

Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma

Pedro del Aguila Juárez*, Jorge Lugo de la Fuente* y Rocío Vaca Paulín*

Recepción: 27 de septiembre de 2004

Aceptación: 22 de febrero de 2005

* Laboratorio de Edafología y Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.

Correo electrónico: daguila@uaemex.mx

Resumen. Se determinó el índice de geoacumulación regional (I_{geo}) y el factor de enriquecimiento (EF) en suelos irrigados de la cuenca alta del río Lerma, Estado de México. Se colectaron 55 muestras de suelo de cinco localidades: Tlachaloya, Ixtlahuaca, Atlacomulco, Temascalcingo y Amealco. Las propiedades químicas analizadas fueron pH, capacidad de intercambio catiónico, arcilla, materia orgánica, concentración de Cr, Cu, Cd, Ni, Zn, y Pb; así como el I_{geo} y FE. Los suelos se consideraron excelentes para su uso agrícola en cuanto a los valores de pH y materia orgánica (MO). Las concentraciones de metales pesados se encontraron por debajo de los límites permisibles. De acuerdo con el factor de enriquecimiento, el Pb se consideró como un contaminante moderado con un origen tanto geológico como antropogénico. El índice de geoacumulación mostró que el Pb y el Ni son los mayores contaminantes del suelo.

Palabras clave: metales pesados, río Lerma, índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

Geoaccumulation Index (I_{geo}) and Enrichment Factor (EF) for Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn in Soils of the Upper Lerma Basin

Abstract. The present study aimed at determined a regional geoaccumulation index (I_{geo}) and enrichment factor (EF) in soils irrigated in the upper basin of the Lerma river, Mexico State. Fifty five soils samples were collected in five localities: Tlachaloya, Ixtlahuaca, Atlacomulco, Temascalcingo and Amealco. The chemical properties analyzed were pH, clay, organic matter, Cr, Ni, Zn, and Pb contents, I_{geo} and FE. According to the pH and MO values the soils are excellent for agricultural use. The contents of heavy metals are lower than the permissible limits. The enrichment factor indicates that the Pb is a moderate contaminant having geological and anthropocentric origins. The I_{geo} values show that Pb and Ni are the highest contaminants for the soil.

Key words: heavy metals, Lerma river, geoaccumulation index and enrichments factors.

Introducción

El suelo, desde el punto de vista químico, es un sistema complejo y heterogéneo conformado por sustancias orgánicas y minerales; se comporta como un sistema biogeoquímico constituido por fases sólidas, líquidas y gaseosas (Lugo, 2002).

Los metales pesados presentes en el suelo son elementos electropositivos que contienen un peso atómico alto y tienen densidades superiores a 5 g cm^{-3} (Trief, 1981); pueden encontrarse de manera soluble, intercambiable, formando complejos húmicos orgánicos estables, absorbidos por óxidos de hierro y manganeso, así como de estructuras de redes cristalinas (Buremmer *et al.*, 1986). De acuerdo con su origen, los metales pesados pueden ser de dos tipos: geológico o antropogénico; el primero se refiere a la presencia y distribución de los metales en minerales y rocas; el segundo surge por actividades productivas de los sectores agropecuario, industrial y urbano, y generan contaminantes que se depositan en ríos, sedimentos y suelos (Alloway, 1990; Coker, 1983 y Loué, 1988).

En el suelo están presentes factores físicos y químicos que permiten la disolución, precipitación y solubilidad de los metales, tales como el pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), entre otros (Loué, 1988). Se conoce que el pH es uno de los factores que controla la solubilidad de un metal en el suelo, ya que la mayoría de los metales son relativamente móviles a pH ácidos. Por otra parte, la MO tiene la capacidad de adsorber metales pesados, dependiendo de sus propiedades de quelación y de la reactividad de la fracción húmica (Giusquiani *et al.*, 1992 y Petruzzelli *et al.*, 1993).

En el curso alto de la cuenca del río Lerma hay estudios que cuantificaron los metales pesados en suelos y los sedimentos, como son los trabajos de Vaca (1996), Morquecho (1997), Balderas (1998), Lugo *et al.* (2000), Rodríguez (2000) y Brito (2000).

El estudio de la acumulación o enriquecimiento de metales pesados en el suelo se basa en técnicas de normalización geoquímica, las cuales permiten conocer los índices de geoacumulación (I_{geo}) y los factores de enriquecimiento (FE). Los I_{geo} miden el grado de contaminación de sustancias orgánicas e inorgánicas en un suelo (Loska *et al.*, 1997; Moreira y Boaventura, 2003), los FE informan de la dinámica de un contaminante inorgánico o elemento químico de la corteza terrestre que puede ser transportado por la lluvia, viento o

El estudio de la acumulación o enriquecimiento de metales pesados en el suelo se basa en técnicas de normalización geoquímica, las cuales permiten conocer los índices de geoacumulación (I_{geo}) y los factores de enriquecimiento (FE).

por fuentes antropogénicas (Hansen *et al.*, 1995; Reiman y de Caritat, 2000).

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el pH, la MO y concentración de metales pesados (Cr, Cd, Mn, Ni, Cu, Pb y Zn) en suelos de cultivo de cinco localidades del Estado de México, así como determinar los factores de enriquecimiento y el índice de geoacumulación, para conocer un gradiente de distribución de metales pesados en la rivera del río Lerma.

1. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra dentro del curso alto del río Lerma; abarca $5,549 \text{ km}^2$ y se divide en tres porciones: curso alto, medio y bajo, según un criterio hidrológico-tectónico que cubre toda la parte norte del Estado de México. La cuenca alta del río Lerma presenta puntos cuya máxima elevación excede los 4,500 msnm, como son los picachos orientales del Nevado de Toluca (Gobierno del Estado de México, 1993).

Respecto a su clima, la parte alta de la cuenca del río Lerma tiene una variación mínima en cuanto a sus condiciones climáticas; predomina el clima templado en cuatro variedades: $C(w_2)(w)$, $C(w_1)(w)$, $C(E)(w_2)(w)$ y $C(E)(m)(w)$ (García, 1988).

La geología manifiesta una actividad volcánica, constituida por una secuencia de rocas formadas por materiales piroclásticos y, en menor proporción, por derrames continentales. Litológicamente, se encuentra formada por rocas ígneas extrusivas de naturaleza intermedia a básica; las primeras predominan en el parteaguas general de la cuenca, las segundas forman corrientes de lava y conos cineríticos; ambas forman depósitos piroclásticos que, en su granulometría, varían de tobas finas a bombas, y en algunos casos aglomerados. En las partes bajas hay depósitos de aluvión. Relacionando la litología y el clima se determina la presencia de suelos; entre ellos dominan el Andosol, que sustenta la vegetación de los bosques templados; Litosol, que sostiene matorrales; Planosol, Feozem y Vertisol, que son de buen uso agrícola (Gobierno del Estado de México, 1993).

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio abarca una distancia de 105 km sobre el río a partir de la presa José Antonio Alzate, Estado de Méxi-

co, perteneciente al curso alto, hasta llegar a Amealco.

El área donde se realizó el estudio fue dividida en cinco sitios (véase cuadro 1 y figura 1).

2.2. Muestreo

El muestreo fue de tipo sistemático (Cochran, 1977): se realizó una colecta de 55 muestras de suelo a 30 cm de profundidad. La diferencia en el tamaño de muestra del sitio Tl obedeció a que se recogieron en dos épocas diferentes, tanto en sequía como en lluvias, ya que tiene diferente nivel freático. El suelo colectado se guardó en bolsas de plástico, fue secado a temperatura ambiente, homogeneizado, molido y tamizado a una malla de 2 mm para los análisis de pH y MO y en una malla de 0.169 mm para la cuantificación de metales pesados (Hodsong, 1987 y Webster y Oliver, 1990).

2.3. Análisis de laboratorio

Se determinó la capacidad de intercambio catiónico por el método del versenato (EDTA: etildinitrilotetracetato disódico), de acuerdo con Jackson (1982), así como textura por el método de Bouyoucos (1963). Se determinó el pH en agua en una relación soluto/solución 1:2.5 (peso/volumen) (McLean, 1982), y el contenido de materia orgánica por el método de modificado Walkley y Black (1947). Para la determinación de metales pesados se realizó una digestión ácida (HNO₃ + HCl) en una relación 4:1 (volumen/volumen); se cuantificó la concentración total de Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn y Fe mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS) (Perkin Elmer, Norwalks, CT, USA).

