Noreste y Suroeste que delimitan la cuenca Macuspana son dos sistemas de fallas producto de la formación de un graben durante el Terciario Temprano, por lo que la cuenca sufre de una elongación (Figura 5).



**Figura 5:** Sistemas de fallas producto: i) De un graben, la fallas que delimitan la cuenca de Macuspana de Noreste a Suroeste son el Sistema Frontera y Macuspana, respectivamente. ii) Por anticlinales, fallamientos en la parte interna de la cuenca (tomado y adaptado de Prinzhofer *et al.*, 2000).

En el Eoceno (Cuadro 4) la cuenca comienza a ser rellenada por los sedimentos acarreados por las corrientes que drenaban la sierra; se depositaron en ella más de 2,000 m de sedimentos (Yáñez-Correa, 1971 citado en Ortiz y Benítez, 1996). Estos sedimentos varían de 2 hasta 200 m de espesor, y son conocidos como "Arenas Productoras" ya que en ellas es de donde procede la mayor parte de hidrocarburos que se explotan en esta zona. En las postrimerías de este periodo se definió la cuenca (geosinclinal) y un mar cerrado en el frente de la sierra.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

A partir del Oligoceno (Cuadro 4) en esta unidad de rocas terciarias comienzan a formarse las cuencas Salina del Istmo y Macuspana estas se encuentran ahora separadas por el llamado Macizo Jalpa (Jurásico Superior al Mioceno), generando así dos mares individuales (Enciso de la Vega, 1963).

Durante el Mioceno las rocas se vieron afectadas por fuerzas de distensión que originaron fallamientos con planos axiales en dirección Noroeste a Sureste (Figura 5) (Prinzhofer *et al.*, 2000)

**Cuadro 4: Cronología de los principales eventos que conforman la cuenca de Macuspana, Tab.:**

Periodo	Época	Millones de años	Desarrollo
Mesozóico	Jurásico y Cretácico	180X10 <sup>6</sup> -70X10 <sup>6</sup>	Formación de rocas masivas evaporíticas
Terciario	Paleoceno	70X10 <sup>6</sup> -60X10 <sup>6</sup>	Levantamiento del bloque chiapaneco y acarreo de sedimentos por corrientes que drenan la sierra.
	Eoceno	60X10 <sup>6</sup> -40X10 <sup>6</sup>	Sedimentación terrígena 2000 m
	Oligoceno	40X10 <sup>6</sup> -25X10 <sup>6</sup>	Formación de las cuencas Comalcalco y Macuspana.
	Mioceno	25X10 <sup>6</sup> -5X10 <sup>6</sup>	Fallamientos
Cuaternario	Pleistoceno	1X10 <sup>6</sup> -1X10 <sup>5</sup>	Periodos glaciales.
		17.000	Último periodo glacial.

Fuente: Ortiz y Benítez, 1996.

Durante el periodo Cuaternario (Cuadro 4) ocurrieron la mayoría de los eventos que han dado origen a las características geomorfológicas actuales del área de estudio. El Pleistoceno estuvo caracterizado por presentar cuatro periodos glaciales con amplias fluctuaciones en el nivel medio del mar. El último periodo glacial redujo el nivel del mar produciendo un valle que fue rellenado paulatinamente por los sedimentos de los ríos conformando la actual planicie aluvial costera y dejando un desnivel con respecto a la antigua, por lo que el poder erosivo del agua hizo que ésta se disectara y formara una serie de lomeríos de baja altura o terrazas que dan lugar a la unidad ecogeográfica conocida como "Terrazas Miocénicas" (West *et al.*, 1969) (Figura 6).

#### 5.4. Estratigrafía

Ortega-Gutiérrez *et al.* (1992), mencionan que la Sierra Madre de Chiapas está constituida de tres divisiones litológicas: la primera o formación base está constituida de unidades sedimentarias marinas del Cretácico que forman intercalaciones de rocas sedimentarias terrígenas (conglomerados, areniscas, lititas) y evaporitas. La unidad intermedia es carbonatada y la superior es de



origen clástico y está constituida por sedimentos plegados verticalmente constituidos de arenisca rojiza, lechos de argilita, de conglomerados y de finos granos calcáreos de colores gris a blanco.

Benavides (1956) describe que los sedimentos terciarios depositados en la cenobahía de Macuspana presentan características estratigráficas regresivas (Sur a Norte). Los sedimentos del Mioceno en la zona de Macuspana, provienen de desarrollos de arena de grano fino a medio a veces ligeramente arcillosos interestratificados con lutitas, con porosidad de 14 a 28% y de espesores variables. Esta composición litológica ha dado lugar a la proliferación de nombres litoestratigráficos (Benavides, 1956; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992):

Mioceno: Belem  
Zargazal  
Encajonado  
Amate Superior  
Amate Inferior

Oligoceno: Caliza Macuspana  
Eoceno: Lutita Macuspana

La formación Belem del Mioceno Superior aflora en los alrededores de Cd. Pemex y Vernet; está compuesta de arcillas margosas de color gris verdoso que se encuentran estratificadas en capas gruesas o macizas; alternan con lechos o capas de arena fina color crema hasta de unos 30 cm de espesor. El espesor de esta formación es de unos 800 m aproximadamente (Gutiérrez-Gil, 1950).

## 5.5. Fisiografía

La visión integral de estudios geológicos, geomorfológicos, edafológicos y ecológicos han permitido entender de manera general los procesos que han operado en el área de Cd. Pemex y Vernet hasta conformar su aspecto actual.

El área de Cd. Pemex - Vernet se encuentra en la unidad ecogeográfica caracterizada como Terrazas Disectadas del Mioceno (Figura 6) (Palma *et al.*, 1985; Ortiz y Benítez, 1996; UNAM-Batelle-IMP, 1999). Esta unidad está constituida por terrazas marinas consideradas de levantamiento, las cuales muestran procesos de erosión fluvial y una amplitud del relieve de 20 a 50 msnm, dando al paisaje formas de lomeríos heterogéneos.

Por su elevación, la unidad de terrazas marinas estuvo influenciada por dos unidades ecogeográficas más elevadas al Suroeste de la unidad conocidas como:

- Flanco de la Sierra Norte de Chiapas: conformada por elevaciones mayores de 1000 msnm, que presentan un relieve escarpado a fuertemente escarpado por procesos de afallamiento, como por procesos erosivos intensos.

- Rampa Piedemonte del Volcán El Chichón: ubicado a 70 km de la zona de estudio en dirección Suroeste.

Las corrientes fluviales que drenaban estas dos unidades las fueron modelando en desniveles. La influencia más fuerte hacia las terrazas queda interrumpida en el Mioceno por un sistema de fallas (anticlinales) en la parte Suroeste y Sureste de la zona de estudio (Figura 5) que aislaron a esta unidad ecogeográfica.

Si bien en la actualidad las terrazas están sometidas a procesos erosivos que implican el transporte de solutos y sedimentos, en tiempos pasados recibieron aportes de materiales cuando estaban ligadas entre sí en el paisaje, en distancias cortas (catena).

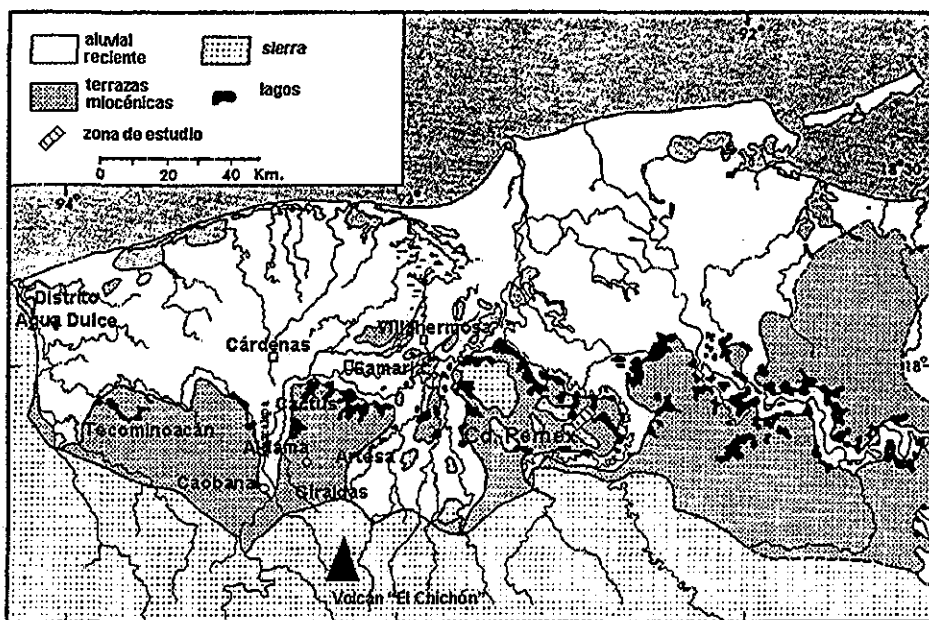


Figura 6: Ubicación de la zona de estudio dentro de la unidad ecogeográfica "terrazas miocénicas" (tomado y modificado de West et al., 1969).

## 5.6. Hidrografía

Todos los ríos y arroyos que surcan la Cuenca de Macuspana-Campeche pertenecen a alguno de los dos grandes sistemas fluviales del sureste de México: el sistema fluvial del río Grijalva y el sistema fluvial del río Usumacinta, los cuales han tenido una alta capacidad de formación de tierras costeras. Ambos forman la región Hidrológica núm. 30 que ocupa una extensión de 18,560.09 km<sup>2</sup> en el estado de Tabasco (Benavides, 1956).

El río Puxcatán nace en la sierra de Chiapas y se une al río Chinal al sureste. Este río drena terrenos desde los cerros de Misopá y Agua Blanca hasta Macuspana y Belem, para unirse finalmente con el río Tulijá y formar el río Tepetitán o Macuspana que fluye al Suroeste de la Cd. de Macuspana. El río Chilapa cruza la parte Noreste de Cd. Pemex, es tributario del río Grijalva y tiene su origen en las estribaciones de las unidades Flanco de la Sierra Norte (Gutiérrez-Gil, 1950; SPP, CGSNEGI., 1982).

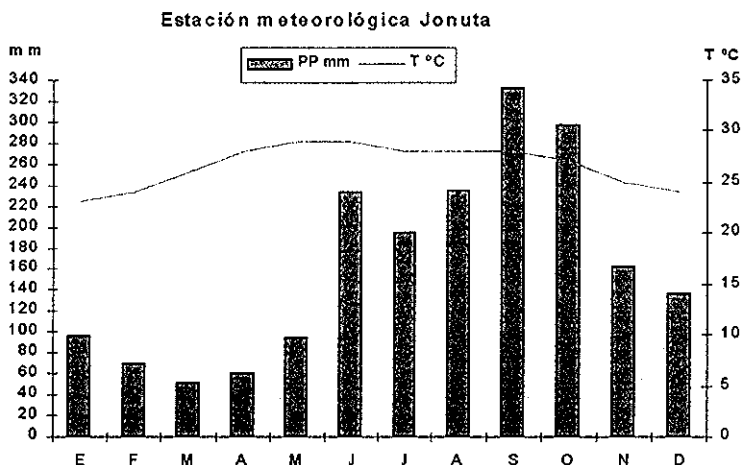
## 5.7. Clima

Por su ubicación geográfica y sus características topográficas, el municipio de Macuspana presenta un clima tropical húmedo con dos subtipos: la parte Norte del municipio (donde se encuentran las localidades de Cd. Pemex y Vernet) corresponde a la fórmula Am cálido húmedo con abundante lluvia en verano que cubre el 42.29 % de la superficie municipal. El Af cálido húmedo con lluvias todo el año en la porción Sur del municipio cubre el 57.71 % restante (INEGI, 1999). La única diferencia entre ellos es la cantidad de lluvia en el mes más seco: más de 60 mm (101mm) en el tipo Af y alrededor de 56 mm en el Am. La lluvia media anual en ambos subtipos es mayor de 750 mm, la oscilación de las temperaturas medias mensuales entre 5° y 7°, con presencia de una pequeña temporada menos húmeda que se manifiesta por una merma de lluvia en los meses veraniegos (canícula o sequía de medio verano) (García, 1988).

La estación meteorológica "Jonuta" (representativa del tipo de clima de la zona de estudio) se ubica a 26.5 km aproximadamente en dirección Noroeste de Cd. Pemex, presenta el clima que corresponde a la fórmula Am(f)(i)gw" (Figura 7): tropical lluvioso con abundante lluvia en verano (Am) (junio a octubre) La precipitación media anual es de 2176.3 mm y la temperatura media anual de 27.4 °C. El cociente P/T promedio es de 79.4, el porcentaje de lluvia invernal con respecto al anual es de 10.2. Presenta el mes más caliente antes del solsticio de verano (antes de junio), por lo que la marcha anual de temperatura es tipo Ganges.

De acuerdo con West *et al.* (1969) el total de la precipitación media anual registrada en las estaciones meteorológicas de Tabasco entre el 40 y el 60% se

registran entre los meses de octubre y marzo, que es la temporada de Nortes. La región por su posición, se encuentra sometida a la zona de vientos alisios del noreste, caracterizándole una atmósfera barotípica que son espacios atmosféricos donde predominan circulaciones convectivas de aire, aunado con las depresiones del golfo (Nortes) que le dan las características de precipitación a la región.



**Figura 7: Climograma de la estación meteorológica Jonuta (Datos de García, 1988).**

## 5.8. Vegetación

West *et al.* (1969), mencionan seis comunidades vegetales que existen en el estado de Tabasco y que van cambiando su distribución en el paisaje debido a su posición geográfica: manglar, vegetación de pantanos (popal y mucal), sabana, selva baja subperennifolia y selva alta perennifolia. Sin embargo, en Tabasco entre 1940 y 1980 se eliminó prácticamente toda la superficie de selvas (Masera, 1998).

Los pastizales actualmente ocupan el 49.41% de la superficie municipal de Macuspana y son la vegetación dominante en las Terrazas Miocénicas. De la vegetación natural la selva mediana perennifolia se conserva en áreas muy restringidas (UNAM-Batelle-IMP, 1999).

Los pastizales son una asociación constituida por gramíneas que pueden existir por dos causas: de forma natural como los géneros *Andropogon*, *Paspalum*, *Axonopus*, etc, que están distribuidos en amplias zonas por la introducción de

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

fuego o en terrenos agrícolas en abandono. Estos pastos cubren zonas donde existe un alto lavado de nutrientes que trae como consecuencia el empobrecimiento del suelo. Los pastizales de tipo inducidos con especies introducidas como la Estrella de África, Alemán, Privilegio, etc. Generalmente estos pastos se utilizan en pastoreo intensivo; si son sobreexplotados provocan la disminución de pastos palatables, iniciando posteriormente un proceso de erosión hídrica, principalmente, proceso que abarca aproximadamente el 70 % del área estatal y que va de moderado a fuerte (INEGI, 1999; Martínez-Méndez, 1999).

## 5.9. Suelos

La unidad ecogeográfica de Terrazas Marinas Miocénicas (Figura 6) cubre el 34% del suelo tabasqueño, de acuerdo con UNAM-Batelle-IMP (1999). En esta unidad los Acrisoles son suelos maduros dominantes en los interfluvios, por lo que en su mayor parte son de origen residual, y se formaron a partir de sedimentos del Mioceno (areniscas) ocupan un área de 202,250.6 ha (8.17 %) del área total del estado y están asociados con Alisoles.

Los Acrisoles de la unidad ecogeográfica "Terrazas Miocénicas" ya han sido descritos y caracterizados con anterioridad (CRTP, 1979; Departamento de Suelos, 1984; Rodríguez-Cuevas, 1992; UNAM-Batelle-IMP, 1999). Son suelos profundos y desarrollados donde los procesos de hidratación e hidrólisis han propiciado la transformación de minerales in situ como es la neoformación de óxidos y arcillas, con predominio de arcillas del tipo 1:1 (caolinita). El proceso de iluviación de arcillas se muestra en el revestimiento de arcillas (argilanes) sobre la cara de los agregados o en canales de raíces.

Procesos de lixiviación han propiciado el lavado de bases y  $\text{SiO}_2$ . El porcentaje de saturación de bases en el complejo de intercambio es menor del 50% y su reacción es ácida.

## 5.10. Uso de suelo

Hasta 1999, del área total municipal de Macuspana correspondiente a 2,551.70 ha, se estimaba una superficie de 1,260.79 ha de pastizales nativos dedicados a la explotación ganadera (49.41 % del total municipal), 837.47 ha por popal-tular (32.82 %), 257.98 ha ocupadas por terrenos de selva con acahuals (remanentes de la vegetación primaria de selva mediana perennifolia) correspondiente al 10.11 % del total municipal, 105.64 ha ocupadas por sabana, 13,014 ha con cultivo de maíz (0.51% del total municipal) y 76.81 ha por otro uso de suelo (INEGI, 1999).

## 6. Metodología

### 6.1. Estrategias de la investigación:

- Caracterizar a los suelos en la zona aledaña al CPG, física, química y mineralógicamente.
- Realizar una extracción total y secuencial de metales pesados (Cr, Ni y V) en los suelos para determinar a qué fases del suelo están asociados en el suelo. Además se incluyó la extracción de Cu, Pb y Zn debido a que también se han reportado como constituyentes de lavas andesíticas y de cenizas del volcán El Chichón (Espíndola *et al.*, 2000)

La extracción secuencial consiste en extraer metales pesados presentes en una misma muestra de suelo, utilizando sucesivamente soluciones de mayor capacidad de extracción y que puedan disolver selectivamente compuestos en los que se encuentran los metales. El uso de extracción secuencial detalla información acerca del origen, modo de ocurrencia y movilización de metales traza (Tessier *et al.*, 1979; Cottenie *et al.*, 1979; Bruemmer *et al.*, 1986).

- Verificar la homogeneidad del material en los perfiles de ambas localidades por medio del análisis de elementos traza (Ti y Zr).
- Describir mediante análisis micromorfológicos los suelos y analizar la distribución de los metales pesados en las diferentes estructuras (nódulos, revestimientos y matriz del suelo) por medio de análisis con Microsonda Electrónica (ME) y por análisis multielemental (PIXE).

### 6.2 Método de campo.

Se procedió a identificar y delimitar los sitios con la ayuda de la cartografía existente (SPP, 1982) al suroeste de Cd. Pemex que presentaran litologías y posiciones topográficas (posición de cresta) con similar tipo de suelo. Después se realizó un recorrido en la zona para verificar las unidades cartográficas definidas y tener una visión de conjunto de la región. En los sitios seleccionados se llevaron a cabo perfiles de suelo (Figura 8).

Los criterios para la selección de perfiles fueron:

- i) Que estuvieran dentro de la misma unidad ecogeográfica.
- ii) Que uno estuviera en una zona inmediata al complejo petroquímico y otro en una zona alejada. Uno quedo ubicado a 450 m en dirección Noroeste del CPG y otro a 8 km Suroeste del CPG.
- iii) Que uno estuviera relativamente más cerca, que el otro, del volcán El Chichón.

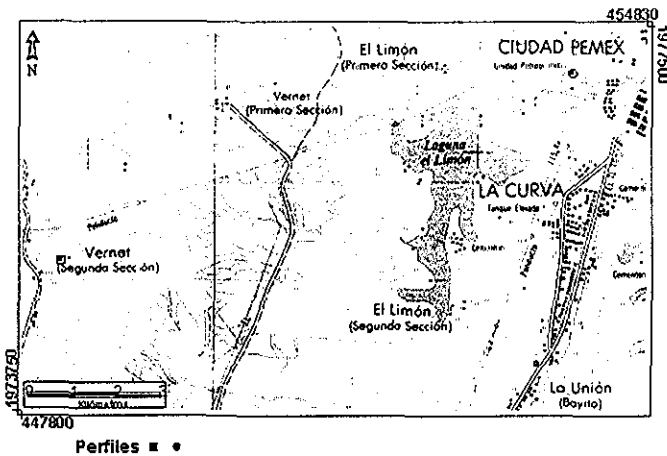


Figura 8: Ubicación de los perfiles tipo en las localidades de Cd. Pemex y Vernet, Tabasco.

La forma del perfil fue rectangular dejando tres paredes verticales y tomando en cuenta la posición del sol para poder observar bien el perfil y sus horizontes el mayor tiempo posible, sin sombras y sin perturbaciones (la cuarta pared inclinada y escalonada para facilitar la excavación). Una vez abierto el perfil se procedió a la identificación de los diferentes horizontes y a la descripción de sus características, realizando las anotaciones correspondientes en una ficha de descripción (Siebe *et al.*, 1996). Después de la descripción, se procedió a la toma de muestras por horizontes.

Para cada horizonte la descripción comprendió las siguientes variables: color, estructura, textura, densidad aparente, porosidad, densidad de raíces, estabilidad de agregados y pedregosidad. Se describieron todo tipo de rasgos pedológicos observables y detalles que revistieran de importancia, con vista a la interpretación del perfil.

Se tomaron muestras alteradas por su extracción del horizonte, depositándolas en bolsas de plástico, y muestras inalteradas con cilindros de PVC de 100 ml (2 por horizonte) para la preparación de láminas delgadas y láminas pulidas para microsonda.

Cerca de la localidad Vernet (8 km SE del CPG) se colectó también una muestra de un corte de camino a más de 63 cm de profundidad con la idea de obtener una muestra representativa del material parental de los suelos de la unidad ecogeográfica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 6.3 Método de laboratorio.

Las muestras se secaron al aire a temperatura ambiente sobre papel. De una alícuota de suelo de los horizontes Ah1 y Bg1 del perfil de Cd. Pemex se extrajeron diferentes estructuras (>2 mm) sin alteración, se lavaron con agua desionizada y se molieron finamente para la determinación de metales pesados ( $\text{g kg}^{-1}$ ). Al observar estas estructuras bajo el microscopio estereoscópico se observó que eran estructuras nodulares y que tenían adheridas a sus bordes pequeñas concreciones redondas y oscuras de un brillo metálico; por lo que se procedió a separar y a analizar por separado las concreciones, los nódulos (> 2 mm) y la matriz del suelo de cada uno de los horizontes del perfil de Cd. Pemex.

Ya secas las muestras se procedieron a romper y a moler los agregados del suelo con un mazo de madera, se pasaron por un tamiz de 2 mm de abertura y se colocaron de nuevo dentro de sus bolsas con su respectiva tarjeta de identificación. De la muestra ya tamizada se tomaron 100 g aproximadamente, se molieron finamente en un molino de rocas con envase de ágata para evitar contaminaciones que pudieran afectar la determinación de metales pesados.

A continuación se describen los procedimientos de análisis de los componentes y estructuras de los horizontes:

#### 6.3.1. Análisis físicos:

**Textura.**- Las muestras (50 g por muestra) se sometieron a un pretratamiento para eliminar las sustancias cementantes como la materia orgánica ( $\text{H}_2\text{O}_2$  al 8%), sesquióxidos (ditionito de sodio 1.0 M) y sales solubles. La separación de arenas finas, medias y gruesas se hizo por medio de tamices y la cuantificación de limos y arcillas por el método de la pipeta (Schlichting *et al.*, 1995).

**Densidad aparente (método del cilindro).**- Se determinó gravimétricamente en muestras inalteradas (cilindros de 100 ml) secadas a 105 °C hasta peso constante y relacionando el peso del suelo seco con el volumen de la muestra ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (Schlichting y Blume, 1966).

#### 6.3.2. Análisis químicos:

**pH en KCl y en agua** - Las determinaciones de pH en KCl se realizaron en un extracto de 10 g de suelo con 25 ml de una solución de KCl 1 M (relación 1:2.5) y el pH en agua con 25 ml de agua destilada (relación 1:2.5), con un potenciómetro Beckman 34 con electrodo combinado (platino y vidrio) (van Reeuwijk, 1992).



**Conductividad eléctrica (C.E.).**- Usando un puente de conductividad eléctrica (WTW) se midió la conductividad eléctrica en el sobrenadante de un extracto con agua destilada (relación 1:2.5) en  $\text{dS m}^{-1}$  (Richards, 1982).

**Óxidos amorfos de Fe, Al, Mn y de Si** (Según Tamm, 1922, modificado por Schwertmann, 1964, en Schlichting y Blume, 1966): extracción con oxalato de amonio a pH 3.25 y a temperatura ambiente en la oscuridad. El Fe, Mn, Al y Si se determinaron en los extractos con espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

**Óxidos cristalinos de Fe y Mn** (según Mehra y Jackson, 1960, en Schlichting y Blume, 1966): La extracción se realizó con ditionito de sodio como agente reductor y extractante, a pH 7.3 usando citrato como tampón y acomplejante. El Fe, Al, Si y Mn se determinaron en los extractos mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

**Determinación de carbón orgánico total.**- El método consiste en la oxidación del carbón orgánico por vía húmeda con dicromato de potasio 1.0 N a 120 °C y determinación fotométrica de la extinción de los iones  $\text{Cr}^{3+}$ , calculando el contenido de carbón orgánico a través de una curva patrón elaborada con glucosa (Schlichting *et al.*, 1995).

**Extracción secuencial de metales pesados (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb y V):** consistió en siete extracciones con base en los métodos propuestos por Zeien y Brümmer (1989), que fueron las siguientes:

1. Fracción móvil o soluble.

- Solución extractora: agua desionizada (relación 1:10), con un tiempo de agitación de 24 h a temperatura ambiente.

2. Fracción fácilmente disponible.

- Solución extractora: acetato de amonio 1M, pH 6 (relación 1:10), con un tiempo de agitación de 24 h a temperatura ambiente.

3. Fracción asociada a los óxidos de Mn.

- Solución extractora: cloruro de hidroxilamonio 0.1M + acetato de amonio 1M, pH 6 (relación 1:10), con un tiempo de agitación de 30 min a temperatura ambiente

4. Fracción asociada a la materia orgánica.

- Solución extractora: EDTA- $\text{NH}_4$  0.025M, pH 4.6 (relación 1:10), con un tiempo de agitación de 90 min a temperatura ambiente.

5. Fracción asociada a los óxidos de Fe amorfos

- Solución extractora: oxalato diamonio monohidratado 0.2M + ac oxálico 0.2M, pH 3.25 (relación 1:10), con un tiempo de agitación de 4 h a temperatura ambiente en la oscuridad.

6. Fracción asociada a los óxidos de Fe cristalinos.

- Solución extractora: ac. ascórbico 0.1M + oxalato diamonio monohidratado 0.2M + ac oxálico 0.2M, pH 3.25 (relación 1:10), con un tiempo de agitación de 30 min en baño María a  $93\pm 3$  °C.

7.- Fracción residual.

- Digestión en horno de microondas con 4 ml de agua desionizada + 2 ml de  $H_2O_2$  + 9 ml  $HNO_3$  + 1 ml HCl + 4 ml de HF (EPA 3052, )

La determinación de los elementos se llevó a cabo por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) de flama y de horno de grafito.

**Extracción de metales pesados totales** en suelo molido fino en molino con envase de ágata. Digestión en horno de microondas (Rars 5) con 4 ml de agua desionizada + 2 ml de  $H_2O_2$  + 9 ml  $HNO_3$  + 1 ml HCl + 4 ml de HF (EPA 3052). Determinación con EAA (Schlichting *et al.*, 1995).

**Análisis por fluorescencia de rayos X:** Ti y V fueron determinados por fluorescencia de rayos X en un sistema secuencial de FRX *Siemens* SRS 3000 (tubo de Rh y ventana de Be 125  $\mu$ m).

