

Metales pesados como indicador de impacto de un sistema ecológico fragmentado por usos de suelo, San Luis Potosí, México

Heavy metals as an indicator of ecological impact of a fragmented land uses, San Luis Potosi, Mexico

Jorge Alcalá Jáuregui ¹
Cecilia Ávila Castorena ²
Juan C. Rodríguez Ortíz ¹
Alejandra Hernández Montoya ¹

F. Alfredo Beltrán Morales ³
Humberto Rodríguez Fuentes ⁴
J. Guadalupe Loya Ramírez ³

Originales: Recepción: 23/05/2011 - Aceptación: 14/06/2012

RESUMEN

La necesidad de estudiar la presencia de metales pesados en el suelo radica en su impacto como indicador de contaminación ambiental. Se determinó la presencia de Cu, Zn, Pb y Cd en suelos donde se distribuyen especies vegetales en un corredor ecológico. Entre los municipios de Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí (México) fueron establecidos 30 puntos distribuidos en cinco prácticas dominantes de usos de suelo: agropecuario, residencial rural, comercio y servicios, residencial urbano y minero. Los muestreos se realizaron en cuatro épocas durante 2009 y 2010 (verano, otoño, invierno y primavera). Se encontró un efecto significativo del uso del suelo en cuanto a los niveles de Cu ($p = 0,000$), Pb ($p = 0,043$) y Cd ($p = 0,010$). En el caso del Zn, el uso del suelo ($p = 0,000$) y la estación ($p = 0,059$) fueron significativos. El uso del suelo minero mostró las mayores concentraciones de metales y el agrícola las menores. Los niveles de los cuatro metales se

ABSTRACT

The need to study the presence of heavy metals in the soil lies on their impact as a indicator of environmental pollution. Therefore, it was determined the presence of Cu, Zn, Pb and Cd in soils where plant species were distributed in an ecological corridor. Among the municipalities of Soledad Graciano Sanchez and San Luis Potosi (Mexico), 30 points were established, distributed in five land uses: agricultural , rural residential, trade and services, urban residential and mining. Sampling was conducted from 2009 to 2010 (summer, fall, winter and spring). A significant effect of land use was found in terms of Cu ($p = 0.000$), Pb ($p = 0.043$) and Cd ($p = 0.010$). In the case of Zn both the land use ($p = 0.000$) and season ($p = 0.059$) had significant effects. It is emphasized that mining land use presented the highest concentrations of the studied metals and agricultural land use the lowest. The levels of four metals are in the range marked like high by the EPA and other technical sources. The levels of Pb and Cd do not

- 1 Profesor-investigador. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Km 14,5 Carretera San Luis-Matehuala. Apartado Postal 32. C. P. 78321 Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí. México. jorge.alcala@uaslp.mx
- 2 Egresada de Programa Ingeniero Agroecólogo. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- 3 Profesor-investigador. Dpto. de Agronomía. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Carretera al Sur km 5,5. Apartado Postal 19-B. C. P. 23080 La Paz, Baja California Sur. México.
- 4 Profesor-investigador. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria. San Nicolás de los Garza. Nuevo León. México.

encuentran en el rango marcado como alto por la EPA y por otras fuentes técnicas. En el caso de Pb y Cd no rebasan los estándares NOM-147-SEMARNAT-SSA1. Estos resultados reflejan el potencial indicativo del uso del suelo en la evaluación de la calidad ambiental, sin embargo, se requiere continuar con un monitoreo de metales pesados en la zona.

exceed the NOM-147-SEMARNAT-SSA1. These results reflect the indicative potential of the soil and its consideration for future to evaluate the habitat of plant species. These results reflect the potential indicative land use in the assessment of environmental quality, however, requires continued monitoring of heavy metals in the area.

Palabras clave

contaminación • impacto ambiental • estación • metales pesados

Keywords

pollution • environmental impact • season • heavy metals

INTRODUCCIÓN

La necesidad de estudiar la biodisponibilidad y contaminación de metales pesados en el suelo radica en el impacto que puede tener en la funcionalidad de los sistemas ecológicos. Para Volke *et al.* (30) algunas de las funciones del suelo que se ven afectadas son la capacidad como soporte físico, que de acuerdo con sus características físico-químicas y mecánicas permite el desarrollo de actividades forestales, recreativas, agropecuarias, además de las socioeconómicas como vivienda, industria, construcción de carreteras, entre otras. La calidad del suelo está relacionada con la capacidad o vocación, fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental (6).