2.4. Índice de geoacumulación (I_{geo})

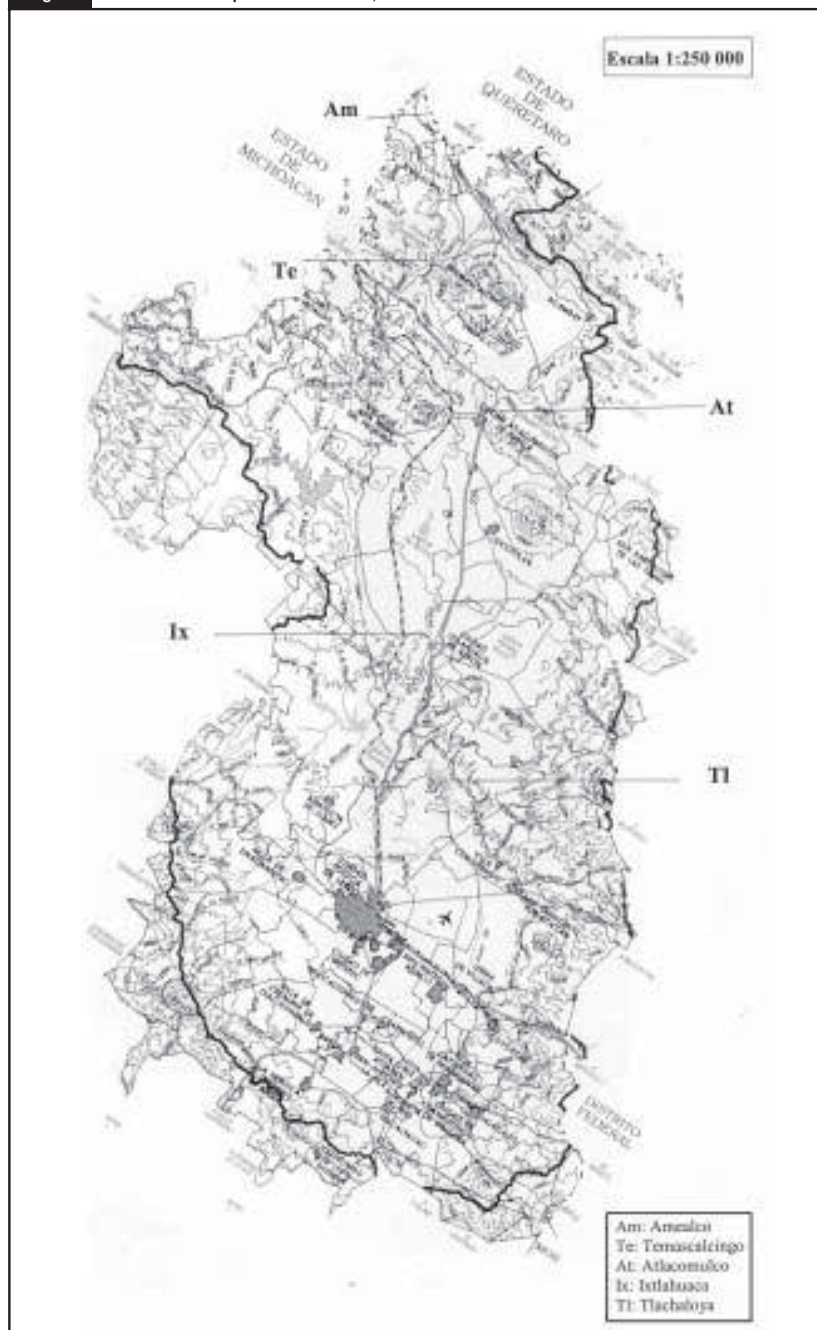
El índice de geoacumulación permite informar de un valor numérico que presenta un intervalo donde el suelo

Cuadro 1. Localidades de la zona estudio.

Sitio	Localidad	Distancia (km) respecto a la ciudad de Toluca	Suelo	Número de muestras
1	Tl = Tlachaloya	20	Feozem	20
2	Ix = Ixtlahuaca	37	Feozem	8
3	At = Atacomulco	60	Feozem	9
4	Te = Temascalcingo	91	Feozem	10
5	Am = Amealco	105	Feozem	8

Fuente: INEGI, 1981.

Figura 1. Localización de los puntos de muestreo, Cuenca Alta del Río Lerma.



Fuente: Gobierno del Estado de México, 1993.

puede considerarse contaminado por sustancias orgánicas e inorgánicas (Loska *et al.*, 1997; Moreira y Boaventura, 2003).

Este índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 0.2 B_n$$

donde C_n es la concentración del elemento examinado y B_n la concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre). Loska *et al.*, (1997) distinguen seis clases de geoacumulación, como se muestran en el cuadro 2.

2.5. Factor de enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento (FE) ha sido utilizado en estudios de ecotoxicología y química ambiental como marco de referencia. Considera los elementos más abundantes de la corteza terrestre tales como Al, Si y Fe (Lawson y Winchester, 1979; Poissant *et al.*, 1994; Stiotyk *et al.*, 2002).

El modelo del factor de enriquecimiento se representa como:

$$FE = (X/Fe)_{lluvia} / (X/Fe)_{corteza}$$

donde los términos $(X/Fe)_{lluvia}$ y $(X/Fe)_{corteza}$ denotan una relación entre la concentración del elemento X con

respecto al hierro (Fe) proveniente de la lluvia y al promedio del elemento presente en la corteza terrestre respectivamente.

Lawson y Winchester (1979) establecen una escala para determinar cuál es el origen del elemento X en estudio; así el cuadro 3 presenta las características de cada intervalo del FE.

2.6. Análisis estadístico

A los resultados de los metales pesados, MO, CIC, arcilla y pH se calculó la desviación estándar, la mediana y la media (Montgomery, 1991); además, para conocer si hay diferencias significativas entre las localidades se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de confianza de 95% (Montgomery, 1991).

3. Resultados y discusión

Los datos encontrados indican que el pH presenta una variación de ligeramente ácida pasando a neutra en el recorrido de las cinco localidades (cuadro 4).

Respecto a la MO (cuadro 4), se observa que el porcentaje tiende a disminuir a medida que va alejándose de la primera localidad (Tlachaloya), con un recorrido de 105 kilómetros sobre la ribera del río Lerma. El mayor contenido en la primera localidad se debe a la descarga de afluentes provenientes de aguas residuales municipales que lleva el río Lerma y se acumula en la presa José Antonio Alzate. En relación con el contenido de arcilla, la localidad que presentó mayor porcentaje fue Tl con 42.78 ± 28.49 y la de menor porcentaje fue Ix con 24.5 ± 9.62 ; la textura de la primera localidad es franco arenosa y de la segunda arcillo arenosa. En cuanto a la CIC, se observa una continuidad en cuanto a un contenido en los cinco sitios.

La figura 2 describe el comportamiento de Pb, Ni y Zn, donde el Pb presenta la menor concentración en Tl (27.9 mg kg^{-1}) y la máxima en Ix (78.1 mg kg^{-1}), para posteriormente descender hasta Am. El Ni tiene un comportamiento similar al Pb, aunque este metal presenta dos máximos, uno de 99.03 mg kg^{-1} en Ix y otro en Te (102

Cuadro 2. Clasificación de dos parámetros: clase de índice de geoacumulación y grado de contaminación.

Valor de I_{geo}	Clases de I_{geo}	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

Fuente: Loska *et al.* (1997).

Cuadro 3. Clases de factores de enriquecimiento de un metal pesado.

Clases de FE	Origen del elemento X (metal pesado)
1-10	De la roca madre
10-500	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre
>500	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico

Fuente: Lawson y Winchester (1979).

Cuadro 4. pH, porcentaje de materia orgánica arcilla y capacidad de intercambio catiónico en suelos de cinco localidades del curso alto del río Lerma.

