



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

“Determinación de metales pesados en muestras de suelo superficial de la zona que circunda a las instalaciones de la empresa Cromátos de México en Tultitlán, estado de México”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGO**

**PRESENTA
FRANCISCO ALMONACID BUENROSTRO**

**ASESORAS:
Dra. Ofelia Morton Bermea
Dra. Esther Matiana García Amador**

MÉXICO D. F. 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

CONTENIDO	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1 Objetivo general.....	4
3.2 Objetivo particular.....	4
4. HIPÓTESIS.....	4
5. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
5.1 El suelo.....	5
5.2 Factores formadores del suelo.....	6
5.3 Funciones del suelo.....	7
5.4 Contaminación de los suelos.....	8
5.5 Distribución de los elementos traza a partir de la solución del suelo	9
5.6 Riesgos derivados de la contaminación.....	9
5.7 Ciclo biogeoquímicos de los metales en el suelo.....	10
5.8 Metales pesados.....	11
5.9 Metales en el suelo.....	11
5.10 Fuentes de metales pesados en el suelo.....	13
5.11 Movilidad de los metales.....	13
5.12 Factores físicos y químicos que afectan la retención de los metales en el suelo.....	14
5.13 Características de los metales estudiados.....	16
5.14 Industrias que presentan mayores emisiones de metales pesados según el elemento.....	18

6. ANTECEDENTES.....	19
7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	25
7.1 Localización.....	25
7.2 Extensión.....	25
7.3 Orografía.....	26
7.4 Hidrografía.....	26
7.5 Clima.....	26
7.6 Principales ecosistemas.....	27
7.7 Recursos naturales.....	27
7.8 Características y uso del suelo.....	27
7.9 Vivienda.....	28
7.10 Vías de comunicación.....	28
7.11 Principales sectores, productos y servicios.....	28
8. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
8.1 Etapa de Campo.....	29
8.1.1 Muestreo.....	29
8.1.2 Toma de la muestra.....	30
8.1.3 Manejo de la muestra.....	31
8.2 Etapa de Laboratorio.....	31
8.2.1 Determinación de parámetros químicos.....	31
8.2.2 Análisis de metales pesados totales en suelos.....	32
8.3 Etapa de Gabinete.....	32
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
9.1 Descripción de los resultados.....	33
9.1.1 Parámetros físicos y químicos de los suelos.....	33
9.1.2 Metales pesados totales en los suelos.....	37
9.2 Evaluación por distancia.....	43
9.2.1 Metales pesados totales en los suelos	43
9.3 Factor de enriquecimiento.....	48
9.4 Índice de geoacumulación.....	50

9.5 Coeficiente de correlación.....	52
9.6 Distribución espacial.....	54
9.6.1 Parámetros físicos y químicos de los suelos.....	54
9.6.2 Metales pesados totales en los suelos.....	58
11. CONCLUSIONES.....	65
12. BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXO 1.....	76
ANEXO 2.....	86

ÍNDICE DE CUADROS

		Pagina
Cuadro 1	Minerales primarios y secundarios encontrados en suelos	5
Cuadro 2	Relación de los usos del suelo en Tultitlán.....	27
Cuadro 3	Profundidad recomendada para la toma de muestras en función del objetivo del muestreo.....	31
Cuadro 4	Valores obtenidos en la determinación de los parámetros físico y químicos hechas a cada muestra de suelo.....	33
Cuadro 5	Resumen de los valores obtenidos para los parámetros fisicoquímicos en comparación con el valor de fondo.....	34
Cuadro 6	Valores obtenidos en la determinación de la concentración de los metales pesados en las muestras de suelo.....	37
Cuadro 7	Descripción de las concentraciones máxima y mínima (ppm) obtenidas para cada metal pesado, así como la comparación con el valor de fondo, concentración natural en suelos de cada elemento y el límite máximo permisible para cada elemento.....	38
Cuadro 8	Valor del Factor de Enriquecimiento obtenido para cada metal pesado.....	48
Cuadro 9	Determinación del I-geo así como el grado de este y la clasificación de la intensidad de la contaminación en función del valor obtenido para cada metal pesado.....	51
Cuadro 10	Coefficiente de correlación entre los metales pesados y los factores fisicoquímicos del suelo.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pagina
Figura 1	Instalaciones de la planta de Cromatos de México.....	2
Figura 2	Ciclos biogeoquímicos de los metales pesados.....	10
Figura 3	Localización del municipio de Tultitlán.....	25
Figura 4	Ubicación de los sitios de muestreo en la zona de estudio.....	30

Figura 5	Representación gráfica de las concentraciones encontradas para cada metal pesado.....	39
Figura 6	Concentración de Cr en relación con la distancia de Cromatos de México.....	43
Figura 7	Concentración de Cu en relación con la distancia de Cromatos de México.....	44
Figura 8	Concentración de Ni en relación con la distancia de Cromatos de México.....	45
Figura 9	Concentración de Pb en relación con la distancia de Cromatos de México.....	46
Figura 10	Concentración de Zn en relación con la distancia de Cromatos de México.....	47
Figura 11	Representación gráfica del valor del Factor de Enriquecimiento obtenido para cada metal pesado.....	49
Figura 12	Representación del valor del índice de geoacumulación obtenido para cada elemento.....	51
Figura 13	Mapa geoquímico del pH medido en las muestras de suelo analizadas.....	54
Figura 14	Mapa geoquímico del contenido de materia orgánica medida en las muestras de suelo analizadas.....	55
Figura 15	Mapa geoquímico de la conductividad eléctrica medida en las muestras de suelo analizadas.....	56
Figura 16	Mapa geoquímico de la dinámica de Cr medido en las muestras de suelo analizadas.....	58
Figura 17	Mapa geoquímico de la dinámica de Cu medido en las muestras de suelo analizadas.....	60
Figura 18	Mapa geoquímico de la dinámica del Ni medido en las muestras de suelo analizadas.....	61
Figura 19	Mapa geoquímico de la dinámica de Pb medido en las muestras de suelo analizadas.....	62
Figura 20	Mapa geoquímico que muestra la dinámica del Zn medido en las muestras de suelo analizadas.....	63

RESUMEN

En los años 70 fue la contaminación atmosférica; en los 80 y en los 90 fue la contaminación del agua. En la actualidad la contaminación del agua sigue siendo un problema ambiental grave, y surgió la contaminación del suelo.

La industrialización y urbanización de la Ciudad de México y en general de las áreas urbanas del país han aumentado de manera acelerada causando problemas de tipo ambiental que pueden poner en riesgo tanto al ambiente como a los habitantes de dichas localidades. Uno de los componentes ambientales que más resulta afectado es el suelo, en tanto que, recibe una gran cantidad de contaminantes provenientes de una gran variedad de fuentes emisoras tales como desperdicios y emisiones de plantas industriales, tráfico vehicular, estaciones termoeléctricas, entre otras actividades..

En este trabajo se analizaron el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje de materia orgánica, también se cuantificaron las concentraciones de Cu, Cr, Ni, Pb y Zn en suelos aledaños a la planta de Cromatos de México en la zona industrial de Tultitlán, de lo cual se desprende que el plomo es el elemento más abundante en las muestras analizadas, mientras que el cromo es el único elemento que sobrepasa lo límites que se permiten.

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades industriales en general han producido un importante volumen de residuos que se consideran contaminantes, durante algún tiempo y sobre todo cuando no existía la necesidad de una adecuada gestión de los mismos (Ross, 1994). En los últimos años los metales pesados se han convertido en un tema de interés público tanto en el campo ambiental como en el de la salud pública. Los daños que éstos pueden causar son severos y en ocasiones se presentan de manera sintomática, por lo que las autoridades ambientales y de salud a nivel mundial han puesto especial atención en minimizar la exposición de la población a éstos elementos tóxicos.

La contaminación por metales pesados influye directamente en la salud del hombre y de los animales por lo que se debe poner especial atención en las concentraciones de tales elementos para evitar riesgos de salud en las poblaciones. En los estudios de suelos urbanos e industriales contaminados por metales pesados se distinguen, principalmente tres objetivos:

- 1) Evaluar la distribución de metales pesados en el ambiente;
- 2) Distinguir entre las fuentes de metales pesados naturales y las antropogénicas; e
- 3) Identificar las posibles fuentes de contaminación (Salvagio *et al*, 2002).

Algunos de los casos más sonados de contaminación por metales pesados en México son, el envenenamiento por plomo entre la población infantil de Torreón, Coahuila por la operación de la empresa Industrias Peñoles (Valdés y Cabrea, 1999); el de contaminación de suelos por la empresa Cromatos de México (Figura 1), que hasta 1978 operó en el municipio de Tultitlán, Estado de México, en el cual se encuentran depósitos estimados de 75,000 toneladas de cromo hexavalente, lo que ha traído como consecuencia un aumento en los casos de cáncer de pulmón, daño permanente en ojos e irritación en nariz, garganta y pulmones (Salud Ambiental y Ecología, 2003).

Otra fuente importante de contaminación por metales pesados en México son los sitios mineros, en los cuales se presentan dos principales fuentes de contaminantes, el proceso primario de extracción de metales y la generación de residuos mineros o jales (Sánchez, 2005).



FIGURA 1. Instalaciones de la planta de Cromatos de México.

2. JUSTIFICACIÓN

En México existe un gran número de sitios de alto riesgo para el ambiente que han sido atendidos de forma inadecuada tanto por las autoridades responsables como por los pobladores locales. El problema de la contaminación de suelos asociada a la actividad industrial, es de gran importancia debido a los impactos ambientales y riesgos a la salud de las poblaciones por la presencia de metales tóxicos. Por lo tanto, es necesario realizar estudios que brinden información sobre las dimensiones de la contaminación debida a estos elementos y dar seguimiento a estudios que conduzcan a un mayor entendimiento de la dinámica de la contaminación en el sitio bajo estudio y que permitan tomar decisiones que faciliten el control de la contaminación y justificar las posibles acciones de remediación del sitio por las autoridades responsables.

El caso específico de la zona industrial de Tultitlán es muy complejo pues en nuestros días este sitio ha sido rodeado por la mancha urbana, provocando que la exposición hacia la gente sea inmediata. Ante la negativa de las autoridades sanitarias de la Secretaría de Salud del Estado de México para aceptar que la alta cantidad de patologías en la zona, está relacionada con residuos de metales pesados que se esparce continuamente hacia el ambiente, este trabajo intenta conocer las concentraciones totales de metales pesados en muestras de suelo para proveer de una referencia real para estimar la dimensión de la contaminación.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Evaluar las concentraciones de metales pesados totales en muestras de suelo aledañas a la empresa Cromatos de México S.A.

3.2 Objetivos Particulares

- Cuantificar la cantidad de cada metal pesado (Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) presente en las diferentes muestras de suelo.
- Determinar el pH, conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica de cada muestra de suelo.
- Comparar los resultados obtenidos con límites máximos permisibles de metales pesados en suelos referidos en la literatura.

4. HIPÓTESIS

La industria química produce graves problemas de contaminación en los suelos aledaños a ella provocando daños a la salud de la población. Al ser Tultitlán una zona con alta actividad industrial que contamina los suelos con metales pesados como Cr, Cu, Ni, Pb y Zn; la dinámica de los metales dependerá de la concentración en que se presente cada uno de ellos y de las propiedades del suelo.

5. FUNDAMENTO TEÓRICO

5.1 El suelo

El suelo es considerado un sistema biogeoquímico complejo, abierto, heterogéneo y dinámico, continuamente intercambia materia y energía con su entorno. Es un componente de la biosfera, donde se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos. Su proceso de formación es largo y tarda desde cientos a miles de años en formarse, de difícil y larga recuperación, por lo que el suelo es considerado frágil y recurso natural no renovable (Alloway, 1993; Pierzynski, 1993 y Singer, 1992). El suelo está constituido por tres fases:

- *Sólida*. Está formada por arcillas minerales, óxidos de hierro y aluminio, materia orgánica en diferentes estados de descomposición, sales y rocas intemperizadas (minerales primarios y secundarios) (Cuadro 1). Constituye cerca del 50% del total del suelo.

CUADRO 1. Minerales primarios y secundarios encontrados en suelos¹.

Minerales	Grupo	Ejemplo
Primarios	Minerales silicatados	Cuarzo, cristobalita y tridimita.
	Feldespatos	Ortoclasa, albita y anortita.
	Micas	Muscovita y biotita.
	Piroxenos	Enstatita, diopsida y augita.
	Anfiboles	Tremolita, actinolita y hornblenda.
	Olivinos	Forsterita, fayalita y zircón.
Secundarios	Óxidos de fosfatos	Apatito y rutilo.
	Carbonatos	Calcita, aragonita y dolomita.
	Los que contienen Azufre	Yeso y pirita.
	Minerales de la halita con capa de silicatos	Halita, caolinita, hallosita, clorita, esmectita y vermiculita.
	Óxidos e Hidróxidos cristalinos	Gibsita, bohemita, goetita y hematita.
	Óxidos e Hidróxidos amorfos	Alofano y ferrihidrato.

¹ Fuente: Fergusson, 1990.

- *Líquida*. Llamada solución del suelo y está formada por agua, iones disueltos y compuestos orgánicos solubles, constituye cerca del 25%.
- *Gaseosa*. Las dos fases líquida y gaseosa ocupan los espacios libres y se hallan en constante cambio, constituye el otro 25%. Los gases son de diversa composición el CO₂, N₂ y O₂ (Alloway, 1993; Pierzynski, 1993 y Singer, 1992).

5.2 Factores formadores del suelo.

Los principales factores formadores del suelo que dictan el contenido de metales, sus propiedades y distribución en el perfil, son los siguientes:

- **Material Parental:** Uno de los factores principales que es fuertemente influenciado en la determinación natural del suelo, la composición de la roca, a partir de la cual los suelos fueron desarrollados y que determinan el contenido de minerales y materiales orgánicos. Los suelos son clasificados como material parental transportado y residual.
- **Topografía:** El ángulo de inclinación, el declive de la pendiente y la elevación son los principales factores de la topografía que ejercen un control en la velocidad de derrame superficial de la precipitación, en la velocidad de drenaje subsuperficial (por lo tanto en la velocidad de filtración de los componentes solubles), y en la velocidad de erosión de los productos intemperizadas, así como en la exposición de la roca fresca en la superficie mineral.
- **Clima:** El efecto puede ser directo o indirecto sobre la formación del suelo. El clima controla el tipo de proceso y su intensidad. Los dos principales factores que influyen en la formación del suelo son la precipitación y la temperatura. La precipitación controla la cantidad de agua que es el principal agente en el intemperismo químico, también es esencial para las reacciones de oxidación. La temperatura afecta en la evaporación y la congelación.
- **Actividad biológica:** Es importante en los procesos de intemperismo que generalmente está restringido a la superficie cercana a la zona del suelo.

Incluye la vegetación y organismos que intervienen en los factores formadores del suelo. Los productos formados por estos procesos interactúan con los materiales de la roca y su superficie (Singer, 1992; Fergusson, 1990; Levison, 1989 y Thornton, 1983).

- **Tiempo:** Los suelos jóvenes mantienen muchas características del material parental del que proceden, pero cuando alcanzan una mayor madurez adquieren mayor importancia los rasgos pedológicos, relacionados con el proceso formador. La progresión comienza con la adición de los primeros fragmentos de materia orgánica y continúa con el desarrollo y diferenciación de los horizontes genéticos. Con el tiempo un suelo se encuentra en equilibrio con su ambiente (clima-vegetación-relieve) y puede considerarse como suelo maduro. La mayoría de las primeras clasificaciones se basan en las características de los suelos maduros (Singer, 1992; Fergusson, 1990; Levison, 1989 y Thornton, 1983).

5.3 Funciones del suelo

El suelo forma parte de un ecosistema dinámico, actúa como barrera protectora de otros medios más sensibles, que amortigua el impacto ambiental de los contaminantes. La mayoría de los suelos presentan una capacidad de depuración que tiene un límite. El suelo tiene diferentes funciones importantes como son:

1. Es un sistema vital, sustenta la vida vegetal, donde las plantas obtienen soporte mecánico.
2. Proporciona los nutrientes esenciales para el sustento de la planta.
3. Funciona como un pozo para los contaminantes orgánicos e inorgánicos, que debido a los procesos de adsorción aglutinan a dichos contaminantes.
4. En el transporte y remoción de los contaminantes tiene funciones de filtración, actúa como amortiguador y de transformación en el sistema.
5. Es un importante regulador biogeoquímico de los flujos de sustancias dentro y fuera del ecosistema, también como un regulador del balance hídrico en las cuencas hidrológicas.

6. Alberga una gran biodiversidad de microorganismos localizados dentro y encima de ellos (Snakin, 1996).

El suelo es el lugar donde se realiza la mayor parte de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas terrestres, teniendo funciones de mineralización de la materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, amonificación, fijación de nitrógeno, producción de CO₂, y oxidación de metano. El suelo realiza también funciones en las actividades del hombre: generación de alimentos (agricultura), crianza de animales (ganadería), explotación de bosques (silvicultura) y de los minerales (minería).

El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que resulta difícil establecer a partir de que momento un elemento deja de ser benéfico. Asimismo también resulta difícil precisar cuando deja de estar contaminado un suelo que está siendo objeto de un proceso de recuperación. En la naturaleza cada elemento tiene su ciclo biogeoquímico, que puede ser perturbado por la interacción de otros elementos, de forma natural o bien por aportaciones derivadas de acciones antrópicas. La interacción por aportes del mismo elemento puede conllevar que se alcancen concentraciones que supongan un riesgo real o potencial de contaminación (Porta *et al.*, 1999).

5.4 Contaminación de los suelos

La contaminación del suelo puede definirse como el aporte de un elemento o de un compuesto químico desde el exterior, que provoca un aumento respecto a la concentración inicial, produciendo efectos desfavorables. La contaminación provoca una perturbación en el suelo que se traduce en una pérdida de calidad y aptitud para el uso o bien lo hace inutilizable, a menos que se le someta a un tratamiento de recuperación (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Porta *et al.*, 1999).

5.5 Distribución de los elementos traza a partir de la solución del suelo

La distribución de los elementos traza en la naturaleza está condicionada por el origen geoquímico o por aportes antrópicos actuales o derivados de actividades contaminantes llevadas a cabo en el pasado.

La distribución de un contaminante en un suelo varía en función de la profundidad del horizonte, de la movilidad del elemento y de los procesos de traslocación ocurridos desde su llegada al suelo. Los elementos potencialmente contaminantes pueden hallarse en forma soluble, adsorbidos en forma intercambiable, fijados de forma irreversible, o precipitados. Los iones de la solución del suelo pueden formar un gran número de especies debido a reacciones de hidrólisis, complexación o redox, con efectos tóxicos marcadamente distintos (Porta *et al.*, 1999).

5.6 Riesgos derivados de la contaminación

En la terminología referente a la contaminación cabe distinguir tres conceptos (Bourrelier y Berthelin, 1998):

- Toxicidad: propiedad o potencial de una sustancia química o material para producir daños (alteraciones en ciertas funciones) en sistemas biológicos. La toxicidad se manifiesta cuando la sustancia entra en el organismo. La toxicidad puede ser aguda, subaguda o crónica. En este último caso se debe a los efectos irreversibles a largo plazo por absorción de pequeñas dosis acumulativas.
- Peligro: naturaleza de efecto adverso provocado por el material tóxico.
- Riesgo: probabilidad de sufrir un efecto o pérdida, resultante de circunstancias específicas.

Los estudios de contaminación del suelo se pueden llevar a cabo por dos vías diferentes: realizando análisis químicos de los suelos o de las plantas, lo que puede permitir evaluar el nivel de contaminación de forma cuantitativa; o bien evaluando la respuesta de las plantas o de los microorganismos indicadores en un suelo que se supone contaminado (Farago, 1994; Paul y Douglas, 1975).

5.7 Ciclo biogeoquímico de metales en suelo

El ciclo biogeoquímico describe la distribución y transporte de metales en todos los aspectos de la vida diaria. Las actividades humanas introducen un gran número de metales y modifican los ciclos biogeoquímicos (Figura 2).

Las modificaciones están dadas por la alteración en la proporción con la cual los metales son transportados entre los diferentes depósitos y por la modificación de la forma en la cual los metales son depositados. El transporte y transformación de estos elementos, incluyendo los metales y sus sales, generalmente involucran procesos geoquímicos y biológicos, de tal manera que forman los ciclos biogeoquímicos de los elementos. Los ciclos biogeoquímicos describen los movimientos y las interacciones de los elementos químicos esenciales para la vida a través de la geósfera, por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, liberando varios elementos de la corteza terrestre a la litósfera, atmósfera e hidrósfera.

