

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

FES-ZARAGOZA

“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE METALES PESADOS Y PROPIEDADES MAGNÉTICAS EN SUELOS URBANOS: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL SUELO EN LA CIUDAD DE MÉXICO”.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A:

**FEDERICO LÓPEZ BEATRIZ ADRIANA**

**PIMENTEL GÓMEZ FRANCISCO JAVIER**

ASESORA: DRA. OFELIA MORTON BERMEA

MÉXICO, D. F



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.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Adriana**

Te agradezco principalmente a ti Dios por haberme dado sabiduría y paciencia en los momentos más difíciles de mi formación como ingeniero químico.

A mi papa por su comprensión y consejos en los momentos de flaqueza y sobre todo por ser el mejor padre.

A mi querida mamá por enseñarme la disciplina, la responsabilidad y a resolver los problemas con dureza y frialdad.

A mis amadas hermanas Mariana y Viky por ser mis mejores amigas y compañeras en mi camino.

A ti Reina por aportarle a mi vida tu amor y consejos.

A ti Fran por recorrer este camino tan difícil a mi lado, por dedicarme tu tiempo y espacio sin condición alguna pero ante todo por creer en mi capacidad como profesionista.

### **Francisco**

A mis padres Francisco Pimentel y Alicia Gómez no sólo por el apoyo que me brindaron para terminar mis estudios profesionales sino por sus grandes consejos que me facilitaron cumplir uno de mis grandes sueños, sabiendo que no hay manera de pagarles ese enorme esfuerzo hecho por ustedes les agradezco profundamente.

A mis hermanos Blanca y Daniel que estuvieron en la mejor disposición para ayudarme cuando lo necesitaba.

A Adry por acompañarme hasta el final y que sin ella no hubiera sido capaz de lograrlo.

Agradecemos a la Dra Ofelia Morton por su gran apoyo y conocimiento que nos brindó para poder concluir nuestros estudios y a la M. en C. Elizabeth Hernández por su importante asistencia que nos enseñó sus habilidades para un mejor trabajo.

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	9
Índice de gráficas.....	10
Nomenclatura.....	11
Resumen.....	12
Objetivos.....	13

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

1.1	Antecedentes.....	14
1.2	El suelo.....	18
	1.2.1 Definición.....	18
	1.2.2 Composición y propiedades del suelo.....	19
1.3	Metales pesados como contaminantes de suelos.....	20
	1.3.1 Origen geoquímico de metales pesados.....	20
	1.3.2 Origen antropogénico de metales pesados.....	22
1.4	Propiedades de los metales pesados .....	23
1.5	Generalidades particulares de los metales pesados presentados en este estudio.....	26
	1.5.1 Cobre (Cu).....	26
	1.5.2 Zinc (Zn).....	28
	1.5.3 Plomo (Pb).....	29
	1.5.4 Vanadio (V).....	30
	1.5.5 Cromo (Cr).....	30

1.5.6	Níquel (Ni).....	31
1.6	Evaluación de la contaminación de suelos urbanos por metales pesados.....	32

## **CAPÍTULO II. MÉTODOS DE ANÁLISIS**

2.1	Introducción.....	34
2.2	Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).....	36
2.2.1	Introducción.....	36
2.2.2	Ventajas del método ICP-MS.....	38
2.2.3	Desventajas de método ICP-MS.....	40
2.2.4	Componentes del equipo ICP-MS.....	40
2.2.4.1	Sistema de introducción.....	41
2.2.4.2	Fuente de ionización.....	42
2.2.4.3	Interfase.....	42
2.2.4.4	Óptica iónica.....	43
2.2.4.5	Filtro de masas.....	43
2.2.4.6	Detector.....	44
2.2.4.7	Computadora.....	44
2.2.5	Factores externos que influyen en el proceso.....	44
2.2.5.1	Sistema de vacío.....	45
2.2.5.2	Recirculador de agua fría.....	45
2.2.5.3	Suministro de argón.....	46
2.2.5.4	Suministro de energía.....	46
2.2.5.5	Temperatura ambiental.....	46

2.3	Fluorescencia de rayos X (FRX).....	47
2.3.1	Introducción.....	47
2.3.2	Descripción de la técnica.....	47
2.3.3	Ventajas de la técnica FRX.....	48
2.3.4	Desventajas de la técnica FRX.....	48
2.4	Medición de las propiedades magnéticas: Técnica de susceptibilidad magnética.....	49
2.4.1	Introducción.....	49
2.4.2	Susceptibilidad magnética.....	51
2.4.2.1	Definición.....	51
2.4.2.2	Susceptibilidad y clasificación magnética de materiales.....	52
2.4.2.3	Técnica de medición.....	53
2.4.2.4	Ventajas de la técnica de susceptibilidad magnética.....	54
2.4.2.5	Desventajas de la técnica de susceptibilidad magnética.....	55

### **CAPÍTULO III. ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

3.1	Zona de estudio.....	56
3.2	Determinación cuantitativa de metales pesados por ICP-MS.....	57
3.2.1	Muestreo de suelos.....	57
3.2.2	Digestión ácida.....	58
3.2.3	Medición de las muestras por ICP-MS.....	61

3.3	Determinación cuantitativa de elementos mayores por FRX.....	63
3.4	Medición de la susceptibilidad magnética.....	64

#### **CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

4.1	Resultados del análisis experimental.....	65
4.2	Evaluación del contenido de metales pesados en muestras analizadas.....	70
4.3	Distribución espacial de los metales pesados en la ciudad de México.....	72
4.4	Influencia del tráfico vehicular sobre la contaminación de suelos urbanos.....	76
4.5	Relación entre los metales pesados y la susceptibilidad magnética.....	77

#### **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....84**

#### **BIBLIOGRAFÍA.....86**

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización de los metales, no metales y metaloides en la tabla periódica.....	24
Figura 2. Esquema general del equipo ICP-MS.....	40
Figura 3. Equipo de ICP-MS característico.....	41
Figura 4. Susceptibilímetro KLY-2 KAPPA BRIDGE.....	54
Figura 5. Total de puntos muestreados en la Ciudad de México y su zona conurbana.....	58
Figura 6. Esquema general del funcionamiento de un equipo de ICP-MS.....	61
Figura 7. Distribución de concentración de Pb.....	74
Figura 8. Distribución de concentración Zn.....	74
Figura 9. Distribución de concentración de Cu.....	74
Figura 10. Distribución de concentración de Ni.....	74
Figura 11. Distribución de concentración de Cr.....	75
Figura 12. Distribución de concentración de V.....	75

**ÍNDICE DE TABLAS****Pág.**

Tabla 1. Concentraciones promedio de metales pesados (mg/Kg) en suelos urbanos de diferentes ciudades del mundo.....	16
Tabla 2. Contenido natural (ppm) de metales pesados en los suelos.....	21
Tabla 3. Propiedades principales de los metales y no-metales.....	26
Tabla 4. Comparación de ICP-MS, ICP-AES y FLAMA AAS.....	39
Tabla 5. Procedimiento de digestión ácida.....	60
Tabla 6. Concentraciones de los metales pesados, elemento mayores (ppm) y susceptibilidad magnética específica X (1/gr) para las muestras analizadas.....	66
Tabla 7. Evaluación del contenido de metales pesados en las muestras analizadas.....	70
Tabla 8. Rangos de concentraciones por cada metal utilizados en las figuras 7-12.....	73
Tabla 9. Factor de Correlación utilizado el total de las muestras.....	82
Tabla 10. Factor de Correlación utilizado los valores más altos de susceptibilidad magnética (1/gr) de las muestras.....	82

**ÍNDICE DE GRÁFICAS****Pág.**

Gráfica 1. Aportación de los metales pesados en muestras de fondo y muestras enriquecidas de la Ciudad de México y su zona conurbana.....	72
Gráfica 2. Niveles de enriquecimiento por metales pesados en las cuatro diferentes zonas de la Ciudad de México.....	73
Gráfica. 3. Influencia del tráfico vehicular en la contaminación de suelos por metales pesados.....	76
Gráfica 4. Relación de la susceptibilidad magnética con Pb.....	78
Gráfica 5. Relación de la susceptibilidad magnética con Zn.....	78
Gráfica 6. Relación de la susceptibilidad magnética con Cu.....	79
Gráfica 7. Relación de la susceptibilidad magnética con Cr.....	79
Gráfica 8. Relación de la susceptibilidad magnética con V.....	80
Gráfica 9. Relación de la susceptibilidad magnética con Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	80
Gráfica 10. Relación de la susceptibilidad magnética con TiO <sub>2</sub> .....	81

**NOMENCLATURA**

Pb	Plomo
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Zn	Zinc
Cr	Cromo
V	Vanadio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
TiO <sub>2</sub>	Titania
HF	Ácido fluorhídrico
HClO <sub>4</sub>	Ácido perclórico
HNO <sub>3</sub>	Ácido Nítrico
ppm	Partículas por millón
mg/Kg	miligramo sobre kilogramo
A/m	Amperes sobre metro
FE	Factor de enriquecimiento
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo
X	Susceptibilidad magnética
Sm	Susceptibilidad magnética
FRX	Fluorescencia de rayos X
ICP-EAS	Espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo
INAA	Análisis instrumental por activación de neutrones
Flame AAS	Espectrometría de absorción atómica con flama

## RESUMEN

Este trabajo estudia la correlación entre propiedades magnéticas y el contenido de Pb, Zn, Cu, Ni, Cr y V en suelos urbanos de la ciudad de México, en donde se utilizó la susceptibilidad como parámetro magnético.

Se determinó la concentración total de cada uno de los metales por ICP-MS de 152 muestras de suelo superficial y se midió la susceptibilidad magnética utilizando un susceptibilímetro KLY-2 Kappa Bridge. Se calculó el factor de enriquecimiento, con el cual se pudo observar que el orden de enriquecimiento por metales pesados es de la siguiente manera  $Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > V$ . Los resultados demuestran que la principal fuente de contaminación de suelo en la ciudad es el tráfico vehicular.

El factor de correlación calculado para los valores más altos de susceptibilidad magnética determina una relación positiva con todos los metales de estudio, siendo el Cu y Zn los que presentan la relación más alta con la susceptibilidad magnética. Esto sugiere que las mediciones magnéticas puedan ser usadas como indicador de la contaminación de suelos por metales pesados.

## **OBJETIVOS**

- Evaluar la contaminación urbana en la zona metropolitana de la Ciudad de México, con base en las concentraciones totales de Pb, Ni, Cu, Zn, Cr y V en muestras de suelos superficiales. Comparar los resultados obtenidos con límites permisibles recomendados en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.
  
- Evaluar la relación entre el contenido de metales pesados y propiedades magnéticas en suelos urbanos de la Ciudad de México, con el propósito de encontrar una metodología sencilla y de bajo costo.

**CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN****1.1 Antecedentes**

El incremento acelerado de urbanización e industrialización de la ciudad de México ha provocado que sea una de las ciudades más pobladas del mundo, esto ha elevado el valor de los niveles de contaminación ambiental producidos por las emisiones industriales, aguas de desechos municipales e industriales, así como las emisiones vehiculares de más de 4 millones de automóviles que circulan en la zona urbana metropolitana. En particular la contaminación por metales pesados procedentes de estas fuentes ha incrementado notoriamente por lo que la calidad del medio ambiente se ha visto seriamente deteriorada.

La contaminación de suelos por estos metales debe ser ampliamente estudiada, en particular en grandes ciudades, ya que tienen diversos efectos toxicológicos en el ser humano. Es importante puntualizar que la mayor parte de la información toxicológica acerca de los metales pesados se ha obtenido a partir de estudios que han utilizado un solo metal, cuando en realidad los seres vivos están expuestos a mezclas de ellos. Así, por ejemplo la toxicidad de la mezcla tal vez difiera de la toxicidad de sus componentes. Por consiguiente no debe perderse la perspectiva de una exposición a mezclas y su implicación toxicológica cuando se plantea la información individual de cada metal<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Cervantes et al. 1999.

Dentro de los principales daños causados por algunos metales son: a) Plomo: afecta el coeficiente intelectual, presenta daños neurológicos irreversibles, aumenta los malestares generales como cólicos, dolores de cabeza y mareo, etc. b) Níquel: causa dermatitis, problemas pulmonares, úlceras, etc. c) Zinc: afecta la piel, las vías gastrointestinales, vómito, etc (Véase Cervantes et al. 1999 y Carson et al. 1986).

El grado de impacto antropogénico en una zona urbana puede ser evaluado en términos de concentración de metales pesados en suelos, tomando en cuenta que el suelo presenta concentración de estos metales de manera natural que dependen de la erosión de la roca parental en la zona<sup>2</sup>.

Durante las últimas décadas se han reportado muchos estudios de la evaluación de metales pesados en suelos urbanos relacionados a las emisiones industriales y vehiculares. Por ejemplo, en Warswan (Polonia) se observó un incremento de Pb, Cu y Ni y al mismo tiempo se presentó aumento en la intensidad del tráfico vehicular en un periodo de 20 años de 1977 a 1997<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Morton et al. 2002

<sup>3</sup> Kabata-Pendias, 2000

Otro estudio realizado en la ciudad de Palermo (Italia) demostró que el Pb, Zn y Cu provienen de la contaminación antropogénica, siendo el tráfico vehicular la principal fuente<sup>4</sup>.

La tabla 1 presenta trabajos reportados en algunas zonas urbanas.

Tabla 1. Concentraciones promedio de metales pesados (mg/Kg) en suelos urbanos de diferentes ciudades del mundo.

Ciudad	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	V	referencia
Roma	330.8						Angelote et. al. (1995)
Pittsburg	398						Carey et. al. (1980)
Boston	800						Spittler and feder(1979)
Warsaw	57	166	31	32	12		Czarnowska (1980)
Hamburgo	218.2	516	146.6	95.4	62.5		Lux (1986)
Salamanca	53.1						Sánchez-Camazano et. al. (1994)
Coruña	309	206	60	39	28		Cal-Prieto et. al. (2001)
Central Madrid	621						Pellicer (1985)
Madrid	161	210	71.7	74.7	14.1	30	De Miguelet. al. (1998)
Bangkok	47.8	118	41.7	26.4	24.8		Wilcke et. al. (1998)
Aberdeen	94.4	58.4	27	23.9	14.9		Peterson et. al. (1996)
Birmingham	570						Departamento of the Environment (1982)
Glasgow	216	207	97				Gibsonand Ferrer (1986)
Central de Londres	647						Rundle and Duggan (1980)
Londres	294	183	73				Thornton (1991)
Hong kong	93.4	168	24.8				Li et. al. (2001)
Hong kong	100	93.9	27.5				Wong et. al (1996)
Hong kong	89.9	58.8	16.1				Chen et. al. (1997)
Manila	213.6	440	98.7	114	20.9		Pfeiffer et. al. (1988)

<sup>4</sup> Salvagio et al. 2002

Muchos de estos trabajos presentan altos valores de Pb en suelos expuestos a alto tráfico vehicular.