### 6.3.3. Análisis mineralógicos:

**Difracción de rayos X:** Muestras molidas de los fragmentos > 2 mm de los horizontes Ah y AB del perfil de Cd. Pemex fueron analizados en difractor *Phillips* Mod. 1130/96 (generador) y PW 1050/25 (goniómetro), utilizando radiación Cu  $K\alpha$ , en el intervalo angular de  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $80^\circ$  en las condiciones normales de operación: 30 kV y 20 mA y con un factor de escala de  $1 \times 10^3$ .

**Microscopio petrográfico:** En láminas pulidas para microsonda se observaron los principales rasgos y estructuras de los suelos y la toma de fotografías. En láminas delgadas se identificaron minerales secundarios y minerales de origen volcánico reciente en la fracción de arena fina (separada durante el análisis de textura)

**Microscopía electrónica (ME) y análisis por microsonda:** Mediante una microsonda electrónica *Jeol* JXA8900-R se realizaron los análisis utilizando un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) multi-elemental, con un voltaje de aceleración de 20 kV y un tiempo de adquisición de 20 segundos. Los

resultados obtenidos representan un área definida por el diámetro del haz de la sonda.

Los mapeos de composición elemental se realizaron con electrones retrodispersados, con una aceleración de 20 kV y una definición de 800x800 píxeles, digitalizando las imágenes de estos mapeos.

#### 6.3.4. PIXE

**Análisis multielemental (PIXE):** Al, Si, Fe, Cr, V, Cu y Zn fueron determinados por la técnica de análisis multielemental "PIXE" (Particle Induce X-Ray Energy). El PIXE es una técnica multielemental y se pueden medir simultáneamente todos los elementos de la muestra de los que el número atómico sea mayor que el del magnesio.

Muestras tamizadas y molidas finamente se compactaron aplicando una presión de 4 toneladas usando una prensa: Cada una de las pastillas fueron irradiadas en vacío con un haz de protones de una energía de 2 MeV. Los espectros de energía de los Rayos X producidos por la irradiación de cada una de las muestras se analizaron usando un programa denominado "GUPIX".

## 7. Resultados

### 7.1 Descripción de perfiles tipo

#### 7.1.1. Localidad Cd. Pemex

##### a) Información acerca de la localidad.

No. de perfil 1

Nombre del sitio: Cd. Pemex, Municipio de Macuspana, Tabasco.

Clasificación del suelo:

F.A.O : Acrisol húmico

WRB: Acrisol ferri-úmbrico

Fecha de descripción: 09-02-99.

Descripción: Manuel Hernández Quiroz.

Localización: ubicado en la 2ª loma a 450 m en dirección suroeste del CPG Cd. Pemex.

Coordenadas: U.T.M.: X 553450

Long.: 92° 29'49" Oeste

Y 1976750

Lat. : 17° 52'74" Norte

Altitud: 30 msnm

Forma del terreno circundante: lomeríos bajos disectados.

Posición fisiográfica: cresta de loma.

Microrelieve: ninguno.

Pendiente: plana.

Uso de suelo: potrero.

Clima: Am(f)(i)gw": tropical lluvioso con abundante lluvia en verano (Am) con régimen de lluvias en verano (junio a octubre) La precipitación media anual es de 1962.0 mm y la temperatura media anual de 26.6 °C. Presenta el mes más caliente antes del solsticio de verano (antes de junio) por lo que la marcha anual de temperatura es tipo Ganges (Datos provenientes de la estación meteorológica de Jonuta ubicada a 26.5 km aproximadamente en dirección Noroeste de Cd. Pemex).

##### b) Información general acerca del suelo.

Material o roca basal: sedimentos del Mioceno.

Drenaje natural: moderado.

Condiciones de humedad en el perfil: seco en su superficie y fresco a poca profundidad.

Profundidad al manto freático: No determinada, no influye al perfil.

Presencia de rocas superficiales: No.

Evidencia de erosión: No apreciable.

Presencia de sales o sodio: No.

Influencia humana: pastoreo y posible influencia del CPG Cd. Pemex.

c) Descripción breve del perfil:

Profundo (105 cm), moderadamente drenado debido a las texturas finas y el taponeo de poros por iluviación de arcillas; los tres primeros horizontes bien diferenciados por color y textura, en sus horizontes inferiores presentan manchas en forma reticulada de colores café rojizo y amarillos. El desarrollo de su estructura es granular a angular mediano y moderado a fuerte, es medianamente poroso y poco permeable, la distribución de raíces con mayor densidad en los primeros 30 cm. Se observa una gran acumulación de fragmentos (> 2 mm) ricos en Fe en los primeros 30 cm, que pareciera tratarse de un material sobrepuesto, su tamaño varía de gravas a arenas de color rojizo y sus formas son irregulares y más o menos redondeadas. El horizonte dentro de los 31 a 40 cm se denomina C por su color y estructura.

d) Descripción del perfil:

**Ah** 0-12 cm Color café oscuro en húmedo (10 YR 3/2), textura franca, contenido medio alta de materia orgánica (4.08%), el valor de pH en agua es de 5.76 clasificándose de moderadamente ácido y en KCl es fuertemente ácido 4.56, estructura es granular, mediana a fina, moderada, densidad aparente mediana ( $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ), pocos poros intersticiales finos, 2 a 3% vol. de fragmentos de color café rojizo de 5 a 10 mm de diámetro, densidad muy alta de raíces (finas), límite claro y más o menos uniforme. Presenta residuos de carbón.

**AC** 12-31 cm Color café oscuro en húmedo (10 YR 3/3), textura franco-arcillo-arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.35%), el valor de pH en agua es de 5.7 moderadamente ácido y en KCl es 4.86 fuertemente ácido, estructura similar al anterior, densidad aparente mediana a alta ( $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ), muchos poros tubulares e intersticiales frecuentes y finos, 70% vol. de fragmentos de color café rojizo de 5 a 15 mm de diámetro, densidad muy alta de raíces, límite uniforme y claro.

**C** 31-40 cm Color café amarillento opaco en húmedo (10 YR 5/4), textura arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.24%), el pH en agua es 5.77 moderadamente ácido y en KCl es 4.70 fuertemente ácido, estructura similar a los dos anteriores, densidad aparente mediana a alta ( $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ), muchos poros intersticiales medianos y finos, 20% vol. de fragmentos de hierro de 2 a 10 mm de diámetro, más o menos redondos y muy duros de color café rojizo (10 YR 3/6), con revestimientos delgados de arcilla sobre algunas caras de agregados (argilanes), densidad alta de raíces, límite abrupto.

**2AB** 40-64 cm Moteado en un 50% de vol. de zonas color naranja amarillento opaco a brillante (10 YR 6/4-6/6) y 50% vol. de zonas color café rojizo (2.5 YR 4/8), textura arcillosa, contenido muy bajo de materia orgánica (0.65%), el pH en agua es 5.64 moderadamente ácido y en KCl es 4.51 fuertemente ácido, estructura angular, mediana a fina, fuerte, densidad aparente mediana ( $1.45 \text{ g cm}^{-3}$ ), muchos poros intersticiales, medianos y finos, 10 % vol. de fragmentos de hierro de 8 a 15 mm de diámetro de color café rojizo (10 YR 3/6) más o menos redondos y duros, densidad media de raíces, límite difuso.

2 Btg, 64-82 cm Moteado en un 25% vol de manchas color café rojizo (2.5 YR 4/8) y un 75% vol. de color naranja amarillento (10 YR 7/1), textura arcillosa, contenido muy bajo de materia orgánica (0.72%), el pH en agua es 5.31 moderadamente ácido y en KCl es 3.66 muy fuertemente ácido, estructura angular, fina a mediana, fuerte, densidad aparente mediana (1.45 g cm<sup>-3</sup>), poros comunes medianos y finos, 10 % vol. de fragmentos de hierro de 8 a 15 mm de diámetro de color café rojizo (10 YR 3/6), más o menos redondos y duros, densidad de raíces baja a media, límite difuso.

2 Btg<sub>2</sub> 82-105 cm Color naranja amarillento opaco (10 YR 7/4), contenido muy bajo de materia orgánica (0.29%), el pH en agua es 5.32 moderadamente ácido y en KCl es 3.46 muy fuertemente ácido, estructura masiva a angular, densidad aparente mediana (1.35 g cm<sup>-3</sup>), pocos poros intersticiales, 1 % vol. de fragmentos de hierro de 2 a 5 mm de diámetro finos, densidad baja de raíces.

---

### 7.1.2. Localidad Vernet

#### a) Información acerca de la localidad.

No. de perfil 2

Nombre del sitio: Vernet 2da Sección, Municipio de Macuspana, Tabasco.

Clasificación del suelo:

F.A.O.: Acrisol húmico. WRB: Acrisol veti - úmbrico

Fecha de descripción: 09-02-99.

Descripción: Manuel Hernández Quiroz.

Localización: Ubicado a 8 km del CPG Cd. Pemex, dirección suroeste.

Coordenadas: U.T.M.: X 548154 Long: 92° 32'74" Oeste  
Y 1975393 Lat.: 17° 51'81" Norte

Altitud: 30 msnm

Forma del terreno circundante: lomeríos bajos.

Posición fisiográfica: cresta de loma.

Microrelieve: Ninguno

Pendiente: Plana.

Uso del suelo o vegetación: Potrero

Clima: Comparte el mismo tipo de clima que el perfil de Cd. Pemex (Am(f)(i)gw").

#### b) Información general acerca del suelo.

Material o roca basal: sedimentos del Mioceno.

Drenaje natural: Moderado.

Condiciones de humedad en el perfil: Seco en los primeros horizontes y fresco a profundidad.

Profundidad al manto freático: No determinada, no influye al perfil.

Presencia de rocas superficiales: No.

Presencia de erosión: No apreciable

Presencia de sales o sodio: No apreciable

Influencia humana: potrero.

c) Descripción breve del perfil:

Perfil medianamente profundo (63 cm), de drenaje moderado, el desarrollo de su estructura es moderado, de tipo subangular a angular mediana, de color café oscuro en superficie, los horizontes inferiores con abundantes manchas en forma reticulada de color naranja (5 YR 5/8) en el centro de los agregados y gris verdoso (2.5 Y 6/4) sobre las caras de agregados, revestimientos gruesos de arcilla, en las caras de los agregados, poros comunes, intersticiales, muy finos, la densidad de raíces es muy alta en el primer horizonte, media en el segundo y baja en los más profundos

d) Descripción del perfil:

**Ah** 0-9 cm Color café oscuro (10 YR 3/3), textura franco arcillosa, contenido medio de materia orgánica (2.53%), el pH en agua es 5.51 moderadamente ácido y en KCl es 4.35 fuertemente ácido. Estructura subangular mediana a fina, fuerte, densidad aparente mediana ( $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ), pedregosidad del 3% de cantos finos, pocos poros medianos tubulares y comunes, finos tubulares e intersticiales, 5 a 10 % vol. de manchas café rojizas (7.5 YR 5/8) de 2 a 3 mm de diámetro, densidad alta de raíces, límite gradual.

**AB** 9-20 cm Color café (7.5 YR 4/4), textura arcillosa, contenido medio de materia orgánica (2.66%), el pH en agua es 5.12 moderadamente ácido y en KCl es 3.83 muy fuertemente ácido, estructura subangular a angular, mediana a fina, moderada, densidad aparente mediana ( $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ ), 2 % vol. de fragmentos de color café rojizo de 2 a 5 mm de diámetro, con revestimientos de arcilla en las caras de los agregados (cutanes), gruesos, quebrados, manchas del 20% vol. de color café brillante (7.5 YR 5/8) de límite difuso y forma irregular, poros comunes tubulares e intersticiales muy finos, densidad de raíces mediana, límite difuso.

**Btg1** 20-34 cm Color café brillante (7.5 YR 5/6), textura arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.97%), el pH en agua es 5.0 moderadamente ácido y en KCl es 3.66 muy fuertemente ácido, estructura angular, mediana a fina, moderada, densidad aparente mediana ( $1.25 \text{ g cm}^{-3}$ ), manchas en el 15 % vol. de color café rojizo brillante (2.5 YR 5/8) de 2 a 4 mm de diámetro, límite gradual, redondeadas, localizadas dentro de los agregados, con revestimientos gruesos de arcilla sobre algunas caras de agregados, densidad de raíces media, límite difuso. Presenta una grieta de 0.5 cm de ancho y 10 cm de longitud rellena con un material arenoso de color gris claro (2.5 Y 6/3) que probablemente sean cenizas del volcán Chichón.

**Btg2** 34/50 cm Color café brillante (7.5 YR 5/6), textura arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.27%), el pH en agua es 4.93 fuertemente ácido y en KCl es 3.62 muy fuertemente ácido, estructura angular mediana a fina, moderada, densidad aparente mediana ( $1.3 \text{ g cm}^{-3}$ ), manchas del 30 % vol. de 3 a 6 mm de diámetro de color café oscuro (2.5 YR 3/6), redondas, dentro de los agregados y en las caras de los agregados presenta un color café amarillento brillante (10 YR 6/6), con revestimientos

gruesos de arcilla sobre algunas caras de agregados, poros comunes, interestriciales muy finos, densidad de raíces baja, límite difuso.

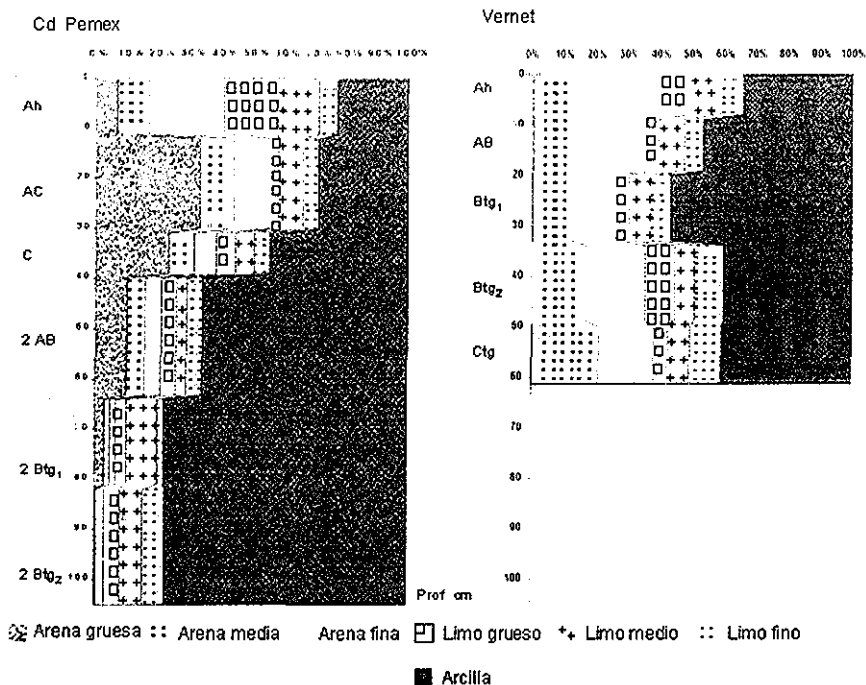
Ctg 50-63 cm Color café brillante (7.5 YR 5/8), textura arcillosa, contenido muy bajo de materia orgánica (0.68%), el pH en agua es 4.82 fuertemente ácido y en KCl es 3.58 muy fuertemente ácido, estructura angular mediana, débil, densidad aparente mediana ( $1.35 \text{ g cm}^{-3}$ ), 5 a 10 % vol. de fragmentos de hierro de color café rojizo (10 YR 4/6), redondeados y suaves, con revestimientos gruesos de arcilla sobre algunas caras de agregados, manchas color naranja (5 YR 5/8) en el centro de los agregados y color gris verdoso (2.5 Y 6/4) en las caras de los agregados, poros comunes, interestriciales muy finos, densidad de raíces baja.

---

## 7.2. Propiedades físicas y químicas generales

La textura de ambos perfiles es arcillosa en el subsuelo y de tipo franca en los primeros centímetros. La fracción de arena gruesa (Figura 9) de la localidad de Cd. Pemex es más alta comparada con la de Vernet y se encuentra principalmente acumulada en el horizonte AC con 33% disminuyendo escalonadamente hacia los horizontes inferiores. Las fracciones de arena media y fina (Figura 9) son más altas en el perfil de Vernet en comparación con el perfil de Cd. Pemex, disminuyen del horizonte superficial hacia su parte media, para tender a aumentar de nuevo con la profundidad. Las fracciones de limos gruesos y medios tienden a disminuir con la profundidad en ambos perfiles y su acumulación es más alta en el horizonte superficial de Cd. Pemex con 17.8 y 12.6% respectivamente. La fracción de limo fino es más alta en el perfil de Vernet y su concentración disminuye del horizonte superficial hacia su parte media, para tender a aumentar de nuevo con la profundidad. La fracción de arcillas (Figura 9) del perfil de Cd. Pemex aumenta escalonadamente hacia los horizontes inferiores de 22.7 a 77.7%, mientras que en la localidad de Vernet se encuentran principalmente acumuladas en el horizonte Btg<sub>1</sub> con el 57% (datos en Anexo 1).





**Figura 9: Distribución del tamaño de partículas con la profundidad del suelo en los perfiles tipo de Cd. Pemex y Vernet, Tab.**

La densidad aparente (Cuadro 5) en el perfil de Cd. Pemex es mediana  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$  en el horizonte superficial a medianamente alta en el resto del perfil. En el perfil de Vernet se clasifica de media (Siebe *et al.*, 1996).

La materia orgánica (Cuadro 5 y Figura 10) en el perfil de Cd. Pemex se clasifica de medianamente alta a mediana del primer horizonte al último con 4.1 a 0.29%, respectivamente. En Vernet, la materia orgánica se clasifica de mediana en el primer horizonte a muy baja en el último horizonte con 2.5 a 3.5 % (Siebe *et al.*, 1996).

La acumulación de la materia orgánica es más alta en el perfil de Cd. Pemex con  $590 \text{ kg dm}^{-3}$  que en Vernet con  $270 \text{ kg dm}^{-3}$  (Siebe *et al.*, 1996). En el perfil de Cd. Pemex la estructura es granular mediana a fina de grado moderado en los primeros tres horizontes y angular mediana a fina, fuerte, en el resto del perfil. En Vernet la estructura es subangular, mediana a fina de grado fuerte a moderado en los primeros dos horizontes, y angular, mediana a fina, moderada a débil en el resto del perfil.

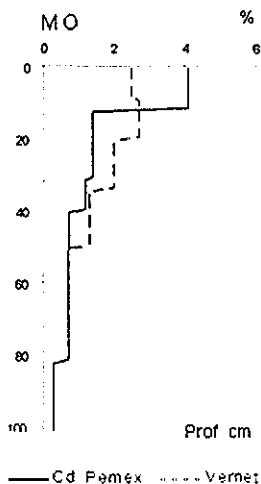


Figura 10: Distribución de la materia orgánica (M.O.) con la profundidad en los perfiles tipo de Cd. Pemex y Vernet, Tab.

El valor de pH en agua (Cuadro 5) en el perfil de Cd. Pemex se clasifica de moderadamente ácido (5.76 a 5.32), mientras que en Vernet es de moderado a fuertemente ácido (5.51 a 4.82). El pH en KCl en ambas localidades es fuertemente ácido a muy fuertemente ácido (Siebe *et al.*, 1996). La conductividad eléctrica es menor de 2.0 dS m<sup>-1</sup> en los dos perfiles, por lo que se consideran con un efecto de salinidad nulo (Richards, 1982).

Cuadro 5: Valores de densidad aparente (d.a.), pH (H<sub>2</sub>O y KCl), conductividad eléctrica (C.E.), Carbón orgánico (C.O.), materia orgánica (M.O.) y la acumulación de la M.O. en los perfiles tipo de Cd. Pemex y Vernet.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	d.a. (g cm <sup>-3</sup> )	pH		C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	C.O. (g kg <sup>-1</sup> )	M.O. (%)	Acumulación M.O. (kg m <sup>-3</sup> )
				H <sub>2</sub> O	KCl				
Cd. Pemex	Ah	0-12	1.2	5.76	4.56	0.056	23.69	4.1	590
	AC	12-31	1.5	5.70	4.86	0.033	7.85	1.3	
	C	31-40	1.5	5.77	4.70	0.026	7.22	1.2	
	AB	40-64	1.4	5.64	4.51	0.033	3.75	0.65	
	Btg <sub>1</sub>	64-82	1.4	5.31	3.66	0.024	4.19	0.72	
	Btg <sub>2</sub>	82-105	1.3	5.32	3.46	0.028	1.70	0.29	
Vernet	Ah	0-9	1.2	5.51	4.35	0.119	14.67	2.5	270
	AB	9-20	1.2	5.12	3.83	0.065	15.41	2.7	
	Btg <sub>1</sub>	20-34	1.2	5.00	3.66	0.051	11.43	2.0	
	Btg <sub>2</sub>	34-50	1.3	4.93	3.62	0.048	7.35	1.3	
	Ctg	50-63	1.3	4.82	3.58	0.058	3.97	0.68	
	Cw	>63		4.82	3.58	0.049	2.03	0.35	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  intercambiable (Cuadro 6) en Cd. Pemex se clasifica de baja (Etchevers *et al*, 1971), tiende a disminuir de 3.53 a 0.71  $\text{cmol kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte C y aumenta a 2.88  $\text{cmol kg}^{-1}$  en el horizonte  $\text{Btg}_1$  para volver a disminuir en el último horizonte. En comparación, en el perfil de Vernet la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  es mediana y tiende a disminuir con la profundidad. El  $\text{Mg}^{2+}$  intercambiable en Cd. Pemex se clasifica de bajo a alto y tiende a disminuir de 1.13 a 0.87  $\text{cmol kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte C y aumenta a 5.09  $\text{cmol kg}^{-1}$  en el horizonte  $\text{Btg}_2$ . En Vernet la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  se clasifica como alta (>3  $\text{cmol kg}^{-1}$ ), disminuye del horizonte superficial al horizonte Ctg. El  $\text{Na}^+$  intercambiable sólo fue determinable en Cd. Pemex en el último horizonte (0.15  $\text{cmol kg}^{-1}$ ). En comparación, en Vernet el  $\text{Na}^+$  está en una concentración baja y relativamente constante. El  $\text{K}^+$  intercambiable en ambas localidades se clasifica de medio en los horizontes superficiales a muy bajo con la profundidad.

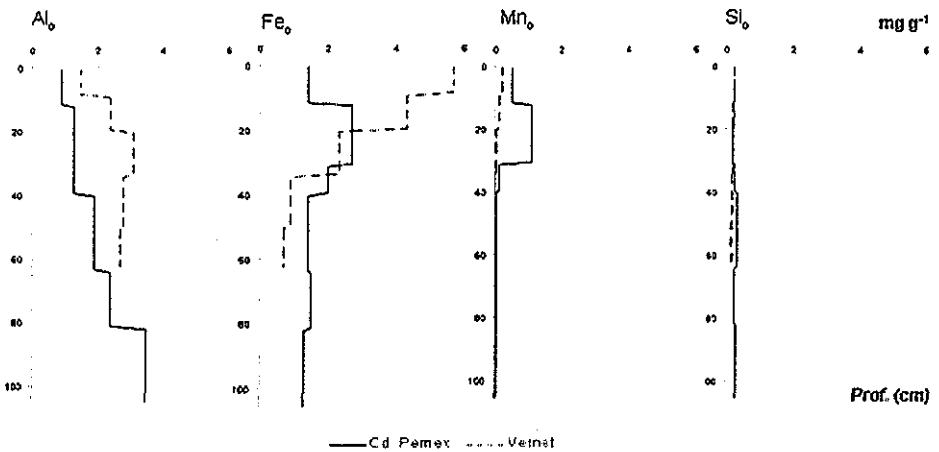
La concentración de  $\text{H}^+$  intercambiable en Cd. Pemex (Cuadro 6) tiende a disminuir de 0.02 a 0.01  $\text{cmol kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte C y aumenta a 0.07  $\text{cmol kg}^{-1}$  en el último horizonte. En comparación, en Vernet el  $\text{H}^+$  aumenta de 0.009 a 0.124  $\text{cmol kg}^{-1}$  del horizonte superficial al último horizonte respectivamente. La concentración de  $\text{Al}^{3+}$  intercambiable en ambos perfiles tiende a incrementarse del horizonte superficial al último horizonte.

La capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) (Cuadro 6) en Cd. Pemex es de 5.12  $\text{cmol kg}^{-1}$  en el horizonte superficial disminuyendo a 1.63  $\text{cmol kg}^{-1}$  en el horizonte C y aumenta de 5.09 a 25.44  $\text{cmol kg}^{-1}$  del horizonte AB al horizonte  $\text{Btg}_2$ . En comparación en Vernet la CICE aumenta del horizonte superficial al horizonte  $\text{Btg}_2$  con 17.93  $\text{cmol kg}^{-1}$  y luego baja otra vez.

**Cuadro 6: Contenido de cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) en suelos de Cd. Pemex y Vernet, Tab.**

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	$\text{cmol kg}^{-1}$						CICE
			$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{H}^+$	$\text{Al}^{3+}$	
Cd. Pemex	Ah	0-12	3.53	1.13	0	0.36	0.02	0.08	5.12
	AC	12-31	3.17	0.69	0	0.07	0.02	0.13	4.08
	C	31-40	0.71	0.87	0	0	0.01	0.04	1.63
	AB	40-64	2.82	2.12	0	0	0	0.15	5.09
	$\text{Btg}_1$	64-82	2.88	4.26	0	0.02	0.01	0.79	7.96
	$\text{Btg}_2$	82-105	0.57	5.09	0.15	0.17	0.07	19.39	25.44
Vernet	Ah	0-9	8.32	4.43	0.17	0.41	0.009	0	13.34
	AB	9-20	8.13	4.64	0.23	0.15	0.063	1.55	14.76
	$\text{Btg}_1$	20-34	5.75	4.12	0.24	0.11	0.106	5.66	15.99
	$\text{Btg}_2$	34-50	5.56	3.08	0.21	0.09	0.121	8.87	17.93
	Ctg	50-63	2.56	3.13	0.21	0.10	0.124	8.87	14.99

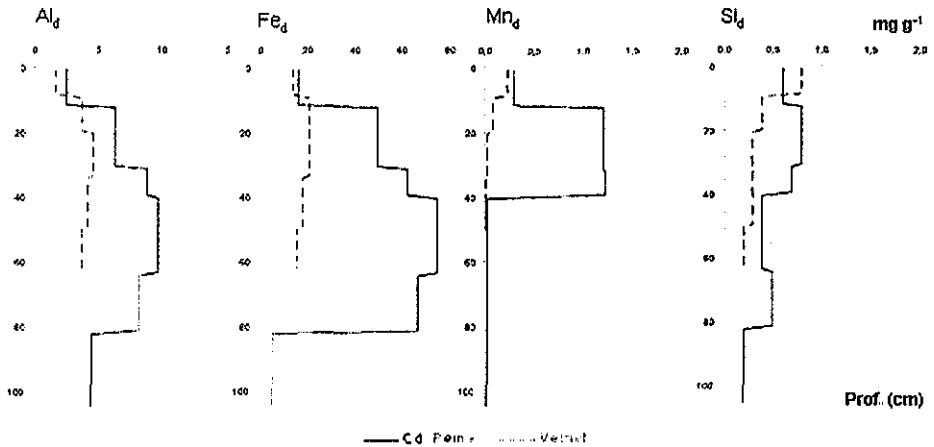
La concentración de Fe extraído con oxalato (Figura 11) (datos en Anexo 2) es más alta en los horizontes superficiales de Vernet comparada con el perfil de Cd. Pemex y tiende a disminuir con la profundidad de 5.69 a 0.68 g kg<sup>-1</sup>. En Cd. Pemex se encuentra principalmente acumulada en los subhorizontes AC y C con 2.7 y 2 g kg<sup>-1</sup>. Las concentraciones de óxidos de Al amorfos de 0.92 a 3.47 g kg<sup>-1</sup> y en Vernet aumentan con la profundidad de 1.50 a 3.1 del horizonte Btg<sub>1</sub> para comenzar a disminuir hacia el último horizonte. Las concentraciones de Mn extractable con oxalato son más altas en el perfil de Cd. Pemex y se encuentran principalmente acumuladas en el horizonte AC (1.06 g kg<sup>-1</sup>) y en Vernet disminuyen con la profundidad. Las concentraciones de óxidos de Si amorfos son bajas en ambas localidades, en Cd. Pemex van de 0.18 a 0.32 g kg<sup>-1</sup> y en la localidad de Vernet disminuyen con la profundidad de 0.26 a 0.13 g kg<sup>-1</sup>.



