

Cu, Fe, Mn y Zn en suelos agrícolas localizados al noroeste de Tlaxcala, México

Elizabeth García-Gallegos¹, Elizabeth Hernández-Acosta², Otilio A. Acevedo-Sandoval³, Francisco Prieto-García⁴, Héctor S. Luna-Zendejas⁵

CIGyA¹, Departamento de Suelos², ICT³, CIQ⁴, CICC⁵

Universidad Autónoma de Tlaxcala^{1,5}, Universidad Autónoma Chapingo^{2*}, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo^{3,4}
Tlaxcala^{1,5}, Texcoco², Pachuca^{3,4}; México

[gallegoseg¹, hlzendejas⁵]@hotmail.com, elizahac@yahoo.com.mx², [acevedo³, prietog⁴]@uaeh.edu.mx

Abstract— Agricultural soils were collected at 300 m away from Industrial City Xicohtencatl I, Tlaxcala. To evaluate by sequence of extraction the fraction of copper, iron, manganese, zinc and the associated to carbonates; organic matter and sulfides to oxides and hydroxides of iron and manganese, and residual fraction. Each soil were determined its pH, electrical conductivity, cation exchange capacity, organic matter, texture, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium. The results revealed that soils contain low concentration of organic matter, clay, cation exchange capacity and showed no salinity problems. The extraction sequence indicated that the iron and zinc are associated with the residual fraction, the manganese to oxides and hydroxides of iron and manganese; copper is presented interchangeably and associated to carbonates in higher concentration.

Keyword— Heavy metals, pollution, bioavailability, industrial influence.

Resumen— Se recolectaron suelos agrícolas a 300 m de distancia de la Ciudad Industrial Xicohtencatl I, Tlaxcala. Para evaluar por secuencia de extracción la fracción intercambiable de cobre, hierro, manganeso, zinc y la asociada a los carbonatos; materia orgánica y sulfuros a óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, y la fracción residual. A cada suelo se le determinó pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, textura, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Los resultados revelaron que los suelos contienen baja concentración de materia orgánica, de arcilla, de capacidad de intercambio catiónico y no presentaron problemas de salinidad. La secuencia de extracción indicó que el hierro y zinc se asociaron a la fracción residual, el manganeso a los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso; el cobre se presentó en forma intercambiable y asociado a los carbonatos en mayor concentración.

Palabras claves— Metales pesados, contaminación, biodisponibilidad, influencia industrial.

I. INTRODUCCIÓN

La Ciudad Industrial Xicohtencatl I cuenta con alrededor de 52 empresas del tipo metal-mecánico, químico, textil, metal básico, eléctrico y mineral no metálico [1], las cuales a través de sus procesos generan una importante contaminación de probablemente metales pesados y que aunado al empleo de fertilizantes inorgánicos, pesticidas, abonos orgánicos y aguas residuales se incrementa la concentración de estos elementos, los cuales impactan de manera negativa la calidad del suelo [2]; aunque el Fe, Cu, Mn y Zn son esenciales, un aumento en el suelo puede constituir un riesgo importante de contaminación, como lo reporta, Lukowski y Wiater [3]. Weber y Karczewska [4, 5] mencionaron que las concentraciones son variables en función del tipo de roca de la que se trate y depende, en gran medida, de la zona de estudio, por lo que existe una importante variabilidad espacial en el contenido de metales en el suelo.

La concentración total de metales ofrece información sobre su presencia en el suelo, pero no indica las formas químicas del metal que determinan su biodisponibilidad, como lo mencionan Yongfeng et al. [6]. Las formas intercambiables y solubles en agua se consideran altamente móviles y disponibles para las plantas, mientras que los metales incorporados en la estructura cristalina de las arcillas son inmóviles. Los metales asociados a los carbonatos, óxidos e hidróxidos de Al, Fe y Mn, así como a la materia orgánica y sulfuros se consideran relativamente móviles, lo que depende de las propiedades

fisicoquímicas del suelo, como lo indican Kabata y Pendias [7], por otro lado, Carrillo et al. [8], Velea et al. [9] reportan también el contenido de arcilla, pH, materia orgánica, óxidos de Fe/Mn, capacidad de intercambio catiónico; el potencial redox y carbonatos de calcio, Fanrong et al. [10]. Por lo anterior, los objetivos del presente estudio consistieron en: 1) evaluar las propiedades del suelo que intervienen en la movilidad de los metales, así como la concentración de N, P, K, Ca y Mg; 2) determinar las formas de Cu, Fe, Mn y Zn asociadas a las diferentes fracciones, a través de un procedimiento de extracción secuencial.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción del área de estudio y obtención de muestras