La gran importancia ecológica y de riesgo a la salud debido a los metales en suelos ha atraído la atención de estancias gubernamentales encargadas de prevenir el deterioro del medio ambiente, esto ha llevado al desarrollo y establecimiento de normas ambientales con el propósito de controlar el riesgo asociado con el incremento excesivo de estos metales en el ambiente.

Recientemente en México se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece los criterios para determinar niveles de limpieza para la remediación de suelos contaminados por arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo hexavalente (Cr VI), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se) y talio (Tl). Estas normas están basadas en fuentes internacionales de información como: United States Environmental Protection Agency (USEPA) y World Health organization (WHO), además de incorporar criterios de calidad del suelo y el riesgo potencial de la salud humana.

Los estudios de distribución espacial en muestras de suelos urbanos son muy importantes para la identificación y evaluación de fuentes de contaminación.

Existen muy pocos estudios de la contaminación de suelos urbanos en la Ciudad de México. Morton Bermea et al. (2002) reporta el impacto de emisiones vehiculares en suelos expuestos a tráfico vehicular denso, sin embargo no existe información concerniente a la distribución espacial de estos elementos.

## **1.2 El suelo**

### **1.2.1 Definición**

El suelo constituye un recurso natural de gran importancia, que desempeña funciones en la superficie terrestre como reactor natural y hábitat de organismos, así como soporte de infraestructura y fuente de materiales no renovables<sup>5</sup>.

El suelo es un componente clave de ecosistemas terrestres, esencial para el ser humano, el crecimiento de plantas y juega un rol importante base para la supervivencia.

---

<sup>5</sup> Volke et al. 2005

### **1.2.2 Composición y propiedades del suelo**

El suelo es un elemento filtrante, amortiguador y transformador, que regula los ciclos del agua y los biogeoquímicos. Tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos. El suelo, además, promueve fenómenos de transpiración del aire a través de la superficie.

El suelo constituye, junto con el agua, el aire y la luz solar, el fundamento de la vida en los ecosistemas terrestres, alberga una gran diversidad de organismos y microorganismos.

Por sus características físicas, químicas y mecánicas, el suelo posee propiedades de soporte para el desarrollo de actividades forestales, recreativas y agropecuarias, además de socio- económicas como vivienda, industria y carreteras, entre otras.

El suelo es un yacimiento de materias primas, como minerales no metálicos de interés para la construcción (piedra, mármol, caliza, yeso, arena), minerales metálicos (blenda, galena, siderita, pirita) y combustibles fósiles como el petróleo.

El suelo es una mezcla compleja de materiales inorgánicos (fracción mineral, formada principalmente de arcillas, limo y arena), materia orgánica, agua/aire y organismos vivos.

### **1.3 Metales pesados como contaminantes de suelos**

#### **1.3.1 Origen geoquímico de metales pesados**

Los elementos mayores, O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti y P, constituyen aproximadamente el 99 % del total de elementos que contiene la corteza terrestre, el resto son los elementos traza (0.1%), que normalmente en concentraciones individuales no exceden de 1000 mg/kg (ppm) de manera natural. La concentración natural de metales pesados en suelos depende de la erosión de la roca parental en la zona<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Alloway, 1995

La concentración de elementos traza en suelos puede ser muy variada y depende de la naturaleza de las rocas y demás fuentes naturales de la zona así como de los procesos físicos de interperismo químico determinada por las condiciones climáticas.

La tabla 2 muestra el contenido natural de los metales pesados analizados en el presente trabajo.

Tabla 2. Contenido natural (ppm) de metales pesados en los suelos.

<b>Metal pesado</b>	<b>Concentración natural en suelos (ppm)</b>
Cr	4-100
Cu	5.5-50
Ni	0.5-80
Pb	3-14
V	20-160
Zn	20-75

Fuente: Alloway, 1995

### **1.3.2 Origen antropogénico de metales pesados**

Cuando un suelo excede las concentraciones naturales de metales pesados, se dice que está enriquecido o contaminado. El incremento en los valores de los metales pesados es el resultado de las actividades del ser humano. Se detectan valores tóxicos de metales pesados en las cercanías de sitios de desperdicio municipal e industrial y en diversos tipos de suelo, incluyendo los agrícolas. Las minas generan todo tipo de metales y originan contaminación significativa de los suelos.

Las industrias que presentan las mayores emisiones de metales pesados según los elementos son: a) Cromo: industrias procesadoras de cemento, colorantes, curtiduría, material fotográfico, materiales refractarios, metalurgia y pinturas. b) Níquel: termoeléctricas, utensilios domésticos, pinturas, cerámica, aceros, metalurgia, joyería, prótesis dentales y quirúrgica. c) Plomo: la combustión de gasolina con tetraetilo de plomo, plantas de fundición de metales, pesticidas con arsenato de plomo (en desuso), fertilizantes fosfatados y pinturas con plomo.

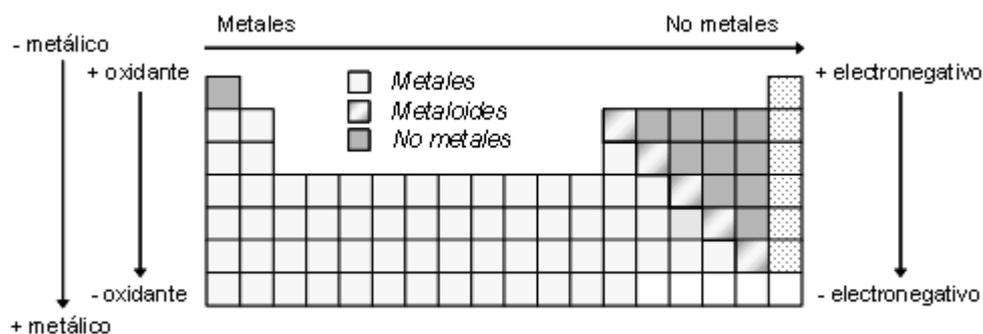
La contribución de origen residencial (no industrial) a la contaminación por metales pesados es significativa, debido a la cantidad de metales pesados que por el uso doméstico de productos de lavandería se arrojan por el drenaje.

### **1.4 Propiedades de los metales pesados**

Los metales son sustancias con características de brillo y que son buenos conductores de calor y electricidad; con excepción del mercurio, todos los metales son sólidos a temperatura ambiente. Son más o menos maleables (formación de láminas) y dúctiles (formación de alambres). La mayoría posee propiedades de dureza, con excepción de los alcalinos, que son muy suaves. Químicamente, estos tienden a perder electrones para formar iones positivos (cationes).

Los elementos de la tabla periódica se definen como metales (izquierda) y no metales (derecha) como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Localización de los metales, no metales y metaloides en la tabla periódica



Un no metal es un elemento que no exhibe las características de un metal. La mayoría de los no metales son gases o sólidos. Los metaloides o semi metales son elementos que presentan propiedades de ambos grupos. En muchos aspectos, los metaloides se comportan como no metales, química y físicamente. Sin embargo, en su propiedad física más importante, la conductividad eléctrica, se parecen a los metales. Los metaloides tienden a ser semiconductores, pero conducen la electricidad en menor grado que los metales<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Volke et al. 2005

En la tabla 3 se muestran las diferencias entre las características de los metales y no metales.

Aunque el término metal pesado es usado comúnmente en materia de contaminación ambiental, su uso en éste y otros contextos ha causado confusión. Una de las definiciones más comunes se aplica a metales con una densidad (gravedad específica) mayor a  $6 \text{ g/cm}^3$ . Sin embargo, dentro de esta clasificación también caen elementos (no metales) con propiedades químicas muy diferentes, además de que la gravedad específica no es significativa en cuanto a la reactividad o la toxicidad de un metal. El término también se ha definido con base en otras propiedades fisicoquímicas (peso, número atómico y reacción con otros elementos) y toxicológicas, por lo que resulta inconsistente. Otra clasificación más aceptada, se basa en la acidez de Lewis y se enfoca en las propiedades químicas de los metales, de manera que los metales pesados se clasifican como elementos de clase A (duros), clase B (suaves) y de frontera. Esta clasificación se basa en la forma en la que se unen los metales en sus complejos y determina las posibilidades para la formación de los mismos.

Tabla 3. Propiedades principales de los metales y no-metales

<b>Metales</b>	<b>No-metales</b>
<i>Propiedades Físicas</i>	
Buenos conductores de electricidad. Dúctiles. Maleables y lustrosos. Sólidos. Punto de fusión alto. Buen conductor de calor.	Malos conductores de electricidad. No dúctiles. No maleables. Sólidos, líquidos o gases. Punto de fusión bajo. Malos conductores de calor.
<i>Propiedades químicas</i>	
Reacción con ácidos. Formación óxidos básicos: Reacción con ácidos. Forman cationes. Forman haluros iónicos.	No reaccionan con ácidos. Forman óxidos ácidos: reaccionan con bases. Forman aniones. Forman haluros covalentes.

## 1.5 Generalidades particulares de los metales pesados en este estudio

### 1.5.1 Cobre (Cu)

El cobre es uno de los más importantes y esenciales elementos para plantas y animales, es de color rojizo y toma un lustre metálico, es maleable, dúctil y un buen conductor del calor y la electricidad. Los principales usos del cobre son la producción de alambre, latón y aleaciones de bronce.

En la naturaleza el cobre forma sulfatos, carbonatos y otros componentes, además se considera que está presente con una concentración promedio de 50 ppm en el suelo, en suelos contaminados se han reportado valores de concentración en un rango de 14-2800 ppm.

La contaminación de suelos por componentes de cobre resulta de la utilización de fertilizantes, spray y desperdicios agrícolas e industriales, también de las emisiones industriales. Algunas fuentes incidentales de cobre se deben a la corrosión de materiales de construcción hechos de aleaciones de cobre, como alambre eléctrico, tuberías, etc.

El enriquecimiento de suelos por cobre es de 5 a 10 veces más en áreas urbanas que en áreas rurales, teniendo como fuente de contaminación principal la combustión de productos de madera, combustible fósil y desperdicios.

### **1.5.2 Zinc (Zn)**

El zinc es un elemento traza esencial para humanos, animales y plantas. En el caso de los humanos es recomendado en la dieta alrededor de 15 mg/día, actúa como un componente estructural en numerosas enzimas relacionadas con la energía del metabolismo.

En suelos naturales se presenta con una concentración promedio de 75 ppm, cuando excede este valor se considera dañino, en años recientes las concentraciones de zinc en suelos han aumentado, particularmente en países industrializados como consecuencia de las actividades humanas, se han reportado concentraciones de miles de ppm. La contaminación de suelos por zinc puede crear un importante problema ambiental ya que pertenece a un grupo de elementos traza potencialmente más peligroso.

Las fuentes antropogénicas de este metal son semejantes a las del cobre.

### **1.5.3 Plomo (Pb)**

El plomo no es benéfico para las plantas y animales, se le conoce por ser un elemento venenoso para los mamíferos, a demás afecta en gran medida al ser humano. Cuando se detecta toxicidad de plomo en el cuerpo puede causar serios daños a la salud por ingestión o inhalación, particularmente en niños<sup>8</sup>.

El suelo y cenizas son fuentes importantes de plomo para los niños, además el plomo en la sangre puede estar relacionado directamente con el suelo.

El plomo se presenta en suelos no contaminados con concentraciones menores a 20 ppm, sin embargo se han reportado valores mucho más elevados en diferentes áreas del mundo como consecuencias de emisiones antropogénicas. Los niveles de Pb en suelos que pueden ser tóxicos son difíciles de evaluar, pero muchos autores han reportado muy similares concentraciones en un rango de 100- 500 ppm<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Salvagio et al. 2002

<sup>9</sup> Kabata-Pendias, 2000

Las principales fuentes de contaminación por este metal son: actividades relacionadas a la fundición, desperdicios domésticos e industriales, emisiones vehiculares y pinturas.

#### **1.5.4 Vanadio (V)**

El comportamiento de vanadio en suelos a recibido muy poca atención debido a que no hay muchos reportes de contaminación por este metal, es probable que los procesos industriales de ciertos minerales y la combustión pueden aumentar las deposiciones de residuos de vanadio en suelos. El valor natural de este metal en suelos es de una concentración aproximada de 160 ppm.

#### **1.5.5 Cromo (Cr)**

El cromo es un metal de transición más comúnmente utilizado en trabajos experimentales y en aleaciones de acero, es gris y quebradizo, además es resistente al ataque por oxidación y corrosión. La presencia de cromo en aleaciones aumenta la dureza y la resistencia al desgaste mecánico.

De manera natural el cromo se encuentra en el suelo en concentraciones de 100 ppm, y su contenido en la superficie del suelo puede aumentar debido a la contaminación de varias fuentes, de las cuales las principales son muchos desperdicios industriales.

### **1.5.6 Níquel (Ni)**

El níquel es un metal de transición usado en aleaciones, pilas y componentes electrónicos, es un metal plateado duro pero quebradizo capaz de conducir el calor y la electricidad.

La concentración promedio del níquel es de 80 ppm en suelos naturales sin embargo es un contaminante serio proveniente de la combustión, fertilizantes y actividades industriales.

## **1.6 Evaluación de la contaminación de suelos urbanos por metales pesados.**

Para determinar concentraciones de metales pesados en muestras ambientales como el suelo se utilizan diversos métodos analíticos, algunos de ellos son: análisis instrumental por activación de neutrones (INAA), fluorescencia de rayos X (FRX), espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES). Sin embargo actualmente la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) se presenta como un método alternativo de gran sensibilidad sumamente necesario para el análisis de elementos traza<sup>10</sup>.

Estos métodos tienen como característica de ser laboriosos y costosos, es por esto que se han presentado alternativas efectivas y más sencillas para evaluar el grado de contaminación de suelos.

Lu y Bai (2005) estudiaron la correlación de propiedades magnéticas con el contenido de metales pesados, concluyendo que la medición de parámetros magnéticos es una herramienta útil para detectar metales pesados en suelos.

---

<sup>10</sup> Hernández et al. 1998

Este desarrollo de técnicas magnéticas se ha convertido en una herramienta muy útil para interpretar distintos procesos que ocurren en el medio ambiente. Estudios recientes relacionados con el estado de contaminación de ambientes europeos constituyen un claro ejemplo del tema, en dichos estudios la susceptibilidad magnética es utilizada e investigada con el objetivo de evaluar la contaminación de suelos por metales pesados<sup>11</sup>.