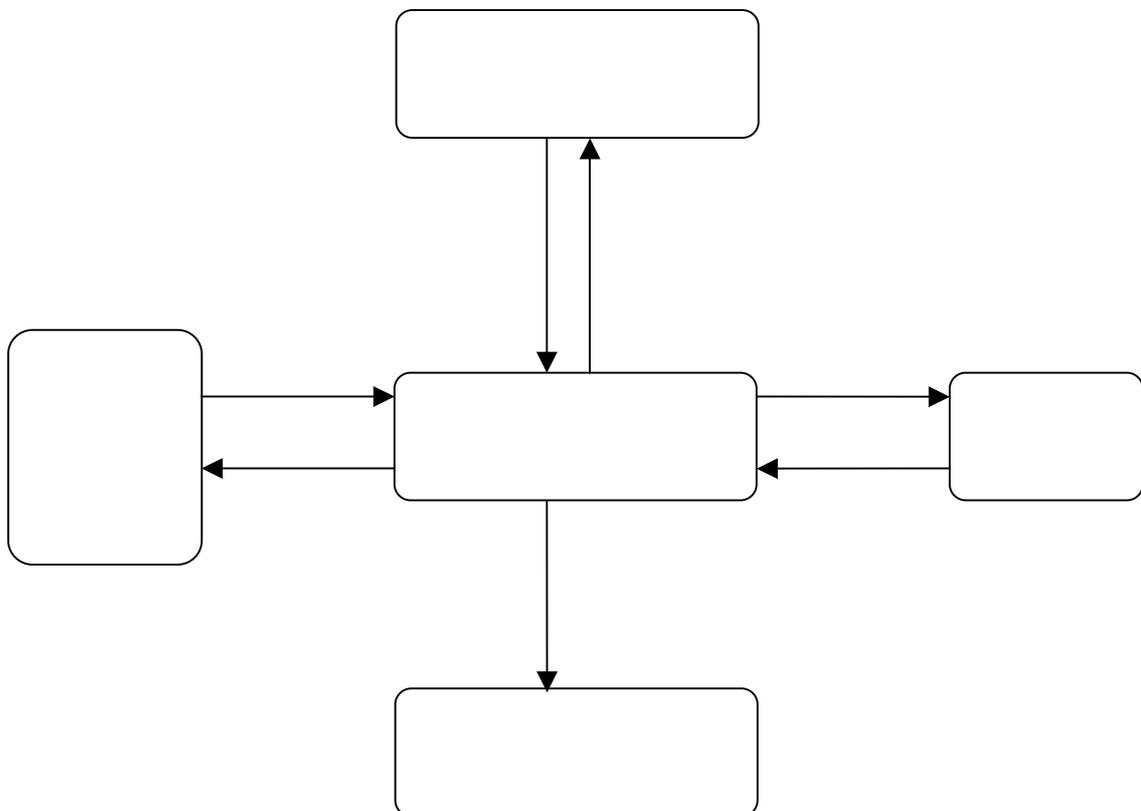


FIGURA 2. Ciclos biogeoquímicos de los metales pesados. Tomada de López J., 2002.

De los 80 elementos que se encuentran en el suelo, sólo una tercera parte son componentes esenciales en plantas y animales (McEldowney, 1993; Stewart, 1989).

5.8 Metales pesados

De los 106 elementos de la tabla periódica, conocidos por el hombre, 84 son metales, por lo que es posible que la contaminación metálica en el ambiente sea alta. Los metales son definidos como cualquier elemento que tienen un lustre plateado, es un buen conductor del calor y la electricidad, presentan una densidad, maleabilidad y ductibilidad alta.

Se denominan metales pesados a aquellos elementos químicos que poseen una masa atómica comprendida entre 63.55 uma (Cu) y 200.59 uma (Hg) y tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm^3 (Barceló, 1989). Cabe destacar que en ésta categoría entran prácticamente todos los elementos metálicos de interés económico, por lo tanto, también de interés minero. La actividad industrial y minera arroja o abandona al ambiente metales tóxicos como plomo, mercurio, cadmio, los cuales se incluyen entre los metales más tóxicos y solubles. Los tres han sido responsables en alguna ocasión de episodios de intoxicaciones muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de formas de vida. A pesar de que este grupo de metales se conoce normalmente como "**metales pesados**" en el también se incluyen otros elementos como el arsénico, más por su toxicidad que por su peso específico. Los metales pesados pueden ser detectados ya sea en su estado elemental, lo que implica que no sufren modificaciones, o se encuentran enlazados en varios complejos con sales y una vez en el ambiente pueden sufrir transformaciones a diferentes formas móviles y/o pueden ser inmovilizados, también pueden permanecer en el ambiente durante varios años.

5.9 Metales en el suelo

El desarrollo industrial y las diferentes actividades relacionadas con el ser humano, han incrementado la liberación de metales.

En el ambiente existen diferentes entradas de metales, los orígenes antropogénicos son numerosos y diversos e incluyen:

- Derrames de contaminantes (hidrocarburos, solventes, industriales, etc.) combustión de aceites fósiles,
- Intemperismo de desechos (jales y terreros mineros, sitios de desechos tóxicos, rellenos sanitarios municipales industriales, zonas agrícolas que utilizan productos químicos como: fertilizantes, herbicidas, fungicidas; etc.),
- Lixiviación de contaminantes (disolución e introducción al medio acuoso).

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

- I. Parte de la estructura de minerales primarios o secundarios.
- II. Precipitados con otros compuestos del suelo.
- III. Sorbidos con sitios de intercambio: óxidos de metal o hidróxidos, minerales arcillosos y materia orgánica que puede servir como intercambiador.
- IV. Disueltos en la solución del suelo, en forma de agua o complejados con ligandos orgánicos e inorgánicos.
- V. Embebidos en microorganismos, plantas o animales.

Una vez en el suelo, los contaminantes experimentan cambios e interaccionan químicamente con otros materiales naturales (sedimentos, suelo, materia orgánica, rocas, minerales, etc.) dando lugar a procesos como: adsorción, precipitación, disolución, especiación, formación de complejos, etc. La disponibilidad de los metales pesados en el suelo está determinada, principalmente por la especie química, las características del suelo (pH, potencial redox, contenido de materia orgánica, contenido y naturaleza de las arcillas, presencia de óxidos de hierro, aluminio y manganeso), así como de las condiciones climáticas

5.10 Fuentes de metales pesados en el suelo

La entrada de metales pesados al suelo se da por dos tipos de fuentes, de forma natural o inducidos antrópicamente. Estos dos tipos de fuentes pueden alterar a los suelos y gradualmente incrementan el nivel de metales tóxicos y estos podrían cada vez más ser absorbidos por las plantas y transferirse hacia la cadena alimenticia. A continuación se describen las dos fuentes:

Fuentes Naturales. Sus aportaciones proceden de las emisiones volcánicas (son las principales fuentes de depositación atmosférica), erosión e intemperización de rocas y la mineralización del material parental del suelo.

Fuentes Antropogénicas. Son las actividades realizadas por el hombre, es la fuente principal de aporte de metales al ambiente. Son complejas, mucho más diversas y tienen una gran variedad de causas, ocasionan diversos problemas y efectos adversos tanto a corto como a largo plazo. Las composiciones, cantidades y las formas de estos suministros varían mucho, influyendo en el comportamiento del metal en el suelo. Las principales fuentes antrópicas por las cuales los metales entran en los suelos son: actividades industriales, actividades mineras, actividades agrícolas, actividades urbanas y domésticas.

5.11 Movilidad de los metales

La movilidad de los iones en el suelo, incluyendo la de los metales pesados, depende de las condiciones de humedad, la velocidad de desplazamiento de la humedad en el suelo, el potencial redox, el pH, la interacción con otros constituyentes de la solución y de la capacidad de intercambio catiónico, entre otras. En general la movilidad de los metales depende de una barrera geoquímica de acumulación. Todas estas variaciones pueden cambiar en distancias cortas y, por lo tanto, la concentración de metales está sujeta a variabilidad espacial y temporal (Streit y Stumm, 1993, citado por Flores *et al*, 1999).

Dowdy y Volk, (1993) citado por Vázquez, (1999) mencionan que el movimiento de metales pesados al interior del suelo ocurre principalmente en la fase líquida, ya sea en forma catiónica o en forma de complejos solubles, por lo cual la intensidad de su movilización estará controlada por la distribución del metal entre la fase sólida y la solución del suelo. Las formas en que se produce el traslado de los metales desde el sitio de formación o de aplicación son similares a las de cualquier otro elemento presente en la solución, esto es, se puede desplazar ya sea por difusión, flujo de masas y por movimiento del metal unido a partículas a través de canales, fisuras o macroporos. La difusión es importante para el traslado a cortas distancias y el flujo se produce generalmente en dirección a la zona de raíces de los cultivos. El flujo de masas juega un papel más importante para el desplazamiento de los metales a grandes distancias.

Colombo *et al.*, (1998) indicaron los diferentes grados del movimiento del metal a lo largo del perfil del suelo, debido al transporte orgánico o a la existencia de grietas y canales dentro del suelo. La movilidad, retención y pérdida de elementos traza están controlados por la precipitación, complejación, adsorción y procesos óxido-reducción.

5.12 Factores físicos y químicos que afectan la retención, movilidad y biodisponibilidad de los metales en el suelo

La toxicidad de un metal pesado no sólo depende de sus propiedades, también depende de las características del suelo donde se encuentre, las más importantes son (Seoáñez, 1999):

- **Potencial de hidrógeno (pH)**

Es un factor esencial. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino.

El pH, es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos.

Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles. Tal es el caso de los siguientes metales: Se, V, As, Cr. La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo (y por tanto, también su solubilidad).

- ***Materia orgánica (MO)***

Reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Los metales una vez que forman quelatos o complejos pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil.

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente algunos metales que pueden quedar en posición no disponible para las plantas. Por eso algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos.

La complejación por la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo.

La estabilidad de los complejos tiende a seguir la siguiente secuencia:
 $Cu > Fe > Mn = Co > Zn$

- ***Salinidad***

El aumento en salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos. Primeramente los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción.

En segundo lugar los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg. Tienden a dar suelos de pH básicos.

5.13 Características de los metales estudiados

Cromo

a) Formas en el suelo

El cromo puede presentarse en varios estados de oxidación, pero las formas comunes más estables son el Cr (III) y el Cr (VI). Estas tienen propiedades químicas diferentes: El Cr (VI) existe como un anión, se extrae fácilmente del suelo y partículas de sedimento y es considerado la forma más tóxica. El Cr (VI) con su alto potencial reductor es fuertemente oxidante y en presencia de materia orgánica el Cr (VI) se reduce a Cr (III) (Cary *et al*, 1977).

b) Usos

El cromo es usado en una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, en la industria del papel, industria química, fertilizantes, metalurgia, y fundidoras (Bradl, 2005).

Nivel promedio establecido de Cr en el suelo oscila de 7 a 221 mg kg⁻¹ (Ramos, 2006).

Cobre

a) Formas en el suelo

El Cu se presenta principalmente en los suelos como ión Cu²⁺ adsorbido en los minerales arcillosos y/o ligados a la materia orgánica.

b) Usos

Este elemento es ampliamente usado para la producción de cables y en la industria eléctrica. Tiene otras aplicaciones como es para elaboración de baterías de cocina, fertilizantes, bactericidas y fungicidas, aditivos de comida, promotores del crecimiento y es un agente para el control de enfermedades en ganadería (Bradl, 2005).

La concentración promedio establecida para el Cu en el suelo es de 6 a 80 mg kg⁻¹ (Ramos, 2006).

Níquel

a) Formas en el suelo

En suelos superficiales se presenta en formas ligadas con compuestos orgánicos, de las cuales solo una parte puede ser fácilmente soluble. Se sabe que una fracción de Ni en el suelo se encuentra en los óxidos de Fe y Mn, y se ha visto que es la forma más disponible para las plantas (Norrish, 1975; Kabata-Pendias y Pendias 2001).

b) Usos

El níquel es encontrado en una gran variedad de productos, por ejemplo en baterías automóviles, implantes quirúrgicos, monedas, entre otros (Bradl, 2005).

Se ha reportado que el valor promedio establecido de Ni en el suelo oscila de 4 a 55 mg kg⁻¹ (Ramos, 2006).

Plomo

Es un metal maleable, dúctil, buen conductor de la electricidad y muy resistente a la corrosión.

a) Formas en el suelo

El Pb se acumula naturalmente en suelos superficiales. Hay un fuerte enriquecimiento de Pb en los suelos provenientes de rocas silíceas. Los principales sitios de Pb en el suelo son la solución del suelo, superficie de adsorción de los complejos de intercambio de arcilla-humus, formas precipitadas, óxidos de Fe y Mn (Petrovic, 1999).

b) Usos

El plomo ha sido utilizado por el hombre hace más de 5000 años. Es un material vital en la industria y es usado principalmente en baterías, pigmentos y en aditivos para gasolina. El contenido de plomo en pesticidas ha sido prohibido en algunos países como Alemania, Austria, Bélgica, pero son todavía utilizados en otros países (Bradl, 2005).

La concentración promedio establecida para el Pb en el suelo es de 10 a 84 mg kg⁻¹ (Ramos, 2006).

Zinc

El zinc es extensamente usado en la industria automotriz, para la producción de capas protectoras de hierro y acero, en cosméticos, pinturas, barnices.

a) Formas en el suelo

El contenido total registrado de Zn en los suelos varía normalmente de 10 a 300 ppm. La solubilidad del Zn^{2+} es altamente dependiente del pH. Otro factor del suelo que aparentemente determina la disponibilidad de Zn es la temperatura.

b) Usos

El zinc es ampliamente necesitado para la manufactura de neumáticos de automóviles, pantallas de televisión, y equipos eléctricos. Las concentraciones de zinc mayores de 100 ppm son consideradas tóxicas (Bradl, 2005).

El nivel promedio establecido de Zn en el suelo varía de 17 a 125 mg kg^{-1} (Ramos, 2006).

5.14 Industrias que presentan mayores emisiones de metales pesados según el elemento

- Cr: industrias procesadoras de cemento, colorantes, curtiduría, material fotográfico, materiales refractarios, metalurgia y pinturas.
- Ni: termoeléctricas, utensilios domésticos, pinturas, cerámica, aceros, metalurgia, joyería, prótesis dentales y quirúrgicas.
- Pb: la combustión de gasolina con Pb, plantas de fundición de metales, pesticidas con arsenato de Pb (ahora en desuso), fertilizantes fosfatados y pinturas con Pb; también el empleo del barro vidriado para cocinar o guardar alimentos.
- As: fertilizantes, pesticidas y la combustión de energéticos fósiles; también existen grandes yacimientos naturales de As en China, India Taiwán, Chile y México.
- Hg: minería (extracción de oro) fabricación electrolítica de Hg, fabricación de equipo eléctrico, industria del papel y celulosa (Cervantes y Moreno, 1999)

6. ANTECEDENTES

De acuerdo con los antecedentes de la actual administración del municipio de Tultitlán de Mariano Escobedo, la empresa conocida como Cromatos de México, operó durante un periodo de 20 años, de 1958 a 1978. La cromita (FeCr_2O_4), materia prima utilizada para la elaboración de los productos cromados era importada de Sudáfrica. Como residuos industriales de la fábrica diariamente se producían 12 toneladas de cromato de sodio, una tonelada de cromato de potasio, ocho toneladas de sulfato de sodio y seis toneladas de hidróxido de aluminio (Congreso de la Unión, 2004, citado en Ledezma, 2006). La producción se realizaba a cielo abierto, sin ningún tipo de control sobre las emisiones de contaminantes a la atmósfera, a las aguas residuales ni para la disposición de los residuos finales. En 1975, se manifestaron las primeras evidencias de daño para la salud humana como perforación del tabique nasal, lesiones renales, problemas cutáneos como ulceración y dermatitis, irritación de las mucosas así como varios tipos de cáncer no especificados (Congreso de la Unión, 2004, citado en Ledezma, 2006). En 1977 la empresa fue cerrada temporalmente y en 1978 fue cerrada definitivamente, instrumentándose algunas medidas de emergencia. En 1979, el inmueble en donde se ubica Cromatos de México fue embargado y posteriormente adjudicado en subasta pública (Gutiérrez, *et al.*, 1985, citado en Ledezma 2006). Tras el cierre de la empresa el lugar se convirtió en un cementerio de residuos industriales, quedando entre 75 mil y 120 mil toneladas de material residual, en su mayoría, cromita (más estable químicamente y menos peligrosa que el Cr), y solo alrededor de un 3% de cromo hexavalente (Gutiérrez, *et al.*, 1985, citado en Ledezma, 2006). En 1985, se llevo a cabo la construcción en el predio de un confinamiento con un área de 16,500 m², el cual resulto inadecuado, dado que no contó con impermeabilización en la base, así como otras especificaciones técnicas necesarias para contener este tipo de material. En poco menos de dos meses se detectaron rupturas y deslizamientos de las paredes del confinamiento, dejando al descubierto el material (Gutiérrez, *et al.*, 1985, citado en Ledezma, 2006). En 1999, después de 15 años en los que se dejó de lado esta problemática; se pensó en la posibilidad de trasladar los residuos a un

lugar de confinamiento especial, por lo que la empresa Residuos Industriales Multiquim S.A. de C. V. (RIMSA), presentó una propuesta para los residuos de cromo y sugirió que se llevará a cabo un estudio sobre la contaminación en mantos freáticos y suelo; sin embargo estos servicios fueron rechazados (PROFEPA, 2003, citado en Ledezma, 2006). En el año 2000, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, en el marco del Programa Nacional de Sitios Contaminados con Residuos Peligrosos, realizó un estudio del cual se desprendió la decisión de declararlo *Zona de Contingencia Ambiental*. En el año 2002, la Secretaria de Ecología del Estado, propuso conformar tres grupos de trabajo interinstitucionales, que abarcaran el campo jurídico, el técnico y el financiero, integrándose autoridades estatales, municipales y federales. Durante el año 2003, se denunciaron por parte de los vecinos del lugar, continuas hemorragias nasales, aunque también se ha reportado que no existe una actitud cooperativa por parte de los habitantes del municipio (PROFEPA, 2003, citado en Ledezma, 2006). Por otro lado, en un intento por llevar a cabo el saneamiento del predio, la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales acordó con la Mesa de Coordinación para la solución problemática ambiental del predio de Cromatos de México en 2003, lo siguiente:

1. Resguardar el predio
2. Analizar las alternativas de restauración
3. Tratamiento y disposición de los residuos
4. Restauración ambiental de predio (SEMARNAT, 2003 citado por Ledezma, 2006).

De acuerdo a la Procuraduría Federal para la Protección al Ambiente (PROFEPA, 2005 citado por Ledezma, 2006), dentro del marco de la cooperación bilateral con Alemania, se encuentran relacionados con Cromatos de México los siguientes elementos:

1. Ejecución del proyecto de la PROFEPA denominado “Seminario sobre las Tecnologías de Identificación, Caracterización y Limpieza de Sitios Contaminados con Residuos Peligrosos”, dentro del proyecto “Promoción Institucional en el Campo de Manejo de Sitios

Contaminados”, presentado por el INE, en colaboración con la Agencia Alemana de Cooperación de Técnica Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)

2. La realización del Curso-proyecto “Remediación de Sitios Contaminados con Residuos Peligrosos” en el marco del convenio “Apoyo a la Gestión de Residuos Peligrosos de la Agencia Alemana de Cooperación de Técnica (SEGEM-GTZ)” firmado en 1999.

En el 2005, la Secretaria de Ecología del Gobierno del Estado de México, anunció que los estudios realizados por la GTZ estaban por concluir, dichos estudios contemplan analizar los contenidos de contaminantes químicos en el suelo (que fueron extraídos de distintas zonas aledañas y del predio), sin embargo el estudio realizado por la GTZ en Cromatos de México forma parte de un proyecto que pretende aprovechar las bases de datos, los criterios y los procedimientos alemanes en la restauración de sitios contaminados como plan piloto (GTZ, 2005), por lo que de ninguna manera se pretende solucionar esta problema ambiental, como han manejado las autoridades locales.

Dado el estado actual del contenedor, los residuos han salido al exterior permeando el suelo y las paredes, por lo que el contacto con los seres vivos se ha incrementado de manera directa.

El riesgo para la población local es inminente, en tanto que estudios realizados en otras partes del mundo revelan que las antiguas cromadoras representan zonas de alto impacto ambiental.

Ledezma, 2006 en su tesis de licenciatura evaluó los efectos genotóxicos de Cr en afloramientos exteriores del confinamiento de la planta de Cromatos de México en poblaciones de mosca *Drosophila melanogaster*. El autor de este trabajo cuantificó las concentraciones totales de Fe, Ni, Cr, As, Cd, y Zn (mediante espectrofotometría de absorción atómica con un equipo Varian SpecterAA-250 Plus); ya que existen reportes acerca de que los tres primeros elementos se encuentran comúnmente asociados en los residuos que

producen las cromadoras y el resto forma parte de las menas de Cr aunque en cantidades mínimas; utilizó muestras ambientales (que obtuvo al raspar la pared externa de la planta Cromatos de México que limita al confinamiento, posteriormente se pulverizó dicho material para ser utilizado en las determinaciones espectrofotométricas de los metales), encontró que los metales más abundantes fueron el Cr (99.40 ppm) y el Fe (42.75 ppm), seguidos del Ni, Zn, Cd y As con concentraciones menores hasta en dos ordenes de magnitud, de manera simultanea especió el Cr para determinar las formas químicas en que se halla, encontró que aproximadamente el 97.79 % corresponde a Cr hexavalente y el 2.21 % restante al Cr trivalente, lo cual significa que la mayor parte del Cr es potencialmente tóxico. De sus resultados observó que los residuos que se filtran hacia el exterior de la planta tienen la capacidad de dañar el material genético de las células reproductoras de los organismos así como producir problemas en el sistema respiratorio y tal vez producir algunos tipos de cáncer.

Finalmente el autor hace la recomendación de declarar el predio de Cromatos de México y la zona aledaña al mismo como “zona de desastre ecológico” y pide se tomen las medidas pertinentes para evitar que continúe la filtración hacia el exterior de los residuos de cromo.