En algunos países, el uso de suelo es uno de los principios determinantes en el desarrollo de políticas ambientales (25). Los cambios de uso del suelo impactan en los regímenes naturales y generan nuevos disturbios en la diversidad de especies, composición de las comunidades y funcionalidad del ecosistema. Las políticas de uso del suelo deben estar basadas en el entendimiento de los cambios del ecosistema, ya que contribuyen a una mejor planificación y toma de decisiones bajo una perspectiva sustentable (8).

En México la cobertura de la tierra y su uso representan los elementos integrantes de los recursos básicos. Los cambios en la cobertura y uso del suelo afectan los sistemas globales, razón por la cual se toman como referencia para algunas aplicaciones que van desde el monitoreo ambiental, la producción de estadísticas como apoyo a la planeación, evaluación del cambio climático y la evaluación de los procesos de desertificación, entre otros (10).

Sbarato *et al.* (26) consideran que los suelos se convierten en emisores de partículas cuando carecen de cobertura vegetal, así como de gases derivados de la actividad biológica cuando se refieren a la fragmentación. Para Anderson *et al.* (2), el estudio del uso de suelo es uno de los aspectos que contribuye en el conocimiento del deterioro de la calidad ambiental, pérdida de tierras agrícolas y pérdida de hábitats de vida silvestre, entre otros.

Uno de los problemas ambientales es la presencia de metales pesados por causa antropogénica derivados principalmente del uso del suelo (7, 16). Fergusson (9) refiere que los metales pesados son considerados dentro de un grupo de elementos químicos que se caracterizan por presentar una alta densidad y toxicidad para los seres vivos. El Zn y Cu corresponden al grupo de metales pesados que pueden encontrarse en el suelo en pequeñas cantidades y son esenciales para los organismos; se consideran nocivos cuando se presentan en concentraciones elevadas. Los niveles de concentración de estos metales en suelo oscilan de 10 a 100 mg kg⁻¹ y 2 a 100 mg kg⁻¹ respectivamente (19). Los metales como Pb y Cd no desempeñan ninguna función biológica y pueden resultar altamente tóxicos (18) así como ser lixiviados y absorbidos por las plantas (7). El contenido de Cd en suelo oscila de 0,01 a 3 mg kg⁻¹ y el de Pb varía de 3 a 189 mg kg⁻¹ (19).

La actividad minera, industrial, doméstica, rellenos sanitarios, drenaje pluvial y quema de combustible se constituyen en fuentes de contaminación por metales pesados. Las prácticas agrícolas inadecuadas como el uso excesivo de agroquímicos propician la acumulación de contaminantes en el suelo (18). Volke *et al.* (30) refieren que en México la presencia de metales en el ambiente es propiciado por residuos automotrices, residuos biológicos infecciosos, escorias de fundición, grasas y aceites gastados, solventes químicos, hidrocarburos, entre otros. En el estado de San Luis Potosí (México) existen sitios considerados con alto nivel de afectación a la salud humana y al ecosistema por la presencia de metales pesados.

El Servicio Geológico Mexicano (27) define la minería como una actividad de mayor impacto económico por la presencia y distribución en los municipios de Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí, considerando la producción de minerales metálicos y no metálicos. En este último se destaca la extracción de Cu, Zn y Pb, además de material no metálico como es la cantera de zeolita, agregados pétreos, grava, arena sílica, yeso, fosforita, mármol y arcillas. En el Municipio de Soledad de Graciano Sánchez, algunas de las principales extracciones se refieren a los agregados pétreos y de roca caliza. La conectividad rural y urbana entre estos Municipios hace posible un escenario de gran importancia en cuanto a la infraestructura y dinámica de actividades pecuarias (agricultura y ganadería), minería y bancos de materiales, vialidades, tránsito vehicular, además de la influencia industrial y de la expansión de asentamientos humanos.

De acuerdo con el Plan del Centro de Población Estratégico San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez (20), se identifica la necesidad de caracterizar las áreas de suelo contaminadas para establecer estrategias de rehabilitación. La dotación de infraestructura verde en las zonas conurbadas y de mayor contaminación se convierte en una estrategia viable para la mitigación del impacto ambiental.

En este contexto, el objetivo del estudio fue determinar la presencia de Cu, Zn, Pb y Cd en un corredor ecológico ubicado en los Municipios de Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí, considerando la fragmentación del hábitat con diversos usos de suelo y la concentración estacional de metales pesados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localizó en el estado de San Luis Potosí, dentro de la zona rural-urbana entre los Municipios de Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí. La zona se ubica en la Altiplanicie Mexicana, entre la Sierra Madre Oriental y Sierra Madre Occidental (20). El municipio de Soledad de Graciano Sánchez se ubica entre 22°27' N, y 100°58' O a 1.850 m s. n. m. El municipio de San Luis Potosí se ubica en las coordenadas: 22°12'27" N, 101°01'20" O y cuenta con una altura de 1.883 m s. n. m. (20, 21).