Los parámetros magnéticos son una medida indirecta para conocer la posible existencia de metales pesados en suelos, es por ello la importancia de estudiar la relación entre los metales pesados y la susceptibilidad magnética. Estudios han reportado la existencia de relaciones lineales entre parámetros magnéticos y metales pesados. Durza (1999) únicamente pudo establecer una relación entre la susceptibilidad magnética y la suma de metales pesados en un área reducida cerca de una planta metalúrgica.

Se ha reportado que los suelos cerca de áreas urbanas tienen susceptibilidad magnética elevada, la cual es atribuida a la deposición de partículas magnéticas de varias fuentes<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> Chaparro, 2006

<sup>12</sup> Lu et al. 2005

**CAPÍTULO II. MÉTODOS DE ANÁLISIS****2.1 Introducción**

En la actualidad se cuenta con varias herramientas para el análisis de metales pesados en muestras ambientales algunas como son: espectrometría de absorción atómica con flama (Flame AAS), espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) la cual ha tenido un gran desarrollo debido a la gran sensibilidad que presenta capaz de medir muy bajas concentraciones traza, fluorescencia de rayos X (FRX) que es más conveniente en la medición de elementos mayores.

Recientemente el magnetismo ambiental ha tenido un auge importante por ser una técnica más sencilla para conocer la contaminación ambiental, en particular la susceptibilidad magnética, que nos indica la posible existencia de metales pesados en suelos contaminados.

Esta técnica a pesar de que no indica la concentración de elementos, puede ayudar a conocer de manera indirecta el grado de contaminación por metales pesados.

En el presente trabajo se utilizó la técnica ICP-MS para determinar las concentraciones de los metales pesados en muestras de suelos, la fluorescencia de rayos X para las concentraciones de elementos mayores usados como referencia para la susceptibilidad magnética. Estas dos técnicas analíticas se describen a continuación así como la susceptibilidad magnética usada como un método alternativo con el objetivo de relacionar la concentración de metales pesados.

## **2.2 Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)**

### **2.2.1 Introducción**

A finales de los años 60's la espectrometría de emisión atómica usando plasma de acoplamiento inductivo llego hacer una técnica futurista muy importante para el análisis de elementos en niveles traza relacionada directamente a las aplicaciones de monitoreo ambiental e investigación medica<sup>1</sup>; sin embargo presentó severos efectos de matriz, debido principalmente a la baja temperatura del plasma.

Se tomó la decisión de implementar un plasma similar al utilizado en el espectrómetro mencionado. Poco después se comenzó el desarrollo del método en los laboratorios Ames y en la universidad de Toronto. El grupo de Ames empezó a trabajar sobre una fuente ICP mientras que el grupo de Toronto utilizó un microondas de plasma inducido con su propia fuente iónica. Sin embargo, no fue sino hasta 1982 que se dio ha conocer la primera demostración de extracción de iones. Un año después se lanzaron al mercado los dos tipos comerciales de ICP-MS: El PlasmaQuad VG, y el SciexElan<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Jarvis et al. 2003

<sup>2</sup> Hernández et al. 1998

En México el sistema ICP-MS es un método poco difundido. En el año de 1995 el Instituto de Geofísica de la UNAM adquirió un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

El método consiste en conjugar dos principios básicos: ionización en el plasma, filtrado y detección de iones en un espectrómetro de masas.

El plasma de acoplamiento inductivo es un tipo de flama que alcanzan temperaturas muy elevadas (6000 a 10000 °K) que permite la extracción de uno o dos electrones de la capa exterior del átomo produciendo iones con cargas positivas más electrones:



El filtrado de iones producidos en el plasma se basa en la diferencia de trayectorias de iones a través de un campo eléctrico. El sistema de detección provee una señal eléctrica que es proporcional a la cantidad de iones que salen del filtro de masas.

### **2.2.2 Ventajas del método ICP-MS**

Debido a la alta sensibilidad y del sistema de detección del método ICP-MS se destina para el análisis de elementos traza, es decir para elementos que se encuentran en concentraciones menores de 0.01%.

ICP-MS ofrece una serie de ventajas sobre otros métodos analíticos convencionales:

- Capacidad de hacer un análisis multielemental simultáneo.
- Amplio rango lineal dinámico. Para la mayoría de los elementos en el rango de 0.01 a 100 ppm.
- Límites bajos de detección.
- Espectro simple, para matrices complejas.
- Posibilidad de medir todo el grupo de platinos y metales preciosos.
- Capacidad de analizar el grupo completo de lantánidos, en muchos casos sin necesidad de hacer separación previa.
- Posibilidad de utilizar estándar interno simultáneamente.
- Tamaño de muestra pequeña (a partir de 10 mg).
- Versatilidad.

Los parámetros más importantes de ICP-MS y de otros métodos analíticos de análisis de elementos traza se reportan en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de ICP-MS, ICP-AES y FLAMA AAS.

Método	ICP-MS	ICP-AES	FLAME AAS
<b>Limites de detección</b>	Excelente para la mayoría de los elementos	Muy bueno para la mayoría de los elementos	Muy bueno para algunos elementos
<b>Razón de procesamiento de muestra.</b>	2-4 s/elem. Paquete de 15 elementos 2-6 min.	5- 30 elem/min	15 s/elem
<b>Rango lineal dinámico</b>	10 <sup>3a</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>
<b>Interferencias:</b> Espectrales Químicas(matriz) Ionización	Poca Moderadas Mínimas	Comunes Casi ni una Mínimas	Casi ni una Muchas Algunas
<b>Sólidos disueltos</b> (conc. Max. Tolerable)	0.1-0.4%	2-25%	0.5-3%
<b>Numero de elementos</b>	>75	>73	>68
<b>Cantidad de muestra empleada</b>	Poca	Alta	Muy alta
<b>Análisis semicuantitativo</b>	Si	No	No
<b>Análisis de relaciones isotópicas</b>	Si	No	No
<b>Operaciones de rutina</b>	Fácil	Fácil	Fácil
<b>Desarrollo del método</b>	Se requiere técnica	Se requiere técnica	Fácil
<b>Operaciones automáticas</b>	Si	Si	No
<b>Gas combustible</b>	No	No	Si
<b>gas soporte</b>	Argón	Argón	
<b>costo de operación</b>	Alto	Alto	Bajo
<b>Costo de implementación</b>	Muy alto	Alto	Bajo

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

ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo.

FLAME AAS Espectrometría de Absorción Atómica con Flama.

### 2.2.3 Desventajas del método ICP-MS

- Costo de adquisición del equipo y de análisis de rutina alto.
- Interferencias espectrales y de matriz.
- Obstrucción en los conos cuando la muestra presenta altos contenidos de sólidos.
- Requerimiento de mucho tiempo en la capacitación del personal para operar el equipo.

### 2.2.4 Componentes del equipo del ICP-MS.

La figura 2 presenta un esquema general de los componentes del equipo de ICP-MS.

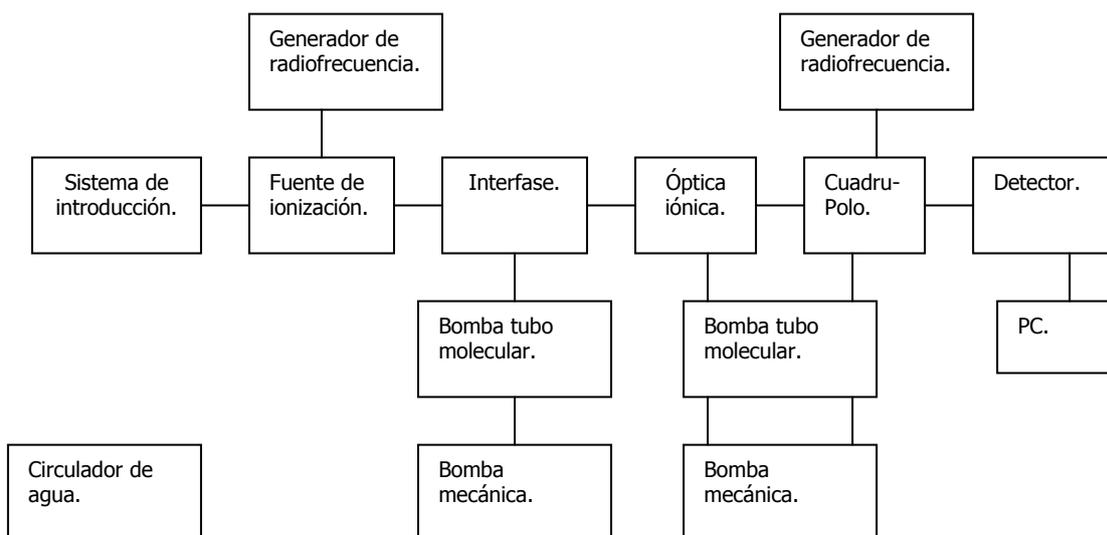


Figura 2. Esquema general del equipo ICP-MS

Los componentes que presenta el equipo son característicos de un espectrómetro de masas con ICP y los mismos principios se conservan en instrumentos de diferentes marcas<sup>3</sup>. La figura 3 es un espectrómetro de masas característico.



Figura 3. Equipo de ICP-MS característico.

#### **2.2.4.1 Sistema de introducción**

La introducción de la muestra es en forma de aerosol, para lograr esto la muestra se convierte en una solución acuosa. Este sistema consiste de un tubo de material neutro y una serie de mangueras, por las cuales la muestra se bombea con una bomba peristáltica hacia el interior del nebulizador.

---

<sup>3</sup> Hernández et al. 1998

El gas entra al nebulizador con cierta presión perpendicularmente al paso de la muestra transportándola a la cámara de nebulización.

En esta parte las gotas de mayor tamaño se condensan en una berrera y se drenan al tubo de desechos, mientras que las gotas de menor tamaño son acarreadas directamente a la antorcha de cuarzo y al plasma mismo.

#### **2.2.4.2 Fuente de ionización**

El plasma acoplado inductivamente se genera por una descarga de electrodos es un gas (Argón) soportado sobre una antorcha de cuarzo a presión atmosférica y sujeto a una bobina con radio frecuencia constante de 40.68 Mhz. la muestra introducida al plasma con flujo de argón entra a la región de más alta temperatura en donde se volatiliza, se disocia y finalmente se ioniza. El producto que sale es una mezcla con prevalencia de iones cargados positiva y negativamente, sobre todo los demás tipos de partículas (bicargadas, neutrales y atómicas).

#### **2.2.4.3 Interfase**

Es la parte crítica que une a las dos partes principales del instrumento entre si, y consiste de dos conos de un diseño especial, los cuales dividen el área de presión atmosférica de la cámara de vacío donde se realiza el filtrado

de masas. La función de interfase es extraer del plasma la parte representativa de la muestra original por la diferencia de presiones a través de la apertura del cono muestreador.

#### **2.2.4.4 Óptica iónica**

La fuente de iones producida en el plasma es enfocada hacia el filtro de masas a través de lentes electrostáticas, los cuales son placas metálicas cargadas potencialmente y permiten únicamente el paso de partículas cargadas positivamente.

#### **2.2.4.5 Filtro de masas**

El filtro de masas utilizado en un ICP-MS es un cuadrupolo que consiste de cuatro barras hiperbólicas en corte transversal, montadas de tal manera que quede un canal de 12 mm entre las mismas. El campo eléctrico alterno generado entre las barras ocasiona que las partículas cargadas eléctricamente sean atraídas o rechazadas, con esto el ion puede viajar a través del espacio entre las barras del cuadrupolo.

**2.2.4.6 Detector**

La cantidad de iones que sale del cuadrupolo es detectada como una señal eléctrica. La señal eléctrica obtenida del cuadrupolo puede ser procesada de dos maneras diferentes: en forma análoga, donde la corriente generada por el detector es integrada después de determinado tiempo; en forma de pulso continuo, donde se cuentan continuamente los iones que llegan al detector.

**2.2.4.7 Computadora**

Actualmente la mayoría de los equipos se manejan a través de una computadora. Los programas especialmente diseñados para estos fines permiten visualizar, mejorar y controlar la señal amplificada y digitalizada, así como programar el análisis del mismo.

**2.2.5 Factores externos que influyen en el proceso**

Para lograr un arranque óptimo del equipo y estabilidad en la señal, se requiere tener un control en los parámetros ambientales e instrumentales, y para tal propósito se requiere controlar los siguientes factores:

**2.2.5.1 Sistema de vacío**

Consiste de dos bombas mecánicas y dos turbomoleculares. Una de las bombas mecánicas es usada para crear el vacío en su primera etapa (interfase) en el tanque del espectrómetro de masas, y la otra se utiliza para la segunda y tercera etapa para respaldar las dos bombas termoleculares, las cuales suministran el vacío.

**2.2.5.2 Recirculador de agua fría**

El agua es bombeada de su tanque al espectrómetro y regresa al radiador donde es enfriada y después regresa al tanque. El recirculador utiliza un ventilador situado en la parte de atrás que proporciona un flujo de aire firme a niveles muy bajos de ruido. El recirculador emplea una bomba de desplazamiento positivo la cual incorpora un regulador de presión para prevenir que la presión del agua exceda las 40 psi.

### **2.2.5.3 Suministro de Argón**

Para llevar a cabo la operación normalmente se utiliza el argón de alta pureza (99.99 %). El equipo debe purgarse por lo menos 12 horas antes de iniciar el arranque. La presión de entrada debe de ser constante (52 psi), de lo contrario en equipo no tiene un funcionamiento adecuado.

### **2.2.5.4 Suministro de energía**

Debido a su naturaleza eléctrica los instrumentos del ICP-MS son muy sensibles a las variaciones en la red eléctrica, por lo cual el establecimiento de condiciones generales es un requerimiento crítico para su instalación y uso cotidiano.

### **2.2.5.5 Temperatura ambiental**

El cuarto donde se localiza el instrumento debe tener un enfriador de aire, el cual permite regular la temperatura, con una variación de  $\pm 3^{\circ}$  C para mantener una señal estable.

## **2.3 Fluorescencia de Rayos X**

### **2.3.1 Introducción**

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica multi elemental que es capaz de detectar la mayoría de los elementos (con la excepción de aquellos con un número atómico menor que 8, para los cuales es necesario equipo especial).

La fluorescencia de rayos X ha sido aplicada para determinar constituyentes mayores de suelos, pero su resolución de sensibilidad la hace menos apropiada para el análisis de elementos traza. A demás es una de las técnicas más usadas en el análisis de suelos<sup>4</sup>.