**Figura 11: Distribución de óxidos amorfos con la profundidad en los perfiles tipo de Cd. Pemex y Vernet, Tab.**

Las concentraciones de óxidos de Fe extraídos con ditionito de sodio (Figura 12) (datos en Anexo 2) en ambos perfiles presentan tendencias a aumentar de los horizontes superficiales a los horizontes AB (74.8 g kg<sup>-1</sup>) de Cd. Pemex y Btg<sub>1</sub> (21.1 g kg<sup>-1</sup>) de Vernet y luego bajan otra vez. Los óxidos cristalinos de Al en ambas localidades tienden a aumentar con la profundidad. Los óxidos cristalinos de Mn en Cd. Pemex se encuentran principalmente acumulados en los horizontes AC y C con 1.21 y 1.23 g kg<sup>-1</sup> respectivamente y disminuyen en el resto del perfil. En Vernet el Mn disminuye con la profundidad. En Cd. Pemex la concentración de óxidos de Si cristalinos es más alta y heterogénea (de 0.22 a 1.66 g kg<sup>-1</sup>); en la localidad de Vernet el Si tiende a disminuir con la profundidad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 12: Distribución de óxidos cristalinos con la profundidad en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex y Vernet, Tab.**

Los índices de  $Fe_o/Fe_d$  (Cuadro 7) en Cd. Pemex tienden a disminuir de la superficie a la profundidad de 0.09 a 0.02 y en Vernet disminuyen de 0.41 a 0.04. Los índices de  $Mn_o/Mn_d$  en Cd. Pemex disminuyen de 1.78 a 0.05 del horizonte superficial al horizonte C y aumentan a 0.48 en el último horizonte. En Vernet los índices de Mn disminuyen de 0.94 a 0.25 del horizonte superficial al horizonte Cw.

Los índices  $Fe_d/Fe_t$  ( $t = \text{total}$ ) (Cuadro 7) en Cd. Pemex son de 0.92 a 0.98; el valor más alto se encuentra en los horizontes AB y  $Btg_1$ . En Vernet son de 0.71 a 0.96; el valor más alto se encuentra en el horizonte Ctg.

**Cuadro 7: Contenido de óxidos amorfos y cristalinos e índices de evolución de suelos en Cd. Pemex y Vernet, Tab.**

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	Índices		
			$Fe_o/Fe_d$	$Mn_o/Mn_d$	$Fe_d/Fe_t$
Cd. Pemex	Ah	0-12	0,09	1,78	0,92
	Ah <sub>2</sub>	12-31	0,06	0,88	0,95
	AB	31-40	0,03	0,05	0,97
	Bg <sub>1</sub>	40-64	0,02	0,39	0,98
	BC	64-82	0,02	0,48	0,98
	Cg	82-105	0,24	0,48	0,81
Vernet	Ahg	0-9	0,41	0,94	0,71
	AB	9-20	0,21	0,83	0,83
	Btg <sub>1</sub>	20-34	0,11	0,57	0,90
	Btg <sub>2</sub>	34-50	0,05	0,25	0,95
	Ctg	50-63	0,04	0,13	0,96
	Cw	>63	0,09	0,25	0,92

Óxidos Amorfos por oxalato:  $Fe_o$ ,  $Al_o$ ,  $Mn_o$ ,  $Si_o$ .

Óxidos Cristalinos por ditionito:  $Fe_d$ ,  $Al_d$ ,  $Mn_d$ ,  $Fe_d$ .

## 7.3. Fraccionamiento de metales pesados en suelos

### 7.3.1. Cromo

En ambas localidades las concentraciones de Cr en las fracciones: i) soluble, ii) intercambiable, iii) asociada a los óxidos de Mn y iv) asociada a la materia orgánica estuvieron por abajo del límite de detección ( $<2 \text{ mg kg}^{-1}$ )

En Cd. Pemex el Cr asociado a los óxidos de Fe amorfos (Figura 13) (datos en Anexo 3) es más alto en los primeros tres horizontes comparados con el resto del perfil. El Cr en esta fracción representa el 2% en el horizonte AC y el 1% de la suma total en el resto del perfil (Figura 14). En Vernet la concentración de Cr asociada a óxidos de Fe amorfos tiende a disminuir de 6.88 a  $1.96 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte AB al horizonte Ctg; esta fracción representa del 2 al 1% del horizonte superficial al inferior.

El Cr asociado a los óxidos de Fe cristalinos (Figura 13) en Cd. Pemex muestra una distribución heterogénea y varía de 18 a  $5.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ; su mayor concentración se encuentra en el horizonte AC con  $34.1 \text{ mg kg}^{-1}$ , que representa el 2% de la suma total de Cr (Figura 14). En Vernet la concentración de Cr asociado a los óxidos de Fe cristalinos también es variable y va de 26.8 a  $15.65 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al último horizonte; su mayor concentración se encuentra en el horizonte Btg<sub>2</sub> con  $51.9 \text{ mg kg}^{-1}$  donde el porcentaje de esta fracción es del 24% de la suma total de Cr.

La fracción residual de Cr (Figura 13) en Cd. Pemex está principalmente acumulada en el horizonte AC con  $1587 \text{ mg kg}^{-1}$  y representa el 120% comparado con el valor de Cr total (Figura 14). La concentración de Cr residual en Vernet es menor en comparación a la localidad de Cd. Pemex y varía entre  $154.5 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial y  $192.5 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Cw, el valor más alto del perfil es de  $258.8 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte AB, la concentración de estos horizontes representa del 84 al 75% del total.

Se observó que después de la extracción con oxalato de sodio más ácido ascórbico las muestras mostraban aún coloraciones rojizas debido a la presencia de óxidos de hierro, de donde el Cr no pudo ser separado en su totalidad por la solución extractora. Por lo anterior, se deduce que el contenido de Cr en la fracción residual se encuentra sobre estimado, debido al aporte de este metal de la fracción asociada a los óxidos de Fe cristalinos.

El Cr total (Anexo 3) en el perfil de Cd. Pemex se encuentra principalmente acumulado en los horizontes AC y C con 1315 y  $1187 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente. En Vernet la concentración de Cr total es menor en comparación a la de Cd. Pemex con 280 a  $164 \text{ mg kg}^{-1}$ . De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) (Cuadro 3) las concentraciones de Cr total en Cd. Pemex son superiores a los intervalos considerados como normales en suelos de textura fina, en la localidad de Vernet las concentraciones totales de Cr entran en rangos considerados como normales para suelos de textura fina.

En la Figura 13 se observa que las sumas de las fracciones de Cr no coinciden con las totales, ésto se debe probablemente:

i) A la heterogeneidad de la muestra. Como se observó con anterioridad los diferentes tipos de concreciones de Fe tienen concentraciones variables de Cr y están distribuidos heterogéneamente en la matriz del suelo

ii) Se observa muchas veces que las sumas no coinciden con los valores totales, porque con las siete extracciones consecutivas son más extractivas que una sola.

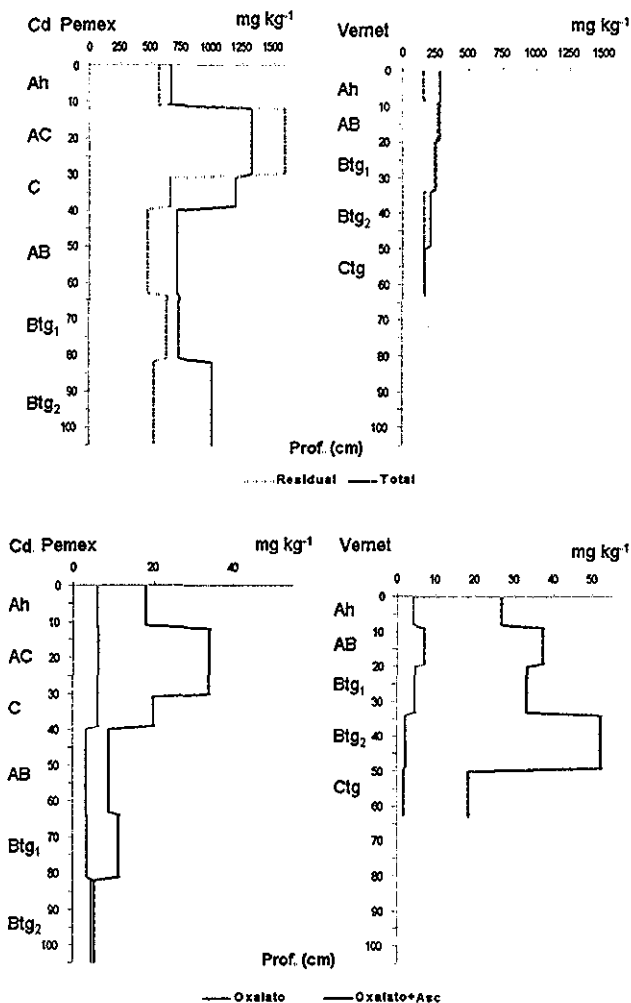


Figura 13: Patrones de distribución de las fracciones de Cr con la profundidad del suelo en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

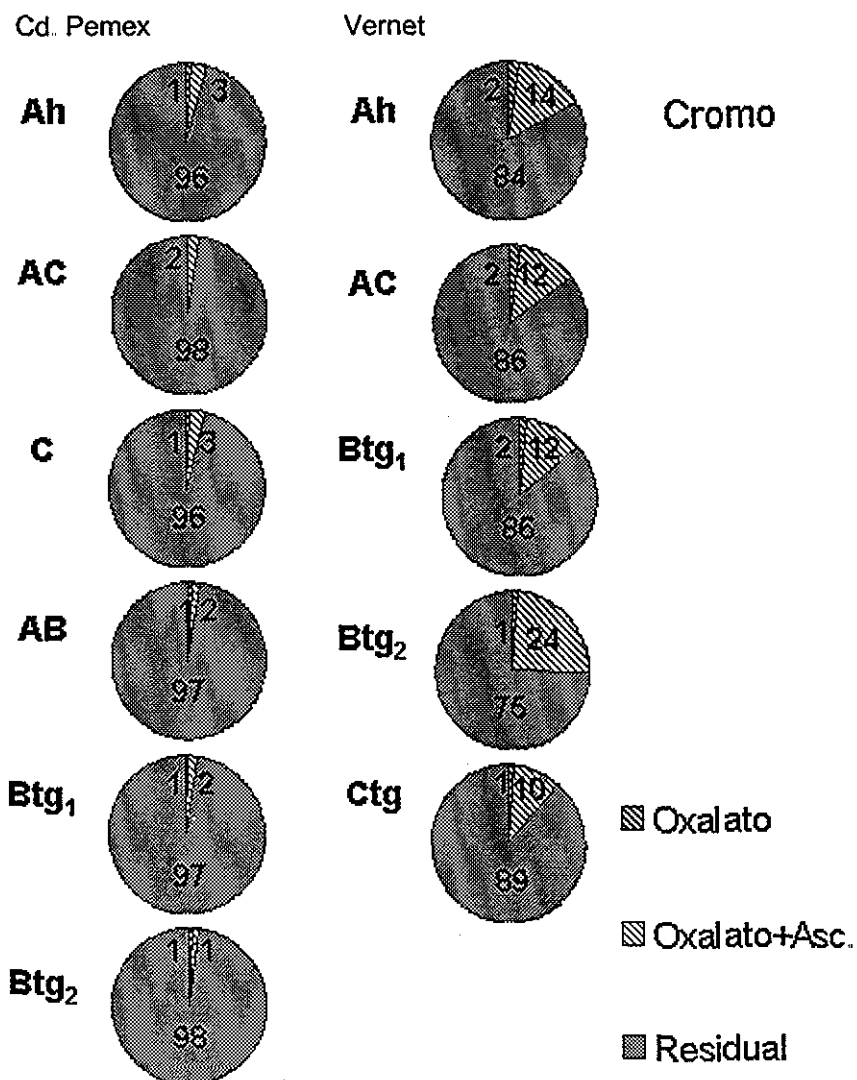


Figura 14: Distribución de Cr (%) en las fracciones del suelo por horizonte, en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.



### 7.3.2. Vanadio

Las concentraciones de V de las fracciones: i) soluble, ii) intercambiable, iii) asociada a óxidos de Mn, iv) asociada a la materia orgánica y v) asociada a óxidos de Fe amorfos estuvieron por abajo del límite de detección ( $<15 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en ambas localidades.

La concentración de V asociado a los óxidos de Fe cristalinos (Figura 15) (datos en Anexo 4) en Cd. Pemex tiende a disminuir de  $38.56 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial a  $16.3 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte C y vuelve a incrementarse a 23.04 en el horizonte AB; ésto representa del 23 al 4% de la suma total de V (Figura 16). En Vernet el V en óxidos de Fe cristalinos sólo pudo leerse en el horizonte Btg1 con  $17.51 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa el 1% de la suma total de V.

La concentración de V de la fracción residual (Figura 15) en Cd. Pemex fue de  $125.9 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superior a  $447.5 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte inferior; el valor más alto del perfil se encontró en el horizonte AC con  $636.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ; esto representa del 77 al 96% de la suma total (Figura 16). En Vernet la concentración de V de la fracción residual es de  $97.7 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superior disminuyendo a  $85.1 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Btg<sub>2</sub> y aumentando a  $111.8 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Ctg; ésto representa del 100 al 87% de la suma total.

Se observó que después de la extracción con oxalato de sodio más ácido ascórbico las muestras mostraban aún coloraciones rojizas debido a la presencia de óxidos de hierro de donde el V, al igual que para el Cr, no pudo ser separado en su totalidad por la solución extractora. Por lo anterior, se deduce que el contenido de V en la fracción residual se encuentra sobre estimado, debido al aporte de este metal de la fracción asociada a los óxidos de Fe cristalinos.

La más alta concentración de V total (Figura 15) en Cd. Pemex se encuentra en el horizonte AC con  $615 \text{ mg kg}^{-1}$ . En Vernet la concentración de V total disminuye de  $214 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial disminuyendo a  $108 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Ctg. De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) (Cuadro 3) las concentraciones totales de V en Cd. Pemex son superiores a los intervalos considerados como normales en suelos de textura fina, en tanto que en Vernet entran en intervalos considerados como normales.

La suma de las fracciones de V al igual que en otros metales no coinciden con los totales (Figura 15) debido a la heterogeneidad de la muestra, o a una extracción más exhaustiva durante el fraccionamiento.

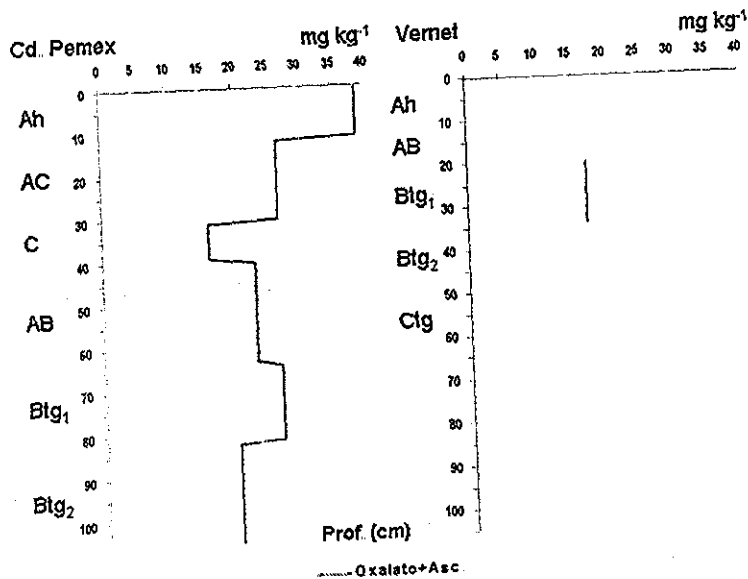
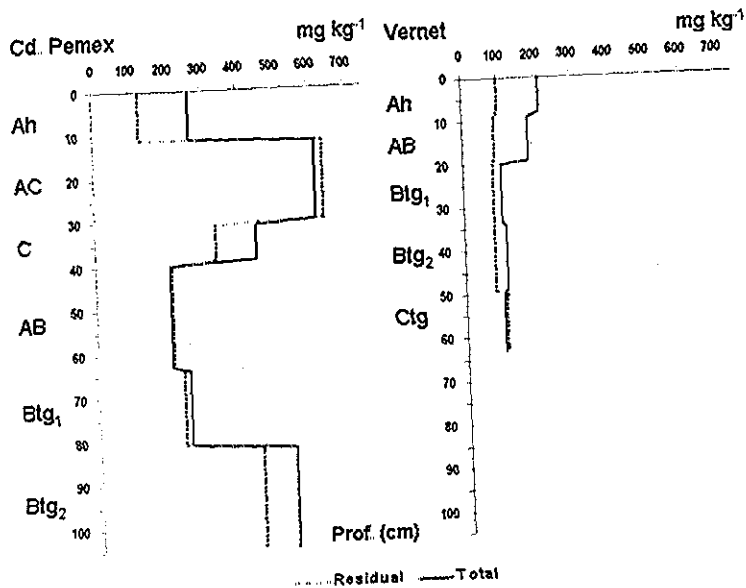


Figura 15: Patrones de distribución de las fracciones de V con la profundidad del suelo en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

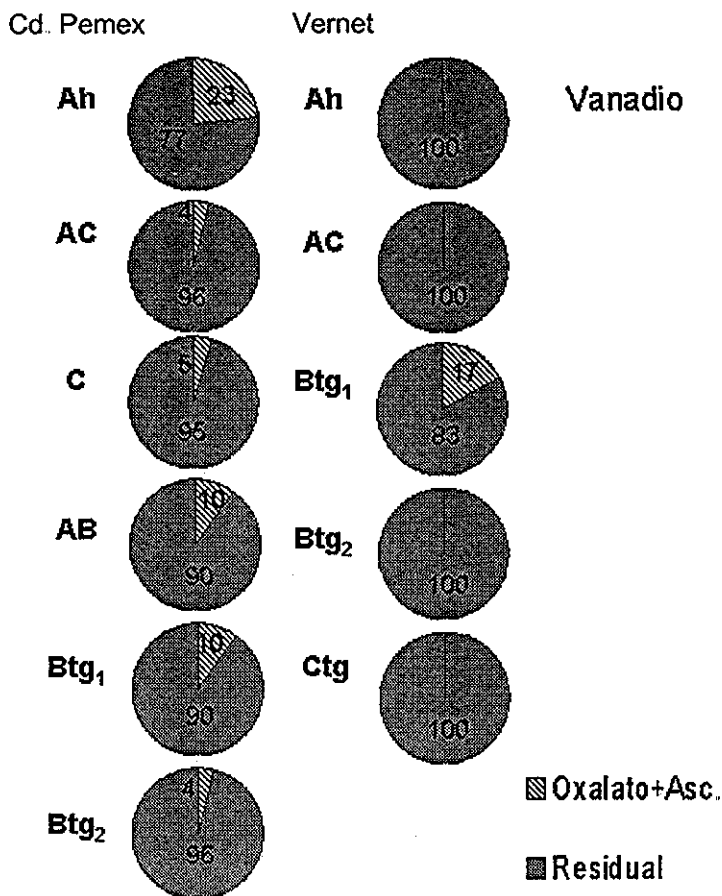


Figura 16: Distribución de V (%) en las fracciones del suelo por horizonte, en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

### 7.3.3. Níquel

La concentración de Ni intercambiable, extraído con acetato de  $\text{NH}_4$  (Figura 17) (datos en Anexo 5) de Cd. Pemex pudo leerse a partir del horizonte AB con  $1.43 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $7.50 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte. Los contenidos en los horizontes representan del 1 al 2% de recuperación de la suma total de Ni en el perfil (Figura 18). En Vernet la concentración de Ni de la fracción intercambiable es más alta en comparación con el perfil de Cd. Pemex con  $3.37 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial a  $6.31 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Ctg; la mayor concentración se encuentra en el horizonte Btg<sub>1</sub> con  $6.82 \text{ mg kg}^{-1}$ , esta fracción representa en promedio el 4% recuperado de la suma total de Ni en el perfil

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El Ni asociado a los óxidos de Mn, extraído con  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  (Figura 17) en Cd. Pemex estuvo por debajo del límite de detección ( $<1 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En Vernet la concentración de Ni fue de  $1.6 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte AB lo que representa el 1% de la suma total de Ni (Figura 18). Los demás horizontes están por abajo del límite de detección ( $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

La concentración de Ni asociado a la materia orgánica extraído con  $\text{EDTA}\cdot\text{NH}_4$  (Figura 17) en Cd. Pemex sólo pudo leerse en el horizonte AC con  $2.7 \text{ mg kg}^{-1}$  que representa 1% de la suma total de Ni (Figura 18), las concentraciones en los demás horizontes estuvieron por debajo del límite de detección ( $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En Vernet el Ni asociado a la materia orgánica disminuye con la profundidad y representa el 14% de la suma total en el horizonte superficial y de 3 al 1% en el resto del perfil

El Ni asociado a óxidos de Fe amorfos extraído con oxalato (Figura 17) en Cd. Pemex fue leíble en los primeros tres horizontes y en el último. El porcentaje de recuperación más alto de Ni de esta fracción es de 6% en el horizonte AC (Figura 18). En Vernet la concentración de Ni asociado a óxidos de Fe amorfos aumenta con la profundidad de  $3.22$  a  $6.49 \text{ mg kg}^{-1}$  y representa del 4% al 5% de la suma total de Ni.

El Ni asociado a los óxidos de Fe cristalinos extraído con oxalato mas ácido ascórbico (Figura 17) en Cd. Pemex aumenta de  $5.26$  a  $12.89 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte C, respectivamente, y disminuye en el resto del perfil, su proporción representa del 11% al 2% de la suma total de Ni en el perfil (Figura 18). En Vernet el Ni asociado a los óxidos de Fe cristalinos aumenta de  $9.98$  a  $17.70 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Ctg (respectivamente) y representa del 13 al 7% de la suma total de Ni en el perfil.

La fracción residual de Ni (Figura 17) en Cd. Pemex aumenta de  $42.3$  a  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Btg<sub>2</sub>, ésto representa del 86 al 95% de la suma total. En Vernet la concentración de Ni residual varía entre  $48.8 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial y  $59.9 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte Cw; el valor más alto se encuentra el horizonte Btg<sub>1</sub> ( $192.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que comparado con el valor del Ni total representa el 120% (Figura 18).

La concentración de Ni total (Figura 17) en Cd. Pemex aumenta con la profundidad de  $39$  a  $318 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al último horizonte. La concentración de Ni total en Vernet es más alta en el horizonte Btg<sub>1</sub> con  $160 \text{ mg kg}^{-1}$  y luego baja otra vez en el resto del perfil. De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) (Cuadro 3) los valores de Ni total en las dos localidades se encuentran en intervalos considerados como normales en suelos de textura fina.

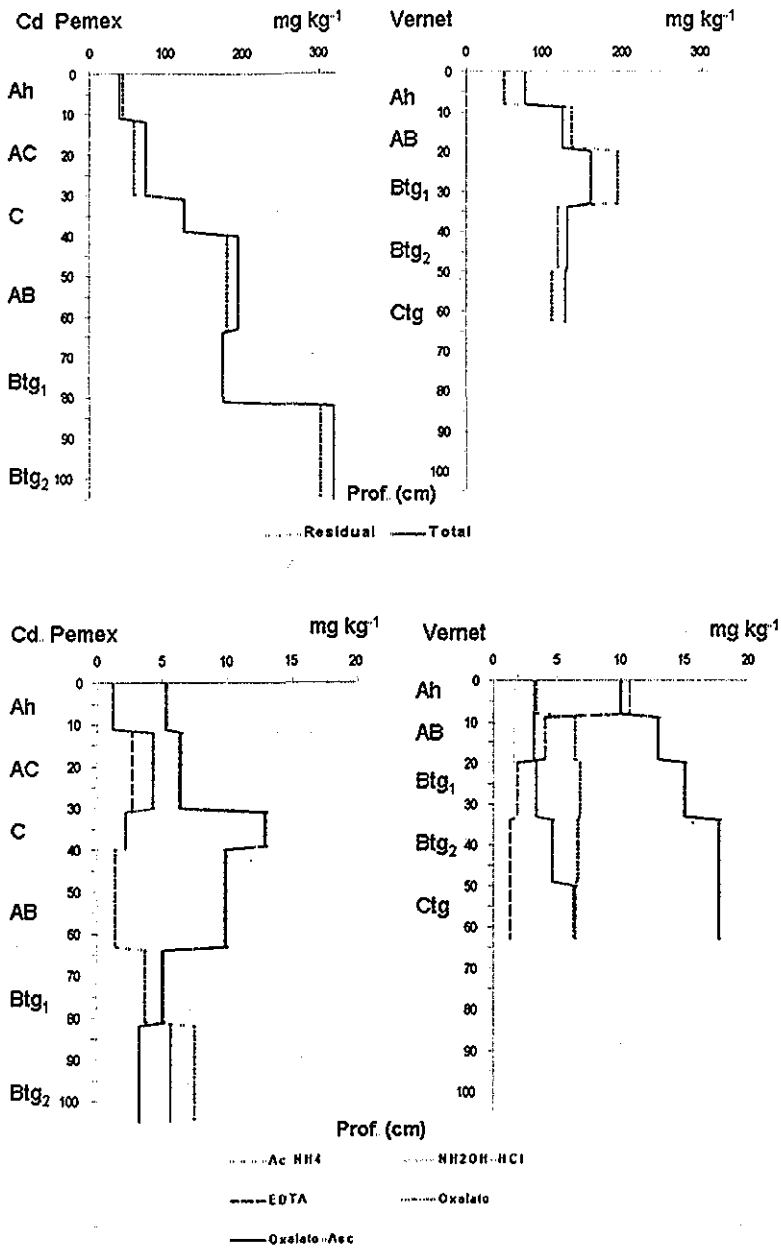


Figura 17: Patrones de distribución de las fracciones de Ni con la profundidad del suelo en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

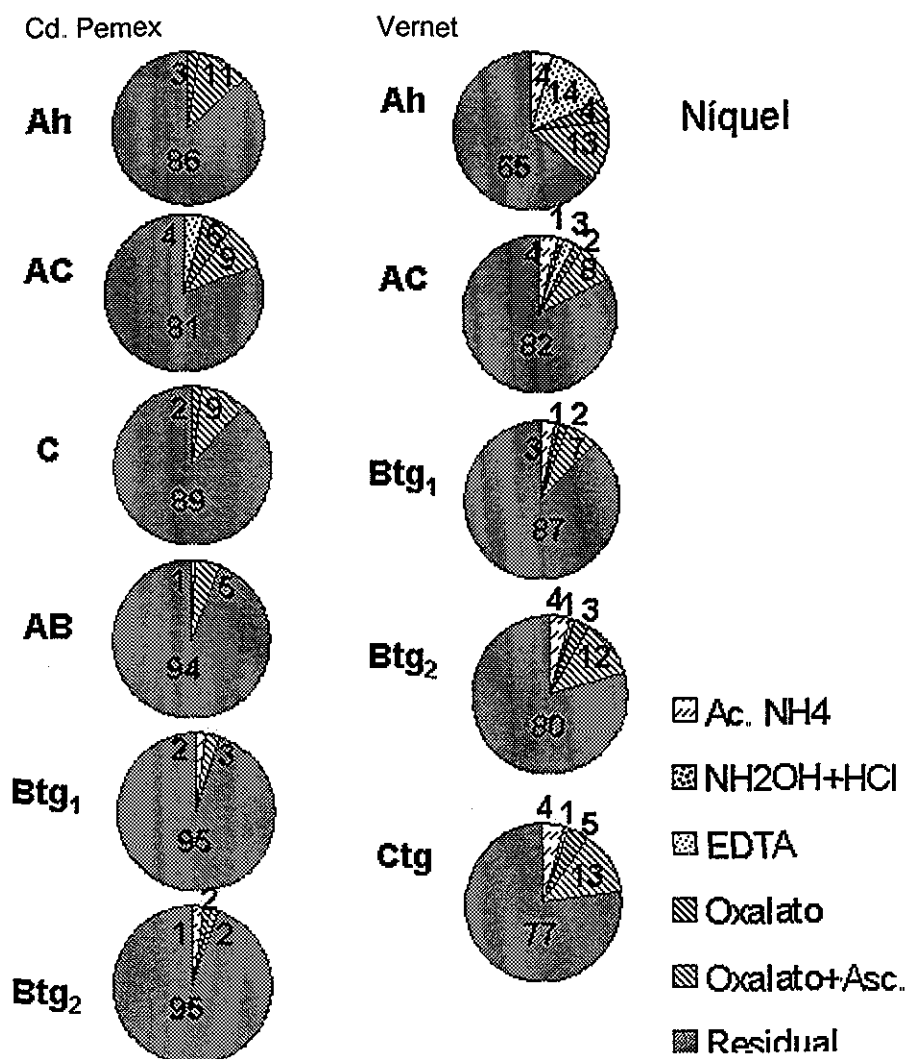


Figura 18: Distribución de Ni (%) en las fracciones del suelo por horizonte, en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### 7.3.4. Cobre

En ambas localidades las concentraciones de Cu de las fracciones: i) soluble, ii) intercambiable y iii) asociada a los óxidos de Mn están por abajo del límite de detección ( $<0.16 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

En ambas localidades las concentraciones de Cu extraídas con EDTA-NH<sub>4</sub> (Figura 19) (datos en Anexo 6) disminuyen con la profundidad: en Cd. Pemex de  $5.34$  a  $0.31 \text{ mg kg}^{-1}$  y en Vernet de  $3.49$  a  $0.19 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa del 25 al 1% en Cd. Pemex y del 22 al 3% en Vernet de la suma total de Cu (Figura 20).