La Ciudad Industrial Xicohtencatl I se localiza al noroeste del estado de Tlaxcala, en el municipio de Tetla, dentro de la provincia del Eje Neovolcánico en la subprovincia de lagos y volcanes del Anáhuac. El clima de la zona es templado subhúmedo, con lluvias en verano y la precipitación va de 600 a 900 mm y predominan los suelos del orden Phaeozem (62%) [11]. La agricultura es de temporal y los principales cultivos son avena forrajera (*Avena sativa*), maíz forrajero y para grano (*Zea mays*), calabaza (semilla) (*Cucurbita* spp.), canola (*Brassica napus*), cebada (*Hordeum vulgare*), chícharo (*Pisum sativum*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), haba para grano y verde (*Vicia faba*), papa (*Solanum tuberosum*), tomate verde (*Lycopersicon esculentum*) y trigo para grano (*Triticum aestivum*). La vegetación predominante son pastos y árboles del género *Juniperus* deppeana, se aplican a los suelos fertilizantes principalmente inorgánicos como la carbamida ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) y fosfato triple calcio (SPT) [1, 11].

Para este primer acercamiento a la zona se seleccionaron cuatro sitios, a una distancia no mayor de 300 m de la Ciudad Industrial Xicohtencatl I. La superficie de cada sitio en promedio fue de 0.4 ha. De cada sitio se colectaron seis muestras simples, con el método de zig-zag, a una profundidad de 0 a 30 cm, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 [12]. Para realizar las diferentes determinaciones se realizó una muestra compuesta por sitio, la cual se analizó por triplicado.

B. Propiedades fisicoquímicas del suelo

Las muestras se colocaron sobre papel “kraft” para realizar el secado a temperatura ambiente y a la sombra. Una vez secas, se pasaron por un tamiz de malla 2 mm, con el objeto de obtener un tamaño homogéneo de partícula. El pH del suelo se midió en una solución suelo:agua, 1:2 (p/v); la materia orgánica se estimó con el método de Walkley-Black [13]; la conductividad eléctrica se determinó en término de sales solubles [14]; la capacidad de intercambio catiónico se obtuvo por acetato de amonio 1N, a pH 7 [15], la textura se midió con hidrómetro de Bouyoucos [16]. La concentración de Ntotal se determinó mediante KCl 2N y arrastre de vapor [17]; el P, por el método de Bray y Kurtz 1 [18]; el K se cuantificó por espectrofotometría de emisión de flama y las concentraciones de Ca y Mg se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica [19].

C. Fraccionamiento de metales

Para el fraccionamiento de los metales se empleó, como base, la secuencia de extracción propuesta por Tessier et al. [20], con modificaciones de Martínez y Rivero [21], Vanek [22] y Prieto et al. [23]. Se analizaron la Fracción I (intercambiable), la Fracción II (asociada a los carbonatos), la Fracción III (asociada a los óxidos e hidróxidos de Fe/Mn), la Fracción IV (asociada a la materia orgánica y sulfuros) y la Fracción V (residual). Se empleó 1 g de suelo y se colocó en un tubo de centrifuga de 50 mL. Posteriormente, se colocó en un agitador mecánico horizontal, marca LabRotator, Barnstead International, EUA. Después, se centrifugó a 2500 rpm, por 15 minutos, en una centrifuga marca Hermle-Labortechnik Z-300. El sobrenadante se depositó en un frasco de polietileno y se aforó a 50 mL con agua desionizada. El residuo de cada fracción se lavó con 2 mL de agua desionizada, antes del

siguiente paso. Se contó con blancos para cada una de las extracciones. Las muestras se analizaron por triplicado.