En la ciudad de México se han realizado pocos trabajos sobre temas relacionados con contaminación por metales pesados, de hecho, se realizó un estudio en filtros de aire colectados de cinco estaciones de monitoreo de la ciudad (Mugica *et al.*, 2000) donde evaluaron las variaciones espaciales y temporales de Cd, V, Cu, Mn, Cr, Pb, Fe, Ti y Ni, durante los años de 1996, 1997 y 1998, de manera clara ese estudio muestra que las zonas más contaminadas son noreste y suroeste, el equipo usado para determinar la concentración de cada metal fue un ICP-MS, de su estudio se desprende que el Fe es el elemento con las concentraciones superiores, debido a una combinación de fuentes naturales y antropogénicas.

Posteriormente en otro estudio sobre metales en la ciudad, (Ramos *et al.*, 2001) evaluaron la concentración de metales pesados extraíbles (Pb, Ni, Zn, Cu, Cr y Cd), sales y sodio en suelos de chinampa en Xochimilco y Tlahuac, encontraron que los suelos de esa área tienen pH alcalino y son ligeramente salino-sódicos en las capas superficiales, tienen alto contenido de materia orgánica, en general los metales que estudiaron no rebasan los límites permisibles en algunos casos, además notaron que existe correlación positiva entre el contenido de metales pesados y las propiedades físicas y químicas del suelo.

En otro estudio, Morton *et al.*, 2002, evaluaron la concentración de metales pesados (Zn, Pb, Cu y Cd) en suelos superficiales de la ciudad de México, agruparon a los suelos en categorías en función de las condiciones de tráfico vehicular, y los resultados que obtuvieron muestran que las mayores concentraciones se asocian a sitios de tráfico pesado, siendo el Pb el metal que presentó concentraciones superiores, respecto al resto de los metales estudiados.

Otro trabajo donde evalúan la cantidad de metales en el suelo y en plantas irrigadas con agua residual proveniente de la ciudad de México (Mireles *et al.*, 2004), se realizó en suelos agrícolas del municipio de Mixquiahuala, Hidalgo y de Tláhuac, D.F., ya que estos sitios han sido irrigados con aguas residuales durante 50 años aproximadamente, los metales que estudió este grupo de trabajo fueron Fe, Cr, Co, Mn, Ni, Cu, Zn y Pb, mediante un análisis por PIXE, los resultados de este estudio muestran que elementos como el Cr, Co y Mn están presentes en concentraciones potencialmente peligrosas en suelos de Tláhuac y Mixquiahuala. En el caso del Cu se notó que está presente en cantidades que no se consideran como tóxicas para las plantas, por otro lado el resto de los metales pesados se hallan en niveles traza, esto, probablemente por el alto contenido de materia orgánica y por el pH de 6.9 a 8.6 observado en ambos sitios que inmoviliza a los metales pesados.

En el ámbito nacional, existe un trabajo (Ceron, 1995) donde se determinó la concentración de cromo en vegetales debido a la operación de una fábrica de cromatos (llamada Química Central) en León Guanajuato, el autor analizó 37 muestras de suelos someros y profundos (30 cm) de la zona aledaña a la cromadora y observó que la presencia del Cr en el suelo del área periférica a Química Central se debe básicamente a la dispersión aérea de polvos generados en los diferentes pasos del proceso industrial y a los emitidos por las chimeneas, los cuales son acarreados por el viento y depositados en la zona. De las muestras analizadas la concentración mayor que se encontró fue de 484.9 ppm, el autor utilizó para cuantificar metales la técnica de espectrofotometría de UV, el autor notó que las concentraciones de metales en suelos someros presentan un patrón de distribución más o menos regular.

Observando los estudios similares que se han hecho en el resto del mundo, de acuerdo con Wong 2005, en lo que respecta a América existen reportados siete trabajos sobre contaminación por metales en suelos urbanos, cabe señalar que seis de estos se han realizado en Estados Unidos y uno en Argentina (Lavado *et al.*, 1998); mientras que en Europa desde 1966 se estudia este fenómeno y hay por lo menos, reportados, 16 trabajos al respecto. Sin embargo en el continente asiático, hay más de veinte estudios relacionados con el tema, siendo Hong Kong el país donde más se investiga sobre la influencia de los metales pesados en la contaminación ambiental.

7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

7.1 Localización

El municipio de Tultitlán se localiza en la parte norte-central del Estado de México y pertenece a la región II del mismo. Limita al norte con los municipios de Cuautitlán y Tultepec, al oriente con Jaltenco Ecatepec y Coacalco, al sur con Tlalnepantla y el Distrito Federal y al poniente con Cuautitlán Izcalli.

Las coordenadas geográficas del municipio son: latitud norte en un rango de 19°34'25" a 19°41'20" y longitud oeste en un rango de 99° 03' 46" a 99°03'46", con una altitud media de 2,240 metros sobre el nivel del mar.

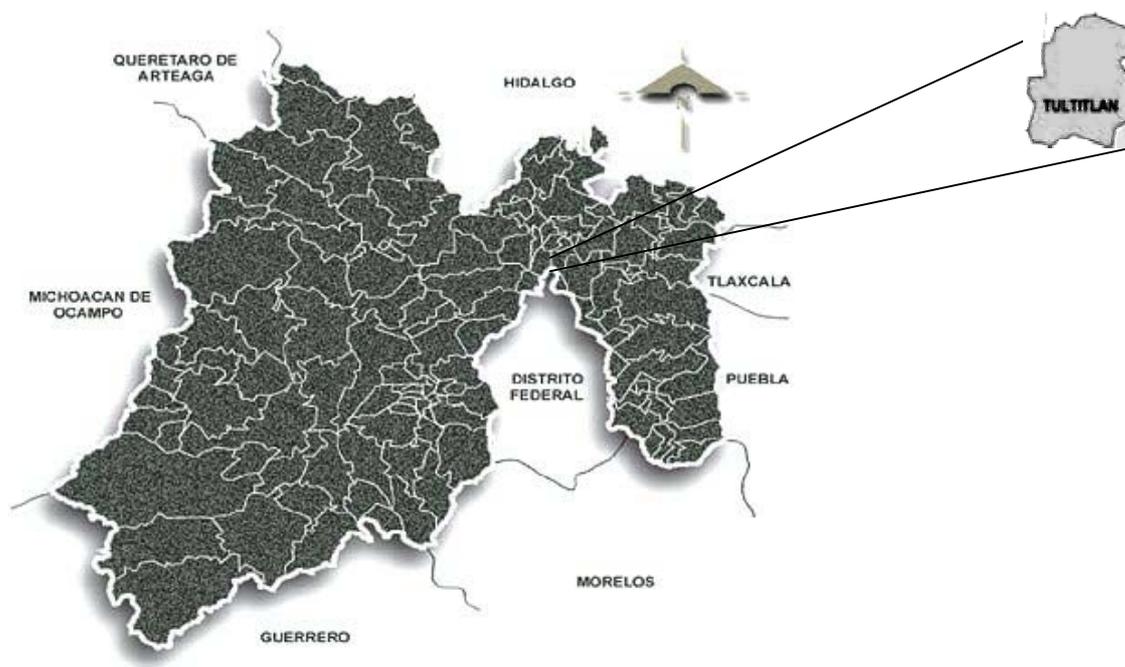


FIGURA 3. Localización del municipio de Tultitlán.

7.2 Extensión

El municipio cuenta actualmente, según los datos oficiales, con una superficie total de 71,087 Km² (INEGI, 2000).

7.3 Orografía

Actualmente el municipio está conformado por dos secciones principales: en la mayor se encuentra la cabecera municipal y la parte sur y suroeste, contando con una extensión de 55.9 kilómetros cuadrados. La segunda sección es la llamada isla municipal, localizada en la zona nororiente, la cual cuenta con 15.1 kilómetros cuadrados, y en ella se localiza el pueblo de San Pablo de las Salinas y una gran cantidad de fraccionamientos, como son Granjas, Unidad Morelos Tercera Sección, Izcalli San Pablo, el Kiosko, etc.

La gran mayoría del territorio municipal está ocupado por una planicie, que tiene un ligero declive de poniente a oriente. El extremo poniente del municipio se encuentra a una altura promedio de 2,248 metros sobre el nivel del mar, y su zona noreste que es la más baja está a 2,238. La parte más alta se localiza al sur, en la sierra de Guadalupe. La cumbre más alta de la sierra dentro del municipio es el cerro Tamazólac.

7.4 Hidrografía

En la actualidad el municipio no cuenta con ríos, arroyos o presas, sino solamente con algunos canales de riego. Entre los principales están los llamados Cartagena y la Acocila, aunque en ambos casos conducen aguas residuales.

7.5 Clima

El clima típico de Tultitlán es el mismo que predomina en la Cuenca y en la ciudad de México, es decir, el llamado subtropical de altura o semiseco. Este clima se caracteriza por ser templado, semiseco y sin invierno muy marcado. Las lluvias por lo general ocurren en los meses de mayo a octubre, y la precipitación promedio anual es de 700 milímetros. La temperatura promedio anual es de 15.7° Celsius. Enero es el mes más frío y las heladas se presentan de diciembre a febrero. Los vientos de septiembre a marzo.

7.6 Principales ecosistemas

Dentro del municipio se aprecian dos áreas bien definidas: 1) la planicie, que antiguamente fue parte de un lago y zonas pantanosas, y que ahora es en su mayor parte área agrícola o urbana, y 2) la Sierra de Guadalupe. Esta última tiene en su parte baja zonas de huizaches, nopaleras y pirúl, en la parte media una zona reforestada con eucaliptos y cedros principalmente. En la parte superior se conserva un bosque de encinos, con algunos madroños y zacatonales. La Sierra de Guadalupe abarca varios municipios y fue declarada parque ecológico a partir de la cota de 2350 metros sobre el nivel del mar.

7.7 Recursos naturales

Entre los recursos se encuentran principalmente el tepetate y la piedra andesita, ambos utilizados como materiales para construcción. Un tercer recurso poco considerado hasta ahora es el suelo fértil, el cual se está perdiendo por el avance de la mancha urbana.

7.8 Características y uso del suelo

El municipio en los últimos 30 años ha pasado de ser agrícola a urbano e industrial. El uso del suelo en la actualidad es el siguiente:

Cuadro 2: Relación de los usos del suelo en Tultitlán¹.

Uso del suelo	Hectáreas	Porcentaje
Agrícola	2,151	30.13
Pecuario	720	10.13
Forestal	780	10.97
Urbano	2,661	37.44
Otros usos	806	11.33

Los tipos de suelos principales son dos: Feozem en las partes bajas y Leptosol lítico en la ladera de la Sierra de Guadalupe.

¹ Fuente INEGI

7.9 Vivienda

De acuerdo a los datos preliminares del Censo General de Población y Vivienda, efectuado por el INEGI en el año 2000, hasta entonces, existían en el municipio 99,366 viviendas en las cuales en promedio habitan 4.35 personas en cada una.

7.10 Vías de comunicación

El municipio está comunicado por medio de la autopista México - Querétaro, la carretera Tlalnepantla - Cuautitlán y la Avenida López Portillo, en los tres casos hacia la ciudad de México y otros municipios. También cruzan las vías de ferrocarril a Pachuca, Laredo y Guadalajara, las cuales parten de la estación de Lechería.

7.11 Principales sectores, productos y servicios

Agricultura

Desde 1970 se consideraba que el 74.52% de la superficie del municipio es apta para la agricultura. Sin embargo, la agricultura se está dejando de lado. Entre los cultivos principales del municipio están el maíz, la alfalfa, el sorgo, el frijol, la calabaza y el maguey.

Ganadería

La ganadería es otra de las actividades que ha venido disminuyendo, prueba de esto es que en Tultitlán apenas el 10.13% de su superficie está dedicada a esa actividad.

Industria

Existen cuatro parques industriales y más de 400 empresas en todo el municipio. Se destacan las de los siguientes ramos: químicas, de empaques de cartón, plásticos, productos de hule, metal-mecánicas, de herramientas, fundiciones, armadora de autobuses, vidrieras, de vinos y licores, envases de acero, de tintas y pinturas. Además en el municipio está la termoeléctrica de Lechería. Cabe mencionar que la actividad industrial del municipio va en aumento y como producto de esta se generan grandes cantidades de metales pesados.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 Etapa de Campo

Consistió en realizar una visita de reconocimiento en la zona industrial de Tultitlán. El método de muestreo fue aleatorio, dado que el interés de este trabajo es determinar que tan contaminada por los metales pesados Cr, Cu, Ni, Pb, Zn se encuentra esta zona; tomando como principal referencia a la empresa Cromatos de México. En este estudio se determinó tomar como valor de fondo una muestra de una excavación de un pozo del sur de la Ciudad de México, porque presenta características edafológicas semejantes a la zona de estudio y no hay presencia de industria química. La selección de los metales que se cuantificaron se hizo con base en los antecedentes que existen acerca de este tema, Moller et al., 2005; Salvagio, 2002; Thuy y Tobschall H. J., 2000.

8.1.1 Muestreo

El muestreo de suelo se llevó a cabo en la zona con evidente presencia de industria química. Se recolectaron 30 muestras de 100g de suelo cada una, repartidas en toda el área de estudio (Figura 4). Debido a que la zona de estudio se encuentra cubierta por pavimento en su mayor parte, la toma de muestras se realizó en función de la disponibilidad de sitios para hacerlo; tratando que las muestras fueran representativas. La distribución sistemática de los sitios de muestreo se dificultó por las siguientes razones:

1. Asfaltado de la mayor parte de área circundante al predio de Cromatos de México.
2. Eliminación casi al 100 % de la vegetación y mascotas en el área.
3. Rechazo de las autoridades de la Secretaria de Salud para aceptar la problemática (Comisiones unidas de medio ambiente y recursos naturales y de desarrollo Metropolitano, Congreso de la Unión, 2004, citado por Ledezma, 2005).

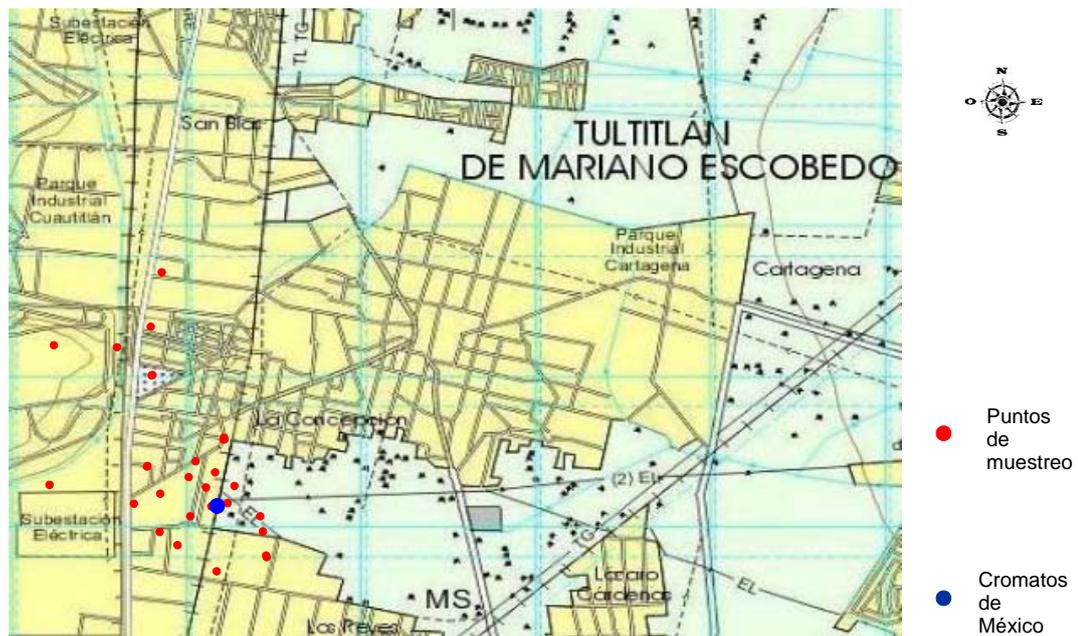


FIGURA 4. Ubicación de los sitios de muestreo en la zona de estudio.

8.1.2 Toma de la muestra

En cada sitio se tomó una muestra en el espesor del suelo 0-10 cm con base en lo reportado en trabajos del Instituto Nacional de Ecología (Cuadro 3). La distancia máxima a la que se tomaron las muestras es de 1Km ya que se pretende muestrear sólo los alrededores del predio de Cromatos de México; por este motivo no se amplía la extensión del muestreo.

Cuadro 3. Profundidad recomendada para la toma de muestras en función del objetivo del muestreo¹.

<i>Objetivo del muestreo</i>	<i>Profundidad recomendada</i>
Riesgo de contaminación en acuíferos	Por horizontes
Riesgo a la salud	De 0 a 10 cm.
Afectación a microorganismos del suelo	Horizonte A
Fertilidad	Espacio radical (0-30 cm.)

¹ Fuente INE, 2005.

8.1.3 Manejo de la muestra

Todas las muestras de suelo recolectadas se almacenaron en bolsas de plástico, fueron trasladadas al Laboratorio ICP-MS en el Instituto de Geofísica de la UNAM para ser analizadas.

8.2 Etapa de Laboratorio

La descripción del principio del método, procedimiento, material, reactivos y equipo utilizado en cada determinación se muestran en el **ANEXO 1**.

Se analizaron 30 muestras de la zona de Tultitlán, así como 2 muestras control tomadas de la zona de Texcoco (valor de fondo), para la cuantificación de metales totales se hizo por duplicado al azar el 20 % de la muestras (Porcentaje Relativo de Diferencia, tomado de US EPA, 1982), mientras que en la determinación de parámetros químicos se hizo una repetición y los valores que se muestran son los promedios.

8.2.1 Determinación de parámetros físicos y químicos

- **Potencial de hidrógeno (pH).**

Se midió en una suspensión de suelo:agua destilada en relación 1:2 (masa:volumen). La determinación se realizó con un conductímetro digital marca HANNA Instruments modelo HI 255 calibrado con soluciones buffer de pH de 4 y 7 (NOM-021-SEMARNAT-2000)

- **Contenido de materia orgánica (MO).**

El contenido de materia orgánica se determinó mediante la técnica de Walkley y Black, la cual consiste en destruir la materia orgánica contenida en una muestra, oxidándola por medio de la adición de una mezcla de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), dejándola digerir por un período de tiempo, para luego realizar una determinación volumétrica con sulfato ferroso del material no oxidado y así determinar la cantidad de MO de la muestra (NOM-021-SEMARNAT-2000).

- **Conductividad eléctrica (CE).**

Se midió en una suspensión de suelo:agua destilada en relación de 1:5 (masa:volumen). La conductividad se midió con un conductímetro digital marca HANNA Instruments modelo HI 255 (Etchevers *et al*, 1996).

8.2.2 Análisis de metales pesados totales en suelos

La cantidad de metales pesados totales en el suelo se determinó utilizando 0.25 ± 0.02 g de muestra, digerida con una mezcla de HF tridestilado y HClO₄ (2.5:1, vol:vol) en recipientes de PFA (perfluoralcoxy) (Hernández *et al*, 2004). La cuantificación de metales se hizo mediante un ICP-MS marca VG-Elemental modelo Plasmaquad 3.

El material de referencia certificado usado para cuantificar metales totales fue el Standard Reference Material 2586 (NIST).

8.3 Etapa de Gabinete

En la cual se realizaron los gráficos, tablas y mapas, así como el análisis de todos los resultados.

Los resultados cuantitativos obtenidos en cada determinación se presentan en los cuadros 4 y 6.

El cálculo del coeficiente de correlación, Índice de geoacumulación, factor de enriquecimiento y la estadística descriptiva (valores máximo y mínimo, así como desviación estándar y promedio) se obtuvieron con el programa Excel (Microsoft Office 2003).

Los gráficos y tablas se generaron con el programa Sigma Plot 9.0 (SYSTAT Software).

Los mapas geoquímicos (mapas de contorno) para evaluar la distribución espacial tanto de los parámetros físicos y químicos como de los metales pesados se generaron con el programa Surfer 8.0 (Golden Software 2002).

El mapa base para elaborar los mapas geoquímicos se obtuvo a partir de la carta geográfica del Estado de México (INEGI 2000).

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Descripción de los resultados

9.1.1 Parámetros físicos y químicos de los suelos

Cuadro 4. Valores obtenidos en la determinación de los parámetros fisicoquímicos hechas a cada muestra de suelo.

MUESTRA	pH (1:2)	MO (%)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
1	7.78	2.88	522.48
2	8.23	9.44	1741.93
3	6.19	3.43	1012.22
4	7.81	1.35	396.06
5	7.70	0.30	448.23
6	8.78	2.48	491.53
7	7.82	7.17	219.97
8	9.18	12.29	388.66
9	7.03	4.22	711.74
10	8.16	3.89	361.67
11	5.54	7.55	1083.77
12	8.03	2.87	401.48
13	8.28	11.30	290.16
14	7.05	2.17	392.12
15	7.43	0.93	1081.96
16	7.03	1.90	310.87
17	6.63	4.65	298.17
18	8.44	10.60	378.55
19	9.29	5.22	209.60
20	8.27	1.97	131.93
21	7.86	4.94	137.44
22	8.44	3.14	243.01
23	8.66	1.37	191.79
24	8.54	2.79	292.27
25	8.48	1.61	154.77
26	8.48	2.19	487.86
27	6.47	1.04	1404.12
28	8.82	2.86	1101.22
29	9.41	8.77	425.36
30	8.63	3.72	146.69

Cuadro 5. Resumen de los valores obtenidos para los parámetros fisicoquímicos en comparación con el valor de fondo.

	pH (1:2)	Materia Orgánica (%)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Valor Mínimo	5.54	0.30	131.93
Valor Máximo	9.41	12.29	1741.93
Valor de fondo (Control)	8.14	5.31	61.42

El pH se determinó en agua (proporción 1:2), de los valores obtenidos se observa que presentan una distribución heterogénea, los datos oscilan entre 5.54 y 9.41, cabe mencionar que los valores obtenidos clasifican a los suelos como moderadamente ácidos a fuertemente alcalinos (NOM-021-SEMARNAT-2000). Banat *et al.*, 2005, encontraron en suelos urbanos de la zona centro de Jordania un pH que oscila entre 5.79 y 9.50, el cual es similar al reportado en el presente trabajo.