De la misma forma, las concentraciones de Cu asociadas a óxidos de Fe amorfos (Figura 19) disminuyen en ambas localidades con la profundidad: en Cd. Pemex de  $4.69$  a  $0.70 \text{ mg kg}^{-1}$  y en Vernet de  $4.60$  a  $0.65 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa el 22 al 3% en Cd. Pemex y el 29 al 8% en Vernet de la suma total (Figura 20).

La concentración de Cu asociado a los óxidos de Fe cristalinos (Figura 19) en Cd. Pemex aumenta hacia los horizontes inferiores de  $0.48 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $2.09 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa del 2 al 9% de la suma total. En Vernet la concentración de Cu en óxidos de Fe cristalinos disminuye de  $2.38$  a  $1.47 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Ctg lo que representa del 15 al 21% de la suma total de Cu (Figura 20).

La concentración de Cu residual (Figura 19) en Cd. Pemex varía entre  $11.3 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superior y  $19.3 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte Btg<sub>2</sub>; la mayor concentración de  $27.4 \text{ mg kg}^{-1}$  se encuentra en el horizonte BC. Esta fracción representa del 51 al 93% de la suma total (Figura 20). En Vernet la fracción residual es relativamente constante de  $5.2$  a  $4.7 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Ctg lo que representa del 34 al 71% de la suma total.

La concentración de Cu total (Figura 19) en Cd. Pemex fue de  $22 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superior, manteniéndose poco variable con la profundidad. En Vernet la concentración de Cu total es de  $19 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial, disminuye paulatinamente a  $8 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Ctg. De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) (Cuadro 3) en ambas localidades la concentración de Cu total se encuentra debajo de los intervalos normales para suelos de textura fina.

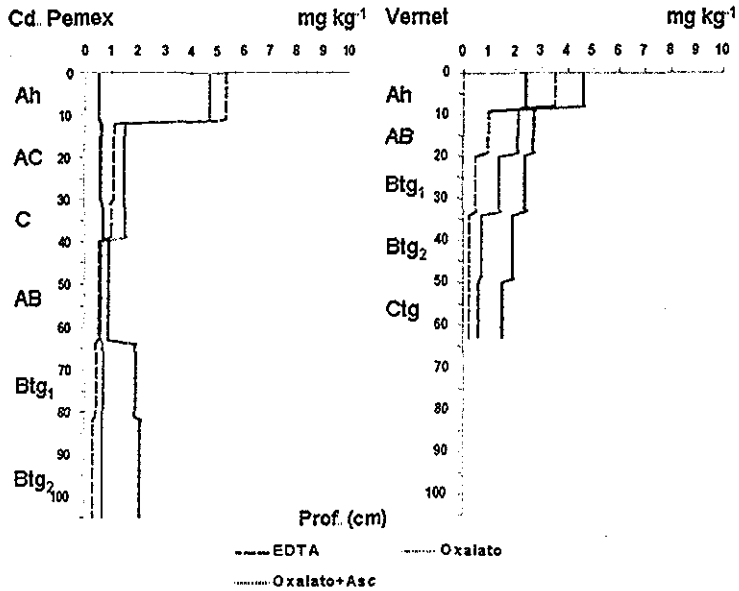
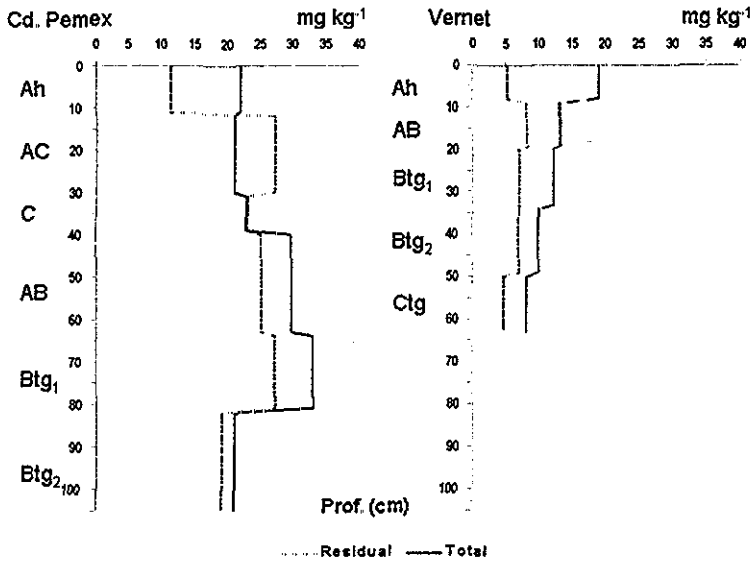


Figura 19: Patrones de distribución de las fracciones de Cu con la profundidad del suelo en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



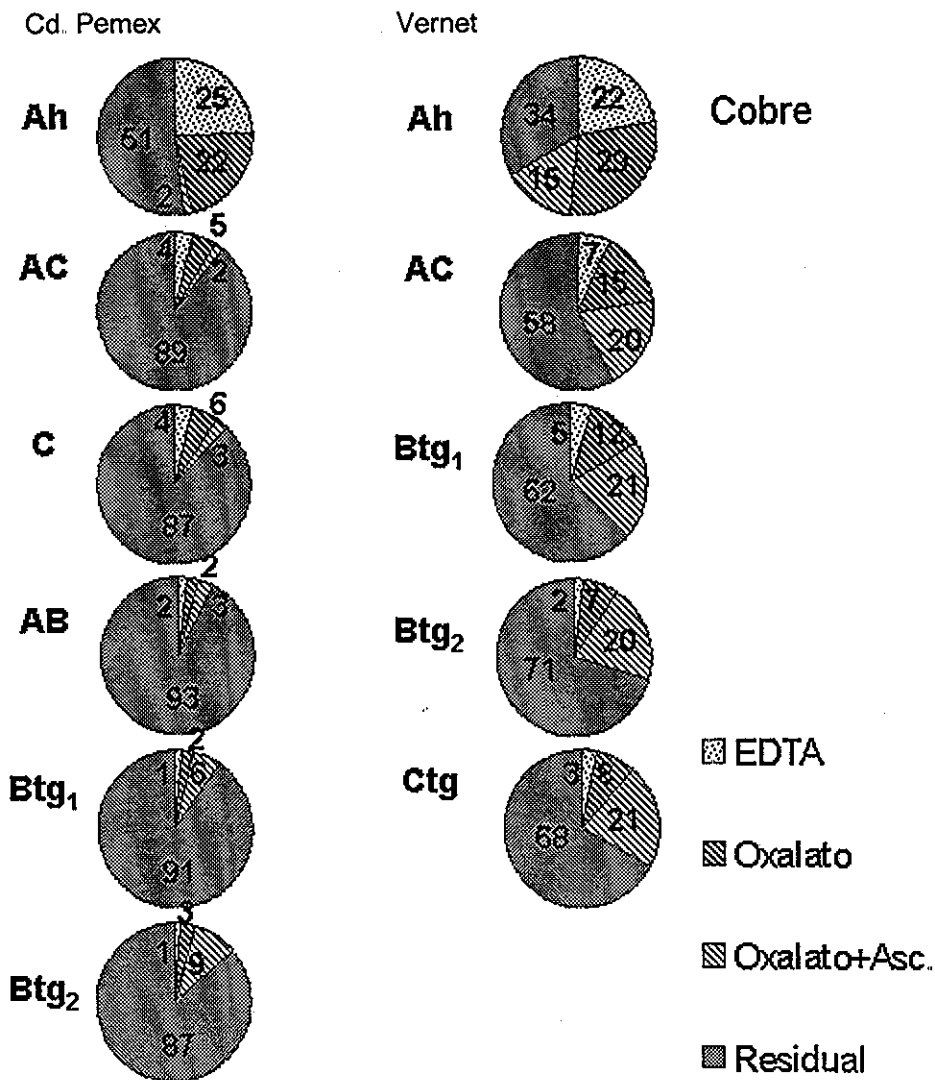


Figura 20: Distribución de Cu (%) en las fracciones del suelo por horizonte, en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### 7.3.5. Zinc

La fracción de Zn soluble ( $H_2O$ ) (Figura 21) (datos en Anexo 7) pudo leerse sólo en el horizonte superficial de Vernet ( $0.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ) lo que representa el 1% de la suma total de Zn (Figura 22). La concentración de Zn soluble en los demás horizontes están debajo del límite de detección ( $<16 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

La fracción intercambiable de Zn sólo fue leible en los horizontes superficiales de ambas localidades con  $0.34 \text{ mg kg}^{-1}$  en Cd. Pemex, lo que representa el 2% de la suma total y en Vernet de  $1.6 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa el 3% de la suma total (Figura 22).

El Zn asociado a los óxidos de Mn (Figura 21) en Cd. Pemex pudo leerse en los dos horizontes superficiales con  $0.37$  y  $0.26 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa el 2 y 1% de la suma total (Figura 22). En Vernet la concentración de Zn de la fracción asociada a óxidos de Mn fue leible sólo en los horizontes Ah y Cw con  $1.3$  y  $0.26 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente, lo que representa el 3 y 5 % de la suma total.

El Zn asociado a la materia orgánica y a óxidos de Fe amorfos (Figura 21) sólo se pudieron leer en los horizontes superficiales de ambas localidades, con  $0.83 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $2.04 \text{ mg kg}^{-1}$  en Cd. Pemex, lo que representa el 2 y 5% de la suma total y en Vernet con  $2.67$  y  $5.25 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa el 6 y 11% (respectivamente) de la suma total de Zn (Figura 22).

La concentración de Zn en óxidos de Fe cristalinos (Figura 21) de Cd. Pemex es más alta en el horizonte superficial con  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa el 16% de la suma total (Figura 22). En Vernet también la concentración más alta se encuentra en el horizonte superficial con  $8.04 \text{ mg kg}^{-1}$ , la que representa el 17% de la suma total.

La concentración de Zn residual (Figura 21) en Cd. Pemex aumenta de  $30.8$  a  $100.2 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al último horizonte, lo que representa de 75 al 98% de la suma total; el valor del último horizonte comparado con el valor del Zn total es más alto y representa el 122%. En Vernet la concentración de Zn residual aumenta de  $26.9$  a  $55.2 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superior al horizonte Btg<sub>2</sub>; estas concentraciones representan del 59 al 88% de la suma total de Zn (Figura 22)

La concentración de Zn total (Figura 21) en Cd. Pemex aumenta con la profundidad de  $49$  a  $82 \text{ mg kg}^{-1}$ . En Vernet la concentración de Zn total es más alta en el horizonte superficial con  $67 \text{ mg kg}^{-1}$  y relativamente constante en el resto del perfil. De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) (Cuadro 3) los valores de las concentraciones totales de Zn se encuentran debajo de los intervalos considerados como normales para suelos de textura fina en ambas localidades.

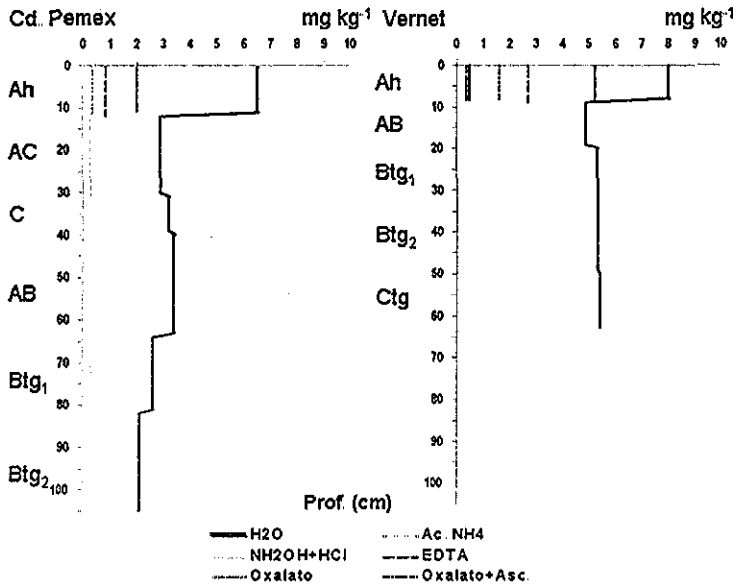
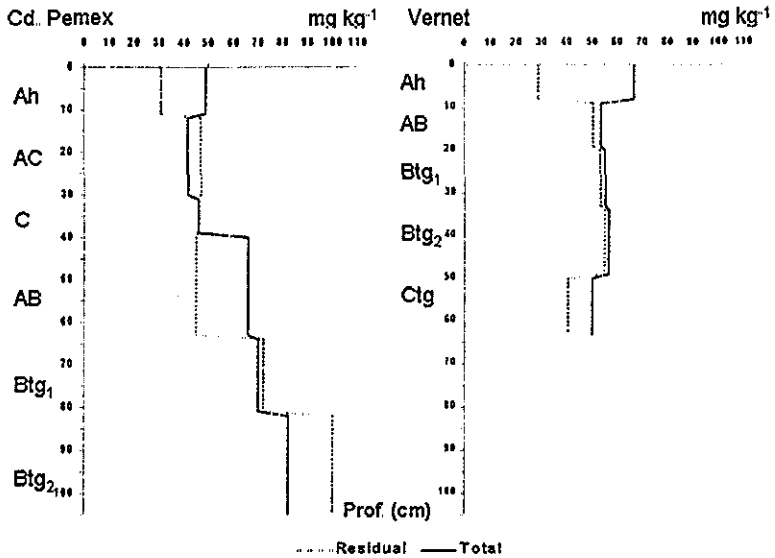


Figura 21: Patrones de distribución de las fracciones de Zn con la profundidad del suelo en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

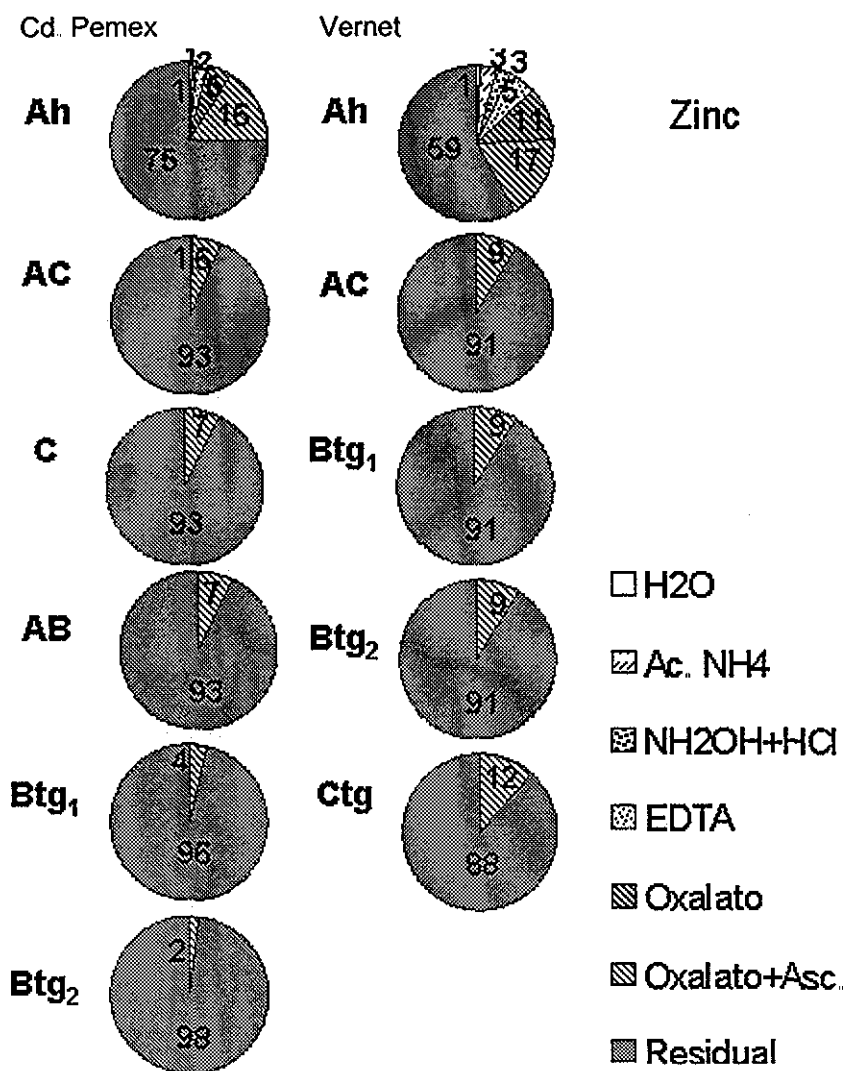


Figura 22: Distribución de Zn (%) en las fracciones del suelo por horizonte en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### 7.3.6. Plomo

Las concentraciones de Pb soluble, intercambiable y la fracción asociada a los óxidos de Mn están por debajo del límite de detección ( $<0.74 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en ambas localidades

El Pb asociado a la materia orgánica (Figura 23) (datos en Anexo 8) en Cd. Pemex aumenta a  $6.25 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte AC y luego baja otra vez a menos de  $0.74 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte; ésto representa del 13 al 5% de la suma total de Pb (Figura 24). En Vernet el Pb asociado a la materia orgánica disminuye con la profundidad y sólo pudo leerse en los tres primeros horizontes con  $2.55$  a  $0.95 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Btg<sub>1</sub>, lo que representa del 16 al 7% de la suma total

La concentración de Pb asociada a óxidos de Fe amorfos (Figura 23) en el perfil de Cd Pemex aumenta a  $6.46 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte AC y luego baja a  $1.34 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte, lo que representa del 17 al 5% de la suma total (Figura 24). En Vernet la concentración de Pb asociada a óxidos de Fe amorfos disminuye de  $4.94$  a  $2.12 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Btg<sub>1</sub> y el porcentaje de esta fracción representa del 16 al 7% de la suma total de Pb.

La concentración de Pb asociado a los óxidos de Fe cristalinos (Figura 23) en Cd. Pemex es poco variable de  $3.40 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial a  $2.63 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte; la mayor concentración se observa en el horizonte AC de  $5.47 \text{ mg kg}^{-1}$  lo que representa del 20 al 10% de la suma total. En Vernet el Pb en óxidos de Fe cristalinos varía de  $2.90 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial a  $3.89 \text{ mg kg}^{-1}$  del último horizonte; con un máximo de  $4.45$  en el horizonte Btg<sub>2</sub>, lo anterior representa del 13 al 34% de la suma total (Figura 24).

La concentración de Pb en la fracción residual (Figura 23) en Cd. Pemex es variable con  $12.5 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte superficial y  $21.9 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte; la mayor concentración de  $31.4$  se encuentra en el horizonte AC. Estas concentraciones representan del 55 al 85% de la suma total del perfil (Figura 24). En Vernet la fracción residual aumenta de  $5.3$  a  $10.3 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superior al horizonte Ctg.

La concentración total de Pb (Figura 23) en ambas localidades es relativamente constante, en Cd. Pemex va de  $20$  a  $25 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al último horizonte; la mayor concentración de  $36 \text{ mg kg}^{-1}$  se observa en el horizonte AC. En Vernet la concentración de Pb total es de  $15$  a  $14 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial al horizonte Ctg. De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) (Cuadro 3) las concentraciones de Pb total se encuentran debajo de los intervalos normales para suelos de textura fina.

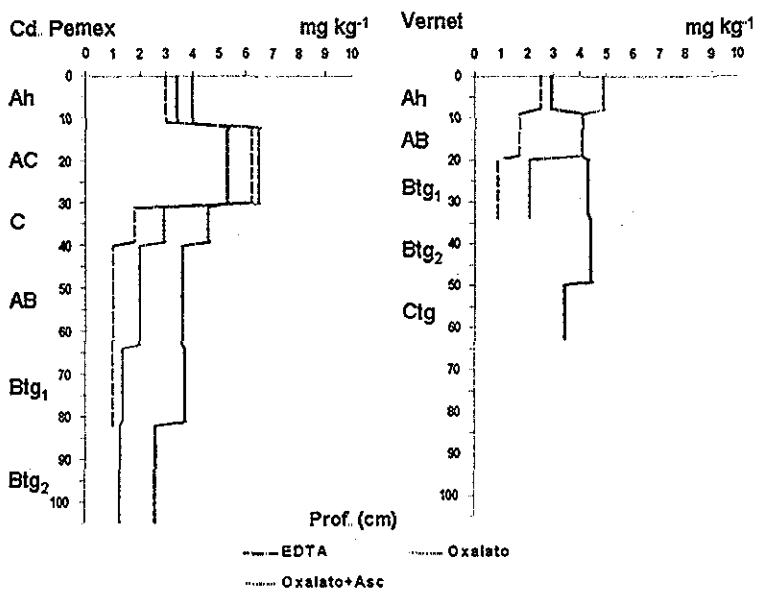
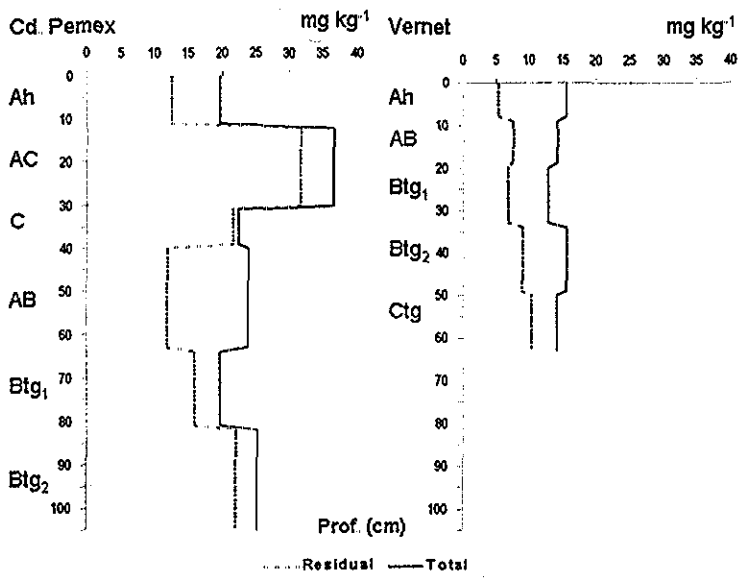


Figura 23: Patrones de distribución de las fracciones de Pb con la profundidad del suelo en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

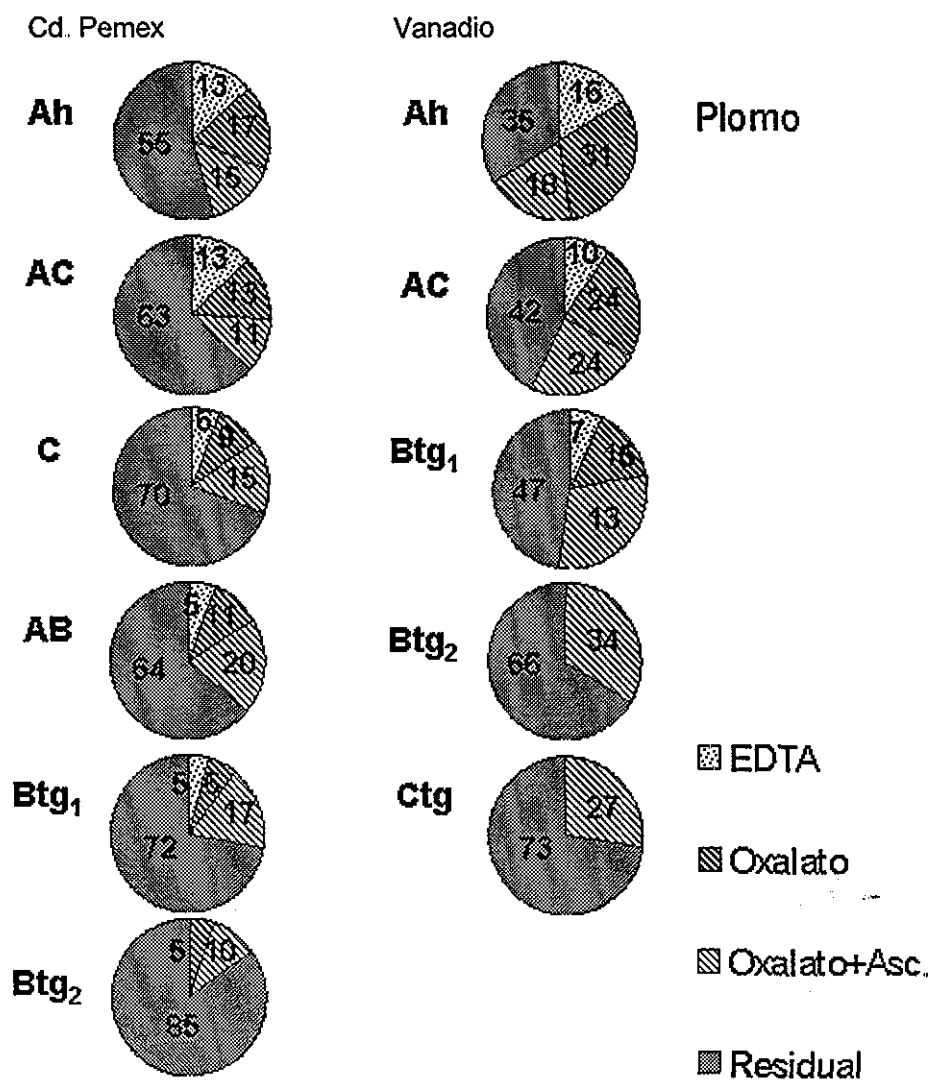


Figura 24: Distribución de Pb (%) en las fracciones del suelo por horizonte, en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 7.4. Fraccionamiento de metales pesados en nódulos de Cd. Pemex.