### **2.3.2 Descripción de la técnica**

La técnica de fluorescencia de rayos X consiste en la excitación de una muestra por una fuente de rayos X. Esta fuente excita los electrones de los elementos que constituyen la muestra de tal manera que algunos de ellos abandonan sus niveles orbitales originales.

---

<sup>4</sup> Alloway, 1995

Posteriormente, otros electrones ocuparán los lugares dejados por aquellos, emitiéndose un fotón con una energía característica para cada elemento. La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición electrónica.

### **2.3.3 Ventajas de la técnica FRX**

- Es una técnica capaz de determinar varios elementos a la vez.
- Determina satisfactoriamente elementos mayores.
- Puede determinar la mayoría de los elementos.
- Es un método rápido de detección

### **2.3.4 Desventajas de la técnica de FRX**

- La sensibilidad que presenta no es tan apropiada.
- Es una técnica costosa
- Se necesita capacitación

## **2.4 Medición de las propiedades magnéticas: Técnica de susceptibilidad magnética.**

### **2.4.1 Introducción**

Desde el siglo IV a.C. han sido conocidas las propiedades magnéticas de materiales en los suelos tales como "piedras imán", los cuales poseían un alto contenido de óxidos ferromagnéticos, entre ellos magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Las conclusiones de varios trabajos relacionados pusieron fin a diversas especulaciones acerca del tema y marcaron en el siglo XVII un comienzo en el geomagnetismo<sup>5</sup>.

El magnetismo ambiental es un campo de las ciencias de la tierra y físicas mucho más reciente que ha potenciado su importancia desde los 80's a partir de desarrollo de nuevas técnicas y métodos de mediciones magnéticas, así como de la investigación de diferentes parámetros magnéticos y su interpretación física en contextos geológicos. Las técnicas magnéticas han sido mejoradas y desarrolladas con rapidez convirtiéndose en herramientas muy útiles para interpretar distintos procesos que ocurren en el ambiente como son cambios globales del ambiente, procesos climáticos y el impacto humano sobre el medio ambiente.

---

<sup>5</sup> Chaparro, 2006

En los últimos años el impacto humano en ecosistemas, especialmente a través de la contaminación atmosférica, ha incrementado su potencial perjudicial convirtiéndose en un tema ampliamente tratado de diferentes campos de estudio. Si bien las técnicas de mediciones magnéticas junto con las químicas son utilizadas para el monitoreo de contaminantes, es importante discriminar entre las contribuciones naturales y las hechas por el hombre, lo cual puede lograrse a través de métodos magnéticos en forma relativamente sencilla, rápida y con un bajo costo<sup>6</sup>.

Es importante destacar que las mediciones magnéticas, en particular la susceptibilidad magnética, son suficientemente sensibles para detectar la señal magnética de la fracción minoritaria de materiales ferromagnéticos, en la mayoría de los casos con concentraciones no superiores al 1%. La medición de la susceptibilidad magnética resulta una herramienta muy útil para identificar los portadores magnéticos en suelos. La importancia del conocimiento de estos portadores reside en su capacidad de registrar y grabar el campo magnético terrestre, registrar cambios climáticos y diferentes procesos ocurridos en la naturaleza, así como también de adsorber y/o incorporar en su estructura cristalina elementos tóxicos cuando son producidos por diversas fuentes antropogénicas por ejemplo: Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, etc.

---

<sup>6</sup> Chaparro, 2006

Esta última característica constituye uno de los principales objetos de estudio del presente trabajo.

La concentración de elementos tóxicos y partículas magnéticas, especialmente magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y/o hematina ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), presentes en las emisiones antropogénicas (cenizas) dependen de varios factores, tales como, característica del material combustible o condiciones de combustión. Las concentraciones de materiales magnéticos y metales pesados pueden estar ligadas<sup>7</sup>.

La asociación mencionada entre portadores magnéticos y contaminantes constituye la base para el uso de los métodos magnéticos en los estudios de contaminación. Este hecho permite investigar las relaciones entre parámetros magnéticos y contenidos de metales pesados.

## **2.4.2 Susceptibilidad magnética**

### **2.4.2.1 Definición**

En presencia de un campo magnético se induce una magnetización en un material. La magnetización es un efecto macroscópico debido a la contribución microscópica de momentos magnéticos bipolares inducidos y permanentes.

---

<sup>7</sup> Chaparro, 2006

La susceptibilidad magnética ( $\chi$ ) es un parámetro característico del material, la cual podemos definir como la razón entre la magnetización inducida en el campo magnético al cual está sujeto dicho material.

La susceptibilidad magnética de un material puede verse como una medida de la facilidad que presenta un material para ser magnetizado por un campo magnético dado.

#### 2.4.2.2 Susceptibilidad y clasificación magnética de materiales

Los materiales pueden clasificarse magnéticamente según el valor de su susceptibilidad magnética en tres grupos principales:

Materiales diamagnéticos:  $\chi < 0$

Materiales paramagnéticos:  $\chi > 0$

Materiales ferromagnéticos:  $\chi \longrightarrow \infty$

Debido al exclusivo interés de los materiales ferromagnéticos en el presente trabajo se describirán a continuación:

La mayoría de los materiales no responden a un campo magnético, sin embargo hay algunos materiales, llamados ferromagnéticos, que son sensibles y responden.

Estos materiales consisten de moléculas que son como imanes pequeños, tienen polos norte y sur e inducen un campo magnético. Originalmente estas moléculas tienen una orientación aleatoria. Esto causa que sus campos se cancelen entre si y parecen no tener propiedades magnéticas.

Cuando se aplica una fuerza magnética exterior las moléculas se alinean en el sentido de la fuerza exterior. Así los campos magnéticos se unen (suman) y estos materiales se comportan como imanes (están imantados)

#### **2.4.2.3 Técnica de medición**

Para la medición de la susceptibilidad magnética en una muestra se utiliza un susceptibilímetro (KLY-2 KAPPA BRIDGE), un equipo característico de este tipo se muestra en la figura 4.



Figura 4. Susceptibilímetro KLY-2 KAPPA BRIDGE

El principio de funcionamiento de este equipo es la generación de un campo magnético, al cual responderá toda muestra a analizar, la respuesta a este campo será medida por el equipo y es a lo que se le conoce como susceptibilidad magnética, la cual es adimensional. Las especificaciones del equipo son:

- Gama de temperaturas: 300 ° K a 975 ° K
- Campo de la CA: 300 A/m
- Frecuencia: 920 hertzios

#### 2.4.2.4 Ventajas de la técnica de susceptibilidad magnética

- Es una técnica sencilla que no requiere mucho tiempo de capacitación.
- Es una técnica relativamente económica.

- Es una técnica confiable y rápida para la estimación cualitativa de la contaminación antropogénica.
- Sus mediciones son rápidas y simples.

#### **2.4.2.5 Desventajas de la técnica de susceptibilidad magnética**

- No indica los contaminantes y sus concentraciones totales.
- Requiere de métodos más detallados para un completo análisis cuantitativo de la contaminación de suelos.

**CAPÍTULO III. ANÁLISIS EXPERIMENTAL****3.1 Zona de estudio**

El desarrollo industrial de la Ciudad de México fue ayudada por el hecho de que tenía la mejor infraestructura del país, el más grande mercado de consumidores y una fuerza de trabajo relativamente bien entrenada. Durante los siguientes cuatro siglos el nivel de la población creció despacio hasta el espectacular crecimiento en el siglo XX. La migración fue más importante que el incremento natural en intensificar el crecimiento de la población en la ciudad. Este rápido crecimiento en la ciudad es el resultado de las políticas que favorecieron la concentración de la producción industrial. Actualmente la ciudad cuenta con más de 20 millones de habitantes y se estima que los 4 millones de autos privados que circulan en la ciudad son responsables del 50% de congestión de tráfico. Las principales fuentes de contaminación de la ciudad y sus zonas conurbanas son el tráfico vehicular y las emisiones industriales.

## **3.2 Determinación cuantitativa de metales pesados por ICP-MS**

### **3.2.1 Muestreo de suelos**

La zona conurbana de la Ciudad de México fue dividida en cuatro cuadrantes para poder tener una mejor distribución de muestreo, el muestreo utilizado fue a criterio de donde fueron tomadas 152 muestras de suelo expuestas a diferentes condiciones de tráfico y 2 muestras más, llamadas muestras de fondo, aparentemente sin contaminación, con el propósito de tener una base de comparación, la figura 5 muestra las zonas donde las muestras fueron recolectadas. Las muestras fueron obtenidas tanto en parques como en avenidas principales en un área de superficie aproximadamente de 200cm<sup>2</sup>. Todas las muestras fueron tomadas superficialmente y con un peso aproximado de 100 gr., excepto las muestras de fondo las cuales fueron tomadas con una profundidad de 2m aproximadamente. Todas las muestras fueron recolectadas utilizando una espátula de teflón y almacenadas en bolsas de polietileno.



Figura 5. Total de puntos muestreados en la Ciudad de México y su zona conurbana.

### 3.2.2 Digestión ácida

Debido a la humedad que se encuentra en el material muestreado se sometió a un secado de aproximadamente 48 hr en una estufa a una temperatura de 80° C. Una vez ya seco el material se pulverizó totalmente, esto a causa de que el protocolo de recepción de muestras de laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM exige que estas estén perfectamente secas y molidas a un tamaño de malla 200. Durante la pulverización se utilizó un mortero de anillos en acero de carbono de tungsteno en cerámica.

Para la determinación de los metales es necesario descomponer las muestras, para lograr este fin se realizó una digestión ácida a 0.2 gr de la muestra utilizando una mezcla de ácidos (10 ml de HF y 4 ml de HClO<sub>4</sub>). La solución fue evaporada hasta la formación de una pasta cristalina y aforada a 100 ml. con una solución estándar de In-Re de 10 ug/l en 2% HNO<sub>3</sub>. El equipo y reactivos junto con el procedimiento utilizado en esta etapa se puntualiza en la tabla 5.

Tabla 5. Procedimiento de digestión ácida.

Digestión ácida		
Equipo y materiales	Reactivos	Procedimiento
<p>1. Parrilla de calentamiento de 150 °C colocada es la campana de extracción de gases.</p> <p>2. Estufa de 150 °C.</p> <p>3. Balanza analítica.</p> <p>4. Vasos de teflón de 50 ó 100 ml</p> <p>5. Matraces volumétricos de 50 ó 100 ml. de pirex.</p> <p>6. Pipetas microdosificadoras</p> <p>7. Botellas nuevas de polipropileno (perfectamente lavadas) de 150 ml.</p>	<p>1. Ácido fluorhídrico tridestilado.</p> <p>2. Ácido perclórico ultra puro</p> <p>3. Ácido clorhídrico. tridestilado.</p> <p>4. Ácido nítrico tridestilado.</p> <p>5. Ácido nítrico tridestilado al 2%.</p> <p>6. Agua desionizada (18.2 MΩ.cm).</p> <p>7. Solución estándar certificada de Indio-Renio de 10 ug/l en 2% HNO<sub>3</sub></p>	<p>1. Secar las muestras durante 48 hrs. a 80 °C.</p> <p>2. Pesar 0.2 gr en vasos de teflón y humedecer un poco con HNO<sub>3</sub> al 2 %.</p> <p>3. Adicionar lentamente 10 ml de HF y 4 ml de HClO<sub>4</sub> (La eficiencia del ataque ácido mejora si la muestra se somete a varias horas en la mezcla ácida, antes de que se inicie la etapa de evaporación.</p> <p>4. Evaporar en la parrilla de calentamiento a 125 °C hasta que se forme una pasta cristalina (2-3 hrs.).</p> <p>5. Repetir el paso 3 las veces que sea necesario, hasta que la muestra quede totalmente digerida. No olvidar la evaporación correspondiente en cada adición.</p> <p>6. Añadir 2 ml de HClO<sub>4</sub> y evaporar hasta que se forme una pasta cristalina para remover cualquier residuo de HF.</p> <p>7. Aforar a 50 ó 100 ml en un matraz volumétrico con la solución estándar de Indio-Renio de 10 ug/l en 2% HNO<sub>3</sub> y transferir inmediatamente a una botella de polipropileno para su posterior análisis.</p>

### 3.2.3 Medición de las muestras por ICP-MS

Posteriormente se determinó las concentraciones de metales pesados en las muestras previamente preparadas, utilizando un espectrómetro de masas ICP-MS VGElemental model PQ3 el cual se calibró con una solución estándar (1,10, 100 y 200 ppb) y un blanco.

La figura 6 muestra el esquema general de lo que sufre una muestra para ser contada.

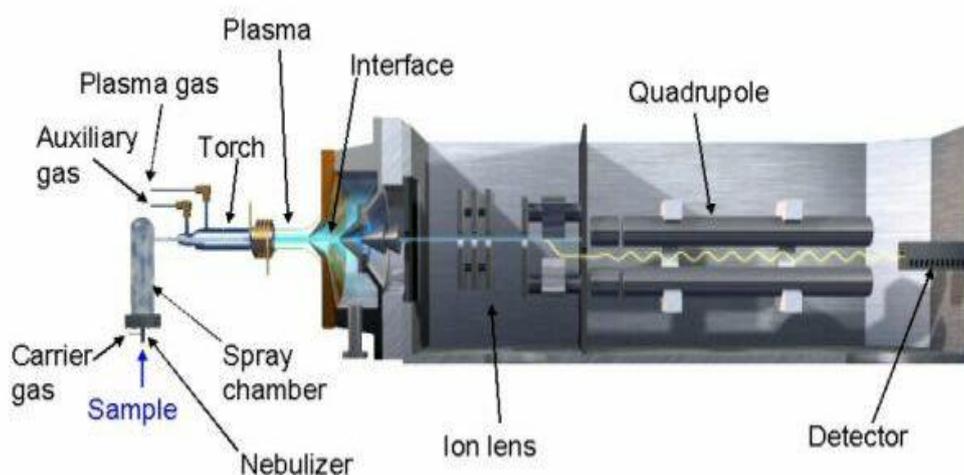


Figura 6. Esquema general del funcionamiento de un equipo de ICP-MS.

En general las muestras líquidas fueron introducidas al equipo por una bomba peristáltica hacia el nebulizador donde la muestra es formada en aerosol y dirigida hacia el plasma, el cual es generado por las colisiones entre los átomos de argón debidas a la energía que pasa en la antorcha. La muestra fue instantáneamente descompuesta en el plasma (temperatura del plasma de 6000 a 10000 °K) para formar átomos los cuales fueron simultáneamente ionizados. Los iones producidos fueron extraídos por diferencia de presión a través de un par de orificios conocidos como conos muestreadotes y espumadores.