	Sitios				
	Tl	Ix	At	Te	Am
pH	5.47 ± 0.34	7.20 ± 0.84	5.79 ± 0.90	7.33 ± 0.76	6.03 ± 0.64
MO (%)	3.76 ± 1.93	2.46 ± 0.72	2.56 ± 1.27	1.83 ± 0.66	1.44 ± 0.75
Arcilla (%)	42.78 ± 28.49	24.5 ± 9.62	40.66 ± 11.87	36.41 ± 2.69	28.62 ± 6.78
CIC meq/100g	20.5 ± 3.56	23.5 ± 6.15	21.22 ± 5.83	21.67 ± 6.09	18.8 ± 3.36

Media \pm desviación estándar

mg kg⁻¹). En Tl, el Zn presenta una concentración de 101.3 mg kg⁻¹ para luego descender hasta 63 mg kg⁻¹ en Am.

La figura 3 muestra el comportamiento del Cr, Cu y Cd; Tlchaloya presenta la menor concentración de Cr (20 mg kg⁻¹) mientras que Ix posee el mayor contenido (69.5 mg kg⁻¹) para luego decrecer hasta la localidad de Am.

Para el Cd y Cu se observa un comportamiento sin variación a lo largo del transecto. La concentración de los tres metales estudiados no rebasó el límite de toxicidad reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1992).

Se observó que el Cd se comportó dentro de un modelo de tipo cuadrático, como se ve en la figura 4:

$$Cd = 1.06 + 0.08D - 0.005D^2$$

en donde:

D = distancia

Tlchaloya presenta una concentración de Cd de 2.4 mg kg⁻¹ alcanzando un máximo de 4 mg kg⁻¹ en la localidad de Te para luego descender a 3.5 mg kg⁻¹ en Am (figura 4).

El cuadro 5 muestra las diferencias significativas entre las cinco localidades para el pH, MO y metales. Se encontró que el pH de Ix y Te difiere significativamente del resto de las localidades siendo éste neutro.

La MO presenta diferencias significativas entre Te y Am respecto a Tl, con el mayor contenido en esta última (cuadro 5); cabe mencionar que el contenido de arcilla fue igual en las cinco localidades. En cuanto a los metales, hubo diferencias significativas para el Cr, Pb, Zn y Ni, no así para el Cu y Cd en los localidades estudiadas. Los sitios donde se observaron diferencias significativas fueron: Ix para Cr, el cual puede deberse al uso de fertilizantes en estos suelos agrícolas (Alloway, 1990); Tl respecto a Ix para Pb, que puede asociarse a la combustión de compuestos derivados del petróleo con tetrametilo o tetraetilo de Pb, y algunas veces en óxido (PbO) y sulfuro (PbS), que están presentes durante la fase de transporte para ser depositado posteriormente en el suelo (Porta *et al.*, 1999); Amealco, entre todos los sitios (a excepción de At), para Zn, debido posiblemente a trazas de este metal contenido en los fertilizantes usados en la región (Alloway, 1990), y Tl para Ni (cuadro 5): la presencia del metal obedece al uso de fertilizantes, que constituye una fuente de incorporación en el suelo agrícola (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

3.1. Factor de enriquecimiento de metales

En lo que respecta a los factores de enriquecimiento (FE) de los metales

Figura 2. Contenido Pb, Ni, y Zn en suelos sobre la ribera del río Lerma de cinco localidades.

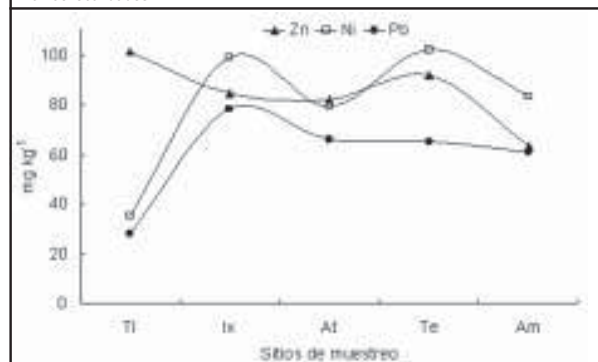


Figura 3. Contenido de Cd, Cu y Cr en el suelo sobre la ribera del río Lerma de cinco localidades.

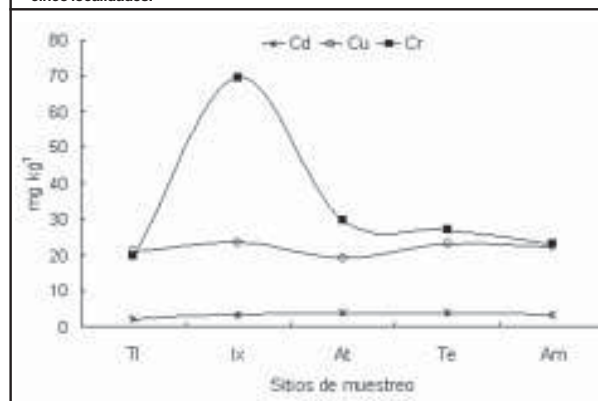
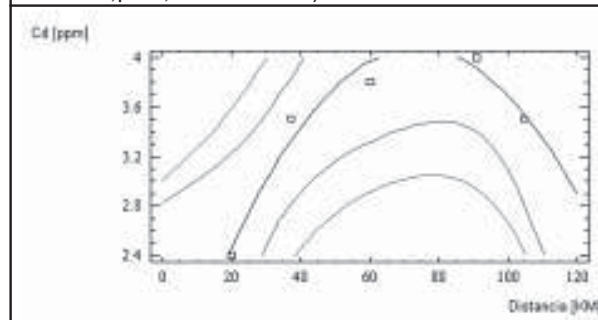


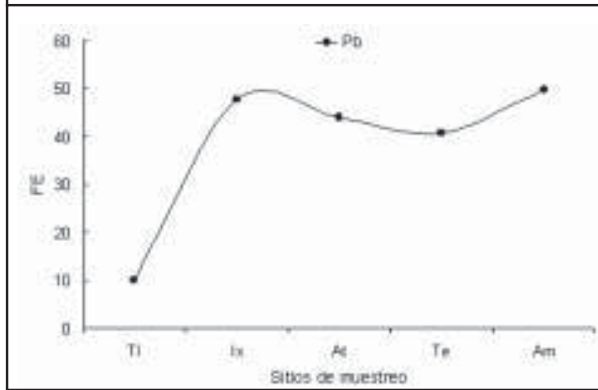
Figura 4. Modelo del Cd en suelos de cultivo cercanos al río Lerma (F = 17.58, R² = 95.19%, p < 0.05, error estándar = 0.19).



Cuadro 5. Prueba de Tukey^a para pH, MO y metales pesados en suelos estudiados.

Sitio	pH	MO	Cr	Pb	Cu	Cd	Zn	Ni
Tlchaloya	5.47 ^A	3.76 ^B	20.03 ^A	27.98 ^A	21.41	3.54	101.36 ^C	35.31 ^A
Ixtlahuaca	7.2 ^B	2.46 ^{AB}	69.58 ^B	78.11 ^B	23.63	3.68	84.56 ^{BC}	99.03 ^B
Atlacomulco	5.79 ^A	2.56 ^{AB}	29.75 ^A	65.83 ^{AB}	19.3	3.88	82.05 ^{AB}	79.35 ^B
Temascalcingo	7.33 ^B	1.83 ^A	26.92 ^A	64.96 ^{AB}	23.0	4.0	91.75 ^{BC}	102.01 ^B
Amealco	6.03 ^A	1.44 ^A	23.08 ^A	60.72 ^{AB}	22.31	3.54	63.1 ^A	83.45 ^B

^A La literal que se localiza como índice superior en el lado derecho de la columna del promedio representa diferencia significativa entre los sitios.
^B p < 0.001.