Debido a que la distribución de Cr y V en los perfiles estaba asociada a la distribución de fragmentos mayores de 2 mm se realizó el fraccionamiento por separado en nódulos de los horizontes Ah y AB de Cd Pemex.

Como se esperaba, las concentraciones de Cr y V fueron altas en los nódulos o fragmentos (Cuadro 8) y son superiores a los intervalos considerados como normales en suelos de textura fina (Fiedler y Roessler, 1988) (Cuadro 3). Las concentraciones de Cu y Pb en los fragmentos se encontraron en intervalos normales para suelos de textura fina, pero fueron más altas comparadas con las concentraciones totales en la fracción del suelo homogenizado de su respectivo horizonte. En tanto, el Ni y el Zn estuvieron en intervalos más bajos de los considerados como normales para suelos de textura fina, pero también fueron más altos que las concentraciones totales reportadas en la fracción del suelo homogenizado.

**Cuadro 8: Concentración de metales pesados (mg kg<sup>-1</sup>) en nódulos (>2mm) de la localidad de Cd. Pemex**

			H <sub>2</sub> O	Ac. NH <sub>4</sub>	NH <sub>2</sub> OH- HCl	EDTA	Oxalato	Ox.+Asc.	Residual	Total
Ni	Ah	0-12	<1	1.10	<1	<1	<1	2.10	61.5	60
	AB	40-64	<1	1.40	<1	<1	<1	3.70	59.9	99
Cr	Ah	0-12	<2	<2	<2	<2	7.90	27.70	2932	2147
	AB	40-64	<2	<2	<2	<2	11.60	33.70	1635	1818
Cu	Ah	0-12	<0.16	<0.16	<0.16	0.58	1.07	0.48	31.5	33
	AB	40-64	<0.16	<0.16	<0.16	0.24	0.74	1.63	53.3	56
Pb	Ah	0-12	<0.74	<0.74	<0.74	3.60	2.84	4.45	38.3	48
	AB	40-64	<0.74	<0.74	<0.74	3.90	3.40	5.46	38.4	50
Zn	Ah	0-12	<0.16	<0.16	0.26	<0.16	<0.16	1.64	44.4	54
	AB	40-64	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	3.60	88.6	94
V	Ah	0-12	<15	<15	<15	<15	20.6	60.19	1191.4	1133
	AB	40-64	<15	<15	<15	<15	24.4	46.6	986.2	1148



## 7.5. Análisis mineralógicos

Los componentes de los suelos del área de estudio son principalmente cuarzos y arcillas asociados con óxidos de Fe y en los horizontes superficiales hay la presencia de minerales de origen volcánico.

Los óxidos de Fe presentes en los perfiles se encuentran formando diferentes estructuras:

i) Nódulos: Son masas globosas que varían de tamaño de grava a arena media y que se diferencian por su composición y/o estructura del resto del suelo. Éstos son de composición heterogénea y se presentan en formas irregulares a redondeadas. Las primeras son más abundantes en los horizontes superficiales del perfil de Cd. Pemex.

ii) Concreciones: Son formas redondeadas a ovaladas de un tamaño de limo fino a arena gruesa, presentan una matriz oscura recubierta por uno o varios crecimientos concéntricos.

### 7.5.1. Análisis mineralógico en la fracción de arena fina.

La identificación de los minerales que componen la fracción fina se efectuó en los horizontes superficiales y basales en ambas localidades (por medio de preparaciones frescas obtenida mediante tamizado en húmedo), con el propósito de:

- i) Determinar si hubo aporte de material volcánico reciente de la erupción volcánica de El Chichón ocurrida en 1982.
- ii) Comparar el material volcánico de los horizontes superiores con el material que compone los horizontes inferiores en los perfiles de ambas localidades.

Los horizontes superficiales se encuentran constituidos de un 10% a 15% vol. de minerales de origen volcánico y el resto de cuarzos y óxidos de Fe en un 85% a 90% vol. Los minerales volcánicos como: vidrios volcánicos, horblendas y los piroxenos no muestran señas de intemperismo ni contacto con arcillas (Figura 25).

En los horizontes basales dominan los cuarzos asociados con óxidos de Fe.

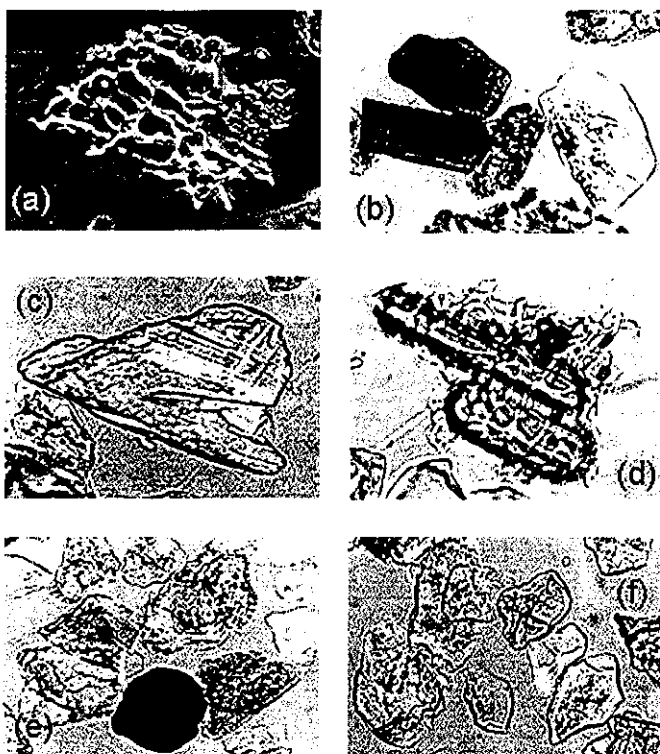


Figura 25: Minerales de origen volcánico en la fracción de arenas finas de los horizontes superficiales de Cd. Pemex y Vernet: (a) Vidrio volcánico (500 aumentos), (b) Horblendas (400 aumentos), (c) Piroxeno prismático (200 aumentos), d) Granos de piroxenos cubiertos de vidrio volcánico (400 aumentos). (e-f) Granos de cuarzo y óxidos de Fe de los horizontes inferiores (200 aumentos).

La identificación mineralógica por difracción de rayos X en nódulos de los horizontes Ah y AB de Cd Pemex muestra el predominio de fases cristalinas como la hematita (41%) y goetita (32%) sobre las fases amorfas como la ferrihidrita (12%) y la berthierina férrica (12%) (Cuadro 9 y Anexo 9).

Cuadro 9: Análisis modal (% vol.) de minerales identificados por difracción de rayos X de muestras de nódulos.

Nódulos de Cd. Pemex	Goetita	Hematita	Ferrihidrita	Berthierina Férrica	Caolinita	Cuarzo	Feldespatos
Ah	9	41	12	12	9	18	3
AB	32	29	10	13	5	8	n.d.

(n.d. = no determinado).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 7 5 2. Morfología y mineralogía de nódulos

Los nódulos (Figura 26) son duros, sus límites son claros con la matriz del suelo y abruptos, su tamaño es de grava a arena media, están revestidos de arcillas orientadas. Su matriz es de color café rojizo (10 YR 3/6), en ella se encuentran incluidos minerales negros de apariencia vidriosa (Figuras 26<sub>(d)</sub>) y 26<sub>(f)</sub>) y cuarzos del tamaño de arena fina a gravas (5 mm) Los cuarzos de 2 a 5 mm presentan un intemperismo débilmente desarrollado debido a procesos de transporte por vía de fluidos acuosos (UNAM-Batelle-IMP, 1999) y forman protuberancias redondeadas en las superficies de los cuerpos nodulares (Figura 26<sub>(c)</sub>); en su fábrica interna presentan fisuras, que en los cuarzos incorporados en nódulos de los horizontes profundos están rellenas de sesquióxidos (runicuarzos) (26<sub>(e)</sub>). Los cuarzos menores de 2 mm, son más abundantes y su morfología es subangular que forman protuberancias angulares en la parte superficial de los nódulos (Figura 26<sub>(a)</sub>).

Las matrices de los nódulos de los horizontes superiores son de aspecto fresco y lustroso (Figura 26<sub>(c)</sub>), en comparación con nódulos de los horizontes inferiores con matrices sin lustre, más viejas en apariencia y porosas (Figura 26<sub>(g)</sub>).

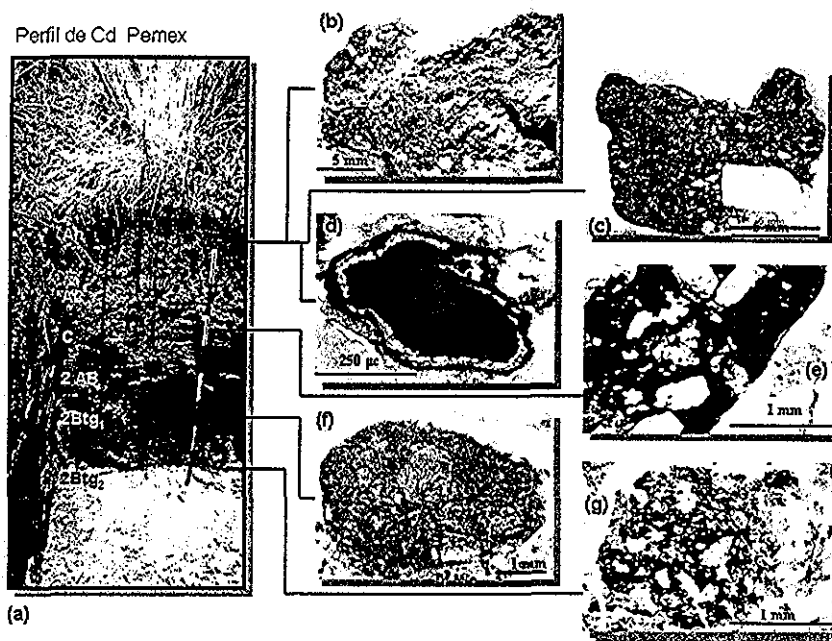


Figura 26: Fotografías y microfotografías de diferentes nódulos de Fe en el perfil de Cd. Pemex: (b y c) Nódulos del horizonte Ah con granos de cuarzo de diferentes tamaños (0.5 a 5mm) incluidos en la matriz, (d) mineral negro de apariencia vidriosa incluido en la matriz de un nódulo, (e) detalle de cuarzos con fisuras rellenas de sesquióxidos (f) nódulo del horizontes 2Btg<sub>1</sub> con un recubrimiento arcilloso y minerales negros incluidos en su matriz, (g) nódulo del horizontes 2Btg<sub>2</sub> más viejo, con matriz sin lustre.

En el perfil de Cd. Pemex (Figura 27) los nódulos de formas irregulares del tamaño de grava se encuentran principalmente acumulados en el horizonte AC en un 70% Vol. y su contenido disminuye abruptamente en los horizontes inferiores. En el perfil de Vernet los cuerpos nodulares son menores del 10% Vol. y su mayor acumulación se observa en la misma proporción en los horizontes Ah y Ctg.

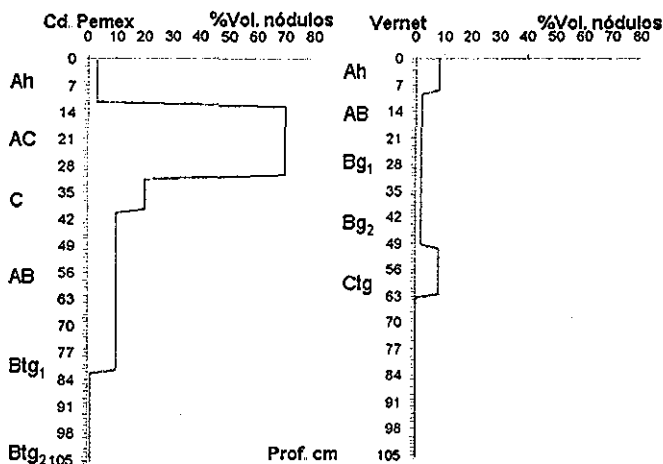


Figura 27: Distribución de nódulos (> 2 mm) en %Vol. con respecto a la profundidad de los perfiles tipo de Cd. Pemex y Vernet.

### 7.5.3. Análisis a la microsonda electrónica

El análisis mediante la microsonda electrónica fue en secciones pulidas representativas de los componentes del suelo de las dos localidades las cuales están constituidos de nódulos, concreciones y matriz del suelo.

#### 7.5.3.1. Composición química de los nódulos

A partir de los análisis en las matrices de los nódulos (Cuadro 10) se distinguieron 3 áreas con una composición elemental similar:

- i) Áreas compuestas principalmente de Fe (80 al 94% vol.) (Cuadro 10, puntos 5 y 6).
- ii) Áreas compuestas de Fe (55 a 75% vol.) con Al y Si en proporciones similares (Cuadro 10, puntos 1, 3 y 4).
- iii) Áreas en las que el Fe (5 a 7% vol.) se encuentra en menor proporción que las concentraciones de Al y Si (Cuadro 10, punto 2).

Para diferenciar la concentración de Cr en una mayor o menor concentración en los nódulos se delimitaron los puntos con más de 5% vol. de Cr con líneas continuas rojas y con menos del 5% vol. con líneas punteadas rojas

De los elementos traza, el Cr es el más abundante (1.1 a 1.9% vol.) y su concentración y distribución en la matriz de los nódulos es heterogénea. Le sigue en abundancia el V (0.1 a 0.8% vol.), el Cu (0.4 a 1% vol.), el Ni (0.1 a 0.7% vol.), el Zn (0.1 a 0.7% vol.) y el Pb (0.4 a 0.5% vol.)

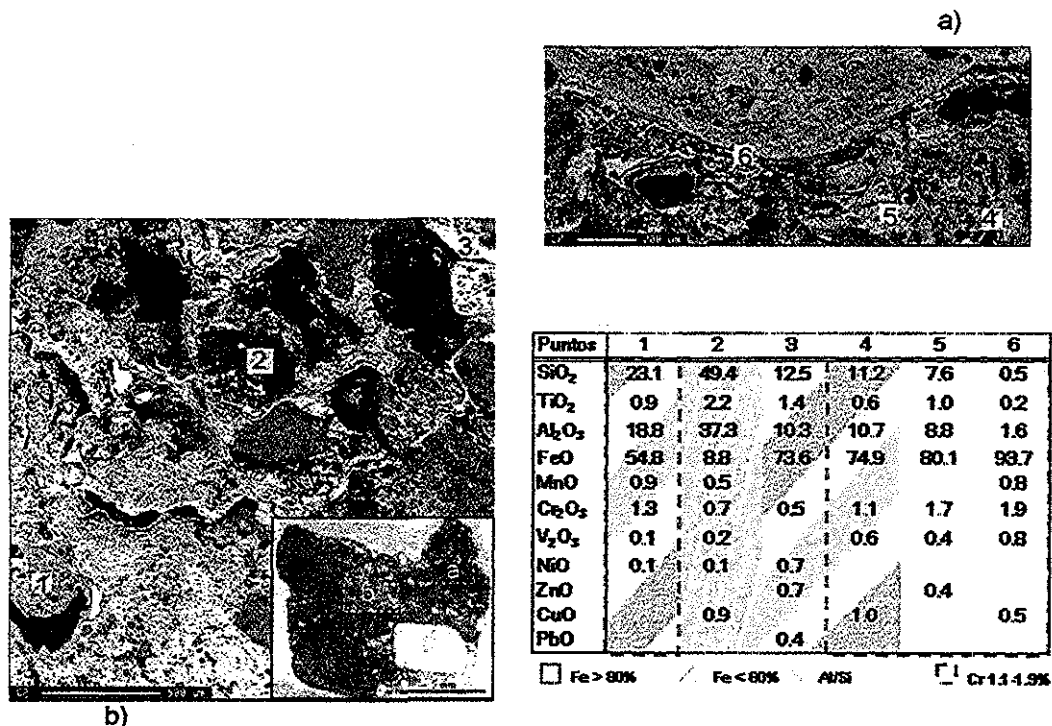


Figura 28: Imagen composicional digitalizada obtenida mediante microsonda electrónica y puntos encuadrados en diferentes colores para relacionar su composición química % vol. en la matriz de un nódulo del horizonte AC de Cd. Pemex. En el recuadro inferior derecho se observan las áreas de la lámina pulida en la cual se hizo el análisis, también puede observarse un cuarzo (> 2 mm) de bordes redondeados que muestra un intemperismo débilmente desarrollado.

En la matriz de los nódulos se encuentran incluidos minerales con altos contenidos de Al (92.9 % vol.), y áreas que forman estructuras como oxiargilanes compuestos de Fe con un alto contenido de Ti (47.2 % vol.) sin la presencia de Cr (Figura 29, punto 3).

Los minerales negros de aspecto vidrioso dentro de los nódulos están compuestos por hierro (85 al 91% vol.) principalmente, de Al (0.5 a 9% vol.) y Ti (6 a 7% vol.) (Figura 29, puntos 1 y 2).



Puntos	1	2	3
SiO <sub>2</sub>			30.7
TiO <sub>2</sub>	5.8	7.1	47.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.8	0.4	27.0
FeO	85.4	91.5	42.2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

Figura 29: Imagen composicional digitalizada obtenida mediante microsonda electrónica y puntos del análisis (% vol.) en un nódulo del horizonte Ah de la localidad de Cd. Pemex. 1 y 2: Minerales negros. 3: Estructura de oxiargilan. En el recuadro superior derecho se observa el área de la lámina pulida utilizando microscopio estereoscópico en la cual se hizo el análisis por microsonda electrónica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 7.5.3.2. Morfología y composición química de concreciones

Las concreciones analizadas en este estudio son de dos tipos principalmente:

i) Concreciones estables (Figura 30), son concreciones de brillo metálico de formas redondeadas muy compactas y duras, presentan una matriz de color café a café oscuro - casi negro. En su mayoría son de tamaños menores a 2 mm, aunque algunas llegan a alcanzar los 5 mm (15%). Las concreciones se encuentran adheridas y sobresalen de las paredes de los nódulos (Figuras 30<sub>(a)</sub> y 30<sub>(b)</sub>) o se encuentran de forma individual en la matriz del suelo. Estas fueron formadas en el pasado ya que su recubrimiento arcilloso, fue sometido a procesos de dilución que alisan la parte externa de la corteza y le confiere un brillo metálico (Vepraskas *et al.*, 1994; Latrille *et al.*, 2001).

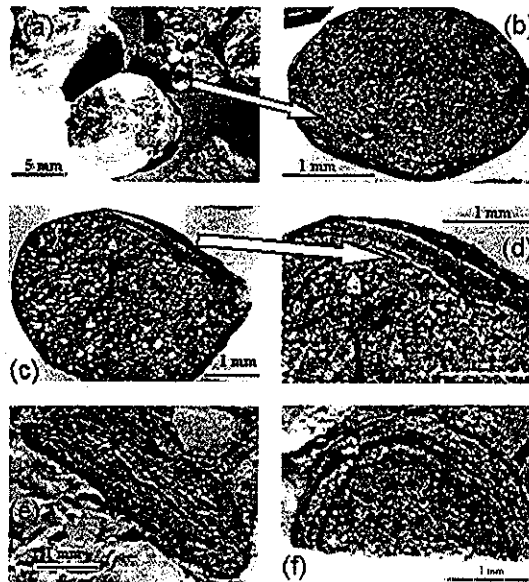


Figura 30: Microfotografías de diferentes concreciones de óxidos de Fe. (a) nódulo con una concreción en su superficie, de aspecto metálico, (b) detalle de la concreción en corte, muestra una matriz no diferenciada con zonas más oscuras en sus bordes de aspecto lustroso, (c y d) detalle del recubrimiento arcilloso de una concreción, (e) concreción laminar alargada con zonas más oscuras en sus bordes de aspecto lustroso (f) detalle de crecimientos concéntrico en concreciones.

ii) Concreciones activas (Figura 31), son concreciones que se forman al mismo tiempo que se forma el suelo, por lo que su matriz concuerda con la del suelo que le rodea. Se presentan de forma irregular con límites difusos o graduales y en ocasiones alguno de sus bordes se encuentra estabilizado por recubrimientos arcillosos; son de coloraciones rojizas o amarillentas. Algunas concreciones presentan grietas de presión (mecánicas), debido a que son estructuras blandas y fácilmente disgregables.

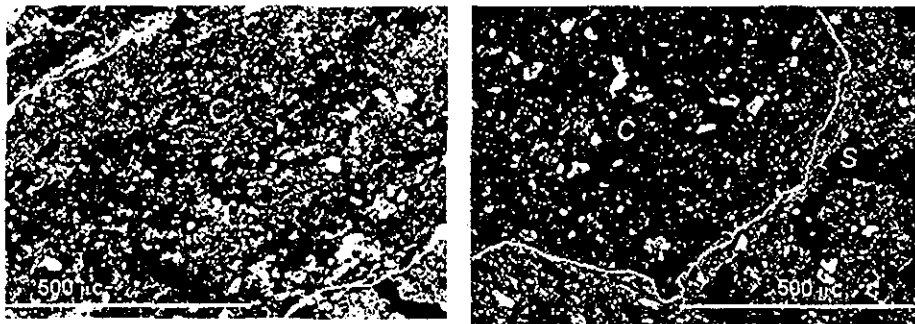


Figura 31: Fotografías de láminas delgadas utilizando microscopio petrográfico con nícoles cruzados de dos concreciones activas en la matriz del suelo del perfil de Vernet. Izquierda, Concreción en el horizonte AB de color amarillo de límites graduales. Derecha, Concreción en el horizonte Btg<sub>2</sub> de coloración roja (C = Concreción; S = Matriz del suelo).

Durante el análisis de concreciones de formas estables en láminas delgadas con el microscopio estereoscópico, se distinguieron dos morfologías internas: Típicas y Concéntricas (Fedoroff y Eswaran, 1985). Las típicas (Figuras 30<sub>(b)</sub> y 30<sub>(c)</sub>) son redondas con una matriz no diferenciada delimitada por una corteza de recubrimientos arcillosos. Las concéntricas (Figuras 30<sub>(e)</sub> y 30<sub>(f)</sub>) presentan varios crecimientos alrededor de una matriz no diferenciada, los cuarzos incluidos en la matriz son pequeños y de menor abundancia en comparación con las anteriores.

Por medio del análisis de microsonda electrónica fue posible obtener la composición elemental de la matriz de las concreciones estables en el suelo.

Las concreciones con morfologías típicas y concéntricas (Figuras 32, 33 y 34) en base a su contenido de Fe se pueden dividir en:

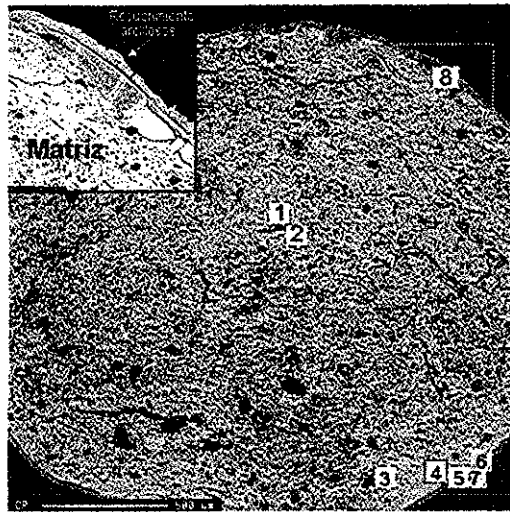
- 1) Área con contenido de Fe que varía entre 80 a 90%.
- 2) Área con contenido de Fe que varía entre 68 a 75%.

De manera similar que en nódulos, para diferenciar la concentración de Cr en una mayor o menor concentración en los nódulos se delimitaron los puntos con más de 5% vol. de Cr con líneas continuas rojas y con menos del 5% vol. con líneas punteadas rojas.



De los elementos traza, el Cr es el más abundante en las concreciones con morfologías típicas su mayor acumulación (7.3 y 9.6) se observó en zonas oscuras en sus bordes debajo de los recubrimientos arcillosos (Figura 32, puntos 4 y 8) y hacia su núcleo la concentración de Cr es menor del 5% vol. En las concreciones concéntricas (Figura 33, punto 3) la distribución del Cr es similar a las anteriores con una mayor acumulación en zonas oscuras en los bordes (7.3% vol. de Cr) y con menos del 5% vol. hacia el núcleo, seguido en abundancia por el V (0.1 a 1.4% vol.), el Zn (0.1 a 2% vol.), el Pb (0.2 a 2.3% vol.), el Ni (0.1 a 2.2% vol.) y el Cu (0.2 a 2% vol.).

Bajo microscopía electrónica los recubrimientos arcillosos de las concreciones con morfologías típicas presentan bandeos de colores claros y oscuros.

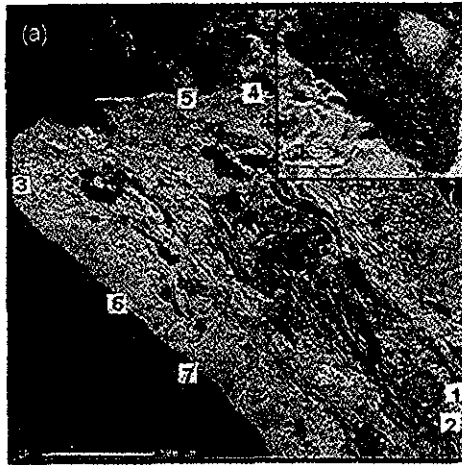


Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	4.0	1.2	1.2	0.6	3.4	9.0	8.7	1.1
TiO <sub>2</sub>	0.7	0.2		0.2	0.5	0.2		0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.6	4.4	3.4	5.6	4.2	10.1	12.6	5.9
FeO	86.2	89.9	92.4	83.0	89.0	75.8	75.9	81.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.1	1.0	1.2	7.3	1.4	0.1	0.6	9.6
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				0.2		0.3	0.2	0.1
NO	0.2	0.8	0.7	0.5		2.2	1.3	0.4
ZnO		0.3	1.2	0.6	0.8	0.9		0.1
CuO		0.9			0.7	1.4		1.5
PbO	2.3	1.3		2.0			0.7	

□ Fe > 80%    /    Fe < 80%    □ Cr 12.14%    □ Cr 7.395%

Figura 32: Imagen composicional digitalizada obtenida mediante microsonda electrónica y puntos de análisis semicuantitativo (% Vol.) encuadrados en diferentes colores que muestran su composición elemental. En la imagen se observa el revestimiento y la matriz de una concreción con morfología típica del AB de Cd. Pemex. En el recuadro superior izquierdo se observa una ampliación del punto 8 que muestra una alta concentración de Cr (9.6 % vol.).