A partir del cuadro 5 es posible determinar que en el caso del pH el valor de fondo (8.14) es ligeramente menor que el valor máximo obtenido (9.41), se aprecia que el 50 % de las muestras está por arriba del valor de fondo, como ya se mencionó los valores sitúan a los suelos en el rango de la alcalinidad, a excepción de tres muestras que presentan valores de pH ligeramente ácidos.

El contenido de materia orgánica se determinó mediante el método de Walkley y Black que se basa en la oxidación del carbono orgánico, los valores obtenidos oscilan entre 0.3 y 12.29, lo cual de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 es indicativo de que va de muy bajo a muy alto.

Debe mencionarse que la muestra control presenta un porcentaje de 5.31 que lo sitúa en la categoría de alto porcentaje de materia orgánica; debe mencionarse que de las treinta muestras solo nueve están por arriba del valor control, ver cuadro 4. En un trabajo realizado en suelos urbanos del centro de Jordania (Banat *et al.*, 2005) el contenido de materia orgánica se encuentra en el rango de 0.3 a 4.9 %, el valor mínimo coincidentemente es igual al obtenido en este trabajo, a diferencia del máximo que es inferior en el suelo urbano de Jordania.

El alto contenido de materia orgánica del 50 % de las muestras favorece la formación de complejos poco móviles, disminuyendo la captación de los metales por las raíces de las plantas lo cual consistentemente muestra que la posibilidad de que los metales sean absorbidos e incorporados a las cadenas tróficas es muy baja; de acuerdo a lo reportado, la materia orgánica puede adsorber tan fuertemente algunos metales que pueden quedar en posición no disponible para las plantas (Adriano, 2001), mientras que en el resto de las muestras el porcentaje de materia orgánica es bajo o casi inexistente.

La conductividad se usa como índice de salinidad en los suelos (Chapman, 1991), se determinó en solución acuosa proporción 1:5 (Richards, 1990 citado por Etchevers *et al.*, 1996), los valores obtenidos se sitúan en un rango de 131.93 a 1741.93 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

De acuerdo con NOM-021-SEMARNAT-2000 los valores de conductividad ubican a los suelos estudiados en la categoría de suelos con efectos despreciables de salinidad a suelos muy ligeramente salinos. El valor obtenido para la muestra control se encuentra muy por debajo de los valores encontrados, el valor mínimo es dos veces mayor que el control, mientras que el valor máximo es casi treinta veces superior al control, lo cual indica claramente la diferencia significativa entre la conductividad eléctrica entre una y otra zona. Las medidas de conductividad permiten conocer de manera indirecta el contenido de sales disueltas presentes en la solución del suelo (Chapman, 1991). Los valores de conductividad obtenidos no favorecen la complejación de los metales pesados, dado el escaso contenido salino y por

tanto de aniones complejantes; limitando de esta forma la movilidad de los metales (Seoáñez, 1999).

Tomando en cuenta lo anterior se puede saber que en la mayoría de muestras el Cu, Ni, Pb y Zn se encuentran adsorbidos y fijados en los suelos analizados, debido al pH alcalino que presentan, no así para el caso del Cr, el cual se vuelve más disponible a pH alcalino (Seoáñez, 1999; Kabata Pendias, 2001; Adriano, 2001; Ahmad, 2005); como ya se mencionó, solo tres de las treinta muestras presentan un pH ligeramente ácido, las muestras 11, 18 y 27 presentan pH de 5.54, 6.63 y 6.47 respectivamente lo cual es indicativo de que en esos puntos específicos los metales pesados (Cu, Ni, Pb y Zn) se encuentran disponibles y móviles, y por tanto, representan un riesgo potencial para la salud; por otra parte, en esos mismos puntos el Cr no se encuentra disponible ni móvil, por lo que en el restante 90 % de las puntos muestreados el Cr es un contaminante importante dada su disponibilidad y movilidad.

Por su parte el alto contenido de materia orgánica en la mitad de las muestras favorece la formación de complejos metálicos basados en la capacidad de quelación de los componentes orgánicos, sin embargo el bajo contenido de sales, determinado a partir de la conductividad eléctrica limita la movilización de los metales (Seoáñez, 1999, Ahmad 2005).

9.1.2 Metales pesados totales en los suelos

Cuadro 6. Valores obtenidos en la determinación de la concentración de los metales pesados en las muestras de suelo.

MUESTRA	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
1	168.30	48.553	23.135	130.74	431.76
2	222.50	39.676	32.152	68.212	136.29
3	123.80	131.08	49.057	275.72	407.39
4	15.03	10.676	5.042	117.77	41.284
5	58.81	47.202	28.071	89.855	329.4
6	105.00	95.296	27.958	152.72	194.88
7	87.30	327.34	28.553	81.764	652.99
8	77.35	97.776	22.682	77.363	191.01
9	45.65	43.547	15.15	165.48	142.73
10	56.57	135.09	22.134	103.93	220.6
11	69.05	55.357	25.314	153.12	394.11
12	75.16	33.835	21.726	65.645	122.27
13	1837.00	28.579	51.06	78.129	165.53
14	294.20	38.512	30.38	129	172.21
15	69.33	62.171	38.088	71.055	277.02
16	131.20	107	25.289	343.13	269.81
17	47.90	25.63	20.922	20.729	68.288
18	173.10	41.254	49.983	116.31	178.39
19	40.32	17.547	21.207	17.381	54.807
20	101.50	101.7	18.292	255.58	385.38
21	37.28	32.264	19.829	62.619	149.51
22	47.28	39.949	27.448	94.254	316.2
23	54.34	21.671	21.594	15.858	67.349
24	33.38	23.204	35.328	11.03	87.567
25	41.33	16.516	16.717	10.395	46.273
26	222.10	23.07	14.247	22.68	72.444
27	550.20	69.046	50.23	169.01	207.9
28	229.10	687.69	36.257	138.5	1092.7
29	146.70	74.15	24.348	116.78	307.74
30	54.365	50.189	33.026	84.492	125.627

Para comprender mejor el comportamiento de los metales en el suelo se tiene el siguiente cuadro; al mismo tiempo en el cuadro se comparan las concentraciones obtenidas con las que corresponden al valor de fondo y a las reportadas en la normatividad correspondiente.

Cuadro 7. Descripción de las concentraciones máxima y mínima (ppm) obtenida para cada metal pesado, así como la comparación con el valor de fondo, concentración natural en suelos de cada elemento y el límite máximo permisible para cada elemento.

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Concentración Mínima	15.03	10.67	5.042	10.39	41.28
Concentración máxima	1837.00	687.69	51.06	343.13	1092.70
Concentración natural en suelos reportada en la literatura ¹	5-100	2-40	5-50	2-60	10-80
Concentración de fondo	93.00	26.00	45.00	17.50	83.00
Límite máximo permisible	280 ²	3100 ³	1600 ³	400 ³	2300 ⁴

¹ Fuente: LFU, 1989 citada por Navarrete 2005

² Norma oficial mexicana **NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004**

³ Normatividad de la EPA (Región 9)

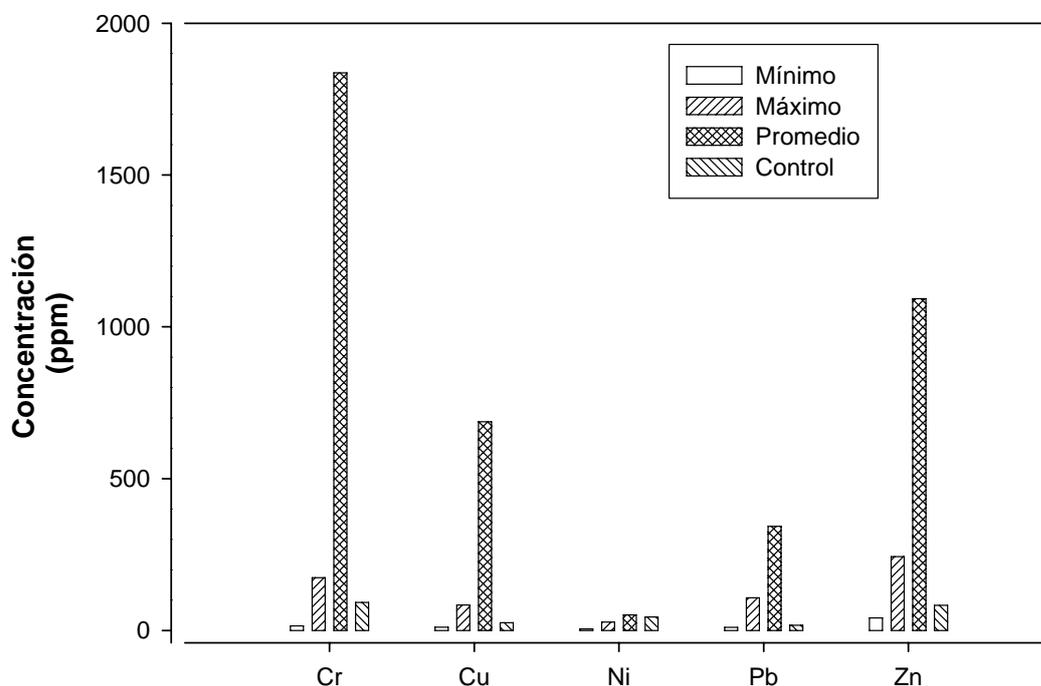


Figura 5. Representación gráfica de las concentraciones encontradas para cada metal pesado.

El cuadro 7 y la figura 5 resumen de manera clara lo que sucede con el contenido de los metales pesados en las distintas muestras de suelo.

En cuanto al contenido de cobre, las concentraciones se encuentran en el rango de 10.67 a 687.69; esto indica que las concentraciones de cobre están dentro del límite máximo permisible establecido por la EPA (3100 ppm). Además el 80 % sobrepasa la concentración obtenida para el valor de fondo (26 ppm), más aún el 50 % de las mismas está fuera del rango de concentración de Cu establecido como natural para suelos (2-40 ppm).

Por otro lado, el contenido de níquel presenta concentraciones que van de 5.04 a 51.06, cabe mencionar que ninguna muestra excede el límite máximo permisible (1600 ppm según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), no

obstante, solo cuatro muestras (3, 13, 18 y 27) presentan valores de concentración superiores al valor de fondo (45 ppm), además solo dos

RESULTADOS

muestras (13 y 27) tienen valores superiores a la concentración establecida como natural para suelos (5-50 ppm, de acuerdo a LFU 1989, citado por Navarrete, 2005).

De acuerdo con Ledezma (2006), la concentración media de Ni que encontraron en el material que se filtra del contenedor de la planta de Cromatos de México es de 0.30000 ppm, es decir casi 100 veces menor que lo encontrado en este trabajo, sin embargo, es comprensible dado que la dispersión de este metal ha ocurrido desde hace 30 años aproximadamente, y se ha acumulado en los suelos durante este periodo de tiempo.

Por lo que respecta al contenido de plomo, se observa que los valores obtenidos se encuentran entre 10.39 y 343.13, el 90 % de las muestras sobrepasa el contenido de Pb obtenido para el valor de fondo (17.50 ppm), según lo señalado por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la muestras, en general, se encuentran dentro de límite permisible (400 ppm), mientras que el 80 % de las mismas están fuera del rango de 2 a 60 ppm establecido como natural para suelos (Navarrete, 2005).

Por otra parte el contenido de Zn fluctúa entre 41.28 y 1092.70, Ledezma (2006) reporta que, en promedio, el material que se filtra del contenedor de residuos de Cromatos de México contiene 0.19900 ppm, de esta manera se observa que demasiado inferior la cantidad que se filtra de la planta, sin embargo ocurre que después de un largo periodo de dispersión se acumula sobre los suelos aledaños y es así como se encuentran concentraciones tales como las determinadas en este trabajo. Ninguna de las muestras supera el límite máximo permisible establecido por la EPA (2300 ppm), aproximadamente el 85 % de las mismas presenta valores fuera de la concentración de 10-80 ppm establecido como natural para los suelos (LFU 1989, citado por Navarrete, 2005), debe notarse que solo cuatro de las treinta muestras tienen concentraciones menores a la que presenta el valor de fondo (83 ppm) lo cual

indica que cerca del 90 % de las muestras están contaminadas con Zn en comparación con el valor de fondo.

RESULTADOS

El rango en el cual se ubica los valores del cromo es de 15.03 a 1837 ppm, en este punto es importante mencionar que de acuerdo con Ledezma (2006) el promedio de concentración de cromo en el material que se filtra del contenedor de Cromatos de México es de 99.40000 ppm, en este caso el contenido promedio de Cr concuerda con los datos obtenido en este trabajo, puesto que el principal metal pesado contaminante presente en los residuos confinados en el contenedor de Cromatos de México es el cromo. Por otro lado se aprecia que el Cr es el único de los elementos que presenta valores que sobrepasan el límite máximo permisible (280 ppm según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), las muestras 13, 14 y 27 presentan las concentraciones más altas (1837, 294.2 y 550.2 ppm respectivamente), según lo reportado por la LFU, citado en Navarrete, 2005, la concentración normal en suelos es de 5-100 ppm lo cual refleja que aproximadamente el 50 % de las muestras está por arriba del valor reportado como normal para suelos, de tal manera que podemos encontrar valores que van desde una hasta dieciocho veces por arriba dicho valor. Aproximadamente el 50 % de la muestras tiene concentraciones de Cr por debajo del valor de fondo.

Bajo estas condiciones se aprecia de manera consistente que el Pb es el elemento que se encuentra en mayor proporción que los demás; esto sin duda se debe a que el plomo es un elemento ampliamente utilizado en un gran variedad de actividades y por tanto es lógico que sea el más abundante de los cinco metales analizados, por su parte el cromo es el único que muestra al menos un valor que excede al límite máximo que se permite en suelos, si bien el resto de los metales no es significativamente contaminante, debe ponerse atención en la fuente de emisión de tales metales pues, en general, el 50 % de las muestras presenta valores que son superiores al valor de fondo y al mismo tiempo, exceden la concentración establecida como valor natural en suelos.

9.2 Evaluación por distancia

9.2.1 Metales pesados en los suelos

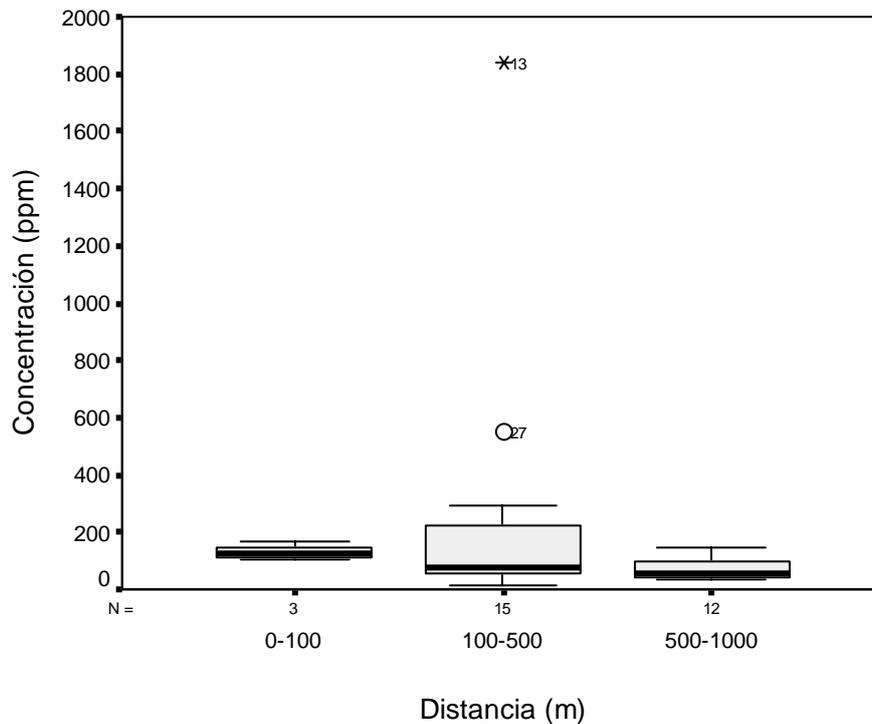


FIGURA 6. Concentración de Cr en relación con la distancia de Cromatos de México, donde N es el número de datos en ese rango, a, b y c representan la distancia de 0 a 100, 100 a 500 y 500 a 1000 metros respectivamente.

Se encontró que entre los 0 y 100 metros se encuentran los valores intermedios de concentración para el cromo, sin embargo entre los 100 y 500 metros se encuentran los valores máximo y mínimo, de hecho a los 300 metros se encuentran las concentraciones más altas de dicho metal, de manera gráfica se muestra en la figura 6, asimismo se aprecia en la figura que las muestras 13 y 27 no tienen el mismo comportamiento que el resto de las muestras, finalmente debe enfatizarse en como decrece la concentración conforme aumenta la distancia de la fuente de emisión tal como lo reporta Hazlett, 1984.

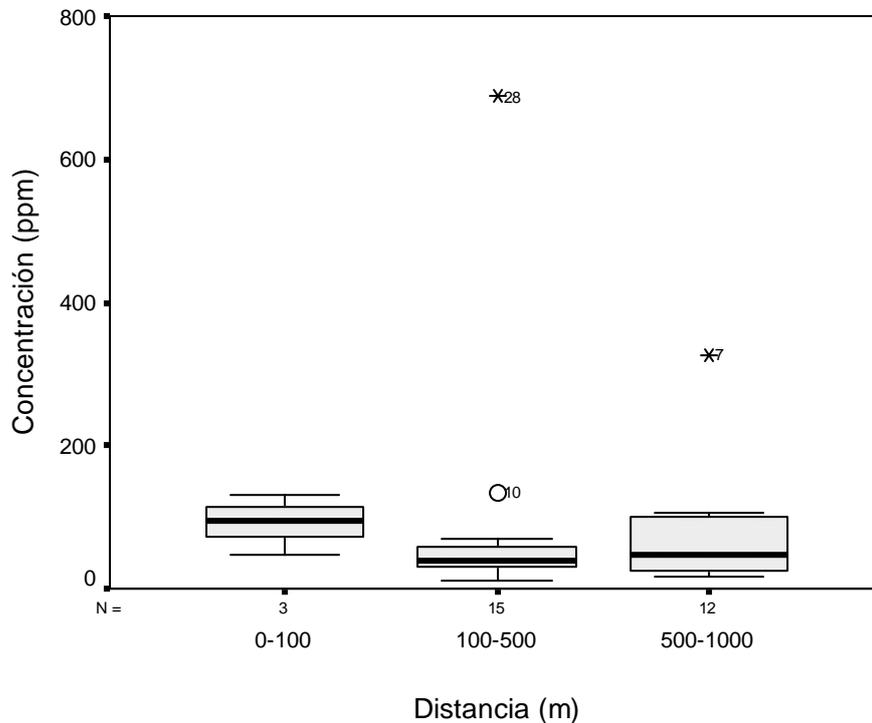


FIGURA 7. Concentración de Cu en relación con la distancia de Cromatos de México, donde N es el número de datos en ese rango, a, b y c representan la distancia de 0 a 100, 100 a 500 y 500 a 1000 metros respectivamente.

La figura 7, ilustra de manera clara como entre los 0 y 100 metros de distancia de la planta se encuentran las concentraciones intermedias de cobre, de 100 a 500 metros se ubican los valores máximo y mínimo, mientras que en el rango de 500 a 1000 metros se presentan algunos de los valores intermedios, no obstante tres de las muestras (7, 10 y 28) no siguen el mismo comportamiento que el resto de las muestras, en otro orden de ideas, si bien no se puede establecer una relación inversamente proporcional entre la distancia y lo concentración de Cu, como la que han reportado Hutchinson y WHitby, 1974; y Kandeler *et al*, 1992, citados por Theocharopoulos, 2001, es posible observar una disminución relativa de la concentración de cobre conforme se aleja de la fuente de emisión.