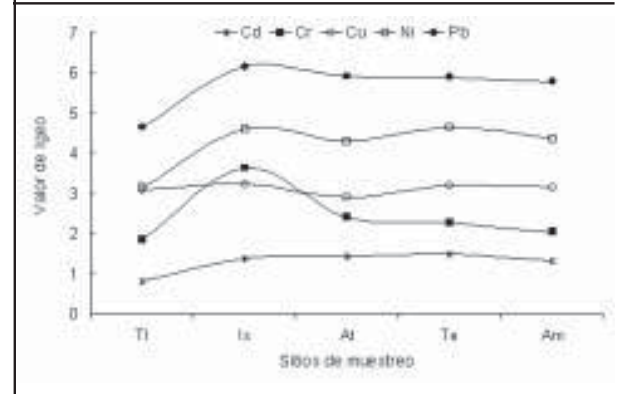
Figura 5. Valores de FE del Pb en suelo de cinco localidades sobre la ribera del río Lerma.


pesados en los sitios de estudio, sólo el Pb se encontró por arriba del valor de 10 (figura 5); esto indica que se trata de un metal moderadamente enriquecido en el suelo por fuentes antropogénicas, de acuerdo con Lawson y Winchester (1979). El resto de los metales mostró para FE un valor menor a 10, por lo que su presencia en el suelo se debe a la roca madre (Lawson y Winchester, 1979).

3.2. Índices de geocumulación I_{geo}

Como se muestra en la figura 6, el comportamiento de los metales con base en su I_{geo} se agrupan según la clasificación reportada por Loska *et al.*, (1997): a) grupo 2, moderadamente contaminados, formado por el Cr y Cd; b) grupo 4, fuertemente contaminado, incluye al Cu, y c) grupo 6, extremadamente contaminado, lo componen el Ni y Pb.

El enriquecimiento del Cr puede deberse al uso de fertilizantes en estos suelos agrícolas (Alloway, 1990); el Zn, a trazas de este metal contenido en los fertilizantes utilizados en la región (Alloway, 1990); el Cu, a la presencia de abonos de origen animal que, al ser depositados en el suelo de cultivo, integran este elemento a la materia orgánica (Smith, 1996); la

Figura 6. Índices de geocumulación en suelo de cinco localidades sobre la ribera del río Lerma.


aparición del Ni obedece al empleo de fertilizantes, que constituyen una fuente de incorporación en el suelo agrícola (Kabata-Pendias y Pendias, 1992); el Pb, se asocia a la combustión de compuestos derivados del petróleo que contienen tetrametilo o tetraetilo de Pb, tal como se ha mencionado anteriormente.

Conclusiones

El contenido total de metales, Cr, Pb, Zn, Ni, Cu y Cd, no rebasó el rango de toxicidad al ambiente edáfico.

En lo concerniente al FE, sólo el Pb se considera como el metal que contamina de manera moderada el ambiente, lo que indica la posibilidad de otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre, que puede ser de tipo antropogénico.

Los I_{geo} , Pb y Ni son considerados como extremadamente contaminantes al ambiente edáfico: el Cu, fuertemente contaminante, mientras que Cr y Zn como moderadamente contaminantes.

Sólo el FE del Cd presentó una correlación con la MO de 0.893, con $p < 0.5$.

Bibliografía

Alloway, B. J. (1990). *Heavy Metals in Soils*. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York.

Balderas, M. A. (1998). *Caracterización de metales pesados en suelos irrigados en la Cuenca Alta del Río Lerma*. Tesis de licenciatura, Universidad

Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Bouyucos, G. V. (1963). "Directions for Making Mechanical Analysis of Soil by Hydrometer Method", *Soil Sci.* 42: 23-30.

Brito, M. A. (2000). *Evaluación de suelos y cultivos con riego de toxicidad por metales pesados en la Cuenca Alta del Río Lerma*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

- Buremmer G. H., J. Gorth y U. Herms (1986). "Heavy Metal Species Mobility and Availability", en *Soils, Z. Pflanzenernaehr Bodenk.* 149: 382-398.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. 3a. ed., Nueva York.
- Coker, E. G. (1983). "The Use Sewage Sludge in Agriculture", *Water Sci. Tech.* 15: 105-208.
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. FOCET Larios, México.
- Giusquiani, P. L.; G. Gigliotti y D. Businelli (1992). "Mobility of Heavy Metals in Urban, Organic Matter and pH in Temperature Soils", *J. Environ. Quality*, 13(2): 234-245.
- Gobierno del Estado de México (1993). *Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del río Lerma*. Tomo I: Cartografía y anexos de documentos básicos. Gobierno del Estado de México, Toluca, México.
- Hansen, A. H.; Z. A. León e I. L. Bravo (1995). "Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimento de la cuenca Lerma-Chapala", *Ingeniería Hidráulica en México*, 3: 55-59.
- Hodgson, J. M. (1987). *Muestreo y descripción de suelos*. Reverte, España.
- INEGI (1981). *Síntesis geográfica, nomenclatura y anexo cartográfico del Estado de México*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Jackson, L. M. (1982). *Análisis químico de suelos*. 4a. ed., Omega, España.
- Kabata-Pendias, A. y H. Pendias (1992). *Trace Elements in Soil and Plant*. CRC. Press, Boca Raton.
- Lawson, D. R. y J. W. Winchester (1979). "A Standard Crustal Aerosol as a Reference for Elemental Enrichment Factors", *Atmospheric Environment*. 10: 925-930.
- Loska, K.; J. Cebula; J. Pelczar; D. Wiechula y Kwapilinski (1997). "Use of Enrichment, and Contamination Factors Together with Geoaccumulation Indexes to Evaluate the Content of Cd, Cu and Ni in the Rynik Water Reservoir in Poland", *Water, Air, and Pollution*. 93: 347-365.
- Loué, L. (1988). *Los microelementos en la agricultura*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Lugo de la Fuente J. _____ J. Hernández Silva, G. y L. Marín (2000). "Heavy Metal Concentration in the Sediments of the Upper Lerma Basin, México", *Backhuys Publishers*. Linden, Países Bajos.
- _____ (2002). *Dinámica de metales pesados en el sistema suelo-sedimento-fracción húmica y arcillosa en la cuenca alta y media del río Lerma*. Tesis de doctorado, UNAM, México.
- McLean, E. O. (1982). "Soil pH and Lime Requirements", en A. L. Page, R. H. Miller, D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis. Part 2, Agronomy 9*. Am. Soc. Agronomy Inc., Madison, Wisconsin.
- Montgomery, D. C. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Iberoamericana, México.
- Moreira A. C. R y R. G. Boaventura (2003). "Referencia geoquímica regional, para a interpretação das concentrações de elementos químicos nos sedimentos da Bacia do lago Paranoá-DF. Quim", *Nova*, 6: 812-820.
- Morquecho, C. A. (1997). *Distribución de metales pesados en el sistema sedimento-suelo de la presa José Antonio Alzate, Estado de México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Petruzzelli G.; G. Guidi y L. Lumbrano (1993). "Organic Matter as an Influencing on Copper and Cadmium Adsorption by Soils", *Water, Air and Soil Pollution*. 9: 263-269.
- Poissant L.; J. P. Schmitt y P. Béron (1994). "Trace Inorganic Elements in Rainfall in the Montreal Island", *Pergamon Press*. Inglaterra.
- Porta, C. J.; R. M. Lopez-Acevedo y L. C. Roquero (1999). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, España.
- Reiman, C. y P. de Caritat (2000). "Intrinsic Flaws of Element Enrichment Factors (EFs) in Environmental Geochemistry", *Environmental Science & Technology*. H.W. Wilson-AST; 34 : 5084-5091.
- Rodríguez, R. E. (2000). *Evaluación de metales pesados en suelos irrigados en la Cuenca Media del Río Lerma*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Smith S.R. (1996) *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*. CABT, Reino Unido.
- Stiolyk, W.; D. Weis y M. Hestekamp (2002). "New Peat Record of Atmospheric Lead Pollution in Switzerland: Pb Concentrations Enrichment Factors, Isotopic Composition, and Organolead Species", *Environmental Science & Technology*, 36: 3893-3900.
- Trief, N. M. (1981). "Environmental and health", *Ann Arbor Science*. Estados Unidos.
- Vaca, P. R. (1996). *Determinación de metales pesados en dos tipos de suelo bajo bosque y cultivo en el Alto Lerma, Estado de México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Walkley, A. (1997). "A Critical Examination of a Rapid Method for Determining Organic Carbon in Soils: Effect of Variations in Digestions Conditions and of Inorganic Soil Constituents", *Soil Sci.* 63:251-263.
- Webster, R. y M. A. Oliver (1991). *Statistical Methods in Soil Land Resource Survey*. Oxford University Press, Inglaterra.

Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma

Pedro del Aguila Juárez*, Jorge Lugo de la Fuente* y Rocío Vaca Paulín*

Recepción: 27 de septiembre de 2004

Aceptación: 22 de febrero de 2005

* Laboratorio de Edafología y Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.

Correo electrónico: daguila@uaemex.mx

Resumen. Se determinó el índice de geoacumulación regional (I_{geo}) y el factor de enriquecimiento (EF) en suelos irrigados de la cuenca alta del río Lerma, Estado de México. Se colectaron 55 muestras de suelo de cinco localidades: Tlachaloya, Ixtlahuaca, Atlacomulco, Temascalcingo y Amealco. Las propiedades químicas analizadas fueron pH, capacidad de intercambio catiónico, arcilla, materia orgánica, concentración de Cr, Cu, Cd, Ni, Zn, y Pb; así como el I_{geo} y FE. Los suelos se consideraron excelentes para su uso agrícola en cuanto a los valores de pH y materia orgánica (MO). Las concentraciones de metales pesados se encontraron por debajo de los límites permisibles. De acuerdo con el factor de enriquecimiento, el Pb se consideró como un contaminante moderado con un origen tanto geológico como antropogénico. El índice de geoacumulación mostró que el Pb y el Ni son los mayores contaminantes del suelo.

Palabras clave: metales pesados, río Lerma, índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

Geoaccumulation Index (I_{geo}) and Enrichment Factor (EF) for Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn in Soils of the Upper Lerma Basin

Abstract. The present study aimed at determined a regional geoaccumulation index (I_{geo}) and enrichment factor (EF) in soils irrigated in the upper basin of the Lerma river, Mexico State. Fifty five soils samples were collected in five localities: Tlachaloya, Ixtlahuaca, Atlacomulco, Temascalcingo and Amealco. The chemical properties analyzed were pH, clay, organic matter, Cr, Ni, Zn, and Pb contents, I_{geo} and FE. According to the pH and MO values the soils are excellent for agricultural use. The contents of heavy metals are lower than the permissible limits. The enrichment factor indicates that the Pb is a moderate contaminant having geological and anthropocentric origins. The I_{geo} values show that Pb and Ni are the highest contaminants for the soil.

Key words: heavy metals, Lerma river, geoaccumulation index and enrichments factors.

Introducción

El suelo, desde el punto de vista químico, es un sistema complejo y heterogéneo conformado por sustancias orgánicas y minerales; se comporta como un sistema biogeoquímico constituido por fases sólidas, líquidas y gaseosas (Lugo, 2002).

Los metales pesados presentes en el suelo son elementos electropositivos que contienen un peso atómico alto y tienen densidades superiores a 5 g cm^{-3} (Trief, 1981); pueden encontrarse de manera soluble, intercambiable, formando complejos húmicos orgánicos estables, absorbidos por óxidos de hierro y manganeso, así como de estructuras de redes cristalinas (Buremmer *et al.*, 1986). De acuerdo con su origen, los metales pesados pueden ser de dos tipos: geológico o antropogénico; el primero se refiere a la presencia y distribución de los metales en minerales y rocas; el segundo surge por actividades productivas de los sectores agropecuario, industrial y urbano, y generan contaminantes que se depositan en ríos, sedimentos y suelos (Alloway, 1990; Coker, 1983 y Loué, 1988).

En el suelo están presentes factores físicos y químicos que permiten la disolución, precipitación y solubilidad de los metales, tales como el pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), entre otros (Loué, 1988). Se conoce que el pH es uno de los factores que controla la solubilidad de un metal en el suelo, ya que la mayoría de los metales son relativamente móviles a pH ácidos. Por otra parte, la MO tiene la capacidad de adsorber metales pesados, dependiendo de sus propiedades de quelación y de la reactividad de la fracción húmica (Giusquiani *et al.*, 1992 y Petruzzelli *et al.*, 1993).

En el curso alto de la cuenca del río Lerma hay estudios que cuantificaron los metales pesados en suelos y los sedimentos, como son los trabajos de Vaca (1996), Morquecho (1997), Balderas (1998), Lugo *et al.* (2000), Rodríguez (2000) y Brito (2000).

El estudio de la acumulación o enriquecimiento de metales pesados en el suelo se basa en técnicas de normalización geoquímica, las cuales permiten conocer los índices de geoacumulación (I_{geo}) y los factores de enriquecimiento (FE). Los I_{geo} miden el grado de contaminación de sustancias orgánicas e inorgánicas en un suelo (Loska *et al.*, 1997; Moreira y Boaventura, 2003), los FE informan de la dinámica de un contaminante inorgánico o elemento químico de la corteza terrestre que puede ser transportado por la lluvia, viento o

El estudio de la acumulación o enriquecimiento de metales pesados en el suelo se basa en técnicas de normalización geoquímica, las cuales permiten conocer los índices de geoacumulación (I_{geo}) y los factores de enriquecimiento (FE).

por fuentes antropogénicas (Hansen *et al.*, 1995; Reiman y de Caritat, 2000).

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el pH, la MO y concentración de metales pesados (Cr, Cd, Mn, Ni, Cu, Pb y Zn) en suelos de cultivo de cinco localidades del Estado de México, así como determinar los factores de enriquecimiento y el índice de geoacumulación, para conocer un gradiente de distribución de metales pesados en la rivera del río Lerma.

1. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra dentro del curso alto del río Lerma; abarca $5,549 \text{ km}^2$ y se divide en tres porciones: curso alto, medio y bajo, según un criterio hidrológico-tectónico que cubre toda la parte norte del Estado de México. La cuenca alta del río Lerma presenta puntos cuya máxima elevación excede los 4,500 msnm, como son los picachos orientales del Nevado de Toluca (Gobierno del Estado de México, 1993).

Respecto a su clima, la parte alta de la cuenca del río Lerma tiene una variación mínima en cuanto a sus condiciones climáticas; predomina el clima templado en cuatro variedades: $C(w_2)(w)$, $C(w_1)(w)$, $C(E)(w_2)(w)$ y $C(E)(m)(w)$ (García, 1988).

La geología manifiesta una actividad volcánica, constituida por una secuencia de rocas formadas por materiales piroclásticos y, en menor proporción, por derrames continentales. Litológicamente, se encuentra formada por rocas ígneas extrusivas de naturaleza intermedia a básica; las primeras predominan en el parteaguas general de la cuenca, las segundas forman corrientes de lava y conos cineríticos; ambas forman depósitos piroclásticos que, en su granulometría, varían de tobas finas a bombas, y en algunos casos aglomerados. En las partes bajas hay depósitos de aluvión. Relacionando la litología y el clima se determina la presencia de suelos; entre ellos dominan el Andosol, que sustenta la vegetación de los bosques templados; Litosol, que sostiene matorrales; Planosol, Feozem y Vertisol, que son de buen uso agrícola (Gobierno del Estado de México, 1993).

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio abarca una distancia de 105 km sobre el río a partir de la presa José Antonio Alzate, Estado de Méxi-

co, perteneciente al curso alto, hasta llegar a Amealco.

El área donde se realizó el estudio fue dividida en cinco sitios (véase cuadro 1 y figura 1).

2.2. Muestreo

El muestreo fue de tipo sistemático (Cochran, 1977): se realizó una colecta de 55 muestras de suelo a 30 cm de profundidad. La diferencia en el tamaño de muestra del sitio Tl obedeció a que se recogieron en dos épocas diferentes, tanto en sequía como en lluvias, ya que tiene diferente nivel freático. El suelo colectado se guardó en bolsas de plástico, fue secado a temperatura ambiente, homogeneizado, molido y tamizado a una malla de 2 mm para los análisis de pH y MO y en una malla de 0.169 mm para la cuantificación de metales pesados (Hodson, 1987 y Webster y Oliver, 1990).

2.3. Análisis de laboratorio

Se determinó la capacidad de intercambio catiónico por el método del versenato (EDTA: etildinitrilotetracetato disódico), de acuerdo con Jackson (1982), así como textura por el método de Bouyoucos (1963). Se determinó el pH en agua en una relación soluto/solución 1:2.5 (peso/volumen) (McLean, 1982), y el contenido de materia orgánica por el método de modificado Walkley y Black (1947). Para la determinación de metales pesados se realizó una digestión ácida (HNO₃ + HCl) en una relación 4:1 (volumen/volumen); se cuantificó la concentración total de Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Zn y Fe mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS) (Perkin Elmer, Norwalk, CT, USA).