Las características climáticas de esta zona indican un clima seco templado con verano cálido, BSkw11(e)g. Se registra una precipitación anual de 400 mm, concentrados en verano y otoño particularmente de mayo a octubre. La temperatura media varía de 16 a 18°C, con una diferencia entre el mes más cálido y frío de 7 y 14°C (22).

Los tipos de suelo dominantes son Durisol, Cambisol, Leptosol, además de la trascendencia del suelo urbano (10, 11). Considerando la alternancia de la presencia de las especies mezquite (*Prosopis laevigata*), pirul (*Schinus molle*) y huizache (*Acacia spp.*) fueron ubicados 30 sitios de muestreo distribuidos en un corredor ecológico de 35,5 km, donde se determinaron cinco tipos de prácticas dominantes de uso del suelo: agropecuario, residencial rural, comercio y servicios, residencial urbano y minero (figura 1).

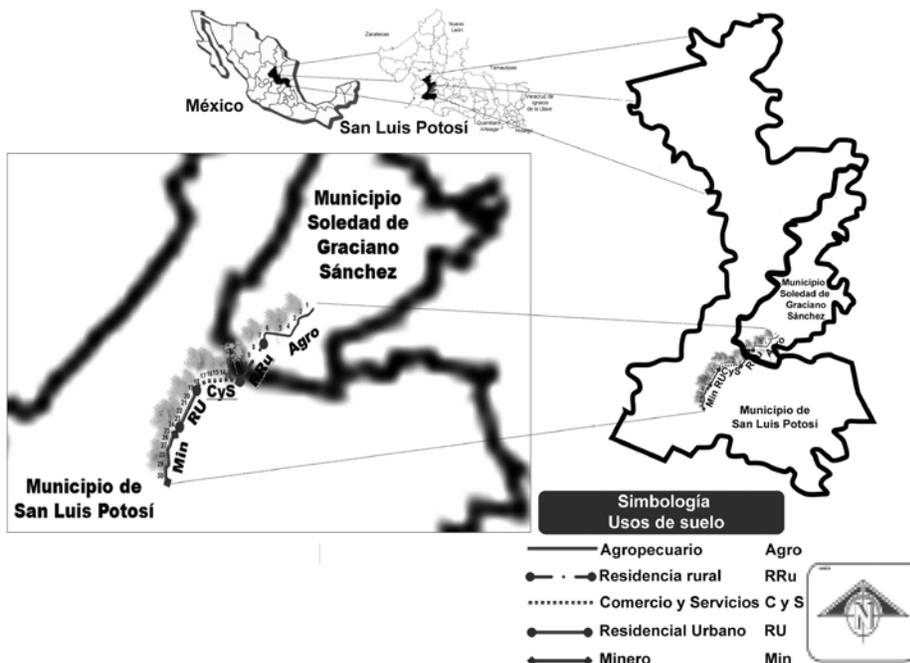


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo.
Figure 1. Location of sampling sites.

Las muestras se tomaron en los mismos puntos durante las estaciones de verano y otoño de 2009, así como en invierno y primavera de 2010, totalizando 120 muestras durante las cuatro temporadas. La profundidad de la muestra de suelo osciló de 0 a 15 cm. Para determinar las concentraciones de metales se preparó la muestra de suelo secándola a temperatura ambiente durante tres días, se tamizó en una malla de 2 mm y se tomó una cantidad de 0,5 g agregándole una mezcla de HNO_3 y HCL (1:3). Esta solución se dejó en una parrilla digestora por dos horas a 60°C , diluyendo el extracto líquido con agua desionizada, filtrando y aforando a 25 mL. Los metales Cu, Zn, Pb y Cd se detectaron por espectrofotometría de absorción atómica utilizándose un equipo Varian 220 con lámparas de cátodo hueco para cada elemento de acuerdo con el Analytical Methods (29) utilizando estándares certificados en curvas de calibración y gases acetileno-aire de alta pureza. Los trabajos se realizaron en el Laboratorio de Suelo-Agua-Planta de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Fueron reportadas las concentraciones de los metales en mg kg^{-1} .