La Fracción I. 8 mL de $MgCl_2$ 1M (pH = 7.0), agitación continua por 1 h, a temperatura ambiente. La Fracción II. Al residuo de la Fracción I se le agregaron 8 mL de NaOAc 1M pH = 5, agitación continua por 5 h, a temperatura ambiente. La Fracción III. Al residuo de la Fracción II se le agregó la mezcla de 20 mL de $NH_2OH.HCl$ 0.04 M en 25% de HOAc, agitación ocasional por 6 h, a 90 ± 3 oC. La Fracción IV. Al residuo de la Fracción III se le agregaron 3 mL de HNO_3 0.002 M y 5 mL de H_2O_2 a 30%. El pH del agua oxigenada se ajustó a 2.0, con HNO_3 . La mezcla se llevó a una temperatura de 85 ± 2 oC, por 5 h, con agitación ocasional. Posteriormente, se agregaron 5 mL de H_2O_2 a 30% (pH = 2 con HNO_3) y se llevaron a 85 ± 2 oC por 3 h, con agitación ocasional. Se refrigeraron las muestras, para luego agregarles 5 mL de NH_4OAc 3.2 M y diluir con 20 mL. Se agitó por 30 min. La Fracción V. Se aplicaron 10 mL de HNO_3 y 10 mL de HF (1:1), agitación continua, 2 h a 100 oC.

Para la cuantificación de Cu, Fe, Mn, Zn se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian, modelo Spectr AA 880, Australia.

D. Análisis de resultados

Los resultados de la concentración de metales asociadas a las fracciones se sometieron a un análisis de varianza de un factor, el cual permite concluir si entre los sitios muestreados existen diferencias significativas al 95%. Para ello se empleó el software estadístico Statgraphics Centurion XVI [24].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Propiedades fisicoquímicas de los suelos

En la tabla I se presentan los resultados del valor promedio de pH en agua en los suelos, el cual varió de 5.7 a 7.3, considerado como ligeramente ácido y neutro por la NOM-021-SEMARNAT-2000 [12]. A pH ácido los metales son más solubles y a medida que el pH se incrementa su solubilidad disminuye, como lo mencionan Kabata y Pendias [7]. Las concentraciones de materia orgánica varían de 0.9% a 1.1%, los cuales de acuerdo con la NOM-021 [12], son bajas, lo que indica un cierto grado de degradación por la pérdida de materia orgánica.

Los valores de CIC presentaron un intervalo de 10 a 16 $cmol(+)kg^{-1}$ (Tabla I). La NOM-021 [12] establece que una CIC de 5 a 15 $cmol(+)kg^{-1}$ se presenta una baja capacidad para adsorber cationes, mientras que a 25 $cmol(+) kg^{-1}$ el suelo cuenta con una reserva nutrimental importante. En general, cuanto mayor sea la CIC se incrementa la capacidad del suelo para adsorber metales; sin embargo, en los suelos bajo estudio esto no sucede. Micó et al. [25] reportaron una CIC promedio de 14.1 $cmol(+) kg^{-1}$ en suelos influenciados por la actividad industrial. Sharma et al. [26] mencionaron que suelos contaminados con Fe presentaron una CIC baja, debido a una alta proporción de arena y a una baja concentración de materia orgánica, como se encontró en este trabajo.

La CE de los suelos muestreados fue de 0.1 a 0.3 $dS m^{-1}$ que, según la NOM-021 [12] no presentan problemas de salinidad (Tabla I). Micó et al. [25] reportaron una CE baja de 7.8 $dS m^{-1}$ en suelos influenciados por la actividad antrópica, mientras que suelos cercanos a una industria del giro electrónico y metalúrgico, en el área de Moradabad, India, presentaron una CE de 0.21 $dS m^{-1}$, valor que no representa un problema de salinidad, mencionan Saraswat y Rai [27]. Este resultado concuerda con el obtenido en este estudio. El análisis granulométrico de los suelos mostró una mayor proporción de arena y un menor contenido de limo y arcilla. Banat et al. [28] mencionaron que el contenido de arcilla depende del tipo de suelo y su cantidad es importante para la adsorción de metales. Respecto al N_{total} , en los Sitios 1 y 2, la concentración es media; alta en los Sitios 3 y 4. En cambio, el P en todos