2.4. Índice de geoacumulación (I_{geo})

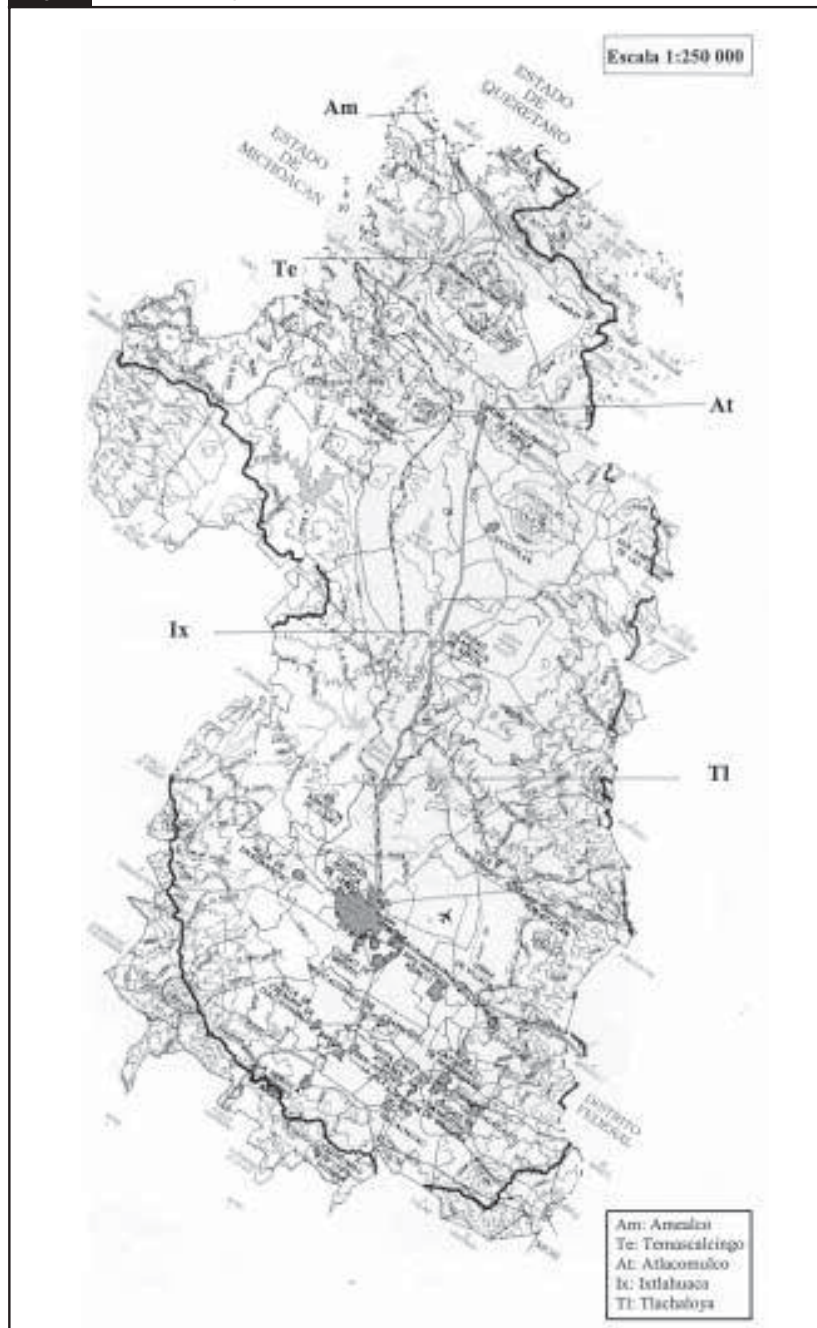
El índice de geoacumulación permite informar de un valor numérico que presenta un intervalo donde el suelo

Cuadro 1. Localidades de la zona estudio.

Sitio	Localidad	Distancia (km) respecto a la ciudad de Toluca	Suelo	Número de muestras
1	Tl = Tlachaloya	20	Feozem	20
2	Ix = Ixtlahuaca	37	Feozem	8
3	At = Atlacomulco	60	Feozem	9
4	Te = Temascalcingo	91	Feozem	10
5	Am = Amealco	105	Feozem	8

Fuente: INEGI, 1981.

Figura 1. Localización de los puntos de muestreo, Cuenca Alta del Río Lerma.



Fuente: Gobierno del Estado de México, 1993.

puede considerarse contaminado por sustancias orgánicas e inorgánicas (Loska *et al.*, 1997; Moreira y Boaventura, 2003).

Este índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 0.2 B_n$$

donde C_n es la concentración del elemento examinado y B_n la concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre). Loska *et al.*, (1997) distinguen seis clases de geoacumulación, como se muestran en el cuadro 2.

2.5. Factor de enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento (FE) ha sido utilizado en estudios de ecotoxicología y química ambiental como marco de referencia. Considera los elementos más abundantes de la corteza terrestre tales como Al, Si y Fe (Lawson y Winchester, 1979; Poissant *et al.*, 1994; Stiotyk *et al.*, 2002).

El modelo del factor de enriquecimiento se representa como:

$$FE = (X/Fe)_{lluvia} / (X/Fe)_{corteza}$$

donde los términos $(X/Fe)_{lluvia}$ y $(X/Fe)_{corteza}$ denotan una relación entre la concentración del elemento X con

respecto al hierro (Fe) proveniente de la lluvia y al promedio del elemento presente en la corteza terrestre respectivamente.

Lawson y Winchester (1979) establecen una escala para determinar cuál es el origen del elemento X en estudio; así el cuadro 3 presenta las características de cada intervalo del FE.

2.6. Análisis estadístico

A los resultados de los metales pesados, MO, CIC, arcilla y pH se calculó la desviación estándar, la mediana y la media (Montgomery, 1991); además, para conocer si hay diferencias significativas entre las localidades se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de confianza de 95% (Montgomery, 1991).

3. Resultados y discusión

Los datos encontrados indican que el pH presenta una variación de ligeramente ácida pasando a neutra en el recorrido de las cinco localidades (cuadro 4).

Respecto a la MO (cuadro 4), se observa que el porcentaje tiende a disminuir a medida que va alejándose de la primera localidad (Tlachaloya), con un recorrido de 105 kilómetros sobre la ribera del río Lerma. El mayor contenido en la primera localidad se debe a la descarga de afluentes provenientes de aguas residuales municipales que lleva el río Lerma y se acumula en la presa José Antonio Alzate. En relación con el contenido de arcilla, la localidad que presentó mayor porcentaje fue Tl con 42.78 ± 28.49 y la de menor porcentaje fue Ix con 24.5 ± 9.62 ; la textura de la primera localidad es franco arenosa y de la segunda arcillo arenosa. En cuanto a la CIC, se observa una continuidad en cuanto a un contenido en los cinco sitios.

La figura 2 describe el comportamiento de Pb, Ni y Zn, donde el Pb presenta la menor concentración en Tl (27.9 mg kg^{-1}) y la máxima en Ix (78.1 mg kg^{-1}), para posteriormente descender hasta Am. El Ni tiene un comportamiento similar al Pb, aunque este metal presenta dos máximos, uno de 99.03 mg kg^{-1} en Ix y otro en Te (102

Cuadro 2. Clasificación de dos parámetros: clase de índice de geoacumulación y grado de contaminación.

Valor de I_{geo}	Clases de I_{geo}	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

Fuente: Loska *et al.* (1997).

Cuadro 3. Clases de factores de enriquecimiento de un metal pesado.

Clases de FE	Origen del elemento X (metal pesado)
1-10	De la roca madre
10-500	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre
>500	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico

Fuente: Lawson y Winchester (1979).

Cuadro 4. pH, porcentaje de materia orgánica arcilla y capacidad de intercambio catiónico en suelos de cinco localidades del curso alto del río Lerma.