Análisis estadístico

Para analizar los datos se consideraron dos criterios estadísticos. El primero constituyó el análisis de Cu, Zn y Pb considerando las estaciones de verano 2009, otoño 2009, invierno 2010 y primavera 2010. Esto fue debido a que en la determinación de la presencia de Cd no se obtuvo los datos suficientes para la estación de invierno 2009. Fueron incluidas las muestras de los usos del suelo agropecuario, residencial rural, comercio y servicios, residencial urbano y minero. Se diseñó un modelo con Proc GLM fijando un $\alpha \leq 0,05$ probando el efecto individual y las interacciones entre los factores uso de suelo y estacionalidad con respecto a las concentraciones de Cu, Zn y Pb. En un segundo análisis se incluyeron los cuatro elementos (Cu, Zn, Pb y Cd) considerando sólo las estaciones de verano 2009, otoño 2009 y primavera 2010. En los dos criterios se determinaron las medias y se realizó la prueba del coeficiente de correlación de Pearson y se aplicó el mismo modelo estadístico.

Para determinar la existencia de metales pesados que pudieran establecer agrupaciones por sus concentraciones, así como su relación con las prácticas de uso de suelo y estacionalidad, se realizó un análisis de componentes principales de los cuatro elementos analizados. Todos los análisis fueron realizados en el paquete estadístico MINITAB®.

RESULTADOS

En la evaluación de los usos del suelo agropecuario, residencial rural, comercio y servicios, residencial urbano y minero y estacionalidades se registró la presencia de Cu, Zn, Pb y Cd. Las concentraciones de Cd sólo se determinaron en las estaciones de verano y otoño de 2009, y primavera 2010.

Análisis de Cu, Zn y Pb

Se determinó que las concentraciones medias de las muestras obtenidas fueron para el Zn ($135,40 \text{ mg kg}^{-1}$) > Pb ($89,08 \text{ mg kg}^{-1}$) > Cu (57 mg kg^{-1}). Con la prueba del

coeficiente de correlación de Pearson se obtuvieron relaciones significativas entre los metales Pb-Cu ($r = 0,544$; $p = 0,000$), Cu-Zn ($r = 0,388$; $p = 0,000$) y Pb-Zn ($r = 0,180$, $p = 0,049$). De acuerdo con el modelo Proc GLM, se encontró efecto significativo de las prácticas dominantes de uso de suelo en las concentraciones de Cu ($p = 0,000$), Zn ($p = 0,000$) y Pb ($p = 0,043$). La estación sólo incidió significativamente en las concentraciones de Zn ($p = 0,059$). Los resultados de las concentraciones significativas de estos metales se presentan en la figura 2.

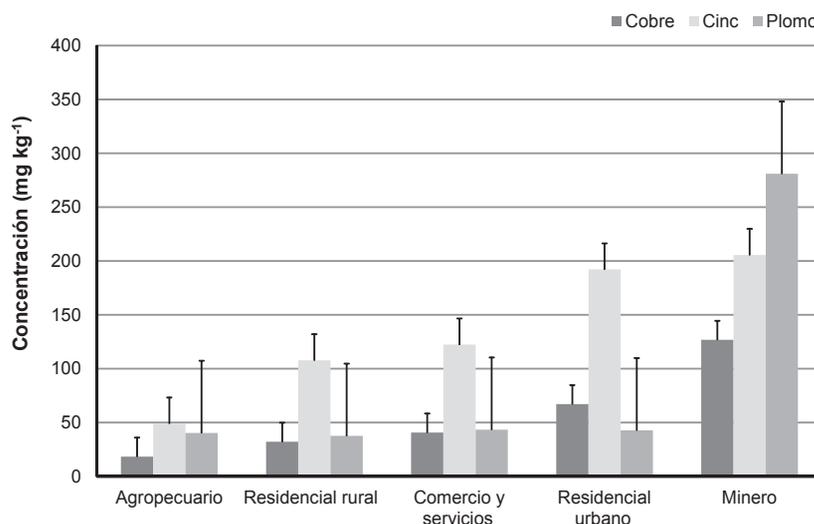


Figura 2. Concentraciones significativas de cobre, cinc y plomo de acuerdo con el efecto del uso del suelo.

Figure 2. Significant concentrations of copper, zinc and lead according to land use effect.

De los valores medios encontrados de Cu, el suelo con uso minero obtuvo la mayor concentración con $126,85 \pm 17,70$ mg kg⁻¹ y en el suelo agropecuario se detectó el valor menor con $18,33 \pm 17,70$ mg kg⁻¹. El Zn evidenció que la actividad minera obtuvo la mayor concentración con $205,59 \pm 23,94$ mg kg⁻¹ y el suelo con uso agropecuario fue el de menor acumulación con $49,03 \pm 23,94$ mg kg⁻¹.

En la figura 3 (pág. 21) se muestran las concentraciones resultantes del efecto significativo de la estación sobre el Zn, observándose que en el verano 2009, así como en el invierno 2010, se obtuvo la misma cantidad de este metal con un promedio de $156,94 \pm 21,41$ mg kg⁻¹. Por otra parte, en otoño 2009 se presentó la menor concentración de este metal con sólo $85,14 \pm 21,41$ mg kg⁻¹.