los sitios fue medio, de acuerdo a lo que establece la NOM-021 [12] (Tabla I). Las concentraciones de K, se clasifican como muy ricas en los Sitios 1 y 2 y ricas en los Sitios 3 y 4 [29]. En cuanto al Ca en los Sitios 1 y 2, la concentración es media y pobre en los Sitios 3 y 4, concentraciones posiblemente debido a la aplicación de fertilizantes nitrogenados o fosforados. Finalmente los suelos de todos los sitios son muy ricos en Mg, lo cual puede ser resultado del proceso de intemperización, el cual libera Mg^{2+} a la solución del suelo, en donde, después puede ser lixiviado, absorbido por las plantas o microorganismos, así como adsorbido al complejo de intercambio [30].

Tabla I. Parámetros de los suelos agrícolas.

Determinación	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4
pH $_{1:2}$ agua	7.3 ± 0.05	7.3 ± 0.05	5.7 ± 0.1	6.4 ± 0.05
pH $_{1:2}$ KCl	6.0 ± 0.02	6.2 ± 0.02	4.3 ± 0.1	5.0 ± 0.03
CE ($dS\ m^{-1}$)	0.3 ± 0.005	0.4 ± 0.005	0.1 ± 0.05	0.3 ± 0.05
MO (%)	1.1 ± 0.005	0.9 ± 0.005	1 ± 0.005	1 ± 0.005
Ct (%)	0.6 ± 0.005	0.5 ± 0.05	0.07 ± 0.05	0.08 ± 0.005
CIC [$cmol(+)kg^{-1}$]	14 ± 1.0	16 ± 0.5	10 ± 1.0	11 ± 0.5
Arena ($g\ kg^{-1}$)	470.8 ± 0.6	665.4 ± 0.6	673.6 ± 0.5	703.6 ± 0.7
Limo ($g\ kg^{-1}$)	305.6 ± 0.6	227.4 ± 0.5	222.0 ± 0.5	172.0 ± 0.8
Arcilla ($g\ kg^{-1}$)	223.6 ± 1.0	107.2 ± 0.5	104.4 ± 0.7	124.4 ± 0.4
N_{total} ($mg\ kg^{-1}$)	0.5 ± 0.8	0.6 ± 0.3	0.8 ± 0.8	0.8 ± 0.8
P ($mg\ kg^{-1}$)	7.5 ± 0.5	7.0 ± 0.5	29.3 ± 0.8	29.3 ± 0.6
K ($mg\ kg^{-1}$)	372 ± 0.6	346 ± 0.2	202 ± 0.4	293 ± 0.6
Ca ($mg\ kg^{-1}$)	1768 ± 0.6	1767 ± 0.8	671 ± 0.2	811 ± 0.3
Mg ($mg\ kg^{-1}$)	581 ± 0.7	555 ± 1.2	186 ± 0.7	314 ± 0.7

MO=materia orgánica, CE=conductividad eléctrica, Ct=carbono total, CIC=capacidad de intercambio catiónico

B. Fraccionamiento de Cu, Fe, Mn y Zn

Los resultados de la extracción secuencial de Cu, Fe, Mn y Zn de los suelos se presentan en la tabla II. Las extracciones secuenciales, si bien no conducen a una especiación química completa, si pueden tener un carácter práctico de mayor interés, en términos del comportamiento de un elemento, porque se pueden relacionar las concentraciones asociadas a distintos componentes del suelo, así como a su movilidad y biodisponibilidad para ser transferidos a las plantas, como lo reportaron Yongfeng et al. [6]; Fuentes et al. [31].

Cobre. Los sitios del área de estudio presentaron un intervalo en la concentración de Cu intercambiable de 1.1 a 2.8 $mg\ kg^{-1}$, mientras que el asociado a los carbonatos fue de 4.1 a 10.3 $mg\ kg^{-1}$ ($p \leq 0.05$) (Tabla II), lo que indica una alta biodisponibilidad para las plantas. La fracción reducible, representada por los óxidos e hidróxidos de Fe/Mn, no presentó diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$). El Cu se asocia fuertemente a la materia orgánica, debido a la facilidad para formar complejos organominerales como lo establecen Li et al. [32]; en los suelos bajo estudio, se presentó un intervalo de 6.4 a 8.8 $mg\ kg^{-1}$, lo que representa el 14.3 y 26.7%, respectivamente. El Cu, en la fracción residual no fue significativo entre los sitios ($p \leq 0.05$).