	Sitios				
	Tl	Ix	At	Te	Am
pH	5.47 ± 0.34	7.20 ± 0.84	5.79 ± 0.90	7.33 ± 0.76	6.03 ± 0.64
MO (%)	3.76 ± 1.93	2.46 ± 0.72	2.56 ± 1.27	1.83 ± 0.66	1.44 ± 0.75
Arcilla (%)	42.78 ± 28.49	24.5 ± 9.62	40.66 ± 11.87	36.41 ± 2.69	28.62 ± 6.78
CIC meq/100g	20.5 ± 3.56	23.5 ± 6.15	21.22 ± 5.83	21.67 ± 6.09	18.8 ± 3.36

Media \pm desviación estándar

mg kg⁻¹). En Tl, el Zn presenta una concentración de 101.3 mg kg⁻¹ para luego descender hasta 63 mg kg⁻¹ en Am.

La figura 3 muestra el comportamiento del Cr, Cu y Cd; Tlchaloya presenta la menor concentración de Cr (20 mg kg⁻¹) mientras que Ix posee el mayor contenido (69.5 mg kg⁻¹) para luego decrecer hasta la localidad de Am.

Para el Cd y Cu se observa un comportamiento sin variación a lo largo del transecto. La concentración de los tres metales estudiados no rebasó el límite de toxicidad reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1992).

Se observó que el Cd se comportó dentro de un modelo de tipo cuadrático, como se ve en la figura 4:

$$Cd = 1.06 + 0.08D - 0.005D^2$$

en donde:

D = distancia

Tlchaloya presenta una concentración de Cd de 2.4 mg kg⁻¹ alcanzando un máximo de 4 mg kg⁻¹ en la localidad de Te para luego descender a 3.5 mg kg⁻¹ en Am (figura 4).

El cuadro 5 muestra las diferencias significativas entre las cinco localidades para el pH, MO y metales. Se encontró que el pH de Ix y Te difiere significativamente del resto de las localidades siendo éste neutro.

La MO presenta diferencias significativas entre Te y Am respecto a Tl, con el mayor contenido en esta última (cuadro 5); cabe mencionar que el contenido de arcilla fue igual en las cinco localidades. En cuanto a los metales, hubo diferencias significativas para el Cr, Pb, Zn y Ni, no así para el Cu y Cd en las localidades estudiadas. Los sitios donde se observaron diferencias significativas fueron: Ix para Cr, el cual puede deberse al uso de fertilizantes en estos suelos agrícolas (Alloway, 1990); Tl respecto a Ix para Pb, que puede asociarse a la combustión de compuestos derivados del petróleo con tetrametilo o tetraetilo de Pb, y algunas veces en óxido (PbO) y sulfuro (PbS), que están presentes durante la fase de transporte para ser depositado posteriormente en el suelo (Porta *et al.*, 1999); Amealco, entre todos los sitios (a excepción de At), para Zn, debido posiblemente a trazas de este metal contenido en los fertilizantes usados en la región (Alloway, 1990), y Tl para Ni (cuadro 5): la presencia del metal obedece al uso de fertilizantes, que constituye una fuente de incorporación en el suelo agrícola (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

3.1. Factor de enriquecimiento de metales

En lo que respecta a los factores de enriquecimiento (FE) de los metales

Figura 2. Contenido Pb, Ni, y Zn en suelos sobre la ribera del río Lerma de cinco localidades.

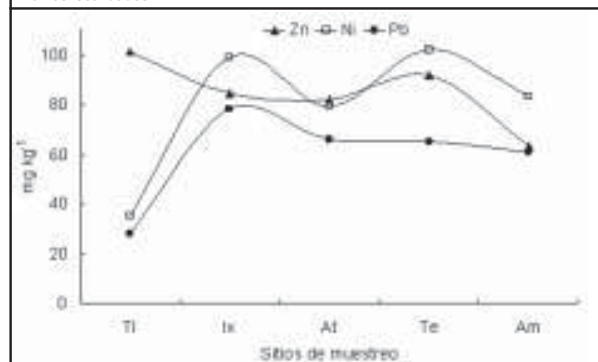


Figura 3. Contenido de Cd, Cu y Cr en el suelo sobre la ribera del río Lerma de cinco localidades.

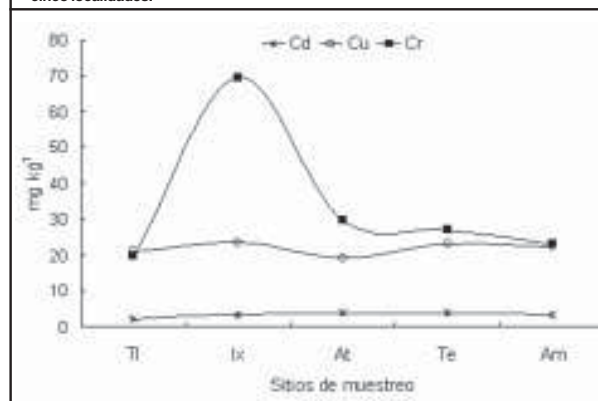
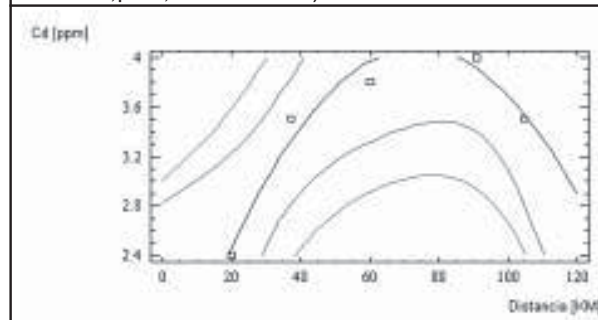


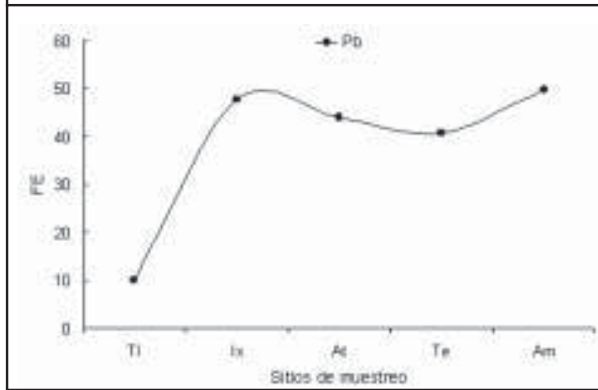
Figura 4. Modelo del Cd en suelos de cultivo cercanos al río Lerma (F = 17.58, R² = 95.19%, p < 0.05, error estándar = 0.19).



Cuadro 5. Prueba de Tukey^a para pH, MO y metales pesados en suelos estudiados.

Sitio	pH	MO	Cr	Pb	Cu	Cd	Zn	Ni
Tlchaloya	5.47 ^A	3.76 ^B	20.03 ^A	27.98 ^A	21.41	3.54	101.36 ^C	35.31 ^A
Ixtlahuaca	7.2 ^B	2.46 ^{AB}	69.58 ^B	78.11 ^B	23.63	3.68	84.56 ^{BC}	99.03 ^B
Atlacomulco	5.79 ^A	2.56 ^{AB}	29.75 ^A	65.83 ^{AB}	19.3	3.88	82.05 ^{AB}	79.35 ^B
Temascalcingo	7.33 ^B	1.83 ^A	26.92 ^A	64.96 ^{AB}	23.0	4.0	91.75 ^{BC}	102.01 ^B
Amealco	6.03 ^A	1.44 ^A	23.08 ^A	60.72 ^{AB}	22.31	3.54	63.1 ^A	83.45 ^B

^A La literal que se localiza como índice superior en el lado derecho de la columna del promedio representa diferencia significativa entre los sitios.
^B p < 0.001.