De los valores obtenidos de Pb, el uso de suelo minero presentó el mayor valor con $281,45 \pm 67,12$ mg kg⁻¹ y el suelo residencial rural registró la menor acumulación con $37,63 \pm 67,12$ mg kg⁻¹. Para este grupo de metales, con el análisis de componentes principales (ACP) se determinaron tres componentes (PC1, PC2 y PC3) de los cuales

PC1 y PC2 explicaron el 86,4% de la variabilidad de los datos. El PC1 mostró correlaciones positivas entre Cu (0,659), Zn (0,474) y Pb (0,584). En cuanto al PC2 presentó correlaciones negativas con respecto al Cu (-0,100) y Pb (-0,557) y positiva respecto del Zn (0,824).

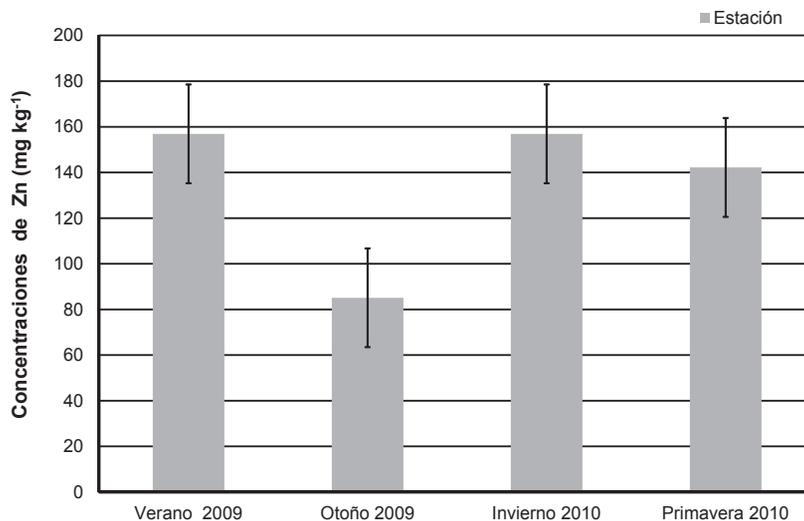


Figura 3. Concentraciones significativas de cinc de acuerdo con el efecto de la estación.
Figure 3. Significant concentration of zinc according to season effect.

En la figura 4 (pág. 22) se presenta la variabilidad de las observaciones determinadas en el PC1 y PC2.

A lo largo de CP1 se observaron cuatro muestras alejadas del eje de intercepción entre CP1 y CP2 siendo tres las pertenecientes al uso de suelo minero y a las estaciones de verano 2009 y otoño 2009. En este caso, destacó la muestra 117 que presentó los valores más altos de Cu (532,04 mg kg⁻¹), Zn (345,11 mg kg⁻¹) y Pb (3.581,40 mg kg⁻¹). A lo largo del CP2 destacó la muestra de suelo 57 con las concentraciones de Cu (598,38 mg kg⁻¹), Zn (411,36 mg kg⁻¹) y Pb (97,72 mg kg⁻¹). Estas muestras son pertenecientes al uso de suelo minero y a la estación de primavera 2010. Por otra parte, se distribuyó la muestra 27 con las mayores concentraciones de Cu (598,38 mg kg⁻¹), Zn (411,36 mg kg⁻¹), Pb (97,72 mg kg⁻¹) y Cd (248,56 mg kg⁻¹). Estos valores pertenecen al uso de suelo minero y la estación de primavera 2010.

Análisis de Cu, Zn, Pb y Cd

En el segundo análisis las concentraciones medias fueron Zn (128,2 mg kg⁻¹) > Pb (101,4 mg kg⁻¹) > Cu (58,3 mg kg⁻¹) > Cd (10,7 mg kg⁻¹). Con la prueba del coeficiente de correlación de Pearson se obtuvieron relaciones significativas con el Cu-Zn (r = 0,579; p = 0,000), Pb-Cu (r = 0,630; p = 0,000) y Cd-Cu (r = 0,852; 0,000), Pb-Cd (r = 0,310; p = 0,003), Cd-Zn (r = 0,416; p = 0,000) y Pb-Zn (r = 0,225; p = 0,033). Se obtuvo efecto significativo del uso de suelo con respecto a las concentraciones de Cu (p = 0,000), Zn (p = 0,000), Pb (p = 0,065) y Cd (p = 0,010). La estación sólo incidió significativamente en las concentraciones de Zn (p = 0,038). Estos resultados se resumen en la tabla (pág. 23).