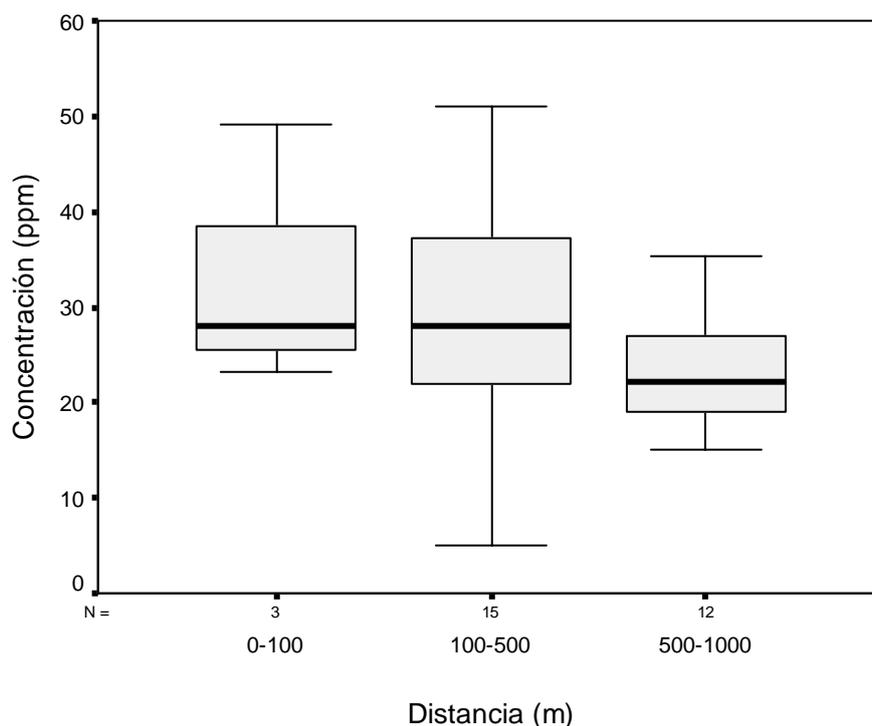


FIGURA 8. Concentración de Ni en relación con la distancia de Cromatos de México, donde N es el número de datos en ese rango, a, b y c representan la distancia de 0 a 100, 100 a 500 y 500 a 1000 metros respectivamente.

En el caso del níquel se aprecia, a partir de la figura 8, que entre 0 y 100 metros de distancia se encuentran algunos de los valores más altos encontrados, mientras que de 100 a 500 metros se encuentran los valores máximo y mínimo 51.060 y 5.042 respectivamente, además entre los 500 y 1000 metros se encuentran los valores intermedios que van de 15.150 a 35.328. En este caso todos los datos presentan el mismo comportamiento. Ocurre para el níquel algo similar al Cu, pues en tanto no hay una relación inversamente proporcional a la distancia se logra observar un descenso de concentración al aumentar la distancia de la fuente emisora de Ni.

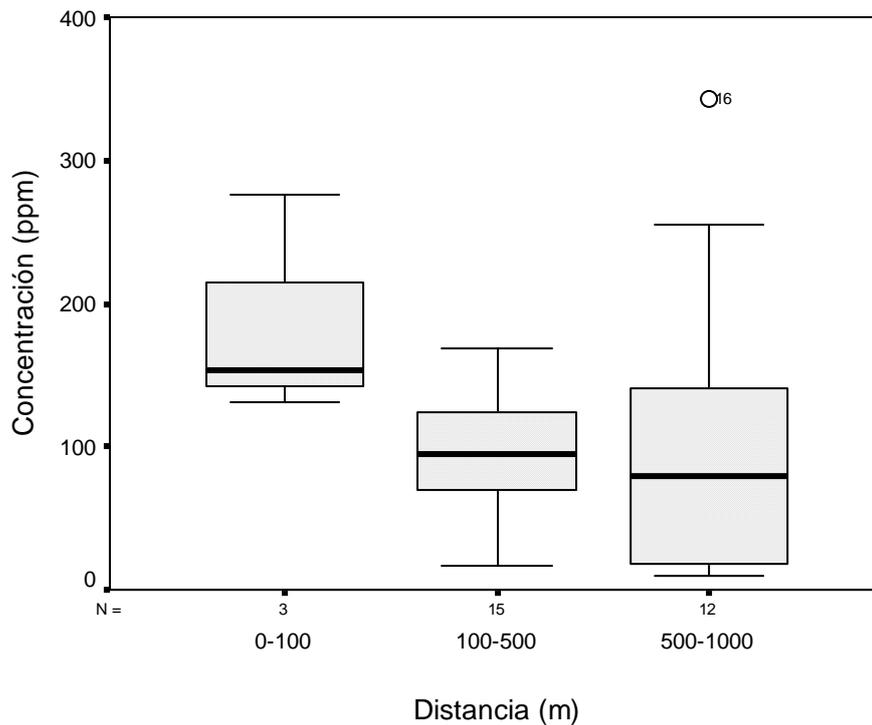


FIGURA 9. Concentración de Pb en relación con la distancia de Cromatos de México, donde N es el número de datos en ese rango, a, b y c representan la distancia de 0 a 100, 100 a 500 y 500 a 1000 metros respectivamente.

En la figura 9 se aprecia claramente que de 0 a 100 metros se encuentran concentraciones relativamente altas de plomo, de 100 a 500 metros se encuentran los valores intermedios y consistentemente se observa que de 500 a 1000 metros se encuentra un amplio rango de concentraciones, ya que a esa distancia se ubican el valor máximo y el mínimo; solo la muestra 16 presenta un comportamiento distinto al resto de los datos obtenidos para esta determinación.

A partir de lo anterior se debe decir que disminuye la concentración de Pb al aumentar la distancia de la fuente de emisión, en este caso Cromatos de México.

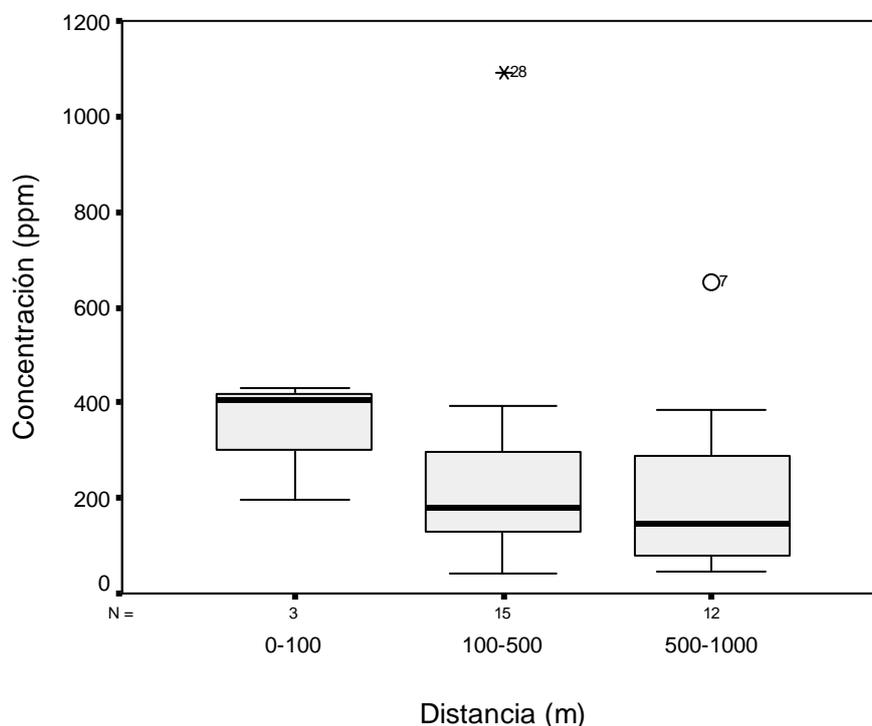


FIGURA 10. Concentración de Zn en relación con la distancia de Cromatos de México, donde N es el número de datos en ese rango, a, b y c representan la distancia de 0 a 100, 100 a 500 y 500 a 1000 metros respectivamente.

En el caso del zinc se aprecia que de 0 a 100 metros se encuentran los valores altos, y de 100 a 500 metros se encuentra el valor máximo y el mínimo, de 500 a 1000 metros se encuentran algunos de los valores intermedios. Las muestras 7 y 28 se comportan de manera diferente al resto de ellas y precisamente son estas las que presentan los valores más elevados para el Zn. Se aprecia también al igual que en los casos del Cu y el Ni un ligero descenso de concentración al alejarse de Cromatos de México por lo que también se aprecia que es esta la fuente de emisión de Zn.

9.3 Factor de Enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento se calculó usando la fórmula:

$$FE = C_n/B_n;$$

donde C_n es la concentración promedio del elemento analizado en la muestra y B_n es la concentración promedio del elemento analizado en la muestra control (valor de fondo).

El factor de enriquecimiento muestra el número de veces que la concentración promedio de un metal sobrepasa la concentración control promedio para el mismo metal; por tanto, de manera general se aprecia que el factor de enriquecimiento más elevado es el que corresponde al plomo (6.17) esto nos indica que la concentración promedio de Pb supera a la concentración del valor de fondo seis veces, en cuanto al FE del resto de los elementos tenemos, en orden descendente para el Cu, Zn, Cr y Ni, 3.23, 2.93, 1.86 y 0.61 respectivamente.

CUADRO 8. Valor del Factor de Enriquecimiento obtenido para cada metal pesado.

Metal	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
FE	3.23	1.86	0.61	6.17	2.93

El cuadro 8 y la figura 11 expresan de manera consistente cual es el metal pesado encontrado en los suelos analizados que sobrepasa de manera significativa la concentración encontrada en el valor de fondo. Dicho lo cual se tiene que, en orden decreciente, el F.E. para cada metal es :

$$Pb > Cu > Zn > Cr > Ni$$

Factor de Enriquecimiento

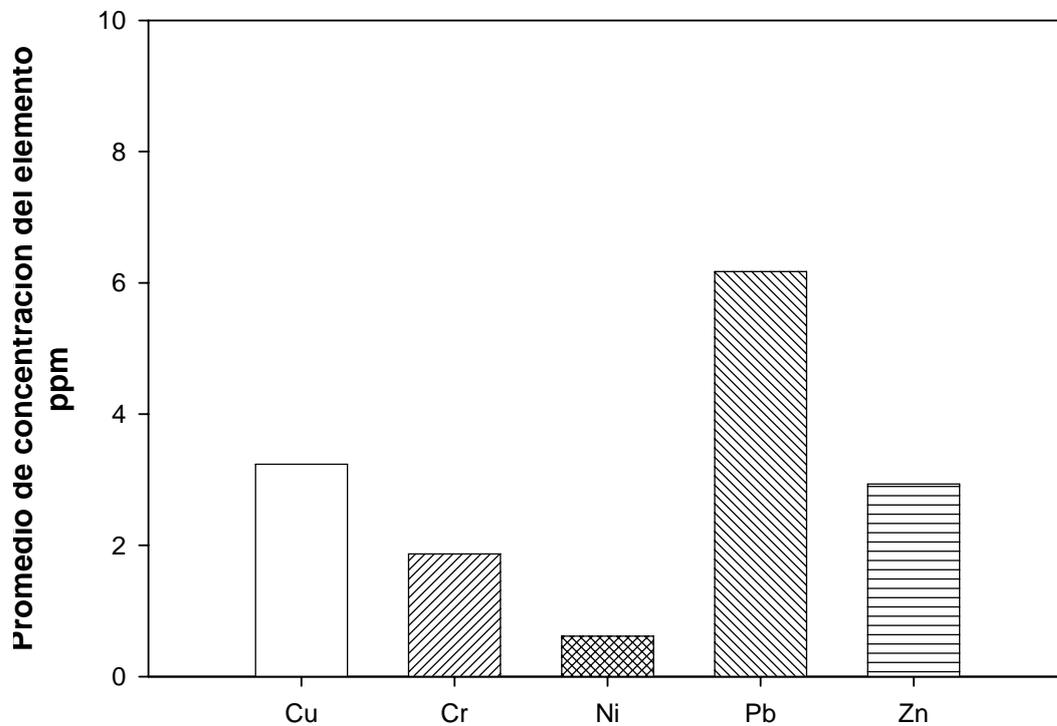


FIGURA 11. Representación gráfica del valor del Factor de Enriquecimiento obtenido para cada metal pesado.

Los resultados que se obtuvieron para el Factor de Enriquecimiento muestran que el plomo es el elemento más abundante, en ese sentido, se puede comprender pues como se ha reportado (Cervantes y Moreno, 1999) este elemento es empleado en un sinnúmero de actividades tanto de tipo industrial como doméstico y al estar analizando suelos de una zona urbana es de esperar un resultado como el obtenido en este trabajo. Por su parte el Cu y el Zn muestran un FE muy semejante, lo cual puede deberse a que provienen del mismo origen y por tanto sobrepasan el mismo número de veces (3 veces) la concentración encontrada de este par de elementos en el valor de fondo. En cuanto al Cr y al Ni el FE es relativamente bajo, lo cual significa que su concentración no es significativamente superior en los suelos analizados en comparación con el valor de fondo.

9.4 Índice de geoacumulación (I-geo)

El índice de geoacumulación se calculó con la fórmula (Muller, 1969; Ntekim *et al.*, 1993):

$$I\text{-geo} = \log_2 (C_n/1.5B_n);$$

donde C_n es la concentración promedio del elemento analizado en la muestra y B_n es la concentración promedio del elemento analizado en la muestra control (valor de fondo); la manera en que se calculó se muestra en el anexo 2.

El índice de geoacumulación es una medida cuantitativa de la extensión de la contaminación superficial por metales en el suelo de una región determinada, y por tanto, provee las bases para valuar la distribución espacial de metales entre sitios (Ruiz, 1999); el cuadro 9 y la figura 12 resumen los resultados obtenidos a partir del cálculo del índice de geoacumulación.

Como ya se mencionó el índice de geoacumulación sirve para determinar el grado de contaminación por metales pesados en el suelo, asimismo a partir de este cálculo se puede hacer una clasificación de los suelos (Muller, 1969 y Ntekim *et al.*, 1993, ver anexo 2), como la que se muestra en el cuadro 9.

Los índices de geoacumulación de Pb, Cu, Zn, Cr y Ni fueron 1.23; 0.65; 0.59; 0.37 y 0.12 respectivamente, lo cual indica que el Pb es, en promedio, el elemento más abundante, esto indica que los suelos están moderadamente contaminados con Pb y están no contaminado a moderadamente contaminado con Cu, Zn, Cr y Ni según Muller, 1969 y Ntekim *et al.*, 1993, de manera similar que el factor de enriquecimiento se tiene para el índice de geoacumulación:

$$Pb > Cu > Zn > Cr > Ni$$

De lo anterior se desprende que la contaminación en la zona aledaña a la planta de Cromatos de México es ligera o nula para la mayoría de los metales analizados en este trabajo (Cu, Zn, Cr, Ni), a excepción del plomo.

CUADRO 9. Determinación del I-geo así como el grado de este y la clasificación de la intensidad de la contaminación en función del valor obtenido para cada metal pesado.

	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
I-geo ⁴	0.64	0.37	0.12	1.23	0.58
Clase del I-geo	1	1	1	2	1
Intensidad de la contaminación	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado	Moderadamente contaminado	No contaminado a moderadamente contaminado

Índice de geoacumulación

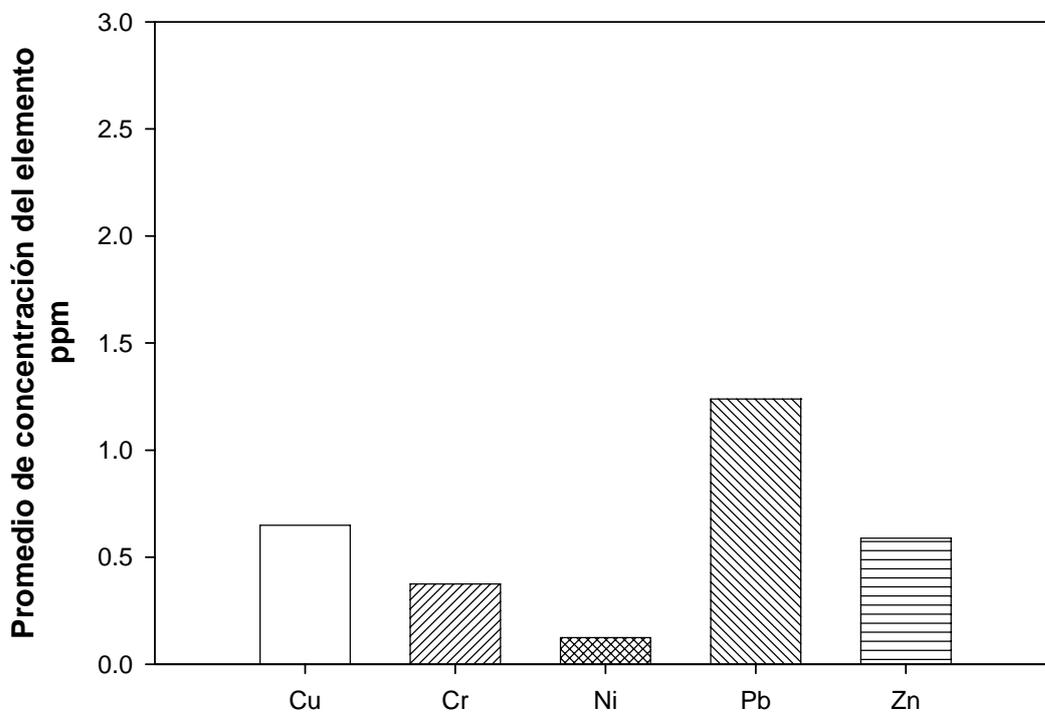


FIGURA 12. Representación del valor del índice de geoacumulación obtenido para cada elemento.

⁴ Los criterios de clasificación así como los cálculos realizados se muestran en el ANEXO 2.

9.5 Coeficiente de Correlación

CUADRO 10. Coeficiente de correlación entre los metales pesados y los factores fisicoquímicos del suelo (n=30).

	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	MO (%)
Cr (ppm)	1							
Cu (ppm)	-0.015	1						
Ni (ppm)	0.523**	0.188	1					
Pb (ppm)	0.016	0.223	0.191	1				
Zn (ppm)	-0.001	0.899**	0.253	0.372*	1			
pH	0.013	0.133	-0.335*	-0.299	-0.029	1		
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	0.081	0.235	0.396*	0.217	0.284	-0.442*	1	
MO (%)	0.363*	-0.001	0.259	-0.130	0.001	0.043	0.054	1

*p < 0.05; **p < 0.01

El Cr presenta una correlación positiva con el % de materia orgánica ($r = 0.363$), esto indica que la materia orgánica influencia la disponibilidad del metal en el suelo, a diferencia del resto de los parámetros físicos y químicos que presentan una baja correlación con el cromo ($r < 0.1$), cuadro 10.

El Cr también está positivamente correlacionado con el Ni ($r = 0.523$), lo cual significa que tanto el Cr como el Ni provienen de la misma fuente de emisión, es decir, de Cromatos de México, pues como lo reportan Medeiros *et al.*, 2003, es común encontrarlos asociados en los residuos que generan las cromadoras y no existen reportes de que en el área haya otra fuente emisora de este tipo de contaminación.

El Zn muestra una elevada correlación positiva con el Cu, de lo cual es importante resaltar que este dato muestra que la contaminación causada por este par de metales invariablemente proviene de la misma fuente de emisión, dado el patrón de distribución y el comportamiento respecto a la distancia del

Cu y Zn es claramente perceptible que el origen es Cromatos de México. El Zn también está positivamente relacionado con el Pb, aunque no tiene un patrón de comportamiento semejante al del Zn o del Cu.

Por otra parte, el Ni es el único metal que muestra interacción con alguno de los parámetros físicos y químicos, de esta manera tenemos para la conductividad eléctrica una correlación de 0.396 lo cual significa que interviene en la movilidad y disponibilidad de este metal, como se sabe la conductividad eléctrica se usa como índice de la salinidad del suelo y representa la variación del potencial osmótico causado por los sólidos disueltos en forma de sales en la solución del suelo (Ahmad *et al.*, 2005) mientras que también el níquel muestra una correlación negativa con el pH, por lo tanto el pH no interviene en la dinámica del níquel en el suelo del área estudiada.

9.6 Distribución espacial

9.6.1 Parámetros físicos y químicos de los suelos.

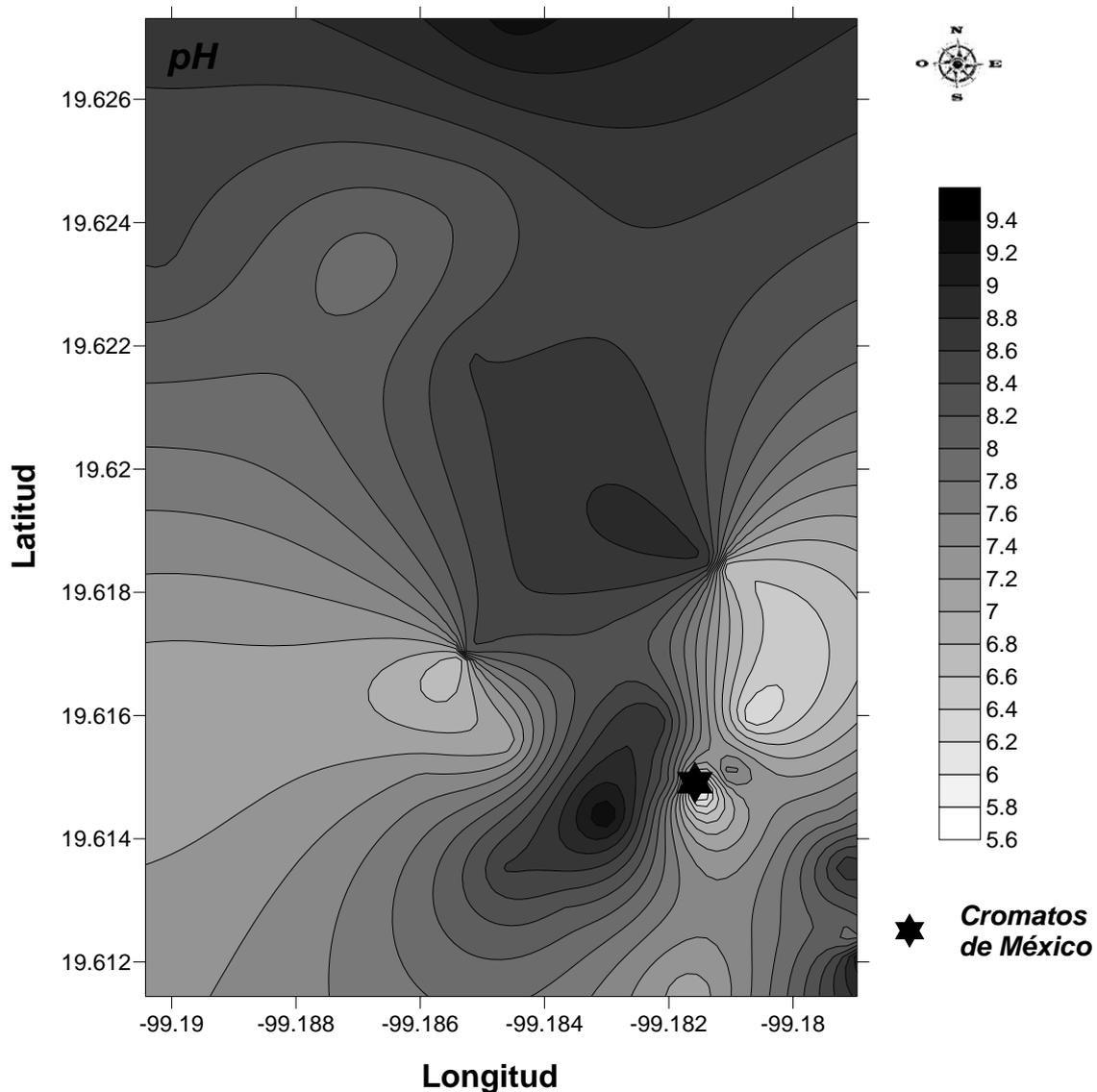


Figura 13. Mapa geoquímico del pH medido en las muestras de suelo analizadas.