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

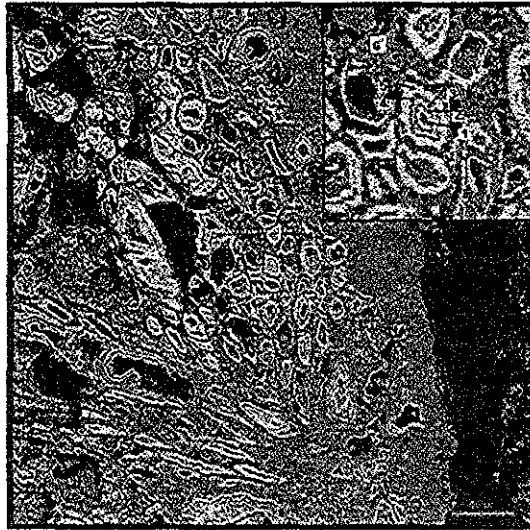


Puntos	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	1.4	0.9	1.7	2.4	1.7	24.7	45.1
TO <sub>2</sub>	0.2	0.4		0.8	0.1	1.8	0.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.3	1.7	9.7	3.3	10.6	25.6	32.7
FeO	91.3	92.3	80.0	91.7	74.0	44.4	19.7
MnO		0.7	0.6				
CaO	1.2		7.3	0.9		0.5	0.4
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.5	0.3	0.9	0.5	0.4	1.3
NO		1.1			1.6		0.2
ZnO	0.5	0.7			1.3	0.9	
CuO		1.0	0.4		0.7		
PbO		0.8			0.5	1.7	
Na <sub>2</sub> O					9.1		

Fe > 80%      Fe < 80%      AlSi      Con Pb  
 Cr 12%      Cr 73%

Figura 33a: Imagen composicional digitalizada obtenida por microsonda electrónica y puntos del análisis semicuantitativo (% vol.) encuadrados en diferentes colores que muestran la composición elemental de una concreción de tipo concéntrica alargada del horizonte AB de Cd. Pemex. En el recuadro superior derecho se observa el área en lámina pulida utilizando un microscopio estereoscópico de la cual se hizo el análisis.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

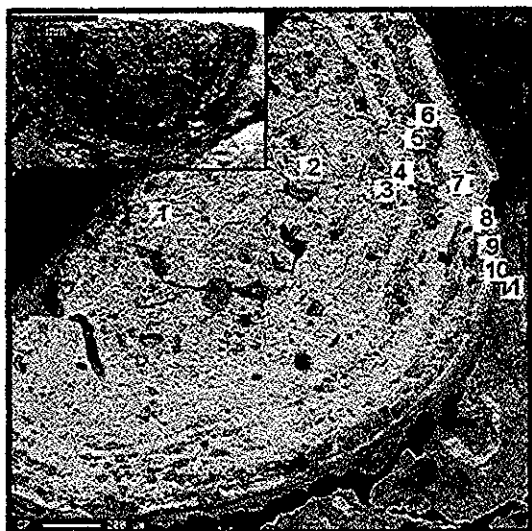


Puntos	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	1.4		1.7	0.9	1.9	0.5
TiO <sub>2</sub>					0.2	0.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5	3.1	1.5	3.7	3.5	9.9
FeO	85.7	87.6	87.4	88.1	87.0	78.2
MnO	0.3	1.4	0.8	0.2		1.0
C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	2.6	2.5	2.4	1.8	8.1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.4				0.2	0.5
NiO	0.2			0.8		
ZnO	1.7	0.9	0.1	1.1	1.6	
CuO			2.0	1.3		
Na <sub>2</sub> O			0.3	0.8		

Fe > 80%       Fe < 80%  
 Cr 18.25%       Cr 83%

Figura 33b: Detalle del punto 3 en la concreción de la Figura 33a. En el recuadro superior derecho se observan porosidades con varios recubrimientos de óxidos de Fe.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



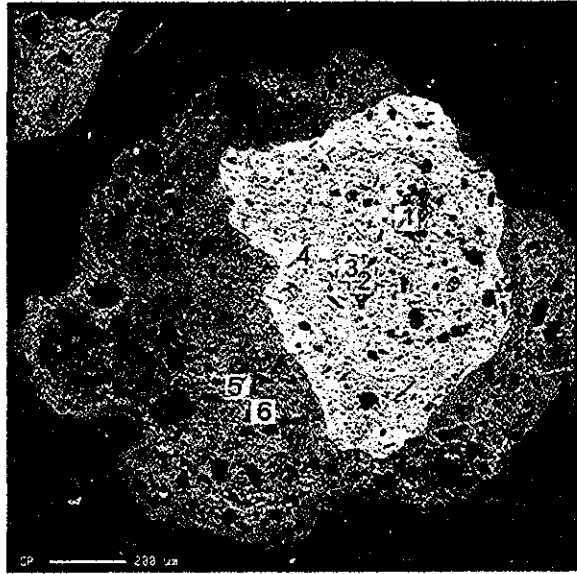
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	5.0	4.1	5.7	4.4	4.5	3.5	2.1	3.5	3.5	1.5	13.9
TiO <sub>2</sub>	0.4		0.3	0.3		0.4		0.5	0.2	1.7	1.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.1	9.2	13.7	5.9	5.7	4.9	6.0	5.9	10.9	3.4	12.3
FeO	79.6	78.6	71.7	83.5	82.0	83.1	83.0	89.9	77.2	87.6	64.8
MnO			0.3	0.1	1.4	1.0	0.4	1.0	0.9		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.7	1.8	0.7	1.8	0.5	2.8	0.1	1.8	0.9	0.7
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.6	0.6	0.9		0.4	0.7			0.9	0.2	
NiO	0.6	0.6	0.2	0.4		0.3	0.9	0.6			1.6
ZnO		1.7	1.1		1.0	0.4	0.3		1.4	1.3	
CuO	1.4			0.7	0.3	1.1	1.6		0.5	1.4	
Na <sub>2</sub> O		1.0	0.7	0.5		0.8					

Fe > 80%   
 Fe < 80%   
 Cr 1.0-2.3%

Figura 34: Imagen composicional digitalizada obtenida mediante microsonda electrónica y puntos del análisis semicuantitativo (% vol.) encuadrados en diferentes colores que muestran la composición elemental de una concreción con un núcleo bien desarrollado y una corteza bandeada compuesta principalmente de Fe.

Las concreciones activas (Figuras 35 y 36) están compuestas principalmente por Fe (64 a 86% vol.), el Al y el Si varían de 7.6 a 13.7% vol. y 6.6 a 20.5% vol., respectivamente. Además son incluidos por la matriz minerales residuales con alto contenido de Ti (ilmenita) y Zr (zirconio) (Figura 36, puntos 2 y 3, respectivamente).

De los elementos traza el Cr es el más abundante 1.0-2.4% vol. (Figuras 35 y 36), el Zn (0.1 a 1% vol.), el Pb (0.3 a 5.4% vol.), el Cu (0.3 a 1.8% vol.), el Ni (0.3 a 1.4% vol.) y el V (0.3 a 1.3% vol.).



Puntos	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	7.7	6.7	6.6	20.5	11.0	2.2
TiO <sub>2</sub>		0.1	0.1	0.1	0.1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.7	7.6	8.4	13.1	13.7	8.7
FeO	72.3	79.8	79.9	64.1	70.2	86.1
MnO	0.7		0.2	0.9		2.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4	1.5	2.4	0.4	1.0	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				0.1	1.3	0.3
NiO	0.9	1.4			1.3	
ZnO		1.0	0.1	0.2	0.6	
CuO		0.3	1.8	0.3	0.8	
PbO	5.4	1.6	0.4	0.3	0.8	0.7

Fe > 80%

Fe < 80%

Cr 10-2.4%

Figura 35: Imagen composicional digitalizada obtenida mediante microsonda electrónica y análisis puntual semicuantitativo (% vol.) encuadrados en diferentes colores que muestran la composición elemental de una concreción del horizonte Bt de la localidad de Vernet.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Puntos	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	78	12	18.5
TiO <sub>2</sub>	0.1	51.3	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.1	5.6	0.6
FeO	76.0	40.8	0.1
MnO	0.1		0.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5	0.9	0.1
NiO			0.3
ZnO		0.2	0.4
CuO	0.5		
PbO	0.8		
Zr			60.1

Alto en Ti  
Fe < 80%  
Alto en Zr  
Cr 1.5%

Figura 36: Imagen composicional digitalizada obtenida mediante microsonda electrónica y análisis puntual semicuantitativo (% vol.) encuadrados en diferentes colores que muestran la composición elemental de una concreción del horizonte Bt de la localidad de Vernet.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## 7.6. Determinaciones de Ti y Zr

El análisis de fluorescencia de rayos X muestra que la distribución de Zr total (Figura 37) en la localidad Cd. Pemex es más alto en el horizonte superficial con  $452 \text{ mg kg}^{-1}$ , disminuyendo bruscamente en el resto del perfil de  $158$  a  $211 \text{ mg kg}^{-1}$ . En comparación, en la localidad de Vernet la concentración de Zr disminuye gradualmente de  $298 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial a  $161 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte.

La distribución de Ti total (Figura 37) en la localidad de Cd. Pemex aumenta del horizonte superior ( $6500 \text{ mg kg}^{-1}$ ) al horizonte AB ( $10000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y baja a  $7000 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte. La concentración total de Ti en la localidad de Vernet es de  $5000 \text{ mg kg}^{-1}$  del horizonte superficial disminuyendo gradualmente a  $3000 \text{ mg kg}^{-1}$  en el horizonte Ctg y aumenta a  $17000 \text{ mg kg}^{-1}$  en el último horizonte (Cw).

En el último horizonte del perfil de Vernet que se colectó de un corte de camino cerca de la localidad con la idea de obtener una muestra representativa del material parental de la unidad geomorfológica, los resultados del fraccionamiento de metales pesados muestran que tiene una identidad diferente a lo que se esperaba comparado con el cuerpo del perfil y que se observa claramente con la relación Ti/Zr de  $107.3$  (Figura 37).

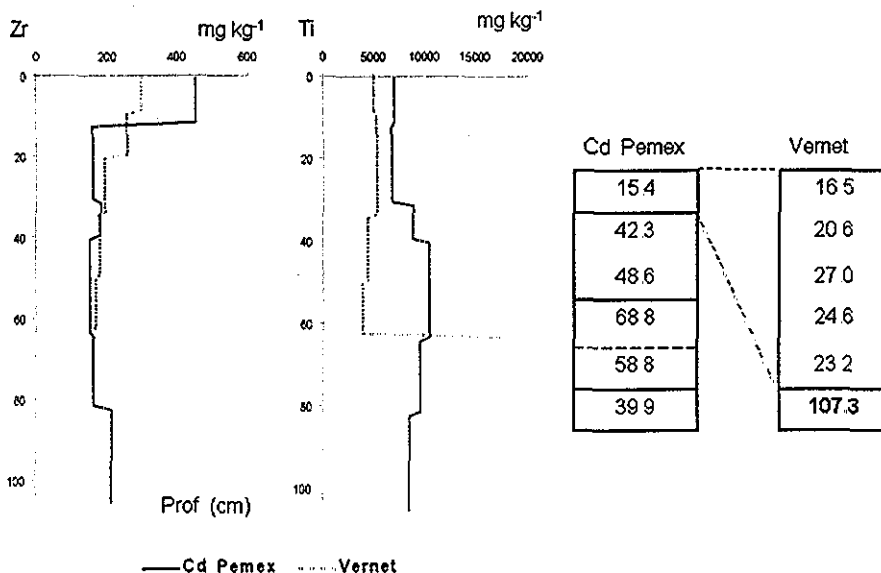


Figura 37: Patrones de distribución de Zr y Ti con la profundidad del suelo, en los perfiles Vernet y Cd. Pemex.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 7.7. Análisis de elementos totales por PIXE

Se decidió realizar el análisis elemental, para conocer las proporciones de elementos como Al, Si y Ti en la matriz del suelo, en los nódulos y en las concreciones por separado, y con la profundidad del suelo por horizonte, lo que podría ayudar a inferir procesos pedogenéticos y si hay un origen similar o bien unas formas proceden de otras.

En los nódulos la distribución Fe (Figura 38) muestra una distribución heterogénea y varía del 65 a 70% con la profundidad del perfil. La distribución de Al es menor del 1%, su mayor concentración se encuentra en el horizonte AC con 4.5%. El Si tiende a disminuir de 4.5% del horizonte superficial a 2% en el horizonte 2 AB para aumentar nuevamente a 4.5% en el horizonte Btg<sub>1</sub>. El Ti es muy heterogéneo varía de 2 a 6% con la profundidad del perfil.

En las concreciones la distribución y concentración del Fe (Figura 38) es similar a los nódulos; su distribución es heterogénea y varía del 65 a 70% con la profundidad del perfil. La distribución de Al es menor del 1%, su mayor concentración se encuentra en los horizontes AC y Btg<sub>1</sub> con 4.5%. La concentración de Si es menor en comparación con los nódulos y es más homogénea. La distribución y concentración del Ti con la profundidad del perfil es homogénea con 0.5%.

En la matriz del suelo la distribución del hierro es heterogénea, su mayor concentración se encuentra en el horizonte 2 AB con 55%. El Al tiende a aumentar de 4% del horizonte superficial a 11% en el horizonte Btg<sub>1</sub>. La distribución de Si es heterogénea y varía del 1 al 3.5%. La concentración de Ti es heterogénea y es más alta en comparación con los nódulos y las concreciones.

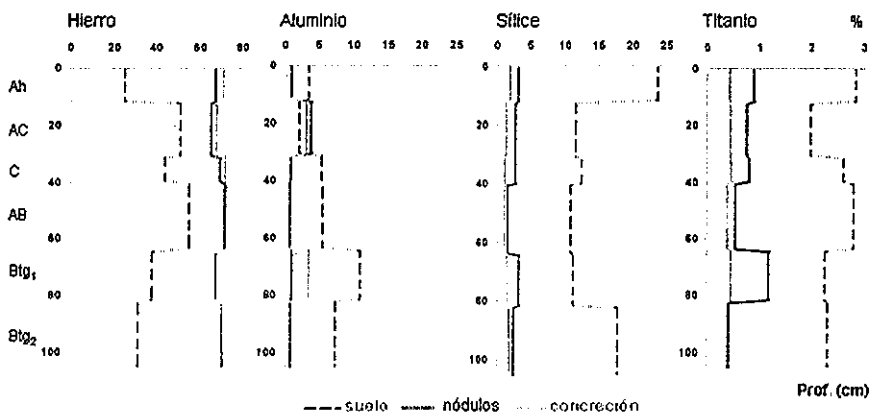


Figura 38: Patrones de distribución de Fe, Al, Si y Ti en la matriz del suelo, nódulos y concreciones con la profundidad del perfil de Cd. Pemex.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



El Cr (Figura 39) en los nódulos muestra una distribución heterogénea y varía del 0.3 a 0.7% con la profundidad del perfil. La distribución de V es menor del 2%, su mayor concentración se encuentra en el horizonte AC y Btg<sub>1</sub>. la concentración de Zn no es mayor del 3% y es heterogénea. El Cu se encuentra especialmente acumulado en el horizonte superficial con 0.5% y es heterogéneo en el resto del perfil

En las concreciones la concentración del Cr (Figura 39) es más alta en comparación con la de los nódulos y con la de la matriz del suelo y tiende a aumentar de 1% en el horizonte superficial a 1.7% del horizonte Btg<sub>1</sub>. El V tiende a aumentar de 0.1% a 0.3% del horizonte Ah al horizonte Btg<sub>1</sub>, respectivamente. El Zn no excede del 2% y su mayor concentración se observa en el horizonte AC. El Cu se incrementa paulatinamente a 5% en el horizonte Btg<sub>1</sub>.

En la matriz del suelo la distribución del Cr es heterogénea, su mayor concentración se encuentra en el horizonte 2 AB con 0.7%. La distribución del V es ligeramente homogénea y va de 0.1 a 0.2%. El Zn tiende a aumentar con la profundidad del suelo a 0.3%. El Cu su distribución es ligeramente más alta en comparación de los nódulos en el horizonte superficial y en el horizonte Btg<sub>2</sub> con 0.75%.

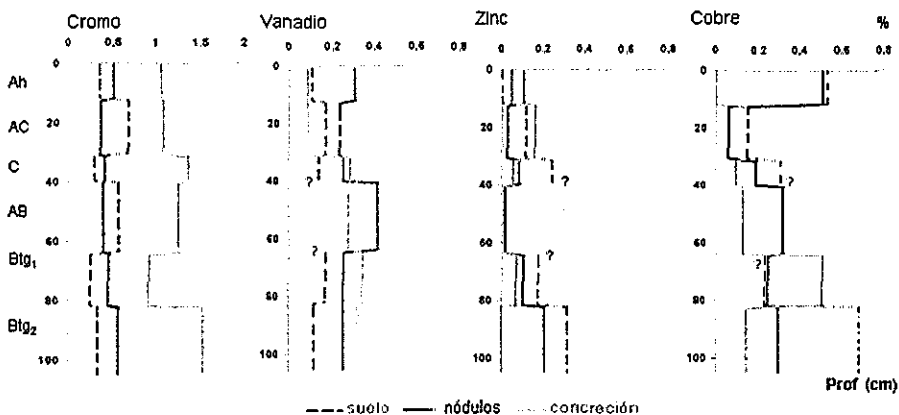


Figura 39: Patrones de distribución de Cr, V, Zn y Cu en la matriz del suelo, lateritas y concreciones con la profundidad del perfil de Cd. Pemex (? = no determinado).

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## 8. Discusión

### 8.1. Aporte de metales pesados

Debido a que los suelos se desarrollaron en superficies cumbrales de lomeríos se consideran de formación *in situ* a partir del material sedimentario. Sin embargo, durante su evolución los sedimentos marinos del Mioceno han recibido diversos aportes de materiales: sedimentarios, de origen volcánico (cenizas volcánicas) y partículas sólidas de la quema del combustible fósil

#### 8.1.1. Material parental de los suelos

En la descripción de campo del perfil de Cd. Pemex se observa que los primeros 40 cm corresponden a un estrato distinto de los siguientes 60 cm. Este estrato contiene un volumen alto de fragmentos o nódulos de tamaños mayores de 2 mm a tamaño de gravas, son de color café rojizo (10 YR3/6). En comparación, en la localidad de Vernet el material que compone al suelo es más homogéneo.

La distribución de Ti y Zr (Figura 37) en los perfiles de Cd. Pemex y de Vernet muestra que hay estratificación en el material que los compone. De acuerdo con el índice de Ti/Zr (Figura 37) en el perfil de Cd. Pemex se pueden apreciar entre 4 a 5 estratos que incluyen: i) el horizonte Ah, ii) los horizontes AC y C, iii) el horizonte AB y posiblemente el Btg<sub>1</sub>, iv) el horizonte Btg<sub>1</sub>. En comparación, el material del perfil de Vernet es homogéneo hasta los 63 cm (del horizonte Ah al Btg<sub>2</sub>). Por lo anterior la relación Ti/Zr confirma que el material que compone a los perfiles de la unidad ecogeográfica Terrazas Miocénicas se encuentra estratificado

Podría asumirse que el horizonte Ah de Cd. Pemex y del horizonte Ah al horizonte Btg<sub>2</sub> de Vernet corresponden al mismo estrato, por la relativa cercanía en sus valores de 15 a 23 de Ti/Zr (Figura 37).

La estratificación en el material que compone los perfiles es una limitación para interpretar la distribución vertical y horizontal de los metales pesados y sobre todo, para deducir su posible origen.

El análisis micromorfológico de los nódulos encontrados en ambos perfiles da indicios para asumir un transporte fluvial. Además se observan formaciones de ferriargilanes quebrados, lo que indica que son formas inactivas de óxidos de hierro secundarios. Las coloraciones de 2.5 YR de la matriz muestran relictos de hematita (Vepraskas *et al* , 1994).

La acumulación de óxidos de Fe en nódulos es característica de procesos reductomórficos. Bajo el microscopio óptico su matriz es heterogénea debido a

las diferentes proporciones de óxidos de Fe que son evidentes por las diferentes áreas de coloraciones rojizas que se observan bajo microscopio óptico y por la presencia en su matriz de cuarzos y ferriargilanes diferentes a la matriz del suelo. Los análisis de difracción de rayos X (Cuadro 9) muestran la congregación de hematita (41-29%), goetita (9-32%), caolinita (9-5%) y cuarzo (18-8%).

Los minerales individuales negros que se encuentran incluidos en la matriz de los nódulos están conformados principalmente de óxidos secundarios de Fe que por su proporción (80 a 90%) (Figura 29, puntos 1 y 2) sugieren su formación del intemperismo a través del tiempo de espinelas de óxidos de Fe (magnetita o titanomagnetita) (Anthony *et al.*, 1997).

Los análisis por microsonda indican que la matriz de los nódulos está compuesta en un 70 a 90% de óxidos de Fe y de 10 a 30% de silicio y aluminio, estas proporciones son características de cuerpos lateríticos (Schellmann, 1981; Ambrosi *et al.*, 1986; Muller y Bocquier, 1986). Las diferencias en la proporción de Al en las lateritas reflejan diferentes procesos de acumulación de oxihidróxidos de hierro que dependen de las condiciones de pH y Eh (Beauvais, 1999).

Por lo anterior, se deduce que los fragmentos o nódulos son lateritas, cuyo origen no se debe a procesos de pedogénesis *in situ*; más bien se trata de un material transportado y depositado en condiciones de un relieve distinto al actual (Targulian, 2001).

Las lateritas pertenecen probablemente a capas petroplínticas de suelos preexistentes en otra posición en el relieve, formadas durante un largo periodo de estabilidad en pendientes relativamente planas sobre lo que fuera una antigua terraza alta preexistente, disectada por procesos de fallamientos ocurridos durante el Mioceno (Ortiz, 2002). Las poliestructuras son producto de una compleja historia de formación debido a las variaciones en las condiciones ambientales, de su posición dentro del suelo y de diferentes microambientes (Schellmann, 1981; Braucher *et al.*, 1998).

Los resultados de los análisis puntuales con microsonda y PIXE en las lateritas de la localidad de Cd. Pemex muestran que las lateritas contribuyen en la concentración de Cr principalmente en la solución del suelo, producto del intemperismo y disolución de las mismas, para su posterior acumulación residual por óxidos de Fe en las concreciones.

## 8 1 2. Actividad volcánica

Las fracciones de arenas finas y limos gruesos y medios que se encuentran acumuladas principalmente en los horizontes superficiales (Ah) de ambos perfiles, es un primer indicio de que éstos fueron depósitos de caída por vía aérea (Figura 9). Los contenidos de estas fracciones son más altos en los horizontes superficiales de Cd. Pemex comparados con los de Vernet; ésto se debe a que en la localidad de Vernet hay una mayor dilución de minerales volcánicos por el pH más ácido y una mayor retención de humedad por su mejor estructura comparada con la localidad de Cd. Pemex. Sin embargo, se observaron minerales frescos, poco intemperizados de horblendas, piroxenos y vidrios volcánicos en las fracciones de arenas finas de los horizontes superficiales (Ah) en ambos perfiles que se deben al aporte volcánico reciente del volcán El Chichón (1982).

El Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn se han reportado como constituyentes elementales de piroclastos del volcán "El Chichón" (Cuadro 2). Por lo que la concentración en el suelo de estos elementos puede estar aumentada por los aportes volcánicos vía aérea y, como se hipotetiza, con mayor influencia en la localidad de Vernet que en la localidad de Cd. Pemex por su proximidad a la fuente geogénea. Los metales pesados están contenidos dentro de la estructura de vidrios volcánicos, que son relativamente fáciles de intemperizar. Los metales se pueden encontrar inicialmente concentrados en los horizontes superficiales del suelo y con el tiempo su distribución se somete a procesos pedogenéticos.

La extracción de metales totales del perfil de Vernet muestra que el V, Cu y el Zn (Figuras 15, 19 y 21) se encuentran concentrados en los horizontes superficiales (Ah) por aporte vía atmosférica. En Cd. Pemex, aunque en menor concentración en comparación de la localidad de Vernet, se observa (por medio del análisis de PIXE) una mayor concentración de Cu en la matriz del suelo del horizonte superficial del perfil (Figura 39).

Los resultados del fraccionamiento de Cr, Ni, Cu, Zn y Pb (Figuras 14, 18, 20, 22 y 24) muestran que estos metales están en formas relativamente móviles en el perfil de Vernet comparados con la localidad de Cd. Pemex, lo que permite deducir una mayor disolución de los minerales volcánicos por intemperismo.

De lo anterior se concluye que hay aporte de metales pesados por el material volcánico y que en particular influye en la concentración total de Cu, Zn y V en la localidad de Vernet y en una mayor concentración de formas relativamente móviles de Cu, Zn y Ni en comparación con la localidad de Cd. Pemex.

### 8.1.3. Actividad petrolera

Se deduce que el CPG no influye en la concentración y disponibilidad de los metales pesados en los suelos, o por lo menos, su aporte es insignificativo en comparación con el aporte sedimentario y volcánico. Esto fue debido a que no se observó una mayor concentración de metales pesados totales cerca del CPG Cd. Pemex respecto a Vernet. Tampoco se observó un incremento de formas relativamente disponibles cerca del CPG Cd. Pemex, en comparación de Vernet, lo cual se esperaba en caso de tratarse de aportes antropogéneos.

## 8.2. Procesos pedogenéticos

### 8.2.1. Neoformación de óxidos de Fe

Los óxidos de Fe secundarios son producto de procesos pedogenéticos, se forman por oxidación o por hidrólisis de minerales primarios. Primero se forman minerales amorfos que evolucionan a través del tiempo a formas más ordenadas o cristalinas. La relación entre los óxidos amorfos y cristalinos depende del tiempo de evolución y de las condiciones prevaletientes en el suelo, como el potencial redox, y puede por lo tanto, dar información sobre la génesis de los suelos (Schlichting y Blume, 1966).

Los coeficientes de  $Fe_o/Fe_d$  y  $Fe_o/Fe_t$  (Cuadro 7) pueden ser usados como índices geoquímicos. El índice  $Fe_o/Fe_t$  se relaciona con el grado de intemperismo de Fe contenido en minerales primarios y el índice  $Fe_o/Fe_d$  es relacionado al grado de cristalinidad en los óxidos de Fe (Malucelli *et al*, 1999).

Las relaciones de  $Fe_o/Fe_d$  (Cuadro 7) en la localidad de Cd. Pemex de 0.09 en la parte superficial del perfil a 0.02 del horizonte BC y en la localidad de Vernet de 0.41 a 0.09, indican que en ambos perfiles la neoformación de óxidos ha tenido tiempo para evolucionar a formas cristalinas que aumentan con la profundidad. Por otro lado, el perfil de Cd. Pemex está más desarrollado en comparación con el perfil de Vernet.

La relación de  $Fe_o/Fe_t$  es muy cercana a 1 en los horizontes subsuperficiales en ambas localidades con 0.98 en Cd. Pemex en los horizontes Bg y BC y en la localidad de Vernet de 0.95 y 0.96 en los horizontes Btg y Ctg (Cuadro 7), lo que indica que casi la totalidad del Fe está contenido en minerales secundarios.

La distribución de óxidos amorfos, en ambas localidades aumenta hacia la superficie del suelo, lo que se ha reportado como natural en los suelos, debido a que la acidez de la materia orgánica impide su evolución hacia formas cristalinas (Figura 11).