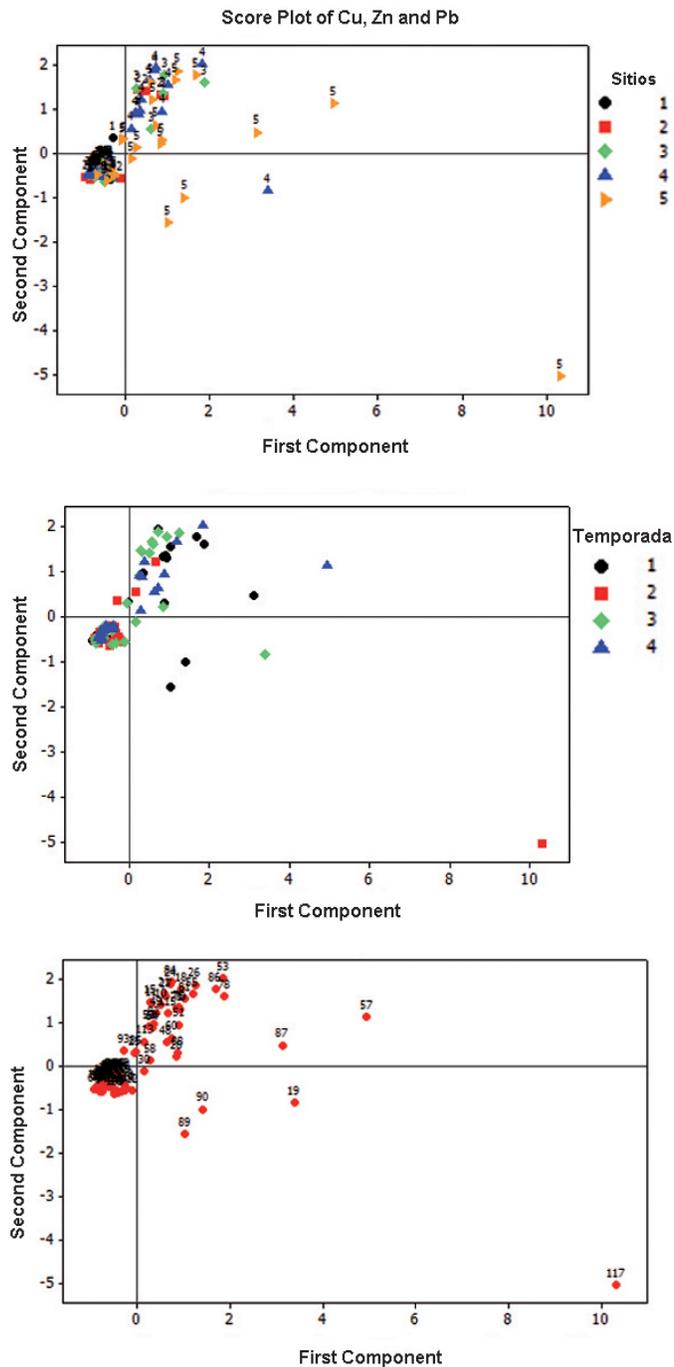


Figura 4. Análisis de componentes principales (ACP) de tres metales pesados.
Figure 4. Principal components analysis (PCA) of three heavy metals.

Tabla. Concentraciones significativas de cuatro metales pesados.
Table. Significant concentrations of four heavy metals.

Uso de suelo*	Cu*		Zn*, **		Pb*		Cd*	
	(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)	
	Prom.	±E.E.	Prom.	±E.E.	Prom.	±E.E.	Prom.	±E.E.
Agropecuario	17,78	6,66	51,39	25,66	37,24	90,60	3,85	6,66
Residencial rural	31,18	6,66	95,13	25,66	33,98	90,60	3,17	6,66
Comercio y servicios	41,57	6,66	97,09	25,66	43,46	93,57	4,30	6,66
Residencial urbano	54,08	6,66	185,67	25,66	41,20	93,57	9,84	6,66
Minero	145,34	6,66	200,18	25,66	348,50	90,60	33,00	6,66
Estación**								
Verano 2009			156,93	19,88				
Otoño 2009			85,14	19,88				
Primavera 2010			135,61	20,66				

* Efecto significativo del uso del suelo. ** Efecto significativo de la estación.

* Significant effect of land use. ** Significant effect of season.