Los iones fueron después enfocados por una serie de lentes iónicas dentro del cuadrupolo, el cual separa los iones basados en su relación masa/carga por medio de un campo eléctrico generado llevándolos hacia el detector, donde los iones fueron detectados como una señal eléctrica y colectados por un contador para cada número de masa.

### 3.3 Determinación cuantitativa de elementos mayores por FRX

Con el objetivo de determinar las concentraciones de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Estas mediciones son importantes como base de referencia en la susceptibilidad magnética.

El análisis de elementos mayores ( $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), se realizó en muestra fundida (perla). Las perlas fueron preparadas mezclando 1 g de muestra en polvo con 9 g de mezcla fundente  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  -  $\text{LiBO}_2$  (50:50 %). La mezcla se vació a un crisol de Pt/5%Au y se calentó a  $1100^\circ\text{C}$  en un hornillo equipado con quemadores Fisher y moldes para la preparación simultánea de 3 perlas (Fluxy Claisse). Previo al calentamiento se agregaron 2 gotas de LiBr en solución acuosa con una concentración de 250g/L. La solución de LiBr actúa como agente no-mojante, favoreciendo que la perla se despegue del molde durante el proceso de enfriado. Las perlas posteriormente se introdujeron al equipo para ser analizadas.

### 3.4 Medición de la susceptibilidad magnética ( $X$ )

Para determinar la susceptibilidad magnética de las muestras de suelo se utilizó un susceptibilímetro KLY-2 Kappa Bridge. El valor de  $X$  es proporcional a la concentración de material ferromagnético en la muestra.

Las muestras se colocaron en un cubo de plástico de  $1\text{cm}^3$  para poder ser introducidas en el equipo y finalmente medidas. Es importante mencionar que para la medición de estas no se pueden tener objetos metálicos como pulseras o anillos, etc.

Para tener un valor de susceptibilidad magnética específica se pesaron todas las muestras contenidas en los cubos en una balanza analítica.

**CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS****4.1 Resultados del análisis experimental.**

La tabla 6 muestra los resultados de los análisis de esta investigación. Se reporta la concentración de los metales pesados Pb, Zn, Cu, Cr, Ni y V. Además, con el propósito de determinar la correlación entre los datos, también están reportados los valores de susceptibilidad magnética y las concentraciones de los elementos mayores  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ .

## CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 6. Concentraciones de los metales pesados, elemento mayores (ppm) y susceptibilidad magnética específica X (1/gr) para las muestras analizadas.

Muestra	Coordenadas		X ( E(-6)	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
1A	19°33'15.30"N	99° 7'30.22"W	77.055	0.85	5.32	153	145	84	147	80	7
1B	19°34'36.30"N	99° 7'41.20"W	49.194	1.03	5.67	130	93	20	20	36	8
1C	19°35'5.71"N	99° 8'28.61"W	314.316	0.78	4.53	69	59	35	34	145	199
1D	19°33'16.70"N	99° 8'31.42"W	246.302	1.03	5.15	93	126	37	50	131	27
2A	19°36'21.49"N	99° 3'43.81"W	212.038	0.79	4.67	88	90	35	18	83	18
2B	19°35'23.50"N	99° 2'42.61"W	404.501	0.88	5.87	50	75	29	20	70	5
2C	19°34'8.62"N	99° 2'42.90"W	223.899	0.63	4.15	50	118	25	39	219	81
2D	19°33'56.70"N	99° 3'10.01"W	484.962	0.78	5.07	84	86	22	45	67	12
3A	19°36'2.02"N	99° 2'28.61"W	1209.687	1.10	9.10	77	167	44	398	1601	148
3B	19°35'0.20"N	99° 2'30.80"W	246.576	0.61	3.86	72	146	77	129	65	14
3C	19°35'55.28"N	99° 0'34.60"W	129.357	0.60	3.90	121	78	35	21	68	24
3D	19°34'13.12"N	99° 1'0.19"W	414.548	0.75	4.67	50	50	20	15	55	7
4A	19°32'57.19"N	99° 6'58.50"W	265.940	0.74	4.39	70	58	20	18	76	18
4B	19°32'10.79"N	99° 8'27.31"W	323.525	0.92	5.63	63	91	26	62	187	81
4C	19°31'58.80"N	99° 6'27.68"W	307.243	0.89	5.72	61	206	66	133	152	131
4D	19°31'23.92"N	99° 6'45.79"W	450.557	0.77	5.48	128	93	35	30	173	44
5A	19°31'45.30"N	99° 5'16.12"W	397.752	0.68	5.05	69	108	24	41	234	66
5B	19°31'17.29"N	99° 3'31.72"W	359.454	1.15	5.07	77	142	85	1160	3807	300
5C	19°32'51.22"N	99° 3'9.11"W	314.323	0.91	5.76	84	265	102	150	281	53
5D	19°33'33.41"N	99° 3'30.20"W	280.128	0.79	4.96	50	109	31	29	123	16
6A	19°32'57.52"N	99° 2'23.32"W	249.076	0.65	4.07	66	64	25	40	321	85
6B	19°32'22.20"N	99° 1'11.32"W	232.054	0.56	3.97	137	119	33	50	273	214
6C	19°31'52.00"N	99° 1'24.60"W	420.292	0.81	5.05	64	80	20	25	132	39
6D	19°30'45.50"N	99° 1'51.20"W	306.377	0.79	4.90	90	93	35	42	108	45
7A	19°29'53.30"N	99° 8'46.21"W	409.660	0.96	5.37	50	93	20	29	102	78
7B	19°29'48.91"N	99° 6'48.38"W	223.163	0.68	4.96	110	82	38	27	152	103
7C	19°28'20.21"N	99° 8'3.70"W	256.397	0.69	4.64	98	89	36	74	385	314
7D	19°28'27.80"N	99° 6'37.58"W	215.006	0.69	4.37	57	167	66	270	167	34
8A	19°30'1.12"N	99° 5'17.20"W	309.797	0.78	4.87	55	100	28	69	232	91
8B	19°28'20.50"N	99° 4'30.11"W	335.890	0.86	5.19	75	109	27	40	250	74

## CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 6. Continuación

Muestra	Coordenadas		X ( E(-6)	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
8C	19°29'0.82"N	99° 2'59.78"W	393.545	0.79	5.33	100	155	35	49	200	265
8D	19°28'16.21"N	99° 3'19.40"W	219.182	0.79	5.25	123	139	36	189	234	46
9A	19°30'0.11"N	99° 2'20.69"W	239.156	0.77	4.67	84	87	29	36	104	23
9B	19°29'58.81"N	99° 1'30.50"W	421.870	0.78	4.98	60	106	28	25	104	22
9C	19°29'29.18"N	99° 1'50.59"W	307.712	0.73	5.02	60	125	33	71	243	108
9D	19°28'31.51"N	99° 2'45.10"W	227.592	0.69	4.39	97	88	43	34	142	43
10A	19°26'53.81"N	99° 8'7.51"W	350.973	0.91	5.78	90	215	90	186	393	1053
10B	19°26'6.22"N	99° 8'45.10"W	297.416	1.11	6.30	65	142	48	33	115	31
10C	19°25'34.79"N	99° 6'51.41"W	420.797	0.89	5.95	121	182	53	149	930	319
10D	19°25'6.31"N	99° 7'11.78"W	379.898	0.99	5.85	108	164	54	38	172	86
11A	19°27'5.00"N	99° 4'55.81"W	348.501	0.67	4.47	88	114	41	72	388	236
11B	19°26'6.00"N	99° 5'13.70"W	148.941	0.71	4.55	137	88	38	39	160	90
11C	19°25'17.11"N	99° 4'26.00"W	309.628	0.76	4.71	82	74	26	34	132	37
11D	19°25'41.20"N	99° 4'18.08"W	348.401	0.83	5.02	96	165	35	55	175	231
12A	19°27'18.68"N	99° 2'29.29"W	88.838	0.35	2.37	50	50	34	27	90	27
12B	19°26'14.50"N	99° 2'28.28"W	276.867	0.63	4.66	87	220	77	180	216	88
12C	19°25'32.41"N	99° 1'58.30"W	787.878	0.71	6.17	121	109	36	71	399	203
12D	19°25'11.89"N	99° 0'47.81"W	321.213	0.82	5.43	96	141	33	66	185	61
13A	19°29'30.59"N	99° 6'37.80"W	221.029	0.61	4.38	102	144	46	108	369	225
13B	19°23'49.49"N	99° 7'45.70"W	365.777	0.87	5.69	108	184	46	79	297	442
13C	19°23'8.70"N	99° 7'19.60"W	291.404	0.82	5.13	111	135	45	52	222	231
13D	19°21'57.38"N	99° 8'5.21"W	260.194	0.88	5.73	54	124	42	49	303	91
14A	19°23'36.38"N	99° 5'11.62"W	287.261	0.81	5.11	88	139	48	43	191	195
14B	19°22'42.71"N	99° 5'23.10"W	235.514	0.66	4.18	79	95	36	36	124	29
14C	19°24'12.60"N	99° 3'26.78"W	106.026	0.40	2.59	50	112	65	130	64	36
14D	19°22'55.81"N	99° 3'1.30"W	407.489	0.90	6.06	109	164	49	56	391	404
15A	19°23'38.69"N	99° 0'23.69"W	300.796	0.96	5.98	109	131	37	25	117	40
15B	19°22'53.18"N	99° 2'54.38"W	246.084	1.36	5.62	86	92	35	27	117	30
15C	19°22'0.30"N	99° 2'23.10"W	300.789	0.69	4.70	80	84	38	36	145	91
15D	19°21'51.41"N	99° 0'22.00"W	246.498	0.76	4.97	121	109	28	41	202	180
16A	19°21'6.37"N	99° 8'39.73"W	393.125	0.92	5.58	89	154	43	111	233	252
16B	19°21'20.92"N	99° 6'40.28"W	226.371	0.76	4.56	65	118	44	48	257	103
16C	19°19'45.37"N	99° 8'9.82"W	461.170	0.91	4.80	91	137	30	42	243	149
16D	19°19'10.27"N	99° 7'27.66"W	263.105	0.75	4.58	79	186	58	272	214	186
17A	19°21'10.55"N	99° 5'53.16"W	476.652	1.08	6.50	105	189	73	154	91	27
17B	19°21'4.25"N	99°10'37.78"W	404.026	0.87	5.88	83	173	37	84	284	287
17C	19°17'53.88"N	99° 5'41.89"W	149.108	0.59	3.61	104	108	25	26	111	20
17D	19°18'39.46"N	99° 4'53.94"W	428.931	0.88	5.83	64	144	37	68	342	133
18A	19°21'37.04"N	99° 2'25.12"W	142.182	0.56	3.87	70	55	27	34	140	52
18B	19°21'10.66"N	99° 1'1.24"W	294.534	1.01	6.27	62	156	40	27	107	17
18C	19°20'37.97"N	99° 1'30.54"W	387.290	0.93	6.49	73	126	45	47	178	82
18D	19°20'34.15"N	99° 3'27.25"W	528.750	0.95	6.39	126	143	42	63	239	298
19A	19°36'27.36"N	99°15'26.64"W	503.486	0.937	5.171	99	69	36	65	215	66
19B	19°35'59.28"N	99°17'1.68"W	800.356	1.242	5.813	103	70	36	92	185	61
19C	19°34'59.16"N	99°16'10.56"W	517.680	0.862	5.661	80	89	34	96	307	135
19D	19°34'9.12"N	99°15'14.76"W	564.434	0.896	5.35	94	93	33	85	388	119

## CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 6. Continuación

Muestra	Coordenadas		X ( E(-6)	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
20A	19°34'45.48"N	99°12'50.76"W	437.319	0.799	5.572	115	122	52	179	767	122
20B	19°36'22.68"N	99°13'37.20"W	259.925	0.693	4.173	83	100	33	50	246	98
20C	19°34'34.32"N	99°13'59.16"W	516.536	1.23	6.32	126	103	39	64	392	264
20D	19°35'28.32"N	99°14'29.04"W	519.309	1.157	5.462	93	116	37	44	135	150
21A	19°35'32.28"N	99°11'13.92"W	315.031	0.707	4.623	88	84	33	43	206	33
21B	19°36'5.40"N	99°10'59.88"W	952.122	0.896	7.667	102	219	80	321	1641	339
21C	19°34'17.04"N	99°11'43.08"W	315.896	0.876	5.855	115	119	41	127	583	167
22A	19°33'18.36"N	99°15'29.52"W	620.146	0.992	5.562	103	76	33	63	205	113
22B	19°32'52.80"N	99°16'20.64"W	669.114	0.911	5.222	100	67	35	36	108	13
22C	19°30'37.80"N	99°15'41.40"W	840.389	1.205	6.745	115	104	40	68	307	206
22D	19°31'8.40"N	99°15'28.44"W	446.407	0.72	4.613	88	131	38	96	262	126
23A	19°33'19.44"N	99°14'37.68"W	136.318	0.392	2.708	91	81	35	111	555	148
23B	19°31'1.92"N	99°14'29.40"W	347.165	0.96	5.244	98	98	39	47	265	154
23C	19°32'2.04"N	99°13'30.36"W	552.242	0.756	5.498	89	142	73	345	1368	232
23D	19°32'48.63"N	99°12'33.56"W	626.130	0.858	6.295	97	174	45	143	566	150
24A	19°33'11.16"N	99°11'55.68"W	650.449	0.85	6.303	168	184	59	437	4203	773
24B	19°32'17.88"N	99°11'47.04"W	402.057	1.055	5.858	140	116	46	97	425	141
24C	19°32'24.72"N	99°10'11.64"W	215.538	0.741	4.978	80	84	36	37	181	44
24D	19°31'32.52"N	99°10'5.16"W	507.524	1.143	7.255	150	239	146	84	305	68
25A	19°29'56.40"N	99°17'3.84"W	620.146	0.745	4.662	88	68	38	75	325	68
25B	19°30'9.72"N	99°15'55.08"W	669.114	0.801	5.359	105	112	37	58	243	84
25C	19°29'15.00"N	99°15'27.00"W	840.389	0.932	5.221	92	85	34	33	128	58
25D	19°28'39.36"N	99°13'11.28"W	446.407	0.708	4.287	93	80	38	66	443	77
26A	19°30'48.60"N	99°14'11.76"W	136.318	0.953	5.377	109	105	40	78	551	408
26B	19°30'25.92"N	99°13'15.96"W	347.165	0.819	4.885	97	95	41	78	415	181
26C	19°28'47.28"N	99°13'53.76"W	552.242	1.134	7.592	114	188	61	210	784	722
26D	19°27'25.56"N	99°13'11.28"W	626.130	0.863	5.183	108	102	43	94	855	821
27A	19°28'16.68"N	99°11'40.56"W	321.527	0.886	5.407	98	143	56	64	373	63
27B	19°29'27.60"N	99°11'42.00"W	253.475	0.894	5.325	131	169	112	139	724	79
27C	19°29'25.08"N	99°10'28.56"W	300.519	1.141	7.058	130	177	67	140	523	94
27D	19°30'17.28"N	99° 9'4.68"W	439.122	0.923	6.453	124	166	56	90	528	132
28A	19°26'5.64"N	99°15'33.84"W	443.767	0.829	5.181	96	88	35	38	168	86
28B	19°26'45.96"N	99°15'34.92"W	234.282	0.812	4.747	96	91	39	59	368	107
28C	19°26'30.48"N	99°17'45.24"W	250.805	0.735	4.846	87	72	39	54	253	36
29A	19°26'0.24"N	99°12'26.28"W	139.034	0.818	5.313	98	120	49	111	456	125
29B	19°27'13.32"N	99°13'9.84"W	412.861	1.088	6.406	102	157	68	65	411	142
29C	19°27'55.08"N	99°13'48.00"W	444.477	1.122	6.634	119	116	48	100	635	521
29D	19°25'47.64"N	99°14'25.80"W	164.638	0.702	4.896	92	91	32	88	329	108
30A	19°25'56.28"N	99° 9'42.12"W	159.045	0.965	5.996	133	196	89	87	434	184
30B	19°26'60.00"N	99° 9'27.72"W	83.430	0.589	3.639	177	74	37	50	155	42
30C	19°27'34.92"N	99°11'21.12"W	188.200	0.789	5.277	119	116	44	103	502	173
30D	19°26'24.36"N	99°11'2.76"W	241.841	0.922	5.588	121	110	43	101	579	247
31A	19°25'0.84"N	99°16'9.48"W	373.186	0.753	5.339	92	94	29	102	469	176
31B	19°24'13.32"N	99°17'49.20"W	320.548	0.829	5.318	109	80	35	51	235	58
31C	19°22'38.64"N	99°16'17.04"W	484.215	1.171	6.499	133	178	54	91	520	321
31D	19°22'9.12"N	99°17'47.76"W	530.879	1	5.927	116	136	54	44	249	119
32A	19°24'33.12"N	99°11'54.96"W	164.799	0.782	5.019	94	100	44	90	659	269

## CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 6. Continuación

Muestra	Coordenadas		X ( E(-6)	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
32B	19°23'49.20"N	99°13'14.88"W	291.860	0.859	6.486	105	152	50	193	1456	452
33C	19°23'23.52"N	99°13'28.41"W	212.574	0.911	5.019	138	116	53	95	378	195
34C	19°20'31.56"N	99°15'11.16"W	254.354	0.951	6.319	120	205	143	44	216	37
34D	19°21'41.40"N	99°16'41.88"W	360.502	1.067	6.446	103	168	84	54	182	31
120A	19°18'56.80"N	99°15'55.60"W	359.213	1.023	5.908	126	82	37	24	102	21
120B	19°18'48.90"N	99°15'29.60"W	247.571	1.096	6.852	134	157	58	51	219	69
120C	19°18'8.70"N	99°16'15.70"W	319.720	1.248	7.452	179	151	69	30	111	23
120D	19°17'45.50"N	99°15'9.80"W	239.583	1.107	6.516	128	154	60	32	124	41
120E	19°18'25.60"N	99°15'37.00"W	370.673	0.931	6.444	105	143	52	136	969	710
121A	19°18'13.80"N	99°15'10.60"W	265.638	1.078	6.806	141	150	67	37	173	27
121B	19°18'44.10"N	99°12'39.50"W	126.141	0.895	5.158	134	137	59	66	389	151
121C	19°17'45.40"N	99°13'55.30"W	284.342	0.943	5.254	83	101	42	54	794	150
121D	19°16'58.30"N	99°14'25.10"W	228.192	0.968	6.324	101	123	56	23	95	17
121E	19°16'50.60"N	99°12'58.50"W	188.989	0.943	6.183	104	115	56	29	90	23
122A	19°18'51.60"N	99°10'26.10"W	297.911	0.929	6.835	101	161	60	82	530	174
122B	19°18'27.60"N	99°12'10.60"W	239.173	0.979	5.78	123	116	46	30	324	45
122C	19°18'4.40"N	99° 9'26.50"W	161.589	0.784	4.873	88	120	54	85	611	173
122D	19°17'6.00"N	99°11'43.50"W	382.718	0.951	6.263	109	95	44	28	129	36
122E	19°17'36.50"N	99°10'40.20"W	242.816	0.846	4.8	78	94	36	41	412	359
123A	19°18'23.60"N	99° 8'32.30"W	207.823	0.911	5.987	155	144	68	53	279	148
123B	19°18'17.90"N	99° 6'30.40"W	158.669	0.787	5.415	109	95	43	131	520	107
123C	19°16'48.60"N	99° 8'20.70"W	157.804	0.768	4.874	103	112	53	63	254	67
123D	19°17'23.30"N	99° 7'48.80"W	230.311	0.83	5.259	123	143	54	188	906	533
123E	19°16'10.50"N	99° 6'54.20"W	157.086	0.691	4.844	113	89	40	64	322	104
124A	19°18'51.50"N	99° 5'37.50"W	154.636	0.841	5.375	101	117	55	57	303	57
124B	19°18'52.30"N	99° 4'14.30"W	189.489	0.835	5.722	75	79	36	84	258	75
124C	19°17'43.90"N	99° 4'48.60"W	737.973	1.15	7.331	114	120	57	35	181	27
124D	19°17'29.00"N	99° 3'43.20"W	120.666	0.766	4.889	97	106	37	50	193	39
124E	19°16'36.10"N	99° 3'0.80"W	243.050	1.178	7.679	110	148	59	26	126	14
M1			316.407	0.779	4.916	84	45	28	20	69	12
M2			194.819	1.114	6.584	95	141	62	32	97	23

- M1 y M2 son muestras de fondo recolectadas a una profundidad de 1.5 y 2 m, usadas como muestras naturales para el análisis de los datos.

**CAPÍTULO IV****ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS****4.2 Evaluación del contenido de metales pesados en las muestras analizadas.**

En la tabla 7 se muestra una evaluación general, reportando los puntos más notables del contenido de metales pesados y elementos mayores en las muestras.

Tabla 7. Evaluación del contenido de metales pesados en las muestras analizadas.

	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Pb (ppm)</b>	<b>Zn (ppm)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Ni (ppm)</b>	<b>Cr (ppm)</b>	<b>V (ppm)</b>
<b>Máximo</b>	<b>9.10</b>	<b>1.36</b>	<b>1053</b>	<b>4203</b>	<b>1160</b>	<b>146</b>	<b>265</b>	<b>179</b>
<b>Mínimo</b>	<b>2.37</b>	<b>0.35</b>	<b>5</b>	<b>36</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
<b>Promedio</b>	<b>5.40</b>	<b>0.86</b>	<b>145</b>	<b>368</b>	<b>87</b>	<b>46</b>	<b>122</b>	<b>99</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.97</b>	<b>0.17</b>	<b>165.75</b>	<b>504.39</b>	<b>111.43</b>	<b>20.12</b>	<b>40.62</b>	<b>26.18</b>
<b>Valor máximo permisible</b>			<b>400<sup>(1)</sup></b>	<b>23000<sup>(2)</sup></b>	<b>3100<sup>(2)</sup></b>	<b>1600<sup>(1)</sup></b>	<b>280<sup>(1)</sup></b>	<b>550<sup>(2)</sup></b>
<b>Valor de fondo</b>	<b>5.75</b>	<b>0.96</b>	<b>17.5</b>	<b>83</b>	<b>26</b>	<b>45</b>	<b>93</b>	<b>89.5</b>
<b>FE máximo</b>	<b>1.58</b>	<b>1.43</b>	<b>60.17</b>	<b>50.63</b>	<b>44.615</b>	<b>3.24</b>	<b>2.84</b>	<b>2.00</b>
<b>FE promedio</b>	<b>0.93</b>	<b>0.90</b>	<b>7.93</b>	<b>3.58</b>	<b>3.34</b>	<b>1.02</b>	<b>1.31</b>	<b>1.10</b>

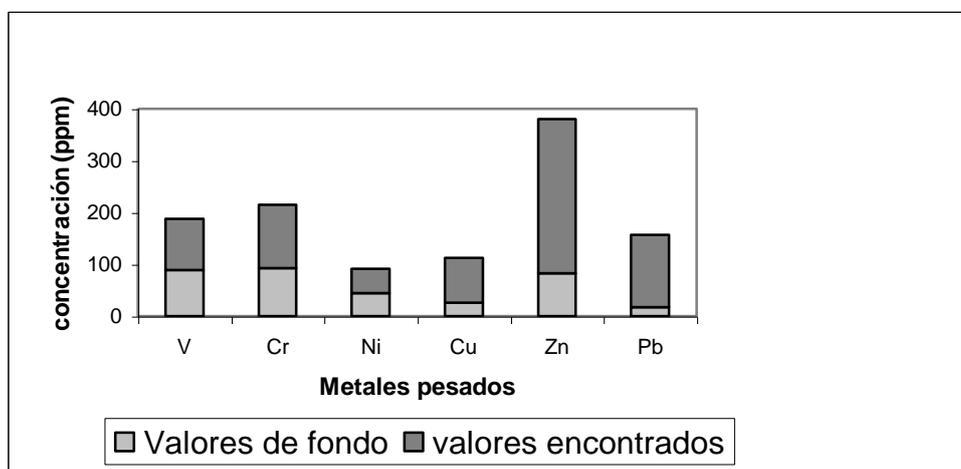
\* FE es el factor de enriquecimiento (FE = Concentración antropogénica / Valor de fondo), el cual nos indica el número de veces en que la concentración de una muestra esta por arriba de su valor natural.

(1) Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

(2) Normatividad de la EPA (región 9)

En comparación con los valores de fondo (concentraciones naturales), se puede decir que el metal más enriquecido es el Pb, llegando a valores de hasta 60 veces el valor de fondo y casi de 8 veces en promedio, alcanzando concentraciones de hasta 1053 ppm, además es el único que por lo menos una muestra sobrepasa la norma oficial. La aportación antropogénica que presentan los metales V, Cr y Ni, así como los elementos mayores  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  es baja, es decir, su contenido es similar a las muestras de fondo.

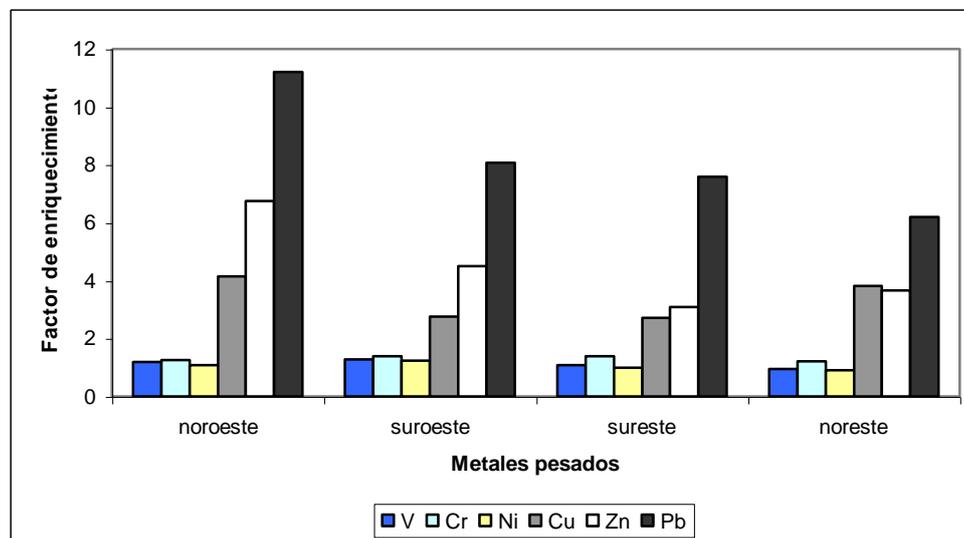
La gráfica 1 muestra la aportación de los metales pesados en muestras de fondo y muestras enriquecidas. Al igual que la Tabla 7, aquí se puede observar que el Pb es el metal más enriquecido (comparado con los valores de fondo). Según estos datos, se puede decir que los suelos de la ciudad de México y su zona conurbana están enriquecidos por metales pesados en el siguiente orden:  $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{V}$ .



Gráfica 1. Aportación de los metales pesados en muestras de fondo y muestras enriquecidas de la Ciudad de México y su zona conurbana.

### 4.3 Distribución espacial de los metales pesados en la Ciudad de México

Con el propósito de evaluar el impacto de los metales pesados a una escala más general, se dividió el mapa de la ciudad en los cuatro principales cuadrantes. Los resultados se observan en la gráfica 2, donde se puede apreciar que la zona con el mayor enriquecimiento por metales pesados es la noroeste, tomando en cuenta que los factores para Pb, Zn y Cu son los más elevados en esta zona.



Gráfica 2. Niveles de enriquecimiento por metales pesados en las cuatro diferentes zonas de la Ciudad de México

Con el objetivo de observar la distribución de las concentraciones altas, medias y bajas obtenidas experimentalmente de metales pesados, se dividieron éstas en tres rangos. Las figuras 7-12 muestran esta distribución para cada uno de los metales. Los puntos rojos representan una concentración alta, los naranjas una media concentración y los amarillos las concentraciones más bajas. Los rangos correspondientes a cada nivel se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8. Rangos de concentraciones por cada metal utilizados en las figuras 7-12.

Color	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V
	ppm					
	148 a 1053	322 a 4203	79 a 1160	48 a 146	139 a 265	109 a 179
	58 a 142	178 a 321	43 a 78	36 a 46	95 a 137	88 a 108
	5 a 57	3 a 175	15 a 43	20 a 36	50 a 95	50 a 88

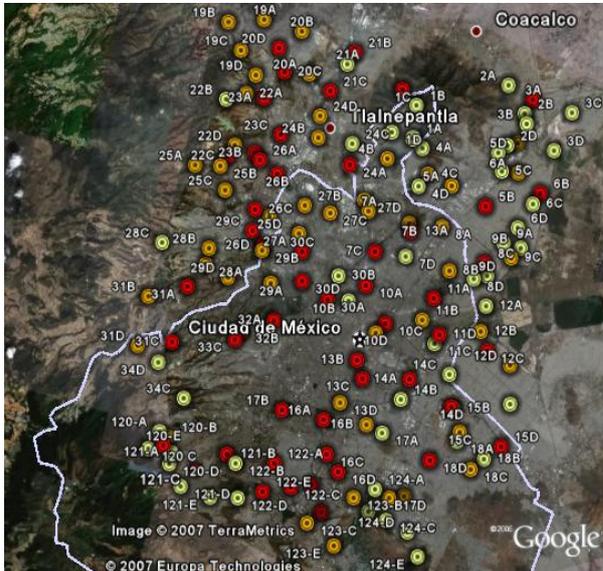


Fig. 7. Distribución de concentración de Pb.