El pH de los suelos muestra una distribución altamente heterogénea, ya que como ilustra la figura 13, en la zona cercana a la planta se concentran los valores más altos para dicho parámetro pero en dirección Noroeste, hacia el Sur y hacia el Este se muestra una disminución de pH, también pueden apreciarse de manera localizada pequeñas áreas donde el pH es fuertemente

alcalino (8.8 a 9.4), evidentemente en esos focos puntuales la disponibilidad y movilidad de Cu, Ni, Pb y Zn es reducida y solo el Cr se encuentra disponible y móvil.

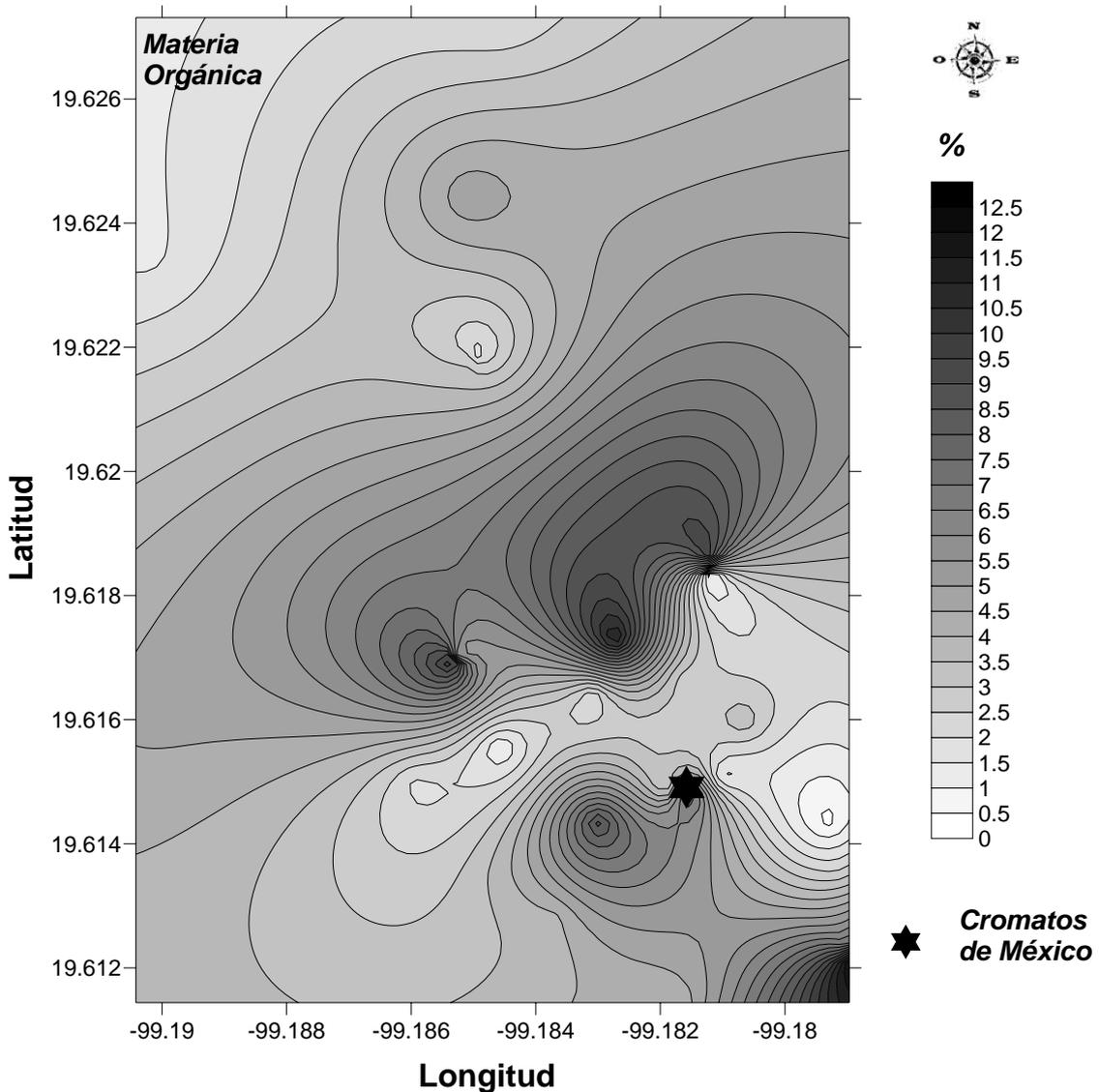


Figura 14. Mapa geoquímico del contenido de materia orgánica medida en las muestras de suelo analizadas.

El porcentaje de materia orgánica se distribuye heterogéneamente a lo largo de la zona de estudio, la figura 14 muestra que en dirección norte y escasamente hacia el sur de la zona se desplazan las mayores concentraciones de material orgánico.

En los puntos más próximos a la planta de Cromatos de México se hallan los niveles más bajos de materia orgánica, de esta manera se puede observar que en estos puntos los metales no forman complejos metálicos y por tanto se encuentran disponibles pues al no establecer uniones con material orgánico presente en el suelo estos metales pueden ser captados, por los organismos.

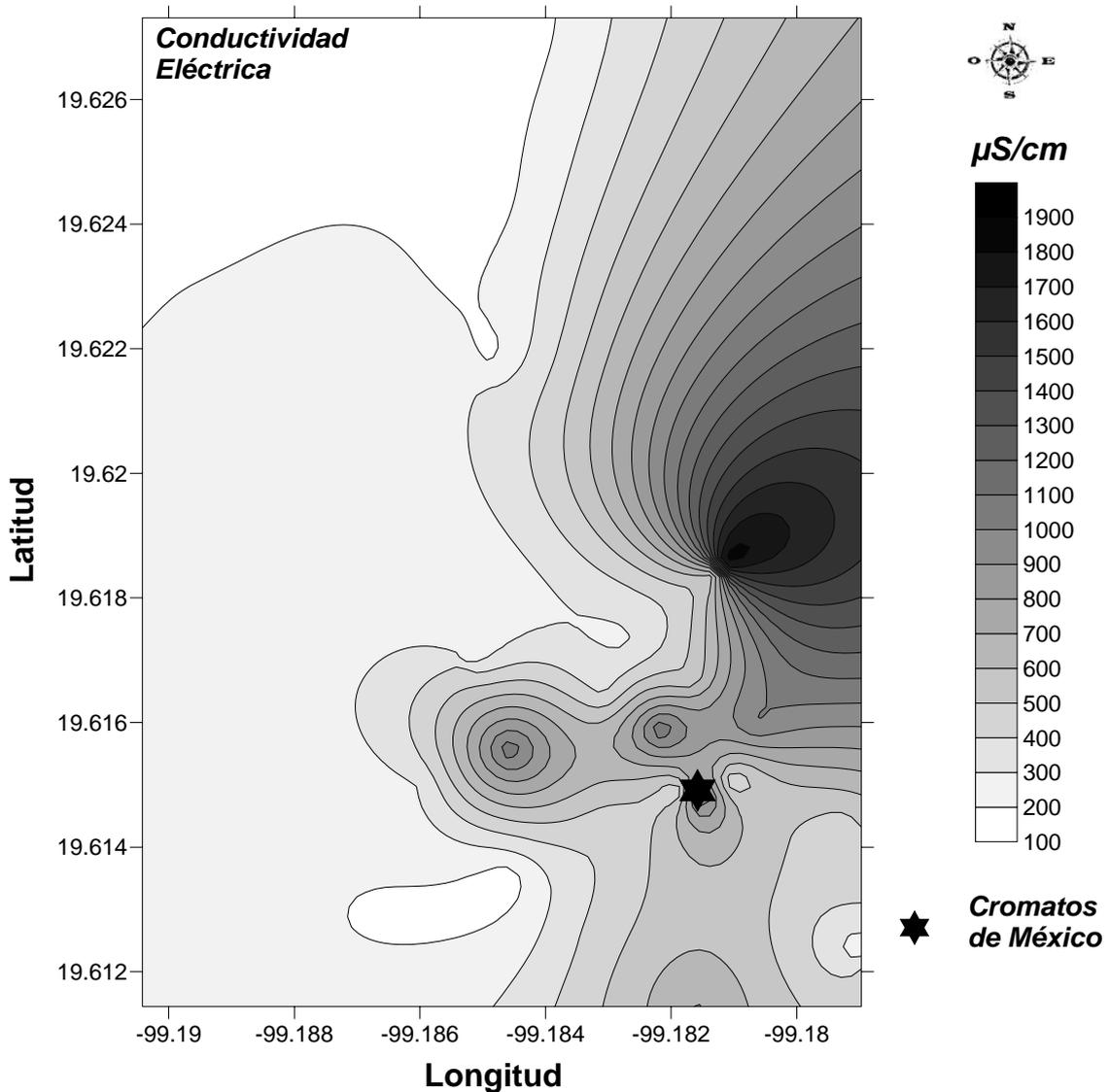


FIGURA 15. Mapa geoquímico de la conductividad eléctrica medida en las muestras de suelo analizadas.

La figura 15 esquematiza la distribución espacial de la conductividad eléctrica y de manera clara se aprecia que cerca de la planta se encuentran valores intermedios dado que los valores más altos de la conductividad están relativamente alejados de Cromatos de México, por lo que se puede entender que los metales pesados están poco móviles debido al bajo contenido de sales. Asimismo los sitios en los que la cantidad de sales puede favorecer la movilidad de tales metales están relativamente alejados de Cromatos de México.

9.6.2 Metales pesados en los suelos.

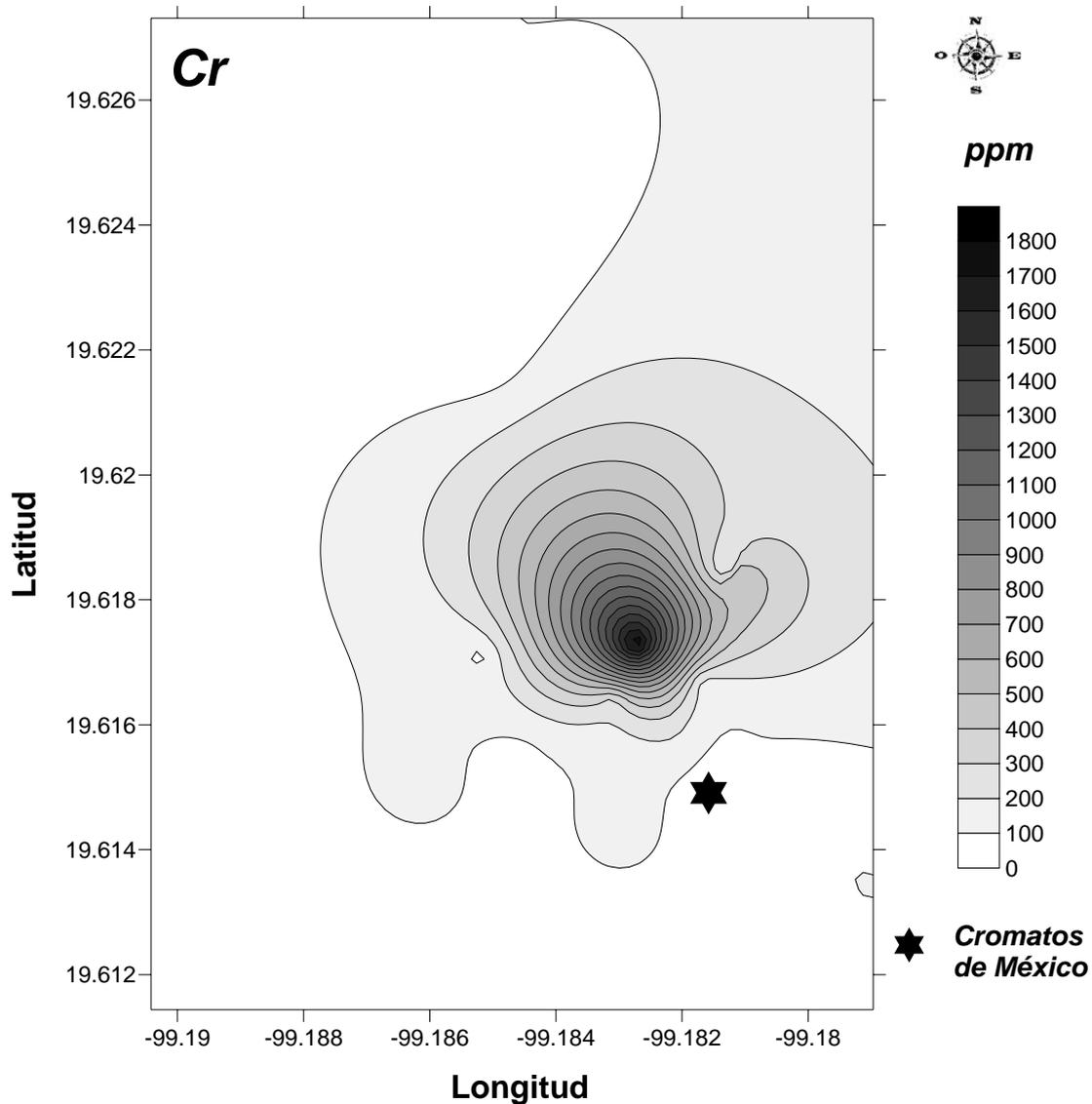


FIGURA 16. Mapa geoquímico de la dinámica de Cr medido en las muestras de suelo analizadas.

En la figura 16 se muestra claramente que las concentraciones más elevadas de cromo se presentan en un foco puntual y se ubican relativamente cercanas a Cromatos de México, además se concentran hacia el noroeste, sin embargo, de acuerdo a los reportes del Servicio Meteorológico Nacional, la dirección del viento en el período de interés (de 1978 a 2006, puesto que a partir de esa fecha cerró la empresa y en el 2006 se realizó este trabajo) es en

sentido contrario, es decir, hacia el Este y con una velocidad promedio de 30 Km h^{-1} , lo cual significa que el viento influye de manera indirecta sobre la distribución espacial de este metal, esto es, el viento dispersa al contaminante, no obstante, el pH de suelo permite la movilidad del cromo a lo largo del área en cuestión y de esta manera se muestra la tendencia de dispersión hacia el noroeste. Mientras en el resto del área de estudio la presencia del Cr es muy baja casi llegando a ser inexistente, de lo cual se desprende que en el área de estudio la única fuente emisora de Cr es Cromatos de México, pues aun cuando no se encuentra operando, los residuos confinados en el contenedor dentro de la planta se dispersan y por tal motivo se presenta esta distribución; cabe mencionar que a partir de los resultados obtenidos en este trabajo se puede observar que el riesgo real de contaminación por este metal se presenta entre los 100 y 500 metros de distancia de Cromatos de México.

En el caso del cobre se aprecia que las concentraciones mayores se hallan concentradas en un foco de contaminación cerca de Cromatos de México, en general, los valores presentan una distribución marcadamente hacia el Noroeste, aunque los reportes muestran que en ese período la dirección del viento fue hacia el este, lo cual indica que el viento influye de manera indirecta sobre la distribución de este metal en la zona de estudio, ver figura 17, también es muy notorio que la fuente de emisión de Cu en esta área es Cromatos de México.

En cuanto a la concentración de Ni el mapa muestra que la distribución se da en dirección norte abarcando tanto la parte Noroeste como Noreste, siendo esta última la región donde se encuentra mayormente localizado el elemento; dada la variación en la coloración de ciertas áreas se puede apreciar que existe un patrón que muestra una distribución heterogénea de níquel en el área, la dirección del viento en el período de estudio fue hacia el Este, lo cual explica porque se presenta esta distribución del níquel. En este caso es notorio que el viento ejerce una influencia significativa sobre la distribución en el espacio del níquel.

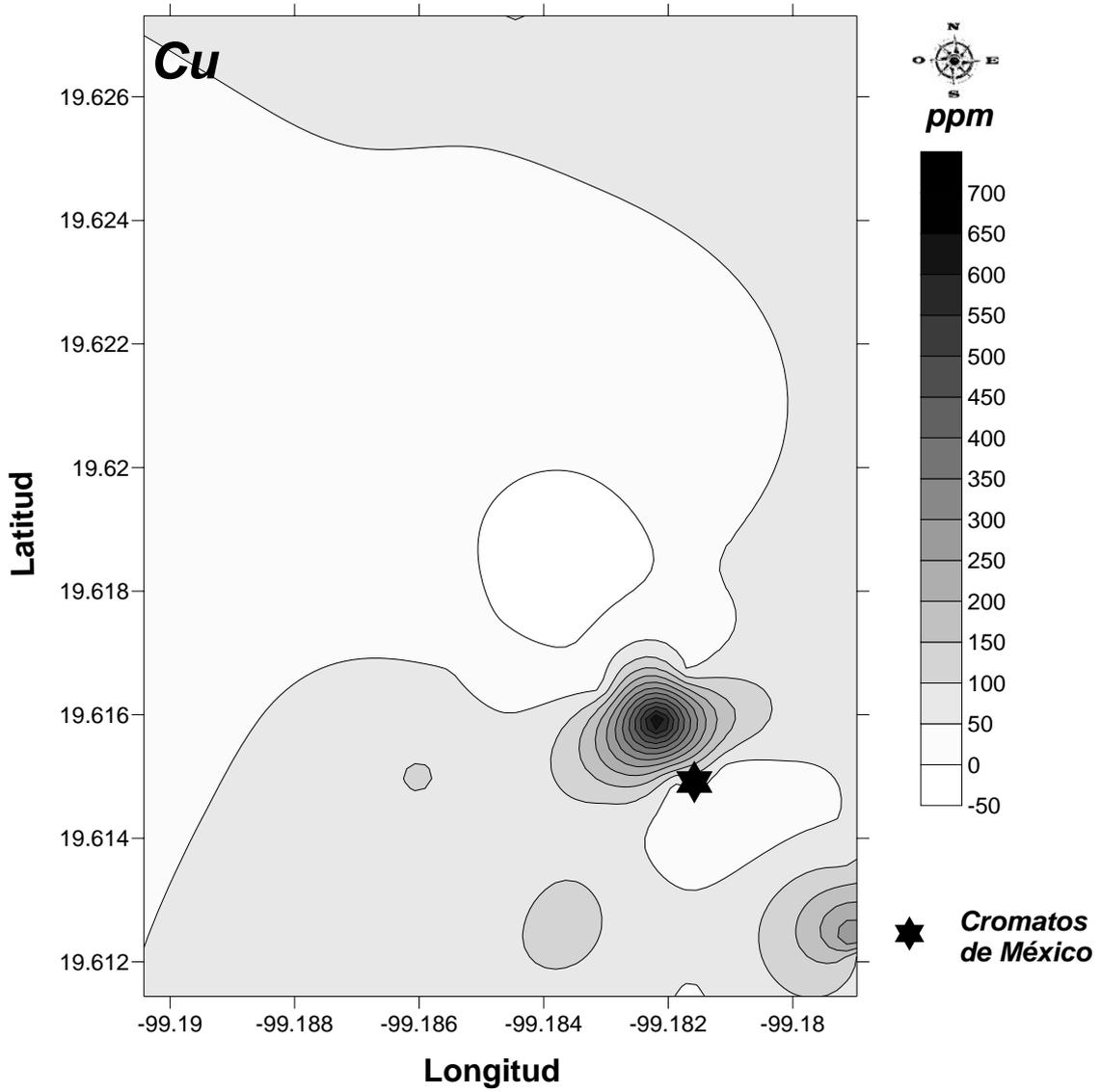


FIGURA 17. Mapa geoquímico de la dinámica del Cu medido en las muestras de suelo analizadas.