Las concentraciones de Cu fueron mayores en la zona minera con $145,34 \pm 19,43$ mg kg⁻¹ y la menor concentración en el uso residencial rural con $17,78 \pm 19,43$ mg kg⁻¹. El Zn presentó su mayor concentración en la zona minera con $200,18 \pm 25,6$ mg kg⁻¹ y la menor proporción en el uso agropecuario con $51,40 \pm 25,6$ mg kg⁻¹. Asimismo, en la estación de verano 2009 obtuvo la mayor concentración con $156,93$ mg kg⁻¹ y la más baja en otoño 2009 con $85,12$ mg kg⁻¹.

En cuanto al Pb la zona minera incidió en una concentración de $348,49 \pm 90,6$ mg kg⁻¹ y la menor cantidad en la zona residencial rural con $33,98 \pm 90,6$ mg kg⁻¹. Respecto del Cd, el suelo sometido a la actividad minera presentó la mayor concentración con $33,0 \pm 6,66$ mg kg⁻¹ y en la zona residencial rural se registró el valor menor $3,17 \pm 6,66$ mg kg⁻¹.

En relación con el ACP se determinaron tres componentes (PC1, PC2 y PC3) siendo el PC1 y PC2 los que explicaron el 84% de la variabilidad de los datos. El PC1 mostró correlaciones positivas entre Cu (0,611), Zn (0,424), Pb (0,413) y Cd (0,526). El PC2 presentó correlaciones negativas con respecto al Cu (-0,050) y Pb (-0,784), así como positivas respecto del Zn (0,585) y Cd (0,203). En la figura 5 (pág. 24) se presenta la variabilidad de las observaciones determinadas en el PC1 y PC2.

Se muestra un grupo principal de suelos cercanos al eje de intercepción de ambos componentes. A lo largo de CP1 se observan tres muestras alejadas del eje de intercepción entre CP1 y CP2 de las cuales destaca la muestra 87 que presentó los valores más altos de Cu ($532,04$ mg kg⁻¹), Zn ($345,11$ mg kg⁻¹), Pb ($3.581,40$ mg kg⁻¹) y Cd ($80,42$ mg kg⁻¹). Estos datos pertenecieron al sitio cinco y a la temporada de otoño 2009. A lo largo del CP2 se observan las muestras de suelo 57 con las concentraciones de Cu ($142,65$ mg kg⁻¹), Zn ($431,92$ mg kg⁻¹), Pb ($86,77$ mg kg⁻¹) y Cd ($20,64$ mg kg⁻¹), estas pertenecientes al uso de suelo minero y a la estación de verano 2009. Por otra parte, se distribuyó la muestra 27 con las mayores concentraciones de Cu ($598,38$ mg kg⁻¹), Zn ($411,36$ mg kg⁻¹), Pb ($97,72$ mg kg⁻¹) y Cd ($248,56$ mg kg⁻¹). Estos valores pertenecen al uso de suelo minero y la estación de primavera 2010.