Hierro. Los suelos muestreados no presentaron Fe intercambiable ni asociado a los carbonatos; en cambio, en la fracción reducible, oxidable, así como en la residual, se presentaron diferencias significativas entre sitios ($p \leq 0.05$) (Tabla II). La mayor concentración de Fe asociada a la fracción reducible se reporta en los S1 y S2, al igual que el Fe en la fracción oxidable, aunque el contenido de materia orgánica fue bajo en todos los suelos analizados. La fracción residual fue mayor en el S3 y el

S4, concentración que no representa un riesgo potencial de contaminación. Tokalioglu et al. [33] reportaron que en suelos influenciados por la urbanización e industrialización, la mayor cantidad de Fe se asocia a la fracción residual y en menor concentración a los óxidos de Fe/Mn.

Manganeso. La distribución de Mn presentó diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre sitios, en la fracción intercambiable, asociada a los carbonatos y a los óxidos de Fe/Mn (Tabla II). Aruani y Sánchez [34] mencionaron que en suelos con pH mayor a 7 existe una mayor adsorción de Mn en los carbonatos, lo que ocasiona una disponibilidad de este elemento. En este sentido, los Sitios 1 y 2 presentaron un pH de 7 y 7.3, respectivamente; CE de 0.3 y 0.4 dS m⁻¹ y una alta concentración de Ca (Tabla I). La fracción asociada a la materia orgánica fue de 39.6 a 42.2 mg kg⁻¹, en el S1 y S4; la materia orgánica es una de las propiedades más importantes que afectan la biodisponibilidad de los metales. La mayor concentración de Mn se encontró asociada a los óxidos de Fe/Mn y a la fracción residual, por lo que el potencial de movilidad y biodisponibilidad para las plantas es bajo.

El zinc es un elemento que está fuertemente relacionado con las fracciones orgánica y mineral del suelo, mencionan Kabata y Mukherjee [35]. Sin embargo, en los suelos bajo estudio el Zn no se reporta en la fracción asociada a los carbonatos y a la materia orgánica. La fracción intercambiable, asociada a los óxidos de Fe/Mn, y la residual presentaron diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$). La fracción intercambiable presentó un intervalo de 0.7 a 5.2 mg kg⁻¹ (3.8 al 26.5%) y en la asociada a los óxidos de Fe/Mn, esta fue de 0.09 a 4.2 mg kg⁻¹ (0.4 al 21.3%); finalmente, la fracción residual presentó la mayor concentración, de 10.2 a 26.3 mg kg⁻¹ (52 a 95.6%) (Tabla II).

Tabla II. Resultados de la extracción secuencial de metales en las muestras de suelo.