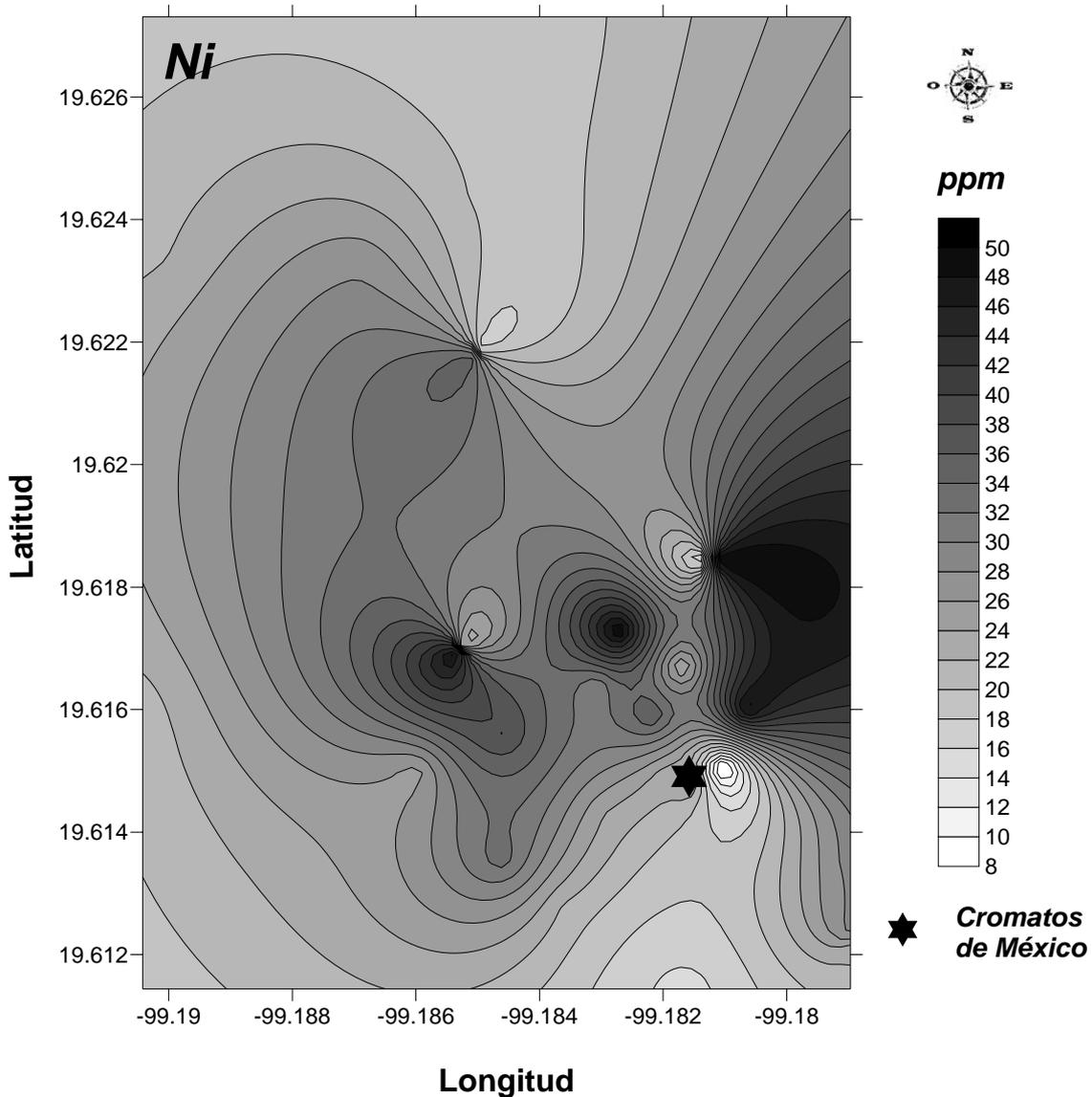


FIGURA 18. Mapa geoquímico de la dinámica de Ni medido en las muestras de suelo analizadas.

Aunque están positivamente correlacionados el Cr y el Ni el patrón de distribución es distinto para cada uno de este par de metales, sin embargo, no debe olvidarse que está documentada la frecuencia con la se hallan juntos tanto el Cr como el Ni en los residuos provenientes de cromadoras (Medeiros, *et al*, 2003), por otra parte en la figura 18 se aprecian tres puntos que se muestran en coloración intensa y no están cercanos a Cromatos de México lo que significa que además de esta empresa en el área hay otra fuente de emisión de Ni, esto es comprensible desde el punto de vista que se trata de un

parque industrial en el cual se encuentran varias industrias que igualmente generan residuos contaminantes.

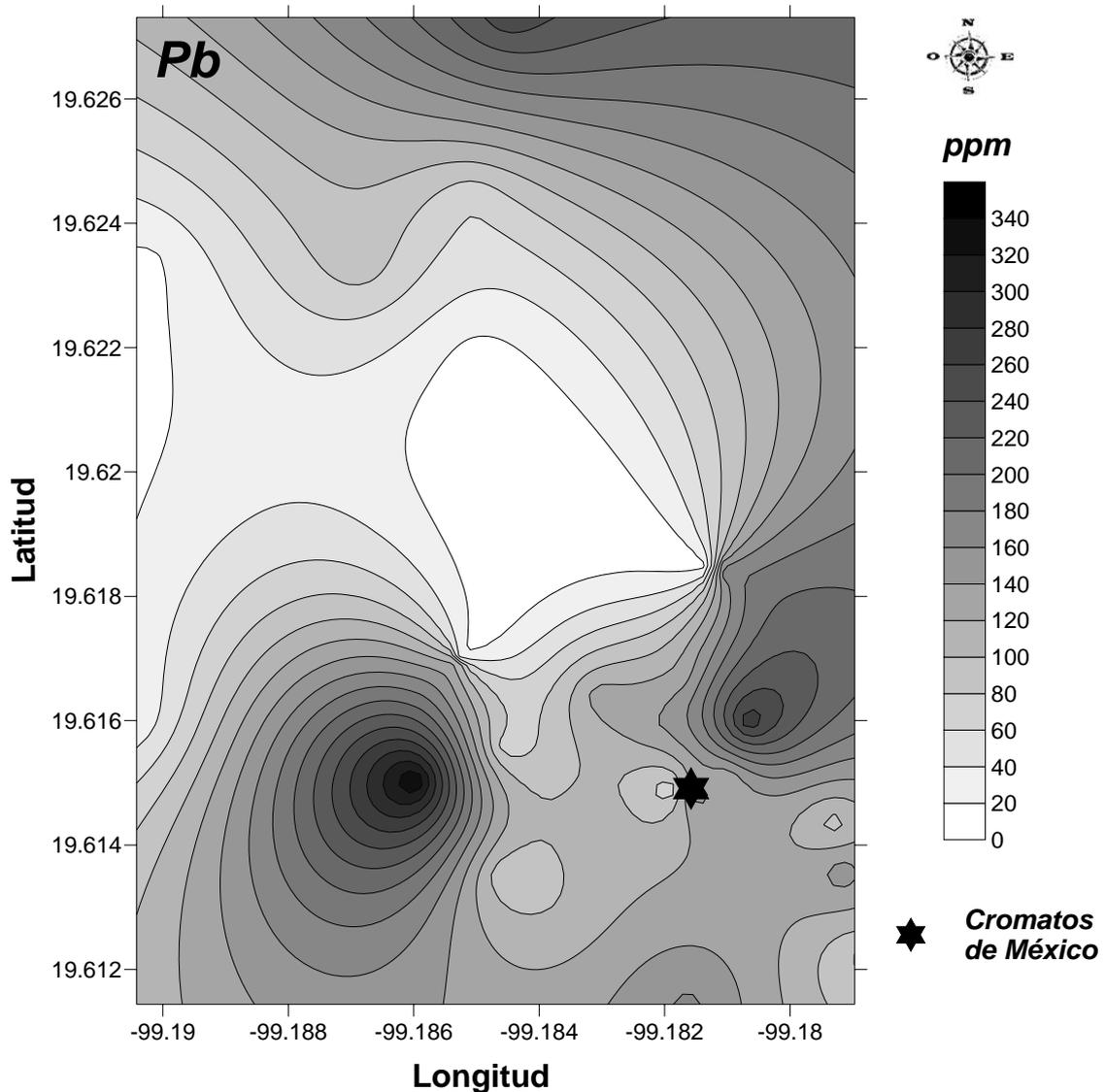


FIGURA 19. Mapa geoquímico que muestra la dinámica del Pb medido en las muestras de suelo analizadas.

La distribución en el espacio del plomo se da de manera heterogénea, pues la dispersión muestra solo dos áreas en las que las concentraciones son elevadas, de esta manera, vemos que hacia el Este y Oeste se ubican los valores más elevados de plomo en los suelos, figura 19, en este caso también se aprecia que el viento influye significativamente sobre la distribución de dicho

metal. También es importante señalar que dada la presencia de dos puntos focales relativamente alejados entres si se puede saber que en el área esta presente otra fuente emisora de Pb.

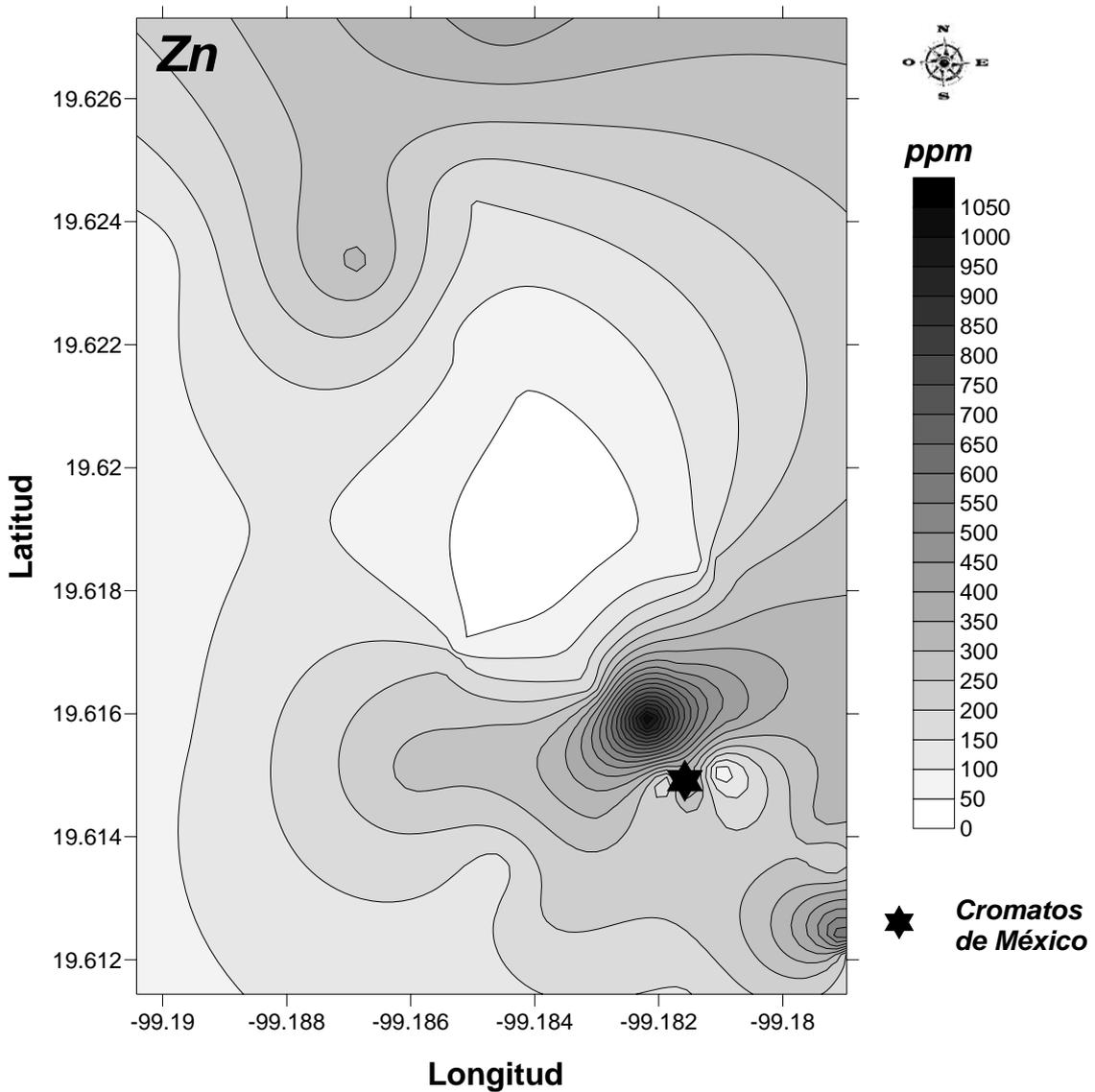


FIGURA 20. Mapa geoquímico que muestra la dinámica del Zn medido en las muestras de suelo analizadas.

En el caso del zinc es claramente perceptible la variación que existe en cuanto a la distribución del mismo en la zona aledaña a la planta de Cromatos de México, además es notorio un ligero desplazamiento del Zn hacia el oeste, cabe mencionar que, de acuerdo con la figura 20, la mayor concentración de este metal pesado está situada muy cerca de la planta, lo cual significa que la fuente de contaminación por zinc se localiza en ese lugar, aunque los reportes sobre la dirección del viento en el período de interés, muestran que la dirección del viento es hacia el Este se observa que influyó de manera indirecta sobre la distribución espacial de Zn en el área de estudio.

También debe mencionarse que el Zn está significativamente correlacionado con el Cu, lo cual ayuda a comprender las semejanzas que se presentan en los patrones de distribución de ambos metales.

10. CONCLUSIONES

El Cu, Ni, Pb y Zn son poco móviles y disponibles debido a que el pH alcalino que presentan los suelos analizados.

El Cr se encuentra móvil y disponible debido a que el pH alcalino que presentan los suelos analizados.

El elevado porcentaje de materia orgánica hace que los metales formen complejos metálicos y se encuentren poco disponibles.

La conductividad eléctrica resultó ser un factor limitante para la movilidad y disponibilidad de los metales en el suelo.

La concentración de Cu, Ni, Pb y Zn no excede los límites permisibles, no obstante en el caso del Cr, tres de las muestras si exceden el límite permisible.

El plomo es el elemento más abundante en la mayoría de las muestras analizadas.

El factor de enriquecimiento y el índice de geoacumulación muestran de manera consistente que la abundancia de los metales estudiados en los suelos analizados es $Pb > Cu > Zn > Cr > Ni$

Las concentraciones de los metales pesados disminuyen con respecto a la distancia del punto de origen.

Se encontró que la dirección del viento influyó de manera importante sobre la distribución en el suelo de los elementos estudiados.

Es ampliamente recomendable que en la ciudad de México se desarrollen estudios sobre metales pesados en suelos para estimar los riesgos potenciales derivados de la inadecuada gestión de los residuos generados por la industria, ya que esto puede ampliar el conocimiento en materia de la dinámica (disponibilidad y movilidad) de los metales pesados en el ambiente, puesto que tales estudios pueden ayudar a sentar las bases para iniciar las acciones de biorremediación que se tornan cada vez más urgentes.

11. BIBLIOGRAFÍA

Adriano D. 2001. **Trace Elements in Terrestrial Environments: Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals.** second Ed. Springer-Verlag Berlin.

Ahmad I. *et al.* 2005 **Heavy Metal Contamination of Soil, Problems and Remedies.** Science Publishers Inc., India.

Alloway J. 1990. **Heavy metals in soils.** 2^a ed. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

Alloway J. Ayres C. 1993. **Chemical Principles of Environmental Pollution.** Blackie Academic & Professional. Londres.

Amini M. Afyuni M. Khademi H. Abbaspour K.C. Schulin R. 2005. **Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of Central Iran.** Science of the Total Environment 347: 64-77.

Armienta M. Rodríguez R. 1995. **Environmental exposure to chromium compounds in the Valley of León, México.** Environmental Health Perspectives 103 (Supplement 1): 47-51.

Arun K. Cervantes C. Loza-Tavera H. Avudainayagam S. 2005. **Chromium toxicity in plants.** Environment International 25: 74- 89.

Backsion D. Sichilongo K. Cernak J. 2006. **Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia.** Chemosphere 63: 497-501.

Banat K. Howari F. Al.Hamad A. 2005. **Heavy metals in urban soils of central Jordan we sorry about their environmental risks?.** Environmental Research, 97: 258.273.

Barceló J. Charlotte P. 1989. **Estrés Vegetal**. Investigación y Ciencia No. 154, Prensa Científica, Calabria, Barcelona.

Bourelhier P. Berthelin J. 1998. **Contamination des sols par les elements en traces: les ris ques et leur gestion**. Lavoisier Tecdoc. Rapport No. 42.

Bradl H. 2005 **Heavy metals in the environment; origin, interaction and remediation**. Elsevier, Londres 264 pp.

Cary E. Alloway W. Olsen O. 1977. **Control of chromium concentrations in food plants**. Agricultural Food Chemistry 25:1 - 2.

Ceron P. 1995. **Determinación de la concentración de Cr en vegetales debido a la operación de una fábrica de cromatos en León Guanajuato**. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cervantes C. Moreno R. 1999. **Contaminación ambiental por metales pesados**. A.G.T. México.

Chapman H. Pratt P. 1991. **Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas**. Editorial Trillas. México.

Chen D. Cai Y. 2002. **The method of analysis of essential elements in soil and sewage sludge with ICP-MS**. Environmental Chemistry 21(5): 509-512.

Chiu K. Ye Z. Wong M. 2005. **Enhanced uptake of As, Zn and Cu by *Vetiveria zizanioides* and *Zea mays* using chelating agents**. Chemosphere 60: 1365-1375.

Colombo L. Margione D. Bellioci L. Figliola A. 1998. **Soil profile distribution of heavy metals in soil amended with sewage sludge for eight years**. Agricultural Mediterranean 128 (4): 273-283.

Date A. and Gray A. 1989 **Applications of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry**. Chapman and Hall. New York.

Davies B. Houghton J. 1984. **Distance decline patterns in heavy metal contamination of soils and plants in Birmingham, England**. Urban Ecology 8: 285-294.

Duffus J. 2002. **"Heavy metals"- A meaningless term? (IUPAC Technical Report)**, Pure Applied. Chemistry 74, 5: 793-807.

Etchevers J. Goijberg G. López R. Cruz M. Guerrero A. Gutiérrez B. Mirando E. 1996. **Manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos**. Editado por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo A.C. y El Colegio de Postgraduados.

Farago M. 1994. **Plants and the chemical. Elements, Biochemistry, uptake, tolerance and toxicity**. VCH, Weinheim.

Fergusson J. 1990. **The heavy metals elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects**. Pergamon Press, USA.

Flores T. Muños S. Morqueño B. 1999. **Absorción de cromo y plomo por alfalfa y pasto ovido**. Agrociencias 33. 381-388.

Gutierrez M. Bocco C. Castillo S. 1985. **Contaminación por Cromo en el norte de la ciudad de México, un enfoque interdisciplinario**. Proyecto de la dirección de prevención y control de la contaminación. SEDUE.

Hazlett P. Rutherford G. Van Loon G. 1984. **Characteristics of soil profiles affected by smelting of nickel and copper at Coniston, Ontario, Canada**. Geoderma 32: 273-285.

Hernández E. González G. Morton O. 2004. **Manual para la preparación de muestras para análisis por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)**. Reportes internos, Instituto de Geofísica, UNAM, México.

Imperato M. Adamo P. Naimo D. Arienzo M. Stanzione D. Violante P. 2003. **Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy)**, Environmental Pollution 124: 247.256.

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2005. disponible en la página electrónica: <http://www.inw.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/343/anexo4.html>.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2000. **Cuaderno estadístico municipal**. Tultitlán, Estado de México, INEGI, México.

Kabata-Pendias A. Pendias H. 2001. **Trace elements in soils and plants**. 4^a ed., CRC Press, Inc., Boca Ratón, Florida.

Lavado R. Rodríguez. M. Scheiner J. Taboada M. Rubio G. Álvarez R. Alconada M. Zubillaga S. 1998. **Heavy metals in soils of Argentina: Comparison Between urban and agricultural soils**. Commune Soil Science Plant Analyses. 29: 1913-1917.

Ledezma P. 2006. **Actividad genotóxica de afloramientos externos del confinamiento de residuos de cromo de “Cromatos de México” en Lecheria, Estado de México**. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Lee C. Li X. Shi W. Cheung S. Thornton I. 2004. **Metal contamination in urban, suburban and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statics**. Science Total Environmental. 16: 1361-1368.

Levison, A. 1989. ***Introduction to Exploration Geochemistry***. Illinois, Applied Publishing Company.

Li X. Poon C. Liu P. 2001. **Heavy metal contamination of urban soil and street dusts in Hong Kong**. *Applied. Geochemistry*. 16: 1361-1368.

Li X. Lee C. Wong S. Shi W. Thornton I., 2004. **The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using GIS- based approach**. *Environmental Pollution* 129: 113-124.

Liao B. Guo Z. Probst A. Probst J. 2005. **Soil heavy metal contamination and acid deposition: experimental approach on two forest soils in Hunan, Southern China**. *Geoderma* 127: 91-103.

Liu H. Probst A. Liao B. 2004. **Metal contamination in soils and crops affected by the Chenzou lead/zinc mine spill (Hunan, China)**. *Science Total Environmetal*. 86: 295-316.