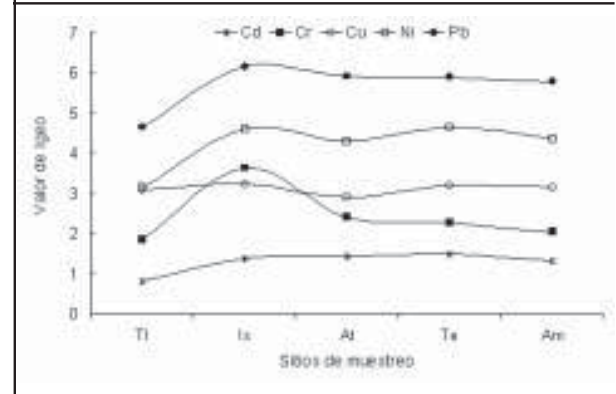
Figura 5. Valores de FE del Pb en suelo de cinco localidades sobre la ribera del río Lerma.


pesados en los sitios de estudio, sólo el Pb se encontró por arriba del valor de 10 (figura 5); esto indica que se trata de un metal moderadamente enriquecido en el suelo por fuentes antropogénicas, de acuerdo con Lawson y Winchester (1979). El resto de los metales mostró para FE un valor menor a 10, por lo que su presencia en el suelo se debe a la roca madre (Lawson y Winchester, 1979).

3.2. Índices de geocumulación I_{geo}

Como se muestra en la figura 6, el comportamiento de los metales con base en su I_{geo} se agrupan según la clasificación reportada por Loska *et al.*, (1997): a) grupo 2, moderadamente contaminados, formado por el Cr y Cd; b) grupo 4, fuertemente contaminado, incluye al Cu, y c) grupo 6, extremadamente contaminado, lo componen el Ni y Pb.

El enriquecimiento del Cr puede deberse al uso de fertilizantes en estos suelos agrícolas (Alloway, 1990); el Zn, a trazas de este metal contenido en los fertilizantes utilizados en la región (Alloway, 1990); el Cu, a la presencia de abonos de origen animal que, al ser depositados en el suelo de cultivo, integran este elemento a la materia orgánica (Smith, 1996); la

Figura 6. Índices de geocumulación en suelo de cinco localidades sobre la ribera del río Lerma.


aparición del Ni obedece al empleo de fertilizantes, que constituyen una fuente de incorporación en el suelo agrícola (Kabata-Pendias y Pendias, 1992); el Pb, se asocia a la combustión de compuestos derivados del petróleo que contienen tetrametilo o tetraetilo de Pb, tal como se ha mencionado anteriormente.

Conclusiones

El contenido total de metales, Cr, Pb, Zn, Ni, Cu y Cd, no rebasó el rango de toxicidad al ambiente edáfico.

En lo concerniente al FE, sólo el Pb se considera como el metal que contamina de manera moderada el ambiente, lo que indica la posibilidad de otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre, que puede ser de tipo antropogénico.

Los I_{geo} , Pb y Ni son considerados como extremadamente contaminantes al ambiente edáfico: el Cu, fuertemente contaminante, mientras que Cr y Zn como moderadamente contaminantes.

Sólo el FE del Cd presentó una correlación con la MO de 0.893, con $p < 0.5$.

Bibliografía

Alloway, B. J. (1990). *Heavy Metals in Soils*. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York.

Balderas, M. A. (1998). *Caracterización de metales pesados en suelos irrigados en la Cuenca Alta del Río Lerma*. Tesis de licenciatura, Universidad

Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Bouyucos, G. V. (1963). "Directions for Making Mechanical Analysis of Soil by Hydrometer Method", *Soil Sci.* 42: 23-30.

Brito, M. A. (2000). *Evaluación de suelos y cultivos con riego de toxicidad por metales pesados en la Cuenca Alta del Río Lerma*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

- Buremmer G. H., J. Gorth y U. Herms (1986). "Heavy Metal Species Mobility and Availability", en *Soils, Z. Pflanzenernaehr Bodenk.* 149: 382-398.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. 3a. ed., Nueva York.
- Coker, E. G. (1983). "The Use Sewage Sludge in Agriculture", *Water Sci. Tech.* 15: 105-208.
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. FOCET Larios, México.
- Giusquiani, P. L.; G. Gigliotti y D. Businelli (1992). "Mobility of Heavy Metals in Urban, Organic Matter and pH in Temperature Soils", *J. Environ. Quality*, 13(2): 234-245.
- Gobierno del Estado de México (1993). *Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del río Lerma*. Tomo I: Cartografía y anexos de documentos básicos. Gobierno del Estado de México, Toluca, México.
- Hansen, A. H.; Z. A. León e I. L. Bravo (1995). "Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimento de la cuenca Lerma-Chapala", *Ingeniería Hidráulica en México*, 3: 55-59.
- Hodgson, J. M. (1987). *Muestreo y descripción de suelos*. Reverte, España.
- INEGI (1981). *Síntesis geográfica, nomenclatura y anexo cartográfico del Estado de México*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Jackson, L. M. (1982). *Análisis químico de suelos*. 4a. ed., Omega, España.
- Kabata-Pendias, A. y H. Pendias (1992). *Trace Elements in Soil and Plant*. CRC. Press, Boca Raton.
- Lawson, D. R. y J. W. Winchester (1979). "A Standard Crustal Aerosol as a Reference for Elemental Enrichment Factors", *Atmospheric Environment*. 10: 925-930.
- Loska, K.; J. Cebula; J. Pelczar; D. Wiechula y Kwapilinski (1997). "Use of Enrichment, and Contamination Factors Together with Geoaccumulation Indexes to Evaluate the Content of Cd, Cu and Ni in the Rynik Water Reservoir in Poland", *Water, Air, and Pollution*. 93: 347-365.
- Loué, L. (1988). *Los microelementos en la agricultura*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Lugo de la Fuente J. _____ J. Hernández Silva, G. y L. Marín (2000). "Heavy Metal Concentration in the Sediments of the Upper Lerma Basin, México", *Backhuys Publishers*. Linden, Países Bajos.
- _____ (2002). *Dinámica de metales pesados en el sistema suelo-sedimento-fracción húmica y arcillosa en la cuenca alta y media del río Lerma*. Tesis de doctorado, UNAM, México.
- McLean, E. O. (1982). "Soil pH and Lime Requirements", en A. L. Page, R. H. Miller, D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis. Part 2, Agronomy 9*. Am. Soc. Agronomy Inc., Madison, Wisconsin.
- Montgomery, D. C. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Iberoamericana, México.
- Moreira A. C. R y R. G. Boaventura (2003). "Referencia geoquímica regional, para a interpretação das concentrações de elementos químicos nos sedimentos da Bacia do lago Paranoá-DF. Quim", *Nova*, 6: 812-820.
- Morquecho, C. A. (1997). *Distribución de metales pesados en el sistema sedimento-suelo de la presa José Antonio Alzate, Estado de México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Petruzzelli G.; G. Guidi y L. Lumbrano (1993). "Organic Matter as an Influencing on Copper and Cadmium Adsorption by Soils", *Water, Air and Soil Pollution*. 9: 263-269.
- Poissant L.; J. P. Schmitt y P. Béron (1994). "Trace Inorganic Elements in Rainfall in the Montreal Island", *Pergamon Press*. Inglaterra.
- Porta, C. J.; R. M. Lopez-Acevedo y L. C. Roquero (1999). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, España.
- Reiman, C. y P. de Caritat (2000). "Intrinsic Flaws of Element Enrichment Factors (EFs) in Environmental Geochemistry", *Environmental Science & Technology*. H.W. Wilson-AST; 34 : 5084-5091.
- Rodríguez, R. E. (2000). *Evaluación de metales pesados en suelos irrigados en la Cuenca Media del Río Lerma*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Smith S.R. (1996) *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*. CABT, Reino Unido.
- Stiolyk, W.; D. Weis y M. Hesterkamp (2002). "New Peat Record of Atmospheric Lead Pollution in Switzerland: Pb Concentrations Enrichment Factors, Isotopic Composition, and Organolead Species", *Environmental Science & Technology*, 36: 3893-3900.
- Trief, N. M. (1981). "Environmental and health", *Ann Arbor Sciencie*. Estados Unidos.
- Vaca, P.R. (1996). *Determinación de metales pesados en dos tipos de suelo bajo bosque y cultivo en el Alto Lerma, Estado de México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Walkley, A. (1997). "A Critical Examination of a Rapid Method for Determining Organic Carbon in Soils: Effect of Variations in Digestions Conditions and of Inorganic Soil Constituents", *Soil Sci.* 63:251-263.
- Webster, R. y M. A. Oliver (1991). *Statistical Methods in Soil Land Resource Survey*. Oxford University Press, Inglaterra.