	Concentración (mg kg ⁻¹)				p ≤ 0.05
	S1	S2	S3	S4	
Cobre					
Intercambiable	2.8 ± 2.03	2.4 ± 0.2	1.1 ± 0.1	2.6 ± 0.4	0.3423
Carbonatos	4.1 ± 0.6	9.3 ± 1.0	9.9 ± 0.5	10.3 ± 0.1	0.0000
Óxidos de Fe/Mn	9.6 ± 0.5	9.8 ± 0.8	5.2 ± 1.1	28.7 ± 2.2	0.1119
M.O y sulfuros	6.4 ± 3.3	7.3 ± 0.7	7.6 ± 0.8	8.8 ± 4.0	0.7389
Residual	1.1 ± 0.5	1.8 ± 1.5	7.1 ± 0.04	11.0 ± 2.6	0.0001
Hierro					
Intercambiable	ND	ND	ND	ND	
Carbonatos	ND	ND	ND	ND	
Óxidos de Fe/Mn	251.3 ± 70.5	214.5 ± 31.8	88.7 ± 24.7	78.0 ± 5.4	0.0027
M.O y sulfuros	263.5 ± 71.1	174.4 ± 24.5	226.9 ± 89.0	61.4 ± 24.0	0.0142
Residual	32.9 ± 9.45	41.3 ± 4.2	427.2 ± 16.2	286.2 ± 19.7	0.0000
Manganeso					
Intercambiable	30.8 ± 5.3	14.7 ± 0.1	24.5 ± 1.1	20.0 ± 0.7	0.0006
Carbonatos	30.9 ± 3.9	22.0 ± 3.2	11.4 ± 1.4	14.2 ± 1.2	0.0001
Óxidos de Fe/Mn	137.9 ± 4.9	126.4 ± 2.5	179.5 ± 68.5	73.7 ± 6.7	0.0353
M.O y sulfuros	39.6 ± 33.4	1.9 ± 1.06	1.7 ± 1.3	42.2 ± 42.4	0.1735
Residual	120.2 ± 15.1	118.6 ± 8.1	113.7 ± 22.5	79.2 ± 31.9	0.1396
Zinc					
Intercambiable	0.7 ± 0.08	2.01 ± 1.06	4.4 ± 0.1	5.2 ± 0.05	0.0000
Carbonatos	ND	ND	ND	ND	
Óxidos de Fe/Mn	0.09 ± 0.1	0.8 ± 0.6	2.4 ± 1.6	4.2 ± 0.5	0.0028
M.O y sulfuros	ND	ND	ND	ND	
Residual	19.2 ± 8.2	25.0 ± 0.9	26.3 ± 2.2	10.2 ± 7.6	0.0336

*Letras diferentes en la misma fila indican una diferencia significativa. M.O = materia orgánica, ND = no detectable.

IV. CONCLUSIÓN

Los suelos agrícolas analizados presentaron bajo contenido de arcilla y materia orgánica, lo que repercute en una baja capacidad para la adsorción de metales y lo que indica una baja calidad productiva del suelo. Respecto a la concentración de Fe y Zn, ésta se encontró principalmente asociada a la fracción residual y, por lo tanto, no podría representar un riesgo al ecosistema. El Mn se asoció esencialmente a los óxidos e hidróxidos de Fe/Mn; condición que indica que este elemento puede ser potencialmente móvil, finalmente se encontró una mayor concentración de Cu intercambiable; sin embargo, no son concentraciones tóxicas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los resultados obtenidos en este trabajo pueden servir de base para ampliar el conocimiento acerca de la concentración presente en los suelos agrícolas de Fe, Zn, Cu y Mn que se encuentran cercanos a la actividad industrial.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece el apoyo al proyecto UATLx-EXB-226, PROMEP/103.5/12/3714.

REFERENCIAS

- [1] Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Tlaxcala (COPLADET). Monografías municipales del estado de Tlaxcala. Gobierno del estado de Tlaxcala. 2008.
- [2] Yaylali, G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey. *Microchem. J.* 2011; 99: 82-92.
- [3] Lukowski A, Wiater J. The influence of mineral fertilization on heavy metal fraction contents in soil. Part II. Copper and Nickel. *Polish J. Environ. Stud.* 2009; 18: 645-650.
- [4] Weber J, Karczewska A. Biogeochemical processes and role of heavy metals in the soil environment. *Geoderma.* 2005; 122: 105-107.
- [5] Bradl, H. B. Heavy metals in the environment. Elsevier Academic Press, The Netherlands. 283 pp. 2005.
- [6] Yongfeng W, Congqiang L, Chenglong T. Distribution and sequential extraction of some heavy metals in urban soils of Guiyang City, China. *Chin. J. Geoche.* 2008, 27: 401-406.
- [7] Kabata P, Pendias H. Trace elements in soils and plants. 3rd. edition. C.R.C. Press. Boca Raton, Florida, USA. 413 pp. 2001.
- [8] Carrillo G R, Simunek J, Sauvé S, Adriano D. Mechanisms and pathways of trace element mobility in soils. *Adv. Agron.* 2006, 91: 111-178.
- [9] Velea T, Gherghe L, Predica V, Krebs R.. Heavy metal contamination in the vicinity of an industrial area near Bucharest. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2009, 16 (Suppl 1): 27 –32.
- [10] Fanrong Z, Shafaqat A, Haitao Z, Younan O, Boyin Q, Feibo W, Gouping Z. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environ. Pollut.* 2011, 159: 84-91.
- [11] Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Prontuario de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala. Clave geoestadística 29031. 9 pp. 2009.
- [12] Diario Oficial de la Federación (DOF). NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. 31 de diciembre de 2002. 85 pp. 2002.