López J. 2002. **Evaluación de la capacidad bioindicadora de elementos metálicos en los hongos silvestres comestibles *Clavariadelphus truncatus* y *Boletus edulis***. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Lu Y. Gong Z. Zhang G. Burghardt W. 2003. **Concentrations and chemical speciations of Cu, Zn, Pb and Cr of urban soils in Nanjing, China**. *Geoderma* 115: 101-111.

Lu A. Zhang S. Shan X-Q. 2006. **Time effect on the fractionation of heavy metals in soil**. *Geoderma* 125: 225-234.

McEldowney S. Hardman D. Waite S. 1993 ***Pollution: Ecology an Biotreatmente***. Longman Scientific & Technical. Singapore.

Medeiros M. Rodrigues A. Batoreu M. Laires A. Rueff J. Zhitcovich A. 2003, **Elevated levels of DNA-protein crosslinks and micronuclei lymphocytes of tannery workers exposed of trivalent chromium.** *Mutagenesis* 18 (1): 19-24.

Micó C. Recatalá L. Peris M. Sánchez J. 2006. **Assessing heavy metals sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis.** *Chemosphere* 65: 863-872.

Mireles A. Solís C. Andrade E. Lagunas-Solar M. Piña C. Flocchini R. 2004. **Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* . 187-190.

Möller A. Müller H. Abdullah A. Abdelgaward G. Utermann J. 2005. **Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus, Ghouta.** *Geoderma* 124: 63-71.

Morton O. Hernández E. Gaso I. Segovia N. 2002. **Heavy metals concentrations in Surface soils from México City.** *Bulletin. Environmental Contamination Toxicology*. 68: 383-388.

Mugica V. Maubert M. Torres M. Muñoz J. Rico E. 2002. **Temporal and spatial variations of metal content in TSP and PM10 in Mexico City during 1996-1998.** *Journal of Aerosol Science* 33: 91-102.

Muller G. 1969. **Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River.** *Geology Journal*. 2: 109-118.

Navarrete M. 2005. **Contaminación por metales pesados en tres unidades de suelo, ocasionada por derrames de petróleo en el distrito de Agua Dulce, Tabasco.** Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Norrish K. 1975. **The geochemistry and mineralogy of trace elements.** Academic Press. New York. Página 55.

Ntekim E. Ekwere S. Upong E. 1991. **Heavy metal distribution in sediments from Calabar River, Southeastern Nigeria,** Environmental Geology. 21: 237-241.

NOM-021-SEMARNAT-2000. 2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Páginas 15-16, 21-23.

Paul E. Douglas A. 1975. **Soil Biochemistry.** Vol.4, Marcel Dekker Inc, New York.

Petrovic M. Kastelan-Makan M. Horvart J. 1999. **Interactive sorption of metal ions and humic acids on to mineral particles.** Water, Air and Soil Pollution. 111 (1-4): 41-56

Pierzynski, G. Sims, T. Vance, F. 1993. **Soils and Environmental Quality.** Lewis CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.

Porta C. López-Acevedo R. Roquero C. 1999. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente.** Mundi-prensa, México.

Ramos R. Cajuste L. Flores D. García N. 2001. **Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México.** Agrociencia 35: 385-395.

Ramos R. 2006. **Contaminación por metales pesados, salinidad y sodicidad en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemanco, Tlahuac y Mixquic D.F.** Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ross M. 1994. **Toxic Metals in Soil-Plant systems**. John Wiley & Sons., Ltd. West Sussex, England.

Ruiz A. 1999. **Distribución espacial y temporal de metales pesados en sedimentos lacustres de la cuenca de México: Chalco, Texcoco y Cuautitlán Izcalli, Estado de México**. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Salud Ambiental y Ecología. 2003. Disponible en la página electrónica: <http://cueyatl.uam.mx/uam/publicacione/bletines/tips/oct03/seis.html>.

Salvagio D. Massimo A. Bellanca A. Neri R. Sprovieri. 2002. **Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy**. Science. Total Environmental. 300: 229-243.

Sánchez M. 2005. **Estudio de la contaminación por metales pesados en el municipio de Guadalupe, Zacatecas**. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Sastre J. Rauret G. Vidal M. 2006. **Effect of the cationic composition of sorption solution on the quantification sorption-desorption parameters of heavy metals in soils**. Environmental Pollution. 140: 322-339.

Seoánez M. 1999. **Contaminación del suelo: Estudios, tratameineti y gestión**. Ediciones Mundi-Prensa. España.

Singer, M. and Munns, D. 1992. **Soils. An Introduction**. 2th Ed. Maxwell MacMillan International Editions. 473p.

SMN. Servicio Meteorológico Nacional. 2007. Disponible en la página: <http://smn.cna.gob.mx/>.

Snakin, V. Krechetov, P. Kuzovnikova, T. Alyabina, I. Gurov, A. and Stepichev, A. 1996. ***The system of assessment of soil degradation***. Soil Technol. **8**: 331-343.

Stewart B. 1989 ***Advances in Soil Science***. Springer-Verlag New York Inc.

Tan M. Xu F. Chen J. Zhang X. Chen J. 2006. **Spatial prediction of heavy metal pollution for soils in peri-urban Beijing, China based on Fuzzy set theory**. Pedosphere 16(5): 545-554.

Theocharopoulos S. Wagner G. Sprengart J. Mohr M. Desaulles A. Muntau H. Christou M. Quevauvillier P. 2001. **European soil sampling guidelines for soil pollution studies**. Science Total Environmental. 264: 51-62.

Thornton I. 1994. **Metal contamination in soils in urban areas**. En: Bullock P. Gregory P. (Eds.), Soils in urban environment, Blackwell, Oxford. Páginas 47-75.

Thuy H. Tobschall H. An P. 2000 **Distribution of heavy metals in urban soils- a case study of Danang-Hoian Area (Vietnam)**. Environmental Geology. 39 (3); 603-610.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1982. **Test Methods for Evaluating Solid Wastes, Physical/Chemical Methods**. Second Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington D.C.

Valdés P. y Cabrera M. 1999. **La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México**. Texas Center for Policy Studies, Austin, Texas.

Vázquez A. 1999. **Evaluación del riesgo a la contaminación por metales pesados en la región del Valle del Mezquital, Hgo.** Tesis de doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco, Estado de México.

Weis J. Weis P. 2004. **Metal uptake and release by wetland plants: implication for phytoremediation and restoration.** Environment International 30: 685-670.

Wong C. Li X. Thornton I. 2005. **Urban environmental geochemistry of trace elements,** Environmental Pollution 75: 1-16.

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS EN LAS DISTINTAS DETERMINACIONES REALIZADAS A LAS MUESTRAS DE SUELO

- **Determinación de pH en solución acuosa (1:2) (NOM-021-SEMARNAT-2000).**

Principio y aplicación

La evaluación electrométrica del pH se basa en la determinación de la actividad del ión H^+ mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H. En el caso de los suelos el pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo:agua 1:2.

El pH es uno de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas del suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo:solución, la presión parcial de bióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión. (NOM-021-SEMARNAT-2000)

Reactivos

Los reactivos utilizados en esta determinación deben de ser grado analítico y el agua utilizada en la preparación de las soluciones debe de ser desionizada o en su defecto destilada.

1. Agua desionizada ($18.2 \Omega cm$) o destilada
2. Soluciones reguladoras de referencia, pH 4.00 y pH 7.00, las cuales se adquieren preparadas o concentradas para diluirse de acuerdo a la instrucción. Estas soluciones deben de estar a temperatura ambiente al momento de calibrar el medidor de pH.

Material y equipo

1. Potenciómetro o medidor de pH equipado con electrodo de vidrio en combinación con electrodo de referencia.
2. Balanza con 0.1g de sensibilidad.
3. Vasos de precipitado con capacidad de 100mL (Clase A de Pyrex).
4. Pipeta volumétrica de 20mL.
5. Agitador orbital (a 100 rpm).
6. Piceta.
7. Cinta métrica.

Procedimiento

1. Pesar 10g de suelo en un vaso de precipitado.
2. Adicionar 20 ml de agua desionizada al vaso conteniendo el suelo.
3. Agitar durante 1 minuto y dejar reposar durante 10 minutos, repetir este paso dos veces más, es decir, 3 minutos de agitación por 30 de reposo.
4. Calibrar el potenciómetro con las soluciones reguladoras pH 4.00 y 7.00 enjuagando con agua desionizada antes de iniciar las lecturas de las muestras.
5. Agitar nuevamente durante 1 minuto e introducir el electrodo en la suspensión.
6. Registrar el pH al momento en que la lectura se haya estabilizado.

Interpretación de resultados

Para la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH se presenta el cuadro siguiente:

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Moderadamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

- **Determinación de materia orgánica mediante el procedimiento de Walkley y Black (1934).**

Principios

Este método se basa en la oxidación de del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Después de media hora de digestión la mezcla se diluye con 100 mL de agua destilada, se adiciona ácido fosfórico (H_3PO_4) para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$). Con este procedimiento se detecta entre 70 y 84 % del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. Para el análisis de suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 (resultado de dividir $1/0.77$).

Reactivos

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser grado analítico a menos que se indique otra cosa.

1. Dicromato de potasio [0.166 M] o [1N]. Disolver 48.8 g de $K_2Cr_2O_7$ en agua desionizada, aforar a 1 litro en un matraz volumétrico.
2. Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).
3. Ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4).
4. Indicador de difenilamina ($C_{12}H_{11}N$). Disolver 0.5 g de difenilamina en 20 mL de agua desionizada.
5. Sulfato ferroso [1M] (aproximadamente). Disolver 278 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ en agua a la que previamente se le añadieron 80 ml de H_2SO_4 concentrado, enfriar y diluir a 1litro. Esta solución debe de ser valorada con $K_2Cr_2O_7$ [1N] antes de realizar la determinación.

Material

1. Matraces erlenmeyer de 500 mL.

2. Bureta de 50 mL para $K_2Cr_2O_7$.
3. Bureta de 50 mL para $FeSO_4 \cdot 7H_2O$.
4. Pipeta volumétrica de 10 mL.
5. Probeta de vidrio de 25 mL.

Procedimiento

1. Pesar 0.5 g de suelo seco y colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Procesar un blanco con reactivos por triplicado.
2. Adicionar exactamente 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ [1N] girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con todo el suelo.
3. Agregar cuidadosamente con una bureta 20 mL de H_2SO_4 concentrado a la suspensión, girar nuevamente el matraz y agitar de esta forma durante un minuto.
4. Dejar reposar durante 30 minutos sobre una lámina de asbesto o sobre una mesa de madera, evitando las mesas de acero o cemento.
5. Añadir 200 mL de agua desionizada.
6. Añadir 5 mL de H_3PO_4 concentrado.
7. Adicionar de 5 a 10 gotas de indicador de difenilamina.
8. Titular con la disolución de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ gota agota hasta un punto final verde claro.

Cálculos

$$\% \text{ C orgánico} = [(B - T) / g] (N) (0.39) \text{ mcf}$$

Donde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (mL).

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (mL).

N= Normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

g = peso de la muestra empleada (g).

mcf = factor de corrección de humedad.

El porcentaje de Materia Orgánica (MO) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724$$

Observaciones

- I. Si al añadir el dicromato de potasio al suelo la solución se torna verdosa o si se gastan menos de dos mL de sulfato ferroso al titular la muestra, se debe reducir el peso de la muestra a la mitad.
- II. El factor 0.39 resulta de multiplicar $(12/4000) \times (1/0.77) \times 100 = 0.39$.

Donde:

(12/4000) es el peso miliequivalente del C;

(1/0.77) es un factor de corrección debido a que se supone que el método solo oxida 77 % del C y 100 es la conversión a porcentaje.

- III. El factor de Van Bemelen de 1.724 se usa para estimar la MO a 'partir del C orgánico, el cual resulta de la suposición de que la MO contiene un 58% de C; $(1/0.58 = 1.724)$.

Interpretación de resultados de Materia Orgánica

Los valores de referencia para clasificar la concentración de materia orgánica en los suelos minerales y volcánicos se presenta en el cuadro siguiente:

Clase	% Materia Orgánica	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

- **Medición de la conductividad eléctrica en solución acuosa proporción 1:5 (Etchevers, 1996).**

Método para la determinación de la conductividad eléctrica en solución acuosa, relación suelo:agua (1: 5) por medición electrolítica.

El término sales solubles del suelo se usa en este método para referirse a los constituyentes inorgánicos del suelo que son apreciablemente solubles en agua. La conductividad eléctrica o conductancia específica de una solución es el recíproco de la resistencia específica de una corriente alterna medida entre las caras opuestas de un centímetro cúbico de una solución acuosa a una temperatura específica. La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para transportar la corriente eléctrica. Una solución acuosa que tiene iones tiene esa habilidad. La conductividad de una solución electrolítica depende de la concentración total de iones presentes en agua, de la movilidad de cada uno de los iones disueltos, su valencia y de la temperatura a la que se hace la determinación. El principio por el cual los aparatos miden conductividad es simple: dos placas de conductividad o electrodos se sumergen en la muestra, se aplica un potencial o voltaje a través de las placas y se mide la corriente que fluye entre las placas.

La conductividad eléctrica (CE) se reporta en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

Reactivos

Los reactivos utilizados en esta determinación deben de ser grado analítico y el agua utilizada en la preparación de las soluciones debe de ser desionizada.

1. Agua desionizada
2. Solución estándar para calibrar el aparato medidor

Material y equipo

1. Conductímetro digital
2. Balanza analítica

Interferencias

La conductividad eléctrica aumenta cuando incrementa la temperatura razón por la cual los valores de la conductividad deben de ser corregidos a 25° C cuando son reportados.

Precisión y exactitud

Los valores de conductividad menores de uno son reportados con dos cifras decimales y los valores mayores de uno con tres cifras significativas en $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25 ° C.

Procedimiento

1. Pesar 10 g de suelo en un vaso de precipitado.
2. Adicionar 50 ml de agua desionizada al vaso conteniendo el suelo.
3. Agitar durante 1 minuto y dejar reposar durante 24 horas
4. Calibrar el conductímetro con las solución estándar enjuagando con agua desionizada antes de iniciar las lecturas de las muestras.
5. Introducir el electrodo leer en el sobrenadante la conductividad eléctrica al momento en que la lectura se haya estabilizado y tomar la temperatura.

Interpretación de resultados de Conductividad Eléctrica

CE $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25 ° C	Efectos
< 1000.0	Efectos despreciables de salinidad
1100 – 2000	Muy ligeramente salino
2100 – 4000	Moderadamente salino
4100 – 8000	Suelo salino
8100 – 16000	Fuertemente salino
> 16000	Muy fuertemente salino

- **Cuantificación de metales pesados por Espectrofotometría de Masas con Plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).**

Este procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a lo reportado en trabajos previos del Instituto de Geofísica de la UNAM; Manual de preparación de muestras para análisis por ICP-MS (Hernández *et al*, 2004)

Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).

A últimas fechas se ha visto el poder de detección multielemental que es logrado con las técnicas del ICP-MS, un método analítico con capacidad de obtener en un análisis la totalidad de los elementos químicos de la tabla periódica con límites de detección bajos de 0.005-1 ppb y una precisión excelente. Los elementos son medidos simultáneamente con un tiempo de dos minutos, por ello es considerado un método analítico extremadamente rápido. Debido a la alta sensibilidad, es adecuada para el análisis de elementos traza que se encuentran en concentraciones menores a 0.01%. El rango para la mayoría de los elementos es de 0.01 a 100 ppm.

El ICP-MS ha sido utilizado para analizar muestras geológicas (*suelos, rocas y minerales*), aguas (*residual, potable y subterránea*), plantas (*comestibles y no comestibles*) y relaciones isotópicas de elementos químicos. El estándar utilizado fue el 2586 del NIST (National Institute of Standards and Technology)

Principio del Método

El plasma de acoplamiento inductivo es un generador de iones, en el que se alcanzan temperaturas de 600 a 10 000° K, las cuales permiten la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo produciendo uno o dos iones con una carga positiva, más un electrón.



El plasma acoplado inductivamente se genera por una descarga eléctrica (el argón es empleado en la técnica); la muestra introducida al plasma entra a la región de más alta temperatura en donde se volatiliza, se disocia, se excita y finalmente se ioniza. La fuente de iones producida en el plasma es dirigida hacia el filtro de masas a través de lentes electrostáticos; estos lentes son placas metálicas cargadas y permiten únicamente el paso de partículas de cargas positivas. El filtro de masas es un cuadrupolo que consiste de cuatro barras hiperbólicas que ocasionan que las partículas cargadas eléctricamente sean atraídas o rechazadas (Date, 1989).

Equipo y materiales

1. Parrilla de calentamiento de 150° C colocada en la campana de extracción de gases
2. Estufa de 150° C
3. Balanza analítica
4. Vasos de teflón o PFA de 50 mL
5. Matraces volumétricos de 100 mL (Clase A de Pyrex)
6. Pipetas microdosificadoras
7. Botellas nuevas de polipropileno (perfectamente lavadas) de 125 ml.

Reactivos

1. Ácido fluorhídrico concentrado tridestilado
2. Acido perclorico concentrado ultrapuro
3. Acido clorhidrico concentrado tridestilado
4. Ácido nítrico concentrado tridestilado
5. Ácido nítrico tridestilado al 2 %
6. Agua desionizada (18.2 Ω .cm.)
7. Solución estándar certificada de Indio-Renio (In-Re) de 10 ug/L en 2% de HNO₃

Procedimiento

1. Secar las muestras durante la noche (24 horas) a 105° C.

2. Moler las muestras en un mortero de carburo de tungsteno.
3. Pesar 0.2g en vasos de teflón y humedecer un poco con HNO_3 diluido al 2%.
4. Adicionar lentamente 10 mL de HF y 5 mL de HClO_4 (La eficiencia del ataque ácido mejora si la muestra se somete varias horas en la mezcla ácida, antes de que se inicie la etapa de evaporación).
5. Evaporar en la parrilla de calentamiento a 125°C hasta que se forme una pasta cristalina (2-3 horas).
6. Repetir el paso 3 hasta que la muestra quede totalmente digerida. No olvidar que la evaporación correspondiente en cada adición.
7. Añadir el HClO_4 y evaporar hasta que se forme una pasta cristalina para remover cualquier residuo de HF.
8. Aforar a 100 mL en matraces volumétricos con estándar de In-Re y transferir inmediatamente a una botella nueva de polipropileno para su posterior análisis.
9. La muestra se lee en el espectrofotómetro y se obtienen los resultados para su análisis.

ANEXO 2 CÁLCULOS REALIZADOS EN LAS DETERMINACIONES

De las tablas de resultados se obtiene la siguiente información para calcular el FE y I-geo, por tanto tenemos:

	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
Valor promedio	84.185	173.838	27.84	107.975	243.648
Valor promedio de la muestra control	26	93	45	17.5	83

- **Factor de enriquecimiento (FE)**

El Factor de Enriquecimiento nos indica el número de veces que la concentración del metal analizado en los suelos sobrepasa la concentración normal, utilizando como factor de comparación el valor de fondo (el cual representa la concentración natural del suelo).

Se calculó de la siguiente manera;

$$FE_{Cu}: 84.185/26 = 3.237$$

$$FE_{Cr}: 173.838/93 = 1.869$$

$$FE_{Ni}: 27.84/45 = 0.618$$

$$FE_{Pb}: 107.975/17.5 = 6.17$$

$$FE_{Zn}: 243.648/83 = 2.935$$

- **Índice de geoacumulación (I-geo)**

El índice de geoacumulación se usa para calcular la extensión e intensidad de la contaminación del suelo (Muller, 1969 y Ntekim *et al.*, 1993).

Se obtiene con la fórmula;

$$I\text{-geo} = \log_2 (C_n/1.5B_n); \text{ en la que:}$$

C_n es la concentración promedio del elemento analizado en la muestra;

B_n es la concentración promedio del elemento analizado en la muestra control (valor de fondo). A partir de dicha fórmula tenemos:

$$I\text{-geo}_{\text{Cu}}: \text{Log}_2(84.185/(1.5 \cdot 26)) = 0.649$$

$$I\text{-geo}_{\text{Cr}}: \text{Log}_2(173.838/(1.5 \cdot 93)) = 0.375$$

$$I\text{-geo}_{\text{Ni}}: \text{Log}_2(27.84/(1.5 \cdot 45)) = 0.124$$

$$I\text{-geo}_{\text{Pb}}: \text{Log}_2(107.975/(1.5 \cdot 17.5)) = 1.238$$

$$I\text{-geo}_{\text{Zn}}: \text{Log}_2(243.648/(1.5 \cdot 83)) = 0.589$$

La clase del I-geo así como la clasificación de la calidad del suelo se obtuvieron con ayuda de la siguiente tabla.

Índice de geoacumulación	Clase del I-geo	Intensidad de la contaminación
0	0	No contaminado
0-1	1	No contaminado a moderadamente contaminado
1-2	2	Moderadamente contaminado
2-3	3	Moderadamente contaminado a fuertemente contaminado
3-4	4	Fuertemente contaminado
4-5	5	Fuertemente a extremadamente contaminado
5-10	6	Extremadamente contaminado

- **Materia orgánica**

Para determinar el porcentaje de MO se realiza los siguientes cálculos tomando en cuenta que

$$\% \text{ C orgánico} = [(B - T) / g] (N) (0.39) \text{ mcf}$$

donde B es el volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos; T es el volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra; N es la normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras); g es el peso de la muestra empleada y mcf es el factor de corrección de humedad. El porcentaje de Materia Orgánica (MO) se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724$$