## 8.2.2. Neoformación de arcillas

En zonas tropicales, la fracción de arcillas es un componente relativamente inestable cuya alteración se encuentra en relación con el clima (Duchaufour, 1984), donde los procesos de hidratación e hidrólisis han propiciado la transformación de minerales *in situ* como es la neoformación de arcillas. Generalmente se considera que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es sostenida principalmente por la fracción de arcillas y la materia orgánica. En este caso la contribución de arcillas caolinitas hacia la CIC en ambas localidades es muy pobre con menos 24 cmol kg<sup>-1</sup> de arcilla. Comparadas con otras arcillas minerales, la caolinita tiene una baja CIC y una baja área de superficie específica total, por lo que pueden ocurrir relativamente pocas sustituciones isomórficas (Alloway, 1990).

Los análisis de difracción de rayos X en lateritas (Cuadro 9) muestran del 5 al 10% de caolinita, debido a que a través del tiempo han tenido un progresivo remplazamiento de caolinita por óxidos de Fe

## 8.2.3. Óxido - reducción

En el perfil de Cd. Pemex a partir del horizonte AB se observa un moteado de color naranja amarillento opaco a brillante (10 YR 6/4-6/6) que contrasta con la matriz amarillo rojiza (10 YR6/6) del suelo y aumenta de 50% a 75 % en el siguiente horizonte; en Vernet se observan moteados de 10 a 30% de color café rojizo en todo el perfil. Cuando están presentes en el perfil moteados rojizos asociados a zonas de colores más claros (amarillos, grises y hasta azules) se relacionan a procesos de óxido-reducción. El Fe soluble originado en los horizontes superiores o en caras de agregados, se concentra y precipita en los horizontes inferiores o en la parte central de los agregados desarrollando un horizonte moteado (Ambrosi *et al.*, 1986). En el último horizonte del perfil de Vernet los procesos de óxido-reducción se observan en los agregados; por los colores que presentan hay oxidación dentro de los agregados y reducción en sus paredes por los colores gris verdoso (2.5y 6/4) ésto se relaciona a propiedades de pseudogleyización.

La relación entre la movilización de Fe y los metales pesados como el Cr, V y Pb son muy similares en la localidad de Cd. Pemex (Figuras 13, 15 y 23), su concentración y distribución se deben a la acumulación de los elementos en forma residual por óxidos de Fe, el horizonte superficial presenta una menor acumulación que el horizonte AC donde los metales se acumulan debido a la relativa impermeabilidad del horizonte C, de la misma forma se observan acumulados en el horizonte Btg<sub>2</sub>. La concentración de Pb está por debajo de lo reportado como normal para suelos de textura fina (Cuadro 3). McKenzie (1980) reporta una mayor afinidad del Pb con la superficie de hematita que para goetita.

## - Concreciones

Las concreciones estables en la matriz del suelo (Figuras 32 a la 34) son estructuras homogéneas en su composición elemental comparadas con las lateritas, y son también relativamente jóvenes (por su tamaño) (Targulian, 2001). Su formación es *in situ* debido a procesos pedogenéticos. Palumbo *et al.* (2001) sugieren su formación *in situ* por impregnación y cementación de la matriz del suelo por oxihidróxidos.

En la matriz de las concreciones típicas (Figura 32) el Fe es el componente dominante (80 a 90%) y el contenido de Al y Si es bajo como consecuencia de la disolución de aluminosilicatos y la precipitación de óxidos de Fe en solución.

La alta proporción de Fe en la matriz de las concreciones indica la relativa temporalidad de unas con respecto a otras. Los procesos de disolución de aluminosilicatos y su sustitución por óxidos de Fe son procesos secuenciales y se presentan de las partes superficiales de las concreciones hacia sus núcleos, resultando en una alta concentración de Fe y la disminución de aluminosilicatos (Ambrosi *et al.*, 1986; Muller y Bocquier, 1986).

Por lo anterior, observando la distribución del Fe en los cuerpos de las concreciones, podría inferirse que las concreciones típicas (Figura 32) y las concreciones concéntricas (como en la Figuras 33) cuyo núcleo está constituido de óxidos de Fe de más del 80% vol., son relativamente más antiguas en comparación con las concreciones de la Figura 34, puntos 1, 2 y 3, cuyo núcleo se compone principalmente de óxidos de Fe asociados con arcillas (Fe de 70 a 80% vol., Si de 0.5 a 2% vol. y Al de 9-14% vol.).

Dependiendo del pH y del contenido de Cr y Fe en la solución del suelo, las especies de Cr y Fe varían ocasionando la precipitación de hidróxidos formando bandeos de color café claro y oscuro en la corteza de las concreciones (Figura 30<sub>(d)</sub>) (Weng *et al.*, 1994).

Los recubrimientos que forman la corteza de las concreciones concéntricas como en la Figura 34 de acuerdo con Mongelli y Acquafredda (1999) están controlados por las fluctuaciones de las láminas de agua intraperfil por periodos de anegación después de eventos de precipitación, seguidos por un intenso drenado y evaporación, condicionados por el clima tropical.

En las concreciones en desarrollo o activas dentro de la matriz del suelo (Figuras 35 y 36) el contenido de Fe es inferior del 80 % con contenidos de Al y Si en similares proporciones; ésto muestra que hay un mayor contenido de arcillas caolíníticas. Las concreciones activas en su crecimiento incluyen minerales residuales, presentes en el suelo. Los elementos en su matriz (Cr, V, Ni, Zn, Pb y Cu) son adquiridos por adsorción de las superficies de los

minerales secundarios, después de que son liberados por el intemperismo de lateritas y de la matriz del suelo.

#### 8.2.4. Acumulación en materia orgánica

Los horizontes superficiales son afectados por acumulación de materia orgánica con  $590 \text{ kg m}^{-3}$  en Cd. Pemex y  $270 \text{ kg m}^{-3}$  en la localidad de Vernet (Cuadro 5). Parte de ella es rápidamente mineralizada durante los meses lluviosos (junio a octubre) a polímeros de bajo peso molecular (ácidos fúlvicos), los cuales bajo condiciones de saturación propician la disminución del pH que disuelve minerales volcánicos fácilmente intemperizables, el Fe de la cara externa de los agregados y reduce el tamaño de las concreciones movilizándolo los óxidos y sus metales pesados asociados.

Los resultados del fraccionamiento en la localidad de Vernet muestran que el Cu y el Pb (Figuras 20 y 24) se encuentran asociados principalmente a la materia orgánica. El Cu es mayormente retenido en el suelo por mecanismos de intercambio y adsorción específica, sin embargo, por su naturaleza catiónica tiene una alta afinidad para ligandos orgánicos solubles y compuestos húmicos (Tessier *et al.*, 1979; Evans, 1989; Bohn, 1993; Balasoiu *et al.*, 2001).

De acuerdo con Evans (1989) el Cr es uno de los metales que son más fuertemente retenidos por la materia orgánica:

A pH de 4.7  $\text{Hg} = \text{Fe} = \text{Pb} = \text{Al} = \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Ni} = \text{Zn} > \text{Co} > \text{Mn}$

A pH de 5.8  $\text{Hg} = \text{Fe} = \text{Pb} = \text{Al} = \text{Cr} = \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Mn}$ .

Balasoiu *et al.* (2001) muestran como la retención de Cr aumenta de suelos minerales a suelos orgánicos. La adsorción de Cr(III) en ácidos húmicos lo hace insoluble, inmóvil e inreactivo, este proceso es más efectivo en rangos de pH de 2.7 a 4.5 (James, 1996). Con base en lo anterior, se esperaba que de haber influencia de emisiones aéreas ya sea por el CPG Cd. Pemex o por parte de la actividad del volcán El Chichón, que el Cr aportado se encontraría retenido en los horizontes superficiales asociado a la fracción orgánica. Por lo que se concluye que el Cr se encuentra principalmente de forma geogénea asociado a la fracción residual.

Sin embargo, ligandos móviles en suelos como ácido cítrico, ácido gálico, ácido acético, DTPA y ácidos fúlvicos forman complejos que pueden oxidar y movilizar de Cr(III) a Cr(VI) (James y Bartlett, 1983a; James y Bartlett, 1983b; Kotas y Stasicka, 2000). Una considerable cantidad de Cr(III) puede ser removida a los subhorizontes donde los ácidos fúlvicos predominan sobre los ácidos húmicos (Bartlett y Kimble, 1976a).



### 8.2.5 Iluviación de arcillas

El proceso de iluviación de arcillas se muestra en revestimientos (argilanes) sobre las caras de los agregados. En Cd Pemex la distribución de arcillas aumenta hacia horizontes inferiores y en Vernet se acumulan principalmente en los horizontes Bt.

Los resultados del fraccionamiento muestran que en Cd. Pemex el Ni (Figura 18) es poco móvil y se encuentra principalmente asociado a la fracción residual (81 al 95%). Su distribución se relaciona con la distribución de arcillas. Los análisis de correlación en la localidad de Cd. Pemex (Anexo 10a) relacionan el Ni total con las arcillas (0.90 y 0.89) y con los óxidos amorfos de Al (0.96 y 0.96). El Ni es comúnmente ocluido en óxidos cristalinos o forma parte de la estructura de los silicatos durante el intemperismo del suelo (Hickey y Kittrick, 1984).

### 8.2.6. Lixiviación de bases y ácido silícico

El porcentaje de saturación de bases en el complejo de intercambio es menor del 50%. Por lo que los suelos se clasificaron de tipo Acrisol. Procesos de lixiviación propician el lavado de bases y  $\text{HSiO}_2$  y con ello la disminución del pH. Debido a la influencia volcánica la reacción del suelo disminuye con la profundidad de 3.46 a 4.86 en KCl. Los suelos se clasifican de muy fuertemente ácidos a fuertemente ácidos (Siebe *et al.*, 1996). El valor más bajo del pH sugiere la presencia de Al(III) intercambiable que es común en suelos minerales fuertemente ácidos (Cuadro 5) (Duchaufour, 1984).

El contenido de cationes intercambiables en la localidad de Cd. Pemex (Cuadro 6) muestra dos decrementos en sus concentraciones: el primero en los primeros 40 cm y el otro en los siguientes 60 cm, lo que infiere lixiviación de bases de los primeros estratos y su adsorción en los horizontes inferiores en las superficies específicas de las arcillas. En la localidad de Vernet, la disminución de bases es de acuerdo con el aumento de cationes ácidos.

## 8.3. Origen de Cr.

En una área (suelo) determinada, las especies de Cr(VI) y Cr(III) pueden ocurrir simultáneamente y de forma natural y antropogénea.

La distribución del Cr en las diferentes fracciones del suelo depende de la composición mineralógica y del pH del suelo. Bajo condiciones ácidas, la superficie de los minerales secundarios presentan cargas positivas (pH<sub>zpc</sub> de 6.8 para Cr(III) en el suelo). En suelos ácidos los iones  $\text{HCrO}_4^{2-}$  comienzan a dominar, son las formas más móviles de Cr en el suelo (Weng *et al.*, 1994; Kotas y Stasicka, 2000). El  $\text{CrO}_4^{2-}$  puede ser adsorbido por goetita  $\text{FeO}(\text{OH})$ ,

por óxidos de Al y otros sustratos de carga superficial positiva. Similarmente, el Cr(III) puede ligarse a sólidos que tienen cargas negativas (silicatos y ligandos orgánicos) (Kimbrough *et al.*, 1999).

El Cr(VI) puede ser rápidamente reducido por el Fe(II) y la materia orgánica bajo condiciones ácidas. Sin embargo, la adsorción de Cr(VI) a óxidos de Fe y Al y en complejos orgánicos presentes en suelos ácidos pueden protegerlo contra la reducción; mientras mayor acidez mayor será la adsorción de Cr (VI) (Kimbrough *et al.*, 1999).

La similitud en la distribución de Cr y V con la profundidad del suelo (Figuras 13 y 15) sugiere:

- Que ambos provienen de la misma fuente.
- Que tienen un comportamiento aniónico similar.

Bartlett y Kimble (1976b) reportan que el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y el  $\text{HCrO}_4^-$  compiten por los mismos sitios de adsorción. Strauss *et al.*, 1997 y Lang, 2000 comprueban que la difusión de iones (fosfato y molibdato, respectivamente) dentro de las superficies de óxidos de Fe es la responsable de su fijación en el suelo. Por lo que se propone un comportamiento similar del Cr en forma de anión.

La mayor acumulación de Cr se encuentra en las concreciones estables (Figura 39). La distribución de Cr en la matriz de las concreciones de formas típicas y laminares es heterogénea, comprende del 1 a 5% en su matriz y su concentración es más alta del 5% en los límites de la matriz (Figuras 32, 33). Este gradiente de concentración de Cr es consistente con la idea de que hay adsorción de Cr en la superficie de las concreciones de hierro seguido por una penetración difusa controlada por el tamaño de poro (Hansen y Lechie, 1998) (Figura 37b).

Se ha reportado un enriquecimiento de Cr en suelos ubicados entre la frontera de Guatemala y la parte alta central del estado de Chiapas y la presencia en la matriz del suelo de estructuras nodulares de Mn, el origen de ambos es atribuido a condiciones marinas (Castellanos-Trujillo, 1982; Castellanos-Trujillo, 1986). El Cr(VI) pero no el Cr(III) puede lixiviar fuera del suelo y entrar al manto freático. Por lo que se hipotetiza que la presencia de óxidos de Mn en condiciones propicias produjo la oxidación del Cr, debido a que sirven como aceptores de electrones en reacciones de oxidación (Bartlett y James, 1976), pudiendo entonces el Cr ser adquirido por afluentes que pasan por las zonas enriquecidas y que probablemente influenciaron la zona de estudio a su paso hacia la planicie aluvial cuando existía una morfología diferente a la actual. La influencia hacia las terrazas quedó interrumpida en el Mioceno por sistemas de fallamientos de anticlinales que aislaron a la unidad ecogeográfica. No se descarta la movilización del Cr en sedimentos por las corrientes fluviales como resultado de la disgregación del suelo y rocas en las partes altas de la cuenca.

## 9. Conclusiones

En relación con las tres hipótesis planteadas en el marco de este trabajo, relacionadas con el origen del Cr en los suelos de Cd Pemex y de Vernet, se concluye lo siguiente:

- Las emisiones del CPG Cd Pemex no influyen en la concentración y disponibilidad del Cr, Ni y V en los suelos, debido a que no se observó una mayor concentración de los contenidos totales en el suelo inmediato al CPG en comparación con el suelo distante (Vernet). Tampoco se observó un incremento en las fracciones relativamente más disponibles. La distribución de estos metales en el perfil no indica mayores contenidos en el horizonte superficial, ni una asociación con la materia orgánica.
- Se encontró un aporte de metales pesados por la actividad volcánica (volcán el Chichón), el cual se ve reflejado principalmente en la localidad de Vernet que es la más cercana al volcán. Los aportes volcánicos influyen principalmente en la concentración total de Cu, Zn y V y en el incremento de formas relativamente más móviles de Cu, Zn, Ni, en el horizonte superficial
- En relación con la hipótesis de que los contenidos de metales pesados en estos suelos hayan sido heredados del material parental, se concluye lo siguiente:
  - Los suelos se desarrollaron *in situ* a partir del material sedimentario, pero en su evolución recibieron aportes de materiales fluviales transportados a distancias cortas.
  - La estratificación del material de ambos perfiles es una limitante para relacionar la distribución vertical y horizontal de los metales pesados con procesos pedogenéticos.
  - Los sedimentos de origen fluvial depositados en la superficie de ambos suelos contienen una gran cantidad de nódulos.
  - Con base en la fábrica interna de los nódulos se concluye que son materiales lateríticos transportados de suelos preexistentes (pedorelictos) en otra posición en el relieve (antigua terraza alta).
  - Los análisis de extracción secuencial muestran que el Cr, Ni y V son poco móviles y se encuentran principalmente asociados a las fracciones residuales y de óxidos de Fe cristalinos. Por lo tanto su movilidad y la disponibilidad son muy bajas.
  - La concentración de Cr en la matriz de las lateritas es relativamente baja comparada con la de las concreciones, por lo que se concluye que no son la fuente única para las concentraciones elevadas de este metal en los suelos estudiados.
  - Los análisis semicuantitativos con microsonda permitieron identificar que las concentraciones más altas de Cr se encuentran en pequeñas concreciones de origen pedogenético ubicadas mayoritariamente en las superficies de los fragmentos lateríticos.

- La concentración del Cr en concreciones se atribuye a procesos pedogenéticos de óxido-reducción in situ que ocurren tanto actualmente como también en el pasado dentro de las formaciones lateríticas.
- La similitud en la distribución de Cr y V con la profundidad del suelo sugieren que ambos tienen el mismo origen.
- Se plantea que la alta concentración de Cr en los suelos estudiados podría estar relacionada con el aporte de afluentes provenientes de zonas ricas de Cr en la sierra de Chiapas cuando aun había contacto entre la sierra y las terrazas y que pudieron influenciar la zona de estudio a su paso hacia la planicie aluvial.

## 10. Literatura citada

- Alloway, B. J., 1990 Heavy metals in soils Blackie. Academic & Professional. Glasgow.
- Ambrosi, P. J., Nahon D. and A. J. Herbillon, 1986. The epigenetic replacement of kaolinite by hematite in laterite – petrography evidence and the mechanisms involved. *Geoderma*. 37: 283-294 pp.
- Anthony, W. J., Bideaux, A. R., Bladh, W. K. and M. C., Nichols, 1997. Handbook of Mineralogy. Vol III. Halides, hydroxides, oxides. Mineral data publishing. Tucson Arizona
- Balasoïu, F. C., Zagury, J. G. and L. Deschênes, 2001. Partitioning and speciation of chromium, copper, and arsenic in CCA-contaminated soils: influence of soil composition. *The Sci. of the Total Environment* 280 (2001): 239-255 pp.
- Barceló, J. y P. Charlotte, 1989. Estrés vegetal inducido por metales pesados. *Investigación y Ciencia*. No 154. Prensa científica. Calabria, Barcelona, España: 54-63 pp
- Bartlett, J. R. and B. James, 1976. Behavior of chromium in soil: III. Oxidation. *J. Environ. Qual.*, Vol. 8, No 1.: 31-35 pp.
- Bartlett, J. R. and J. M. Kimble, 1976a. Behavior of chromium in soil: I. Trivalent form, *J. Environ. Qual.* 5, 379-382 pp.
- Bartlett, J. R. and J. M. Kimble, 1976b. Behavior of chromium in soil: II. Hexavalent form, *J. Environ. Qual.* 5, 386 p.
- Beauvais, A., 1999. Geochemical balance of laterization processes and climatic signatures in weathering profiles overlain by ferricretes in Central Africa, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 63, No 23/24: 3939-3957 pp.
- Benavides, L., 1956. Notas sobre la geología petrolera de México. En: Guzmán, E. (Ed.): Symposium sobre yacimientos de petróleo y gas. Tomo III: América del Norte. Pp 351-562. XX Congreso Geológico Internacional. Edit. Stylo.
- Bohn, H. L., B. L. McNeal y G. A. O'Connor, 1993. Química del suelo, Limusa, México.: 370 p.
- Botello, A. V., 1996. Características, composición y propiedades fisicoquímicas del petróleo. En: A.V. Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez y D. Zárate-Lomelí (Eds.) Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias, 203-210 pp. EPOMEX Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche, México, 666p.

Bravo-Álvarez, H y R Torres-Jardón, 1996 Características fisicoquímicas y fuentes de contaminantes atmosféricos. En: A V. Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez y D. Zárate-Lomelí (Eds.) Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias, 203-210 pp. EPOMEX Serie Científica 5 Universidad Autónoma de Campeche, México, 666 p.

Brady, N.C. and R. Weill, 1996. The nature and properties of soils, Prentice Hall International Editions.

Braucher, R., Colin F., Brown T. E., Bourlès L. D., Bamba O., Raisbeck M. G., Yiou F. and J. M. Koud, 1998. African laterite dynamics using in situ-produced  $^{10}\text{Be}$ , *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 62, No 9: 1501-1507 pp.

Bruemmer, G. W., Gerth, J., and U. Herms, 1986. Heavy metals species, mobility and availability in soils, *Z Pflanzenernaehr. Bodenk.* 149: 382-398 pp

Castellanos-Trujillo, L., 1982. El origen marino de las anomalías por cromo en el estado de Chiapas, México, *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 9 (1): 45-54 pp.

Castellanos-Trujillo, L., 1986. La costa de cromo en los estados de Tabasco y Campeche, México, *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 13 (1): 79-90 pp.

Centro regional Tropical Puyacatengo, 1979. CRTP, Teapa, Tabasco.

Charlet, L. and Manceau A., 1992. X-ray absorption spectroscopic study of the sorption of Cr(III) at the oxide/water interface. II Adsorption, coprecipitation and surface precipitation on ferric hydrous oxides. *J. Coll Interf. Sci.* 148: 25-442 pp.

Childs, C. W. and D. M. Leslie, 1977. Interelement relationship in iron-manganese concretions from a catenary sequence of yellow-grey earth soils in loess, *Soil science*, Vol. 123, No. 6: 369-376 pp.

Cottenie, R. A., Camerlynck, M. and A. Dhaese, 1979. Fractionation and determination of trace elements in plants, soils and sediments, *Pure o Appl. Chem*, 52.: 45-53 pp.

Departamento de Suelos, 1984. Los suelos de Tabasco (Primera aproximación). Rama de agronomía; Colegio Superior de Agricultura. H Cárdenas Tabasco, México.

Duchaufour, P. H., 1984, *Edafogénesis y clasificación 1*. Masson. Barcelona.

Enciso de la Vega, S., 1963. Estudio mineralógico y petrográfico de algunos domos salinos del Istmo de Tehuantepec. *Boletín No 65*. Instituto de Geología, UNAM

Etchevers B. J. D., Espinoza G. y E. Riquelme, 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes, segunda edición, Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía Chillan, Chile.

Espíndola, M. J., Macías, L. J., Tilling, I. R. And M. F. Sheridan, 2000. Volcanic history of El Chichón Volcano (Chiapas, Mexico) during the Holocene, and its impact on human activity, *Bull Volcanol* (2000) 62: 90-104 pp.

Evans, L. J., 1989. Chemistry of metal retention by soils. *Environ. Sci. Technol.*, 23, 9, 1046 – 1056 pp.

Fedoroff, N. And H. Eswaran, 1985. Micromorphology of Ultisols, *Soil Micromorphology and soil Classification*, Soil Science Society of America: 145-164 pp.

Fiedler y Roessler, 1988 (eds). *Spurenelemente in der Umwelt*. Enke-Verlag, Stuttgart.

Fujikawa, Y., Fukui M. and Kudo, 2000. Vertical distributions of trace metals in natural soil horizons from Japan Part 1. Effect of soil types, *Water, Air, and Soil Pollution* 124: 1-21 pp.

García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Gutiérrez-Gil, R., 1950. Yacimientos petroleros en la región de Macuspana, Tabasco, *Bol. AMGP*, Vol. 11, No. 8, 499-510 pp.

Guzmán-Vega, M. A. And M. R. Mello, 1999. Origin of oil in the Sureste basin, México, *AAPG Bulletin*, V 83, No.7 (July): 1068-1095 pp.

Hansen, M. A. and J. O. Lechie, 1998. Time Dependent adsorption in near coastal marine sediments: a two-step model, *Advances in Water Resources* 21 (1998): 523-531 pp.

Hickey, M. G. y J.A. Kittrick, 1984. Chemical partitioning of cadmium, copper, nickel and zinc in soils and sediments containing high levels of heavy metals. *J Environ. Qual.*, 13(3), 373 – 376 pp.

Hill, G. I., Worden H. R. and I. G. Meighan, 2000. Geochemical evolution of a palaeolaterite: the Interbasaltic Formation, Northern Ireland, *Chemical Geology* 166.: 65-84 pp.

INEGI, 1999. Cuaderno estadístico municipal Macuspana Tabasco. México: 151 p.

- James, B. R., 1996. The challenge of remediating chromium-contaminated soil, *Environ, Sci Technol*, 30, 248-251 pp
- James, B. R. and J. R. Bartlett, 1983a. Behavior of chromium in soil: VI. Interactions between oxidation-reduction and organic complexation, *J Environ. Qual.* 12, 173-176 pp
- James, B. R. and J. R. Bartlett, 1983b. Behavior of chromium in soil: V. Fate of organically complexed Cr(III) added to soil, *J. Environ. Qual.* 12, 169-173 pp.
- JCPDS, 1983. Mineral powder diffraction file, Group Data Book, International Center for Diffraction Data, Swarthmore, PA.
- Jeffery, P.G. and D. Hutchison, 1986. Chemical methods of rock analysis (3<sup>rd</sup> ed), Pergamon Press, England, 379 p.
- Kimbrough, E. D., Cohen, Y., Winer, M. A., Creelman, L. and C. Mabuni, 1999. A Critical Assessment of chromium in the environment, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29 (1): 1-46 pp.
- Koons, R. D., Helmke, P. A. and M. L. Jackson, 1980. Association of trace elements with iron oxides during rock weathering, *Soils Science society of American journal*, 44:155-159 pp
- Koschinsky, A. and P. Halbach, 1995. Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genic implications, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No. 24, 5113-5132 pp.
- Kotas, J. and Z. Stasicka, 2000. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation, *Environmental Pollution* 107 (2000) 263-283 pp.
- Lang, S. F., 2000. Molybdän mobilität und – mobilisierbarkeit auf sauren Waldstandorten: Prozesse und Einflussfaktoren, *Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim*, 135 p.
- Latrille, Ch., Eisass, F., van Oort, F. and L. Denaix, 2001. Physical speciation of trace metals in Fe-Mn concretions from a rendzic lithosol developed on Sinemurian limestones (France). *Geoderma* 100: 127-146 pp.
- Malucelli, F., Terribile, F., and C. Colombo, 1999. Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosol on the island of Sao Miguel (Azores), *Geoderma* 88.: 73-98 pp.
- Márquez, N, Ysambertt, F y C. De La Cruz, 1999. Three analytical methods to isolate and characterize vanadium and nickel porphyrins from heavy crude oil, *Analytica Chemical Acta* 395.: 343-349 pp.



Martínez-Méndez, R. M., 1999. Programas nacionales de conservación de suelos: Análisis retrospectivo en: Siebe Ch, H.C. Rodarte, G. Toledo, G. Etchevers y Oleschko K. Conservación y restauración de suelos, Universidad Nacional autónoma de México, Programa Universitario del Medio Ambiente, México.

Masera, R. O., 1998. desforestación y degradación forestal en México. En: Barba, R. (Ed.): Guía ambiental, Union de Grupos Ambientalistas, México.: 377-385 pp.

McGee, J.J., R.I. Tilling y W.A. Duffield, 1987. Petrologic characteristics of the 1982 and pre-1982 eruptive products of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico. GEOF. INT. Vol. 26-1: 85-108 pp

McKenzie, R. M., 1980. The adsorption of lead y other heavy metals on oxides of manganese and iron. Aust J Soil Res., 18 : 61-73 pp.

Mongelli, G., and P. Acquafredda, 1999. Ferruginous concretions in a Late Cretaceous karst bauxite: composition and conditions of formation, Chemical Geology 158 (1999): 315–320 pp.

Morales-Gíl, C., 1999. Explotación y producción, corazón de la actividad petrolera de México, La Revista Peninsular, No. 504, Yucatán, Mérida.

Muller, P. J. and G. Bouquier, 1986. Dissolution of kaolinites and accumulation of iron oxides in lateritic-ferruginous nodules: mineralogical and microstructural transformations, Geoderma, 37. : 113-136 pp.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez S. A., Nieto Samaniego A. F., 1992. Texto explicativo de la quinta edición de la Carta Geológica de la Republica Mexicana escala 1:2'000 000 U.N.A.M. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal México.

Ortiz-Pérez, M. A. y J. Benítez, 1996. Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en planicies deltáicas: la región de Tabasco y Campeche, 483-503 pp. In: A.V Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J. A. Benitez, D. Zárate-Lomelí (Eds.). Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnostico y tendencias. Universidad Nacional autónoma de Campeche.