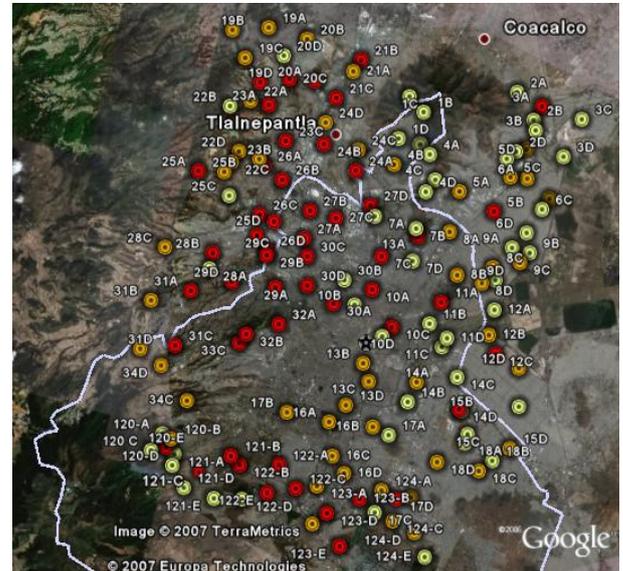


Fig. 8. Distribución de concentración Zn.

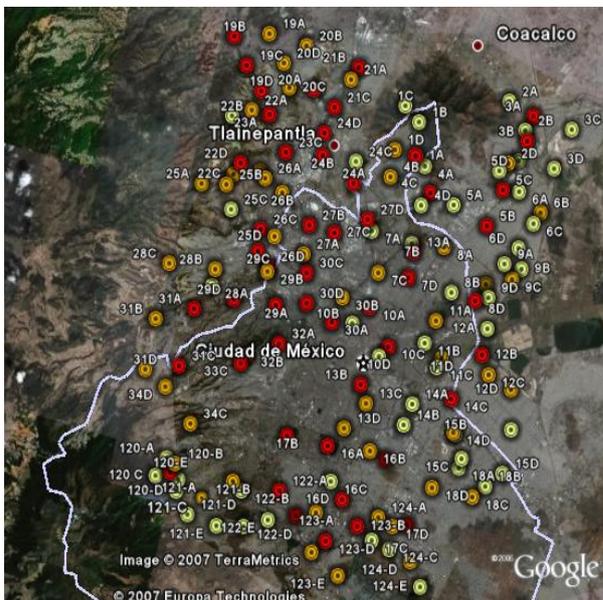


Fig.9. Distribución de concentración de Cu.

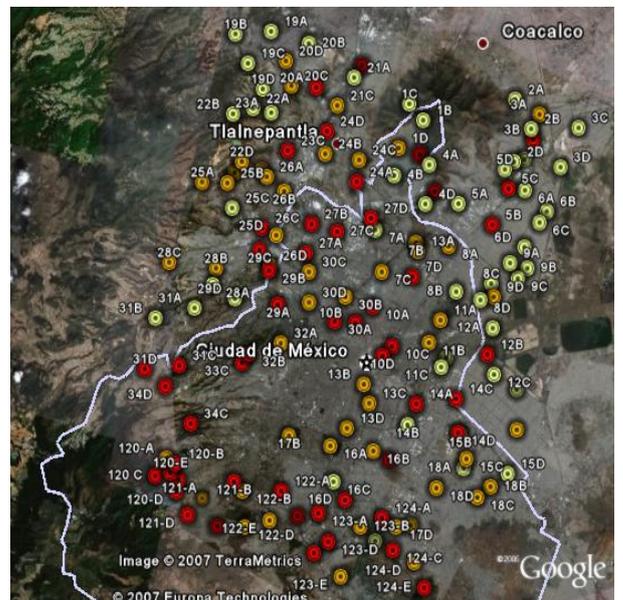


Fig.10. Distribución de concentración de Ni.

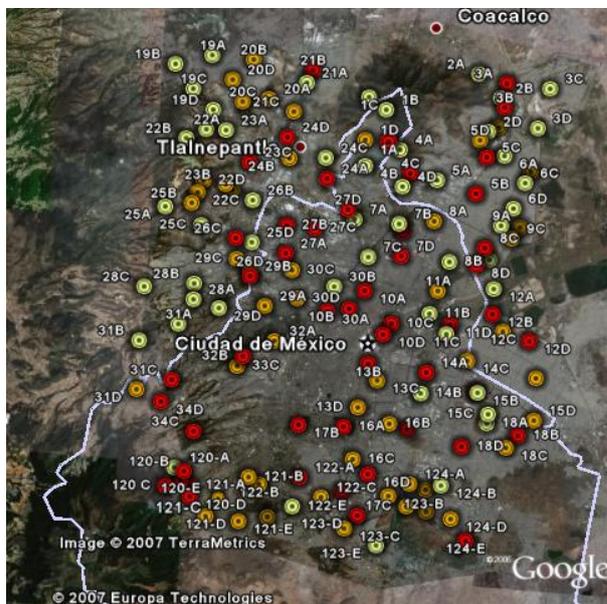


Fig. 11. Distribución de concentración de Cr.

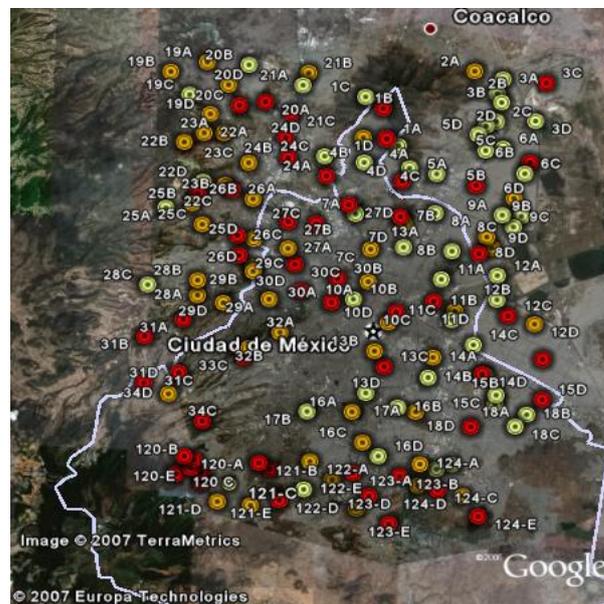
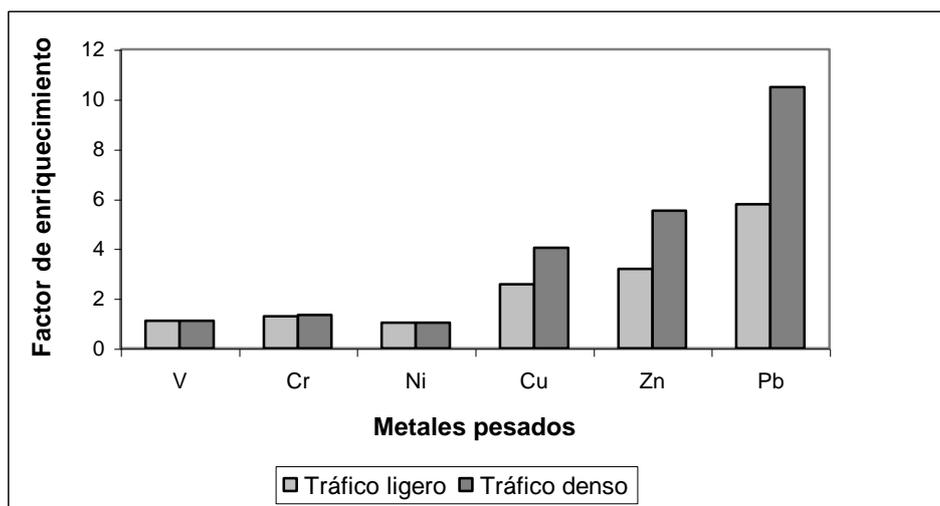


Fig.12. Distribución de concentración de V.

En las figuras anteriores no se puede observar una zona en particular en donde predomine un rango de concentración en el caso de Ni, Cr y V. Mientras que para Pb y Zn se puede observar, al igual que la gráfica 2, que la tendencia de sus valores altos es en la zona noroeste.

#### 4.4 Influencia del tráfico vehicular sobre los suelos urbanos

Para apreciar la influencia que tiene el tráfico vehicular sobre la contaminación de los suelos urbanos, se tomaron los resultados de las muestras recolectadas cerca de avenidas con tráfico denso y al mismo tiempo con bajo nivel de tráfico, con ello se calculó el factor de enriquecimiento. Esta influencia se muestra en la gráfica 3.



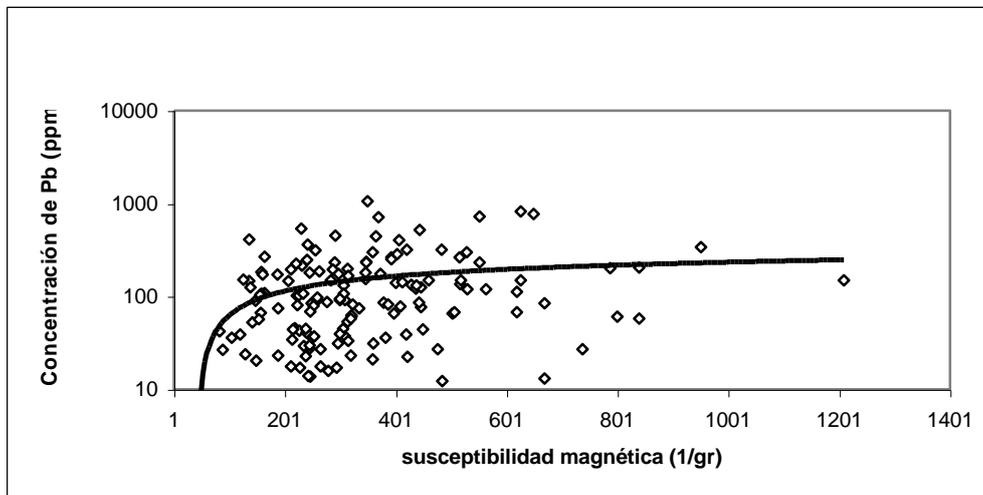
Gráfica. 3. Influencia del tráfico vehicular en la contaminación de suelos por metales pesados.

Como se muestra en la gráfica 3, la contaminación de suelos urbanos por Pb, Zn y Cu son directamente proporcionales al tráfico vehicular, mientras que para el V, Cr y Ni su factor de enriquecimiento no se ve alterado con o sin influencia vehicular.

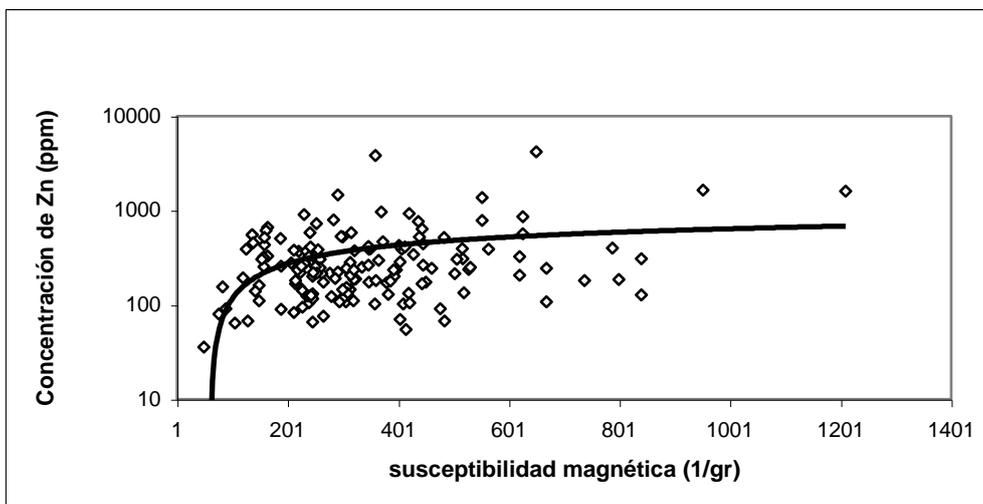
Por lo tanto, el gran número de automóviles que circula diariamente por la Ciudad de México y su zona conurbana es la principal fuente de contaminación por estos metales pesados, en especial el Pb.