- [13] Jackson M. L. Análisis químico de suelos. Trad. al español por M. J. Beltrán. 3ª edición. Omega. Barcelona, España. 1976.
- [14] Richards L A. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª edición. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa. México, D.F. 1990.
- [15] Chapman H D. Cation Exchange capacity. In: C. A. Black (ed.). Methods of analysis. Part. 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. pp. 891-901. 1965.
- [16] Rodríguez F H, Rodríguez A J. Métodos de análisis de suelos y plantas. Trillas. México, D. F. 196 p. 2002.
- [17] Bremner J M. Total nitrogen. In: C. A, Black (ed.). Methods of soil analysis. Part. 2 Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. pp. 1149-1178. 1965.
- [18] Bray R H, Kurtz. Determination of total organic, and available phosphorus in soil. Soil Sci. 1945, 59: 39-45.
- [19] Alcántar G G, Sandoval M V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 156 p. 1999.
- [20] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem. 1979, 51: 844-851.
- [21] Martínez Y, Rivero C. Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo. Rev. Ingeniería UC. 2005, 12: 14-19.
- [22] Vanék A, Boruvka L, Drábek O, Mihaljevic M, Komárek M. Mobility of lead, zinc and cadmium in alluvial soils heavily polluted by smelting industry. Plant Soil Environ. 2005, 51: 316-321.
- [23] Prieto G F, Pérez M F, Barrado E E. Lixiviación selectiva de arsénico y otros elementos de material sedimentario arrastrado por aguas subterráneas en Zimapán, Hidalgo, México. Interciencia. 2006, 3: 50 – 56.
- [24] StatPoint Technologies. Statgraphics Centurion XVI. Software estadístico versión en español. United States of America. 2011.
- [25] Micó C, Recatalá L, Peris M, Sánchez J. Discrimination of lithogenic and anthropogenic metals in calcareous agricultural soils: a case study of the lower Vinalopó region (SE Spain). Soil Sediment Contam. 2008, 17: 467 – 485.
- [26] Sharma B D, Chahal D S, Singh P K, Raj-Kumar. Forms of iron and their association with soil properties in four soil taxonomic orders of arid and semi-arid soils of Punjab, India. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2008, 39: 2550 – 2567.
- [27] Saraswat S, Rai J. Phytoextraction potential of six plant species grown in multimetal contaminated soil. Chem. Ecol. 2009, 25: 1-11.
- [28] Banat K M, Howari F M, Tomah M M. Chemical fractionation and heavy metal distribution in agricultural soils, North of Jordan Valley. Soil Sediment Contam. 2007, 16: 89-107.
- [29] Vázquez A. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. 2ª. ed. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 31 p. 1997.
- [30] Núñez E R. El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. En: Nutrición de cultivos (G. G. Alcántar y L. I. Trejo, Coord.). 2a.reimpresión. Mundi Prensa. México, D.F., pp. 93-149. 2007.
- [31] Fuentes H M V, De Astudillo L R, Díaz A, Martínez G. Distribución de metales pesados en los sedimentos superficiales del Saco del Golfo de Cariaco, Venezuela. Rev. Biol. Trop. 2010, 58: 129-140.

- [32] Li B, Qiuquan W, Huang B, Shuping L. Evaluation of the results from a quasi-Tessier's sequential extraction procedure for heavy metal speciation in soils and sediment by ICP-MS. *Anal. Sci.* 2001, 17 (Supl. 1): 1561-1564.
- [33] Tokalioglu S, Kartal S, Gultekin A. Investigation of heavy-metal uptake by vegetables growing in contaminated soils using the modified BCR sequential extraction method. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2006, 86: 417-430.
- [34] Aruani M C, Sánchez E E. Fracciones de micronutrientes en suelos del Alto Valle de rio Negro, Argentina. *Rev. Ciencia del Suelo.* 2003, 21: 78-81.
- [35] Kabata P, Mukherjee A, B. Trace elements from soil to human. Springer. Berlin. 561 pp. 2007.