Ortiz, M. A. 2002. Comunicación personal. Instituto de Geografía UNAM.

Palma, L. D., J. Cisneros, A. Trujillo, N. Granados, J. Serrano y J. Argueta, 1985. Caracterización de los suelos de Tabasco, uso actual y potencial y taxonomía. SECUR, Gobierno del Estado de Tabasco. México. 42 p.

Palumbo, B., Bellanca, A., Neri, R. and M. J. Roe, 2001. Trace metal partitioning in Fe-Mn nodules from Sicilian soils, Italy, Chemical Geology 173.: 257-269 pp.

Porta, J., López-Acevedo M. y Roquero C., 1994, Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Mundi-prensa, España.

Prinzhofer, A., Vega, G. A. M., Battani, A. and M. Escudero, 2000. Gas Geochemistry of the Macuspana Basin (Mexico): thermogenic accumulations in sediments impregnated by bacterial gas *Marine and Petroleum Geology* 17 (2000): 1029-1040 pp.

Richards, L A. (ed)., 1982, Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos, Limusa, México, 98 p.

Rodríguez-Cuevas, M., 1992, Los cambios antropogénicos de los Acrisoles de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, Colegio de Postgraduados. Tesis de maestría.: 197 p.

Schellmann, W., 1981. Considerations on the definition and classification of laterites. Proceedings of the International Seminar on Lateritisation Processes, Trivandrum, India A. A. Balkema, Rotterdam, 1-10 pp.

Schlichting, E. y H. P. Blume, 1966. *Bodenkundliches Praktikum*, Verlag Paul Parey, Hamburg & Berlin, Alemania.

Schlichting, E., H.P. Blume y K. Stahr, 1995. *Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte* 81, 2a Ed. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, Wien.

Schwertmann, U., 1985. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals, *Advances in Soil Science*, Vol. 1.: 172-200 pp.

Siebe, Ch., R. Jahn y K. Stahr, 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. *Publicación Especial 4*, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Chapingo, México, 57p.

Singh, B. and J. R. Gilkes, 1992. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soils of south-western Australia *Journal of soil Science* 43: 77-98 pp.

SPP, CGSNEGI., 1982. [Hoja] Macuspana (E15 D12): Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, Carta Topográfica, escala 1:50,000.

Strauss, R., Brümmer, W. G. and N. J. Barrow, 1997. Effects of cristallinity of goethite: II. Rates of sorption and desorption of phosphate, *European Journal of soil science*, March 1997, 48, 101-114 pp.

Targulian, V. O., 2001. Comunicación personal Institute of Geography, Russian Academy of Science, Staromonetny 29, Moscow 109017, Russia.

Tessens, E. and S. Zaugh, 1982. Positive permanent charge in oxisol, *Soils Science Society American journal*, 46: 1103-1106 pp.

Tessier, A., Campbell, P. G. C. and M. Bisson, 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Analytic Chemistry*, Vol 51, No. 7, June.: 844-850 pp.

Thornton, I., 1983. Applied environmental geochemistry, Academic Press Geology Series, Academic Press, London.: 501 p.

Trujillo-Narcía, A., Zavala, C. J. y C. E. Lagunes, 1999. Contaminación del suelo por metales pesados e hidrocarburos aromáticos en Tabasco. VIII Reunión Científica-Tecnológica Forestal-Agropecuaria. 22-24 nov/99, Villahermosa, Tabasco: 45-52 pp.

Tucker, R. J., Drees, L. R. and L. P. Wilding, 1994. Signposts old and new: active and inactive redoximorphic features; and seasonal wetness in two Alfisols of the gulf coast region of Texas, U.S.A., In: A. j. Ringrose-Voase and G.S. Humprey (Ed), *Soils Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Proc. IX Int. Working Meeting on soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. *Developments in Soil Science* 22, Elsevier, Amsterdam, pp. 149-159 pp.

UNAM-IMP-Battelle, 1999. Diagnóstico de los efectos ambientales de la industria petrolera asociados a la región sur de PEMEX-Exploración y Producción, fase III. Instituto Mexicano del Petróleo, UNAM y Battelle. Programa Universitario de Medio Ambiente.

van Reeuwijk, L.P., 1992, *Procedures for soil analysis*, ISRIC, Wageningen.

Varekamp J.C., J.F. Luhr y K.L. Prestegard, 1984. The 1982 eruptions of El Chichón Volcano (Chiapas, Mexico): character of the eruptions, ash-fall deposits and gasphase. *Journal of volcanology and geothermal research*, 23, 39-68 pp.

Vepraskas, M. J., Wilding L. P. and L. R. Drees, 1994. aquic conditions for Soil Taxonomy: concepts, soil morphology and micromorphology., In: A. j Ringrose-Voase and G.S. Humprey (Ed), *Soils Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Proc. IX Int. Working Meeting on soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. *Developments in Soil Science* 22, Elsevier, Amsterdam.: 117-131 pp

Weng, H. C., Huang, P. C., Herbert, E. A., Cheng, H-D. A. and P. F. Sanders, 1994. Chromium leaching behavior in soil derived from chromite ore processing waste, *The Science of the Total Environment* 154 (1994):71-86 pp.

West, R.C., N.P. Psuty y B.G. Thom, 1969. The Tabasco lowlands of southern Mexico. Louisiana State University Press. 88p.

William, I.R. , T.J. Bornhorst, S.P. Halsor, W.A. Capaul, P.S. Plumley, S. De la Cruz-Reyna, M. Mena y R. Mota, 1984. Volcán el Chichón, México: pre-1982 S-rich eruptive activity. *Journal of volcanology and geothermal research*, 23, 147-167 pp.

Zeien, H. y G.W. Brümmer, 1989. Chemische Extraktion zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. *Mitteilgn. Dtsch Bodenkundl. Gesellsch.*, 59, 505-510 pp.

Anexo 1: Características de textura en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex y Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	Arena (%)			Limo (%)			Arcilla (%)	Clasificación
			gruesa	media	Fina	Grueso	Medio	fino		
Cd. Pemex	Ah	0-12	6.6	10.4	23.9	17.8	12.6	5.8	22.7	Franco
	AC	12-31	33	11.5	11.3	2.8	7.6	4.8	28.9	Franco arcillo arenoso
	C	31-40	23	8.4	7.4	5.9	6.1	5.5	43.7	Arcilloso
	AB	40-64	10	5.8	5.0	5.3	3.0	4.9	65.9	Arcilloso
	Btg <sub>1</sub>	64-82	3.3	2.1	2.1	2.6	9.9	1.9	78.0	Arcilloso
	Btg <sub>2</sub>	82-105	0.12	0.48	2.7	4.9	7.2	6.8	77.7	Arcilloso
Vernet	Ah	0-9	0.5	14.6	23.6	9.9	9.8	6.7	34.8	Franco arcilloso
	AB	9-20	0.7	14.0	20.8	3.6	7.9	6.3	46.7	Arcilloso
	Btg <sub>1</sub>	20-34	0.05	12.4	13.6	4.1	7.0	5.8	57.0	Arcilloso
	Btg <sub>2</sub>	34-50	0.04	17.4	18.1	8.8	6.1	9.5	40.1	Arcilloso
	Ctg	50-63	0.08	20.6	17.2	3.9	7.4	9.8	41.0	Arcilloso
	Cw	>63	10.4	4.3	3.1	1.3	4.7	8.6	67.5	Arcilloso

Anexo 2: Contenido de óxidos amorfos y cristalinos e índices de evolución de suelos en Cd. Pemex y Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	g kg <sup>-1</sup>							
			Al <sub>o</sub>	Fe <sub>o</sub>	Mn <sub>o</sub>	Si <sub>o</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>d</sub>	Mn <sub>d</sub>	Si <sub>d</sub>
Cd. Pemex	Ah	0-12	0.92	1.42	0.51	0.21	2.53	16.38	0.29	0.61
	AC	12-31	1.27	2.75	1.06	0.18	6.36	49.69	1.21	0.79
	C	31-40	1.35	2.00	0.07	0.23	8.94	62.44	1.23	0.77
	AB	40-64	1.88	1.39	0.01	0.32	9.80	74.82	0.02	0.43
	Btg <sub>1</sub>	64-82	2.43	1.46	0.01	0.24	8.35	66.81	0.02	0.52
	Btg <sub>2</sub>	82-105	3.47	1.35	0.01	0.27	4.53	57.17	0.02	0.16
Vernet	Ah	0-9	1.50	5.69	0.21	0.26	1.74	13.93	0.23	0.80
	AB	9-20	2.42	4.30	0.07	0.22	3.74	20.88	0.08	0.45
	Btg <sub>1</sub>	20-34	3.10	2.33	0.01	0.20	4.64	21.10	0.02	0.34
	Btg <sub>2</sub>	34-50	2.84	0.95	0.00	0.16	4.18	17.96	0.01	0.26
	Ctg	50-63	2.66	0.68	0.00	0.13	3.66	15.59	0.02	0.24
	Cw	>63	2.32	1.14	0.00	0.31	5.37	13.02	0.00	0.55

Óxidos Amorfos por oxalato: Fe<sub>o</sub>, Al<sub>o</sub>, Mn<sub>o</sub>, Si<sub>o</sub>.

Óxidos Cristalinos por ditionito: Fe<sub>d</sub>, Al<sub>d</sub>, Mn<sub>d</sub>, Fe<sub>d</sub>.

Anexo 3: Resultados de la extracción secuencial de cromo (mg kg<sup>-1</sup>) en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex-Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof (cm)	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> -acetato	NH <sub>2</sub> HO-HCl	EDTA	Oxalato	Oxalato +Asc.	Residual	Suma	Total
			Cd. Pemex	Ah <sub>1</sub>	0-12	<2	<2	<2	<2	6.03	18.05
	Ah <sub>2</sub>	12-31	<2	<2	<2	<2	6.27	34.10	1587.0	1627	1315
	AB	31-40	<2	<2	<2	<2	6.26	19.95	648.4	674	1187
	Bg <sub>1</sub>	40-64	<2	<2	<2	<2	3.31	9.10	471.3	483	714
	BC	64-82	<2	<2	<2	<2	3.50	11.40	627.9	642	731
	Cg	82-105	<2	<2	<2	<2	4.49	5.40	523.6	534	1002
Vernet	Ah	0-9	<2	<2	<2	<2	4.26	26.85	154.5	186	280
	AB	9-20	<2	<2	<2	<2	6.88	37.40	258.8	303	277
	Btg <sub>1</sub>	20-34	<2	<2	<2	<2	4.66	33.45	240.1	278	249
	Btg <sub>2</sub>	34-50	<2	<2	<2	<2	2.40	51.90	160.4	215	209
	Ctg	50-63	<2	<2	<2	<2	1.96	18.60	160.4	181	164
	Cw	>63	<2	<2	<2	<2	2.28	15.65	192.5	210	290

Anexo 4: Resultados de la extracción secuencial de vanadio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex-Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> - acetato	NH <sub>2</sub> OH- HCl	EDTA	Oxalato	Oxalato +Asc.	Residual	Suma	Total
Cd. Pemex	Ah	Ah	<15	<15	<15	<15	<15	38.56	125.9	164	267
	AC	AC	<15	<15	<15	<15	<15	26.61	636.2	663	615
	C	C	<15	<15	<15	<15	<15	16.30	333.8	350	444
	AB	AB	<15	<15	<15	<15	<15	23.04	208.5	231	204
	Btg <sub>1</sub>	Btg <sub>1</sub>	<15	<15	<15	<15	<15	26.68	233.5	260	252
	Btg <sub>2</sub>	Btg <sub>2</sub>	<15	<15	<15	<15	<15	19.81	447.5	467	542
Vernet	Ah	0-9	<15	<15	<15	<15	<15	<15	97.7	98	214
	AB	9-20	<15	<15	<15	<15	<15	<15	89.3	89	185
	Btg <sub>1</sub>	20-34	<15	<15	<15	<15	<15	17.51	83.0	100	108
	Btg <sub>2</sub>	34-50	<15	<15	<15	<15	<15	<15	85.1	85	118
	Ctg	50-63	<15	<15	<15	<15	<15	<15	111.8	112	108
	Cw	>63	<15	<15	<15	<15	<15	<15	229.9	230	251

Anexo 5: Resultados de la extracción secuencial de níquel ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex-Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> - acetato	NH <sub>2</sub> OH- HCl	EDTA	Oxalato	Oxalato +Asc.	Residual	Suma	Total
Cd. Pemex	Ah	0-12	<1	<1	<1	<1	1.22	5.26	42.3	48	39
	AC	12-31	<1	<1	<1	2.70	4.34	6.44	57.0	70	73
	C	31-40	<1	<1	<1	<1	2.21	12.89	121.6	137	122
	AB	40-64	<1	1.43	<1	<1	<1	9.93	178.7	190	192
	Btg <sub>1</sub>	64-82	<1	3.71	<1	<1	<1	5.12	172.0	181	174
	Btg <sub>2</sub>	82-105	<1	7.50	<1	<1	5.75	3.28	300.0	316	318
Vernet	Ah	0-9	<1	3.37	<1	10.66	3.22	9.98	48.8	77	76
	AB	9-20	<1	6.42	1.6	4.12	3.22	12.92	134.5	164	123
	Btg <sub>1</sub>	20-34	<1	6.82	<1	1.86	3.50	14.96	192.7	221	160
	Btg <sub>2</sub>	34-50	<1	6.57	<1	1.36	4.72	17.71	117.3	148	129
	Ctg	50-63	<1	6.31	<1	1.42	6.46	17.70	108.6	139	127
	Cw	>63	<1	<1	<1	<1	<1	3.7	59.9	64	43

Anexo 6: Resultados de la extracción secuencial de cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex-Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> - acetato	NH <sub>2</sub> OH- HCl	EDTA	Oxalato	Oxalato +Asc.	Residual	Suma	Total
Cd. Pemex	Ah	0-12	<0.16	<0.16	<0.16	5.34	4.69	0.48	11.3	22	22
	AC	12-31	<0.16	<0.16	<0.16	1.09	1.49	0.63	27.1	30	21
	C	31-40	<0.16	<0.16	<0.16	1.04	1.46	0.67	22.9	26	23
	AB	40-64	<0.16	<0.16	<0.16	0.55	0.64	0.88	24.8	27	30
	Btg <sub>1</sub>	64-82	<0.16	<0.16	<0.16	0.42	0.66	1.88	27.4	30	33
	Btg <sub>2</sub>	82-105	<0.16	<0.16	<0.16	0.31	0.70	2.09	19.3	22	21
Vernet	Ah	0-9	<0.16	<0.16	<0.16	3.49	4.60	2.38	5.2	16	19
	AB	9-20	<0.16	<0.16	<0.16	1.00	2.15	2.74	8.0	14	13
	Btg <sub>1</sub>	20-34	<0.16	<0.16	<0.16	0.54	1.37	2.38	7.2	11	12
	Btg <sub>2</sub>	34-50	<0.16	<0.16	<0.16	0.20	0.73	1.95	6.9	10	10
	Ctg	50-63	<0.16	<0.16	<0.16	0.23	0.57	1.47	4.7	7	8
	Cw	>63	<0.16	<0.16	<0.16	0.19	0.65	5.20	13.6	20	23

Anexo 7: Resultados de la extracción secuencial de zinc (mg kg<sup>-1</sup>) en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex-Vernet, Tab.

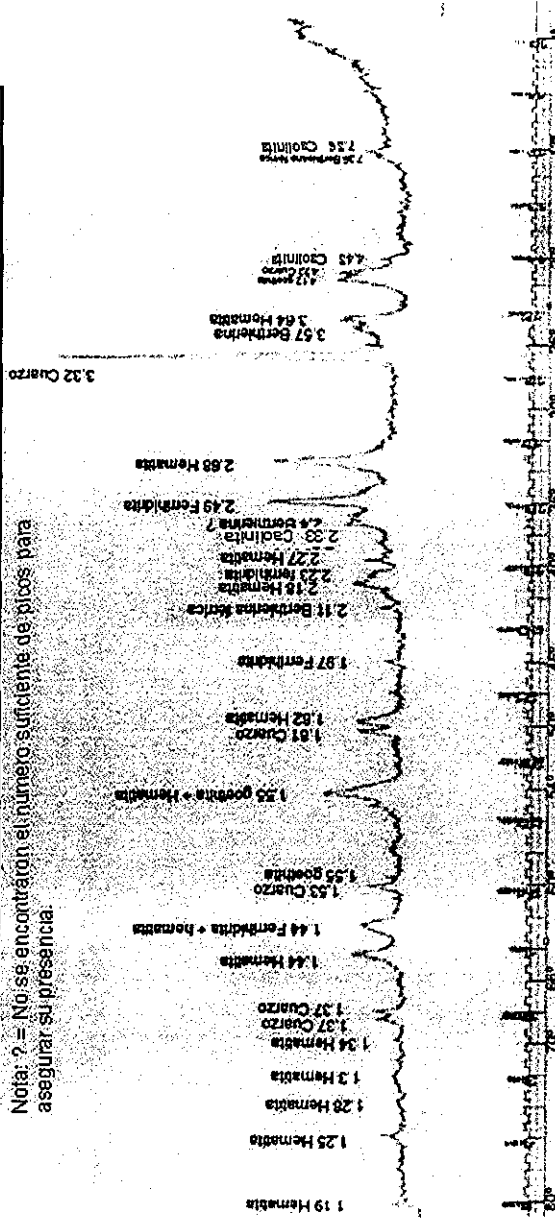
Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> -acetato	NH <sub>2</sub> OH-HCl	EDTA	Oxalato	Oxalato +Asc.	Residual	Suma	Total
Cd. Pemex	Ah	0-12	<0.16	0.34	0.37	0.83	2.04	6.51	30.8	41	49
	AC	12-31	<0.16	<0.16	0.26	<0.16	<0.16	2.94	47.0	50	42
	C	31-40	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	3.20	45.8	49	46
	AB	40-64	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	3.37	45.2	49	66
	Btg <sub>1</sub>	64-82	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	2.63	71.8	74	70
	Btg <sub>2</sub>	82-105	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	2.07	100.2	102	82
Vernet	Ah	0-9	0.42	1.6	1.33	2.67	5.25	8.04	26.9	46	67
	AB	9-20	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	4.92	50.7	56	54
	Btg <sub>1</sub>	20-34	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	5.31	53.5	59	56
	Btg <sub>2</sub>	34-50	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	5.31	55.2	60	57
	Ctg	50-63	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	<0.16	5.38	40.5	46	50
	Cw	>63	<0.16	<0.16	0.26	<0.16	<0.16	9.55	39.1	49	68

Anexo 8: Resultados de la extracción secuencial de plomo (mg kg<sup>-1</sup>) en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Cd. Pemex-Vernet, Tab.

Localidad	Horizonte	Prof. (cm)	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> -acetato	NH <sub>2</sub> OH-HCl	EDTA	Oxalato	Oxalato +Asc.	Residual	Suma	Total
Cd. Pemex	Ah	0-12	<0.74	<0.74	<0.74	3.05	4.02	3.40	12.5	23	20
	AC	12-31	<0.74	<0.74	<0.74	6.25	6.46	5.47	31.4	50	36
	C	31-40	<0.74	<0.74	<0.74	1.80	2.90	4.65	21.6	31	22
	AB	40-64	<0.74	<0.74	<0.74	1.00	2.02	3.65	11.8	18	24
	Btg <sub>1</sub>	64-82	<0.74	<0.74	<0.74	1.00	1.38	3.74	15.8	22	20
	Btg <sub>2</sub>	82-105	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	1.34	2.63	21.9	26	25
Vernet	Ah	0-9	<0.74	<0.74	<0.74	2.55	4.94	2.90	5.3	16	15
	AB	9-20	<0.74	<0.74	<0.74	1.70	4.08	4.12	7.4	17	14
	Btg <sub>1</sub>	20-34	<0.74	<0.74	<0.74	0.95	2.12	4.28	6.7	13	13
	Btg <sub>2</sub>	34-50	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	4.45	8.8	13	15
	Ctg	50-63	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	3.89	10.3	14	14
	Cw	>63	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	<0.74	5.90	15.8	22	21

Horizonte	Profundidad (cm)	Especies mineralógicas
Ah1	D-12	Hematita, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sist. Rombodral (Hex), Coeinita, α-FeO(OH), Sist. Ortorrómbico, Ferrhidrita, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (OH)•4H <sub>2</sub> O, Sist. Hexagonal, Cuarzo?, Berthierina?

Nota: ? = No se encontraron el número suficiente de pícos para asegurar su presencia.



Anexo 9a. Identificación mineralógica de las fases de óxidos presentes en nódulos del horizonte Ah1 en el perfil Cc1, Permex.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN







Vereda	Área	plant	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10	m11	m12	m13	m14	m15	m16	m17	m18	m19	m20	m21	m22	m23	m24	m25	m26	m27	m28	m29	m30	m31	m32	m33	m34	m35	m36	m37	m38	m39	m40	m41	m42	m43	m44	m45	m46	m47	m48	m49	m50	m51	m52	m53	m54	m55	m56	m57	m58	m59	m60	m61	m62	m63	m64	m65	m66	m67	m68	m69	m70	m71	m72	m73	m74	m75	m76	m77	m78	m79	m80	m81	m82	m83	m84	m85	m86	m87	m88	m89	m90	m91	m92	m93	m94	m95	m96	m97	m98	m99	m100	m101	m102	m103	m104	m105	m106	m107	m108	m109	m110	m111	m112	m113	m114	m115	m116	m117	m118	m119	m120	m121	m122	m123	m124	m125	m126	m127	m128	m129	m130	m131	m132	m133	m134	m135	m136	m137	m138	m139	m140	m141	m142	m143	m144	m145	m146	m147	m148	m149	m150	m151	m152	m153	m154	m155	m156	m157	m158	m159	m160	m161	m162	m163	m164	m165	m166	m167	m168	m169	m170	m171	m172	m173	m174	m175	m176	m177	m178	m179	m180	m181	m182	m183	m184	m185	m186	m187	m188	m189	m190	m191	m192	m193	m194	m195	m196	m197	m198	m199	m200	m201	m202	m203	m204	m205	m206	m207	m208	m209	m210	m211	m212	m213	m214	m215	m216	m217	m218	m219	m220	m221	m222	m223	m224	m225	m226	m227	m228	m229	m230	m231	m232	m233	m234	m235	m236	m237	m238	m239	m240	m241	m242	m243	m244	m245	m246	m247	m248	m249	m250	m251	m252	m253	m254	m255	m256	m257	m258	m259	m260	m261	m262	m263	m264	m265	m266	m267	m268	m269	m270	m271	m272	m273	m274	m275	m276	m277	m278	m279	m280	m281	m282	m283	m284	m285	m286	m287	m288	m289	m290	m291	m292	m293	m294	m295	m296	m297	m298	m299	m300	m301	m302	m303	m304	m305	m306	m307	m308	m309	m310	m311	m312	m313	m314	m315	m316	m317	m318	m319	m320	m321	m322	m323	m324	m325	m326	m327	m328	m329	m330	m331	m332	m333	m334	m335	m336	m337	m338	m339	m340	m341	m342	m343	m344	m345	m346	m347	m348	m349	m350	m351	m352	m353	m354	m355	m356	m357	m358	m359	m360	m361	m362	m363	m364	m365	m366	m367	m368	m369	m370	m371	m372	m373	m374	m375	m376	m377	m378	m379	m380	m381	m382	m383	m384	m385	m386	m387	m388	m389	m390	m391	m392	m393	m394	m395	m396	m397	m398	m399	m400	m401	m402	m403	m404	m405	m406	m407	m408	m409	m410	m411	m412	m413	m414	m415	m416	m417	m418	m419	m420	m421	m422	m423	m424	m425	m426	m427	m428	m429	m430	m431	m432	m433	m434	m435	m436	m437	m438	m439	m440	m441	m442	m443	m444	m445	m446	m447	m448	m449	m450	m451	m452	m453	m454	m455	m456	m457	m458	m459	m460	m461	m462	m463	m464	m465	m466	m467	m468	m469	m470	m471	m472	m473	m474	m475	m476	m477	m478	m479	m480	m481	m482	m483	m484	m485	m486	m487	m488	m489	m490	m491	m492	m493	m494	m495	m496	m497	m498	m499	m500	m501	m502	m503	m504	m505	m506	m507	m508	m509	m510	m511	m512	m513	m514	m515	m516	m517	m518	m519	m520	m521	m522	m523	m524	m525	m526	m527	m528	m529	m530	m531	m532	m533	m534	m535	m536	m537	m538	m539	m540	m541	m542	m543	m544	m545	m546	m547	m548	m549	m550	m551	m552	m553	m554	m555	m556	m557	m558	m559	m560	m561	m562	m563	m564	m565	m566	m567	m568	m569	m570	m571	m572	m573	m574	m575	m576	m577	m578	m579	m580	m581	m582	m583	m584	m585	m586	m587	m588	m589	m590	m591	m592	m593	m594	m595	m596	m597	m598	m599	m600	m601	m602	m603	m604	m605	m606	m607	m608	m609	m610	m611	m612	m613	m614	m615	m616	m617	m618	m619	m620	m621	m622	m623	m624	m625	m626	m627	m628	m629	m630	m631	m632	m633	m634	m635	m636	m637	m638	m639	m640	m641	m642	m643	m644	m645	m646	m647	m648	m649	m650	m651	m652	m653	m654	m655	m656	m657	m658	m659	m660	m661	m662	m663	m664	m665	m666	m667	m668	m669	m670	m671	m672	m673	m674	m675	m676	m677	m678	m679	m680	m681	m682	m683	m684	m685	m686	m687	m688	m689	m690	m691	m692	m693	m694	m695	m696	m697	m698	m699	m700	m701	m702	m703	m704	m705	m706	m707	m708	m709	m710	m711	m712	m713	m714	m715	m716	m717	m718	m719	m720	m721	m722	m723	m724	m725	m726	m727	m728	m729	m730	m731	m732	m733	m734	m735	m736	m737	m738	m739	m740	m741	m742	m743	m744	m745	m746	m747	m748	m749	m750	m751	m752	m753	m754	m755	m756	m757	m758	m759	m760	m761	m762	m763	m764	m765	m766	m767	m768	m769	m770	m771	m772	m773	m774	m775	m776	m777	m778	m779	m780	m781	m782	m783	m784	m785	m786	m787	m788	m789	m790	m791	m792	m793	m794	m795	m796	m797	m798	m799	m800	m801	m802	m803	m804	m805	m806	m807	m808	m809	m810	m811	m812	m813	m814	m815	m816	m817	m818	m819	m820	m821	m822	m823	m824	m825	m826	m827	m828	m829	m830	m831	m832	m833	m834	m835	m836	m837	m838	m839	m840	m841	m842	m843	m844	m845	m846	m847	m848	m849	m850	m851	m852	m853	m854	m855	m856	m857	m858	m859	m860	m861	m862	m863	m864	m865	m866	m867	m868	m869	m870	m871	m872	m873	m874	m875	m876	m877	m878	m879	m880	m881	m882	m883	m884	m885	m886	m887	m888	m889	m890	m891	m892	m893	m894	m895	m896	m897	m898	m899	m900	m901	m902	m903	m904	m905	m906	m907	m908	m909	m910	m911	m912	m913	m914	m915	m916	m917	m918	m919	m920	m921	m922	m923	m924	m925	m926	m927	m928	m929	m930	m931	m932	m933	m934	m935	m936	m937	m938	m939	m940	m941	m942	m943	m944	m945	m946	m947	m948	m949	m950	m951	m952	m953	m954	m955	m956
--------	------	-------	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------