#### **4.5 Relación entre los metales pesados y la susceptibilidad magnética.**

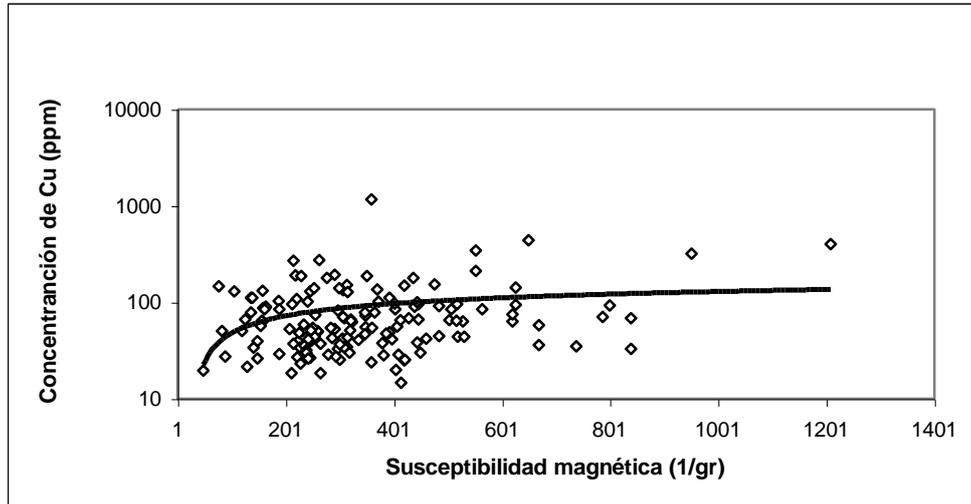
Con el propósito de encontrar la posible relación de la susceptibilidad magnética con la contaminación por metales pesados se realizó un primer intento, graficando concentraciones con susceptibilidad magnética de todas las muestras, en las gráficas 4-10 se observa el comportamiento para cada metal pesado y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$



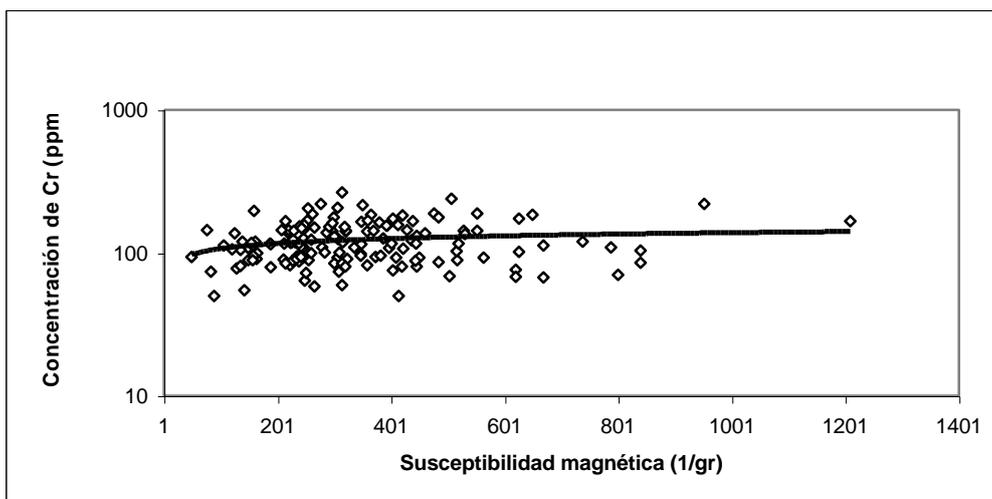
Gráfica 4. Relación de la susceptibilidad magnética con Pb.



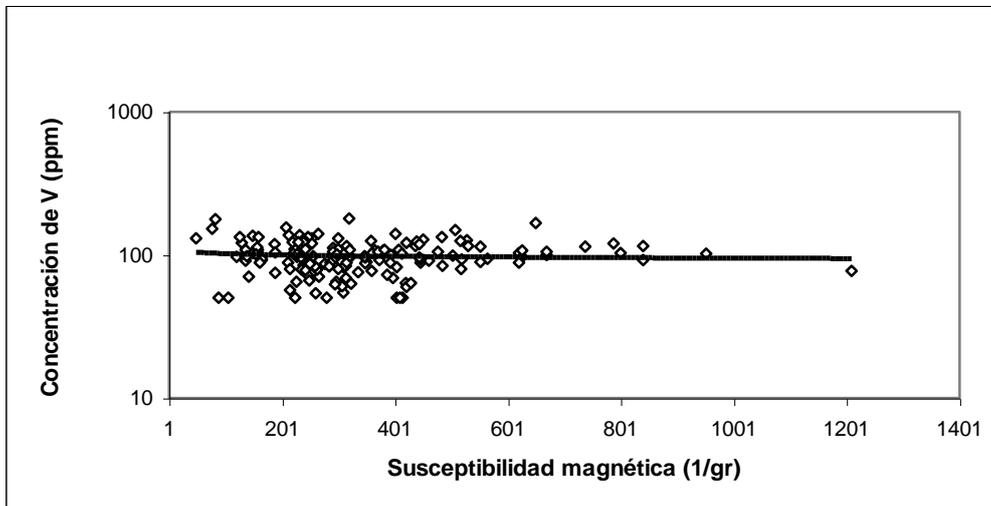
Gráfica 5. Relación de la susceptibilidad magnética con Zn.



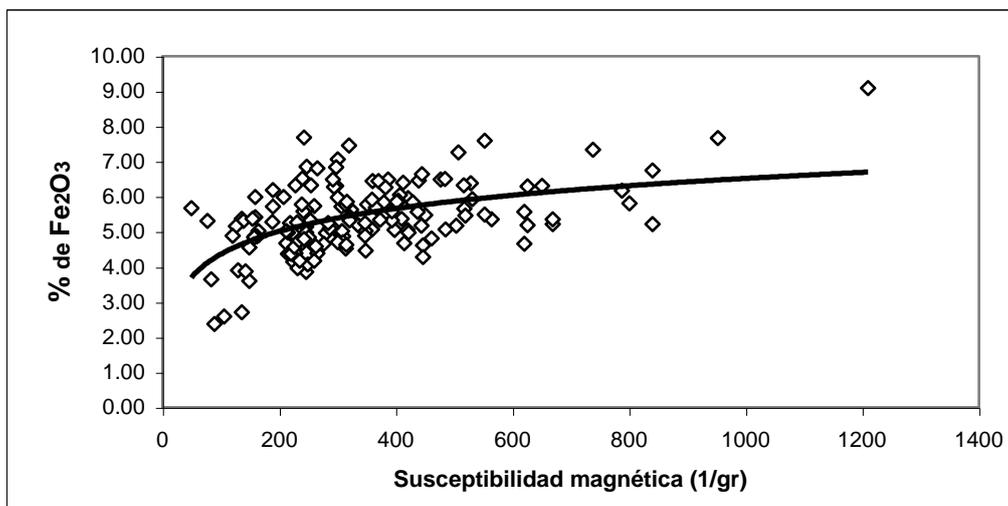
Gráfica 6. Relación de la susceptibilidad magnética con Cu.

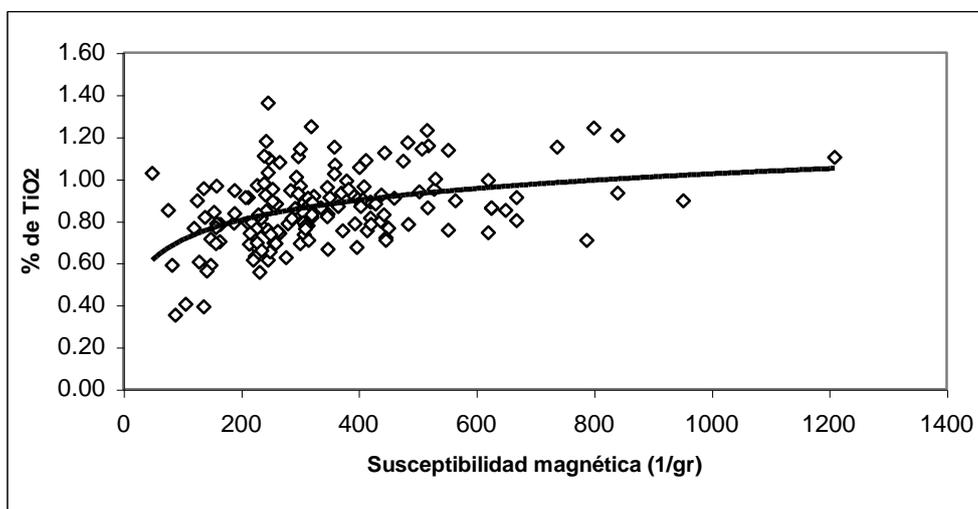


Gráfica 7. Relación de la susceptibilidad magnética con Cr.



Gráfica 8. Relación de la susceptibilidad magnética con V.

Gráfica 9. Relación de la susceptibilidad magnética con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Gráfica 10. Relación de la susceptibilidad magnética con TiO<sub>2</sub>.

Las gráficas correspondientes a los elementos mayores TiO<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentan buena relación con la susceptibilidad magnética, debido a que tienen propiedades magnéticas, por otro lado, se observa poca relación con cada uno de los metales pesados, siendo Zn y Pb los de mayor relación.

Otra alternativa para evaluar esta relación, además para conocer la relación entre los metales, se empleó un factor de correlación. Los resultados correspondientes se reportan en la tabla 9 y 10.

## CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 9. Factor de Correlación utilizado el total de las muestras

	sm E(-6)	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
sm E(-6)	1.000								
TiO <sub>2</sub>	0.398	1.000							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.509	0.837	1.000						
V	-0.032	0.343	0.348	1.000					
Cr	0.116	0.342	0.501	0.248	1.000				
Ni	-0.025	0.294	0.386	0.384	0.744	1.000			
Cu	0.303	-0.010	0.211	0.032	0.482	0.341	1.000		
Zn	0.377	0.097	0.336	0.152	0.277	0.192	0.670	1.000	
Pb	0.190	0.074	0.137	0.179	0.239	-0.006	0.270	0.533	1.000

\*sm: Susceptibilidad magnética (1/gr)

\*Los valores sombreados son aquellos que presentan buena relación ( $\geq 0.5$ )

Tabla 10. Factor de Correlación utilizado los valores más altos de susceptibilidad magnética (1/gr) de las muestras.

	sm E(-6)	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
sm E(-6)	1.000								
TiO <sub>2</sub>	0.290	1.000							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.587	0.599	1.000						
V	0.071	0.417	0.376	1.000					
Cr	0.083	0.287	0.633	0.441	1.000				
Ni	0.099	0.383	0.555	0.594	0.772	1.000			
Cu	0.607	0.154	0.665	0.128	0.515	0.334	1.000		
Zn	0.530	0.094	0.635	0.203	0.519	0.318	0.912	1.000	
Pb	0.037	0.250	0.376	0.411	0.456	0.170	0.305	0.493	1.000

En base a estos resultados utilizando el factor de correlación se puede decir que el contenido de metales pesados presenta una relación positiva con la susceptibilidad magnética, siendo el Cu y Zn los de mejor relación, todo esto tomando en cuenta solamente los valores más altos de susceptibilidad magnética.

**CAPÍTULO V. CONCLUSIONES**

Entre los principales temas de interés se busca la posibilidad de encontrar una alternativa que supla los análisis químicos para una primera evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados, por ello el objetivo de buscar una relación positiva entre el contenido de metales pesados y parámetros magnéticos, en este caso particular la susceptibilidad. En base al factor de correlación se puede concluir que los metales pesados de este estudio presentan una relación positiva con las mediciones de susceptibilidad magnética tomando en cuenta que Cu y Zn tienen la mejor relación con este parámetro. La técnica de medición de la susceptibilidad magnética puede ser una herramienta útil para una primera evaluación de la contaminación de suelos urbanos por metales pesados.

Se pudo determinar las concentraciones totales de metales pesados en muestras de suelos de la Ciudad de México, en donde el enriquecimiento de metales pesados en suelos superficiales es más obvio en zonas cercanas a vías donde el tráfico vehicular es más denso, en especial el Pb, el cual está presente en la gasolina. También se observó que el enriquecimiento de los metales pesados en esta ciudad se presenta en el siguiente orden:

Pb > Zn > Cu > Cr > Ni > V.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que las concentraciones de metales pesados en suelos urbanos de la Ciudad de México pueden ser usadas para destacar el gran impacto de la actividad humana, además señalan que el tráfico vehicular es la fuente contaminante más importante de este ambiente urbano.

Según este estudio los suelos de la Ciudad de México están más enriquecidos por Pb, Zn y Cu principalmente, cuando son comparados con muestras de fondo (factor de enriquecimiento). Cuando estos se comparan con la norma oficial el Pb es el principal contaminante de la Ciudad de México, ya que es el único que sobrepasa en algunas de las muestras los niveles máximos permisibles.

## BIBLIOGRAFÍA

Alloway, B. (1995). Heavy metals in soils. 368 pp.

Ahmad, I. , Hayat, S. y Pichtel, J. (2005). Heavy metal contamination of soil. Problems and remedies. 252 pp.

Bityukova, L. , Scholger, R. y Birke, M. (1998). Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. Physics an chemistry of the earth. 24. 829-835.

Bohn, H. , Mc Neal, B. y O´Connor, G. (1985). Soil chemistry. 341 pp.

Carson, B. , Ellis III, H. y Mc Cann, J. (1986). Toxicology and biological monitoring of metals in humans.Including feasibility and need. 328 pp.

Cervantes, C. , Moreno, R. (1999). Contaminación ambiental por metales pesados . Impacto en los seres vivos. 157pp.

Chaparro, M. (2006). Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y antártica. 104 pp.

Dityukova, L. , Scholger, R. y Brike, M. (1999). Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in tallin. Pergamon. 24. 829-835.

Durza, O. (1999). Heavy contamination an magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. Physics an chemistry of the earth. 24. 541-543.

Fialová, H. , Maier, G. , Petrovsky, E. , Kapicka, A. , Boyko, T. y Scholger, R. (2006). Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. Journal of applied geophysics. 59. 273-283.

Hernández, E., Lounejeva, E., Morton, O. y Armienta, M. (1998). Manual de análisis de elementos traza por espectrometría de masas de acoplamiento inductivo (ICP-MS). 18 pp.

Hu, X. , Rong, Y. , Li, X. y Zhang, G. (2007). Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications. Catena. 70. 428-436.

Imperato, M. , Adamo, P. , Naimo, D. y Violante, P. (2002). Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). Environmental pollution. 247-256

Jarvis, K. , Gray, A. y Houk, R. (2003). Handbook of inductively coupled plasma mass spectrometry. 380 pp.

Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. 413 pp.

Lu, S. G. y Bai, S. Q. (2005). Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou city, China. Journal of applied geophysics. 1-12.

Maier, G. y Scholger, R. (2003). Demonstration of connection between pollutant dispersal and atmospheric boundary layers by use of magnetic susceptibility mapping, St. Jacob (Austria). Physics and chemistry of the earth. 997-1009.

Moller, A., Muller, H. , Abdullah, A. , Abdelgawad, G. , Utermann, J. (2004). Urban Soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals en the soils of the Damascus Ghouta. Geoderma.63-71

Morton, O. , Hernández, E. , Gaso, I. y Segovia, N. (2001). Heavy metal concentrations in surface soils from Mexico city. Environmental contamination an toxicology. 383-388.

Norma Oficial Mexicana. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Salvagio, D. , Angelone, M. , Bellanca, A. , Neri, R. y Sprovieri, M. (2002). Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Silicy), Italy. The Science of the total environmental. 229-243

Schmidt, A. , Yarnold, R. , Hill, M. y Ashmore, M. (in pess). Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution: a site study. Journal of Geochemical Exploration. 109-117.

Skoog, D. , West, D. (1975). Análisis instrumental. 718 pp.

Ulleich, S. , Ramdey, M. y Helios-Rybicka. (2007). Total and exchangeable concentration of heavy metals in soils near Bytom, an area of Pb-Zn mining and smelting in upper Silesia, Poland. Applied geochemistry. 14. 221-235.

Volke, T. , Velasco, J. y de la Rosa, D. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides. 144pp.

Wild, A. (1995). Soil and the environment an introduction. 350 pp.