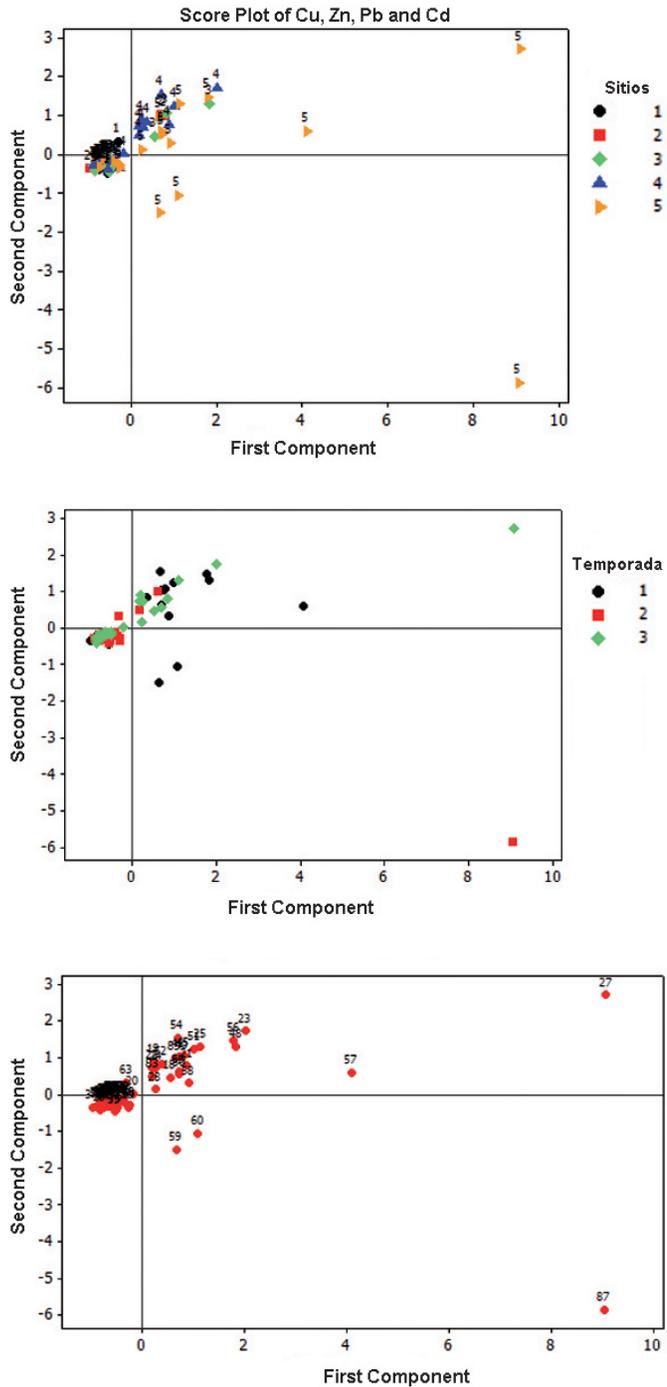


Figura 5. Análisis de componentes principales (ACP) de cuatro metales pesados.
Figure 5. Principal components analysis (PCA) of four heavy metals.

DISCUSIÓN

Los resultados indican que las prácticas dominantes de uso del suelo y, en algunos casos, la estación o temporada del año inciden en las concentraciones Cu, Zn, Pb y Cd. De estos, son de suma importancia el Pb y Cd debido a que se encuentran regulados por la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (17). El Cd registró una diferencia de $29,8 \text{ mg kg}^{-1}$ entre el uso de suelo minero y el residencial rural que evidenciaron el nivel más alto y más bajo, respectivamente. La NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (17) establece que los niveles máximos permisibles de Cd en suelo agrícola, urbano y comercial son de 37 mg kg^{-1} y para uso industrial de 450 mg kg^{-1} . El contenido de Cd en suelo oscila de $0,01$ a 3 mg kg^{-1} (19).

Por otra parte, USEPA (28) refiere que la cantidad de Cd en suelo es usualmente menor a 1 mg kg^{-1} . Otras fuentes indican que el contenido total en suelo debiera estar entre $0,01$ y $3,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (19). Esto significa que tanto los valores medios de $33,0 \text{ mg kg}^{-1}$ en el suelo con uso minero como el valor máximo y el nivel más bajo obtenido de $3,17 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd en la zona residencial rural, se encuentran por encima de este límite. Dentro de la zona minera se están llevando a cabo obras de regeneración urbana e implicaría tomar medidas si se considera el desarrollo de actividades agrícolas, residencial urbano y comercial en los que la norma refiere límites menores.

Para ATSDR (3), la presencia de Cd en el ambiente puede ser atribuida a revestimientos de pintura, uso de fungicidas, pigmentos, aceite de motor viejo y fabricación de acero. Otras fuentes que originan su presencia son derivadas de la actividad minera, industrial y desechos domésticos.

Respecto del Pb fue evidente una distancia de $243,82 \text{ mg kg}^{-1}$ con respecto a las concentraciones obtenidas en el uso de suelo minero y la zona residencial rural. La NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (17) establece que los niveles máximos permisibles de Pb en suelo para actividades agrícolas, urbanas y comerciales, es de 400 mg kg^{-1} y para uso industrial de 800 mg kg^{-1} . Esto significa que se encuentra por debajo de estos rangos. Sin embargo, al referir a la USEPA (28), las concentraciones de Pb en suelos naturales pueden presentarse en 10 mg kg^{-1} y la concentración total de Pb oscilaría de 3 a 189 mg kg^{-1} y la concentración fitotóxica en suelo estaría dada de 100 a 400 mg kg^{-1} (19). Por lo tanto, las concentraciones encontradas de este metal están en este rango y puede considerarse como niveles altos que en algún momento podrían afectar las especies vegetales que se encuentran distribuidas en esta zona.

Por otra parte, USEPA (28) considera que el Pb en orillas de carreteras estaría presente hasta por 2.400 mg kg^{-1} . Alcalá *et al.* (1), en usos de suelo donde se había desarrollado actividad minera, encontraron niveles de $1.714,70 \text{ mg kg}^{-1}$, recomendando la necesidad de usar técnicas de remediación. La presencia de este metal en el ambiente es atribuida a residuos de pinturas, baterías, soldaduras, vidrio, pigmentos, pesticidas, entre otros. Este metal una vez establecido en el suelo se adhiere fuertemente a las partículas y permanece sobre la capa superior. El esparcimiento de sus partículas a través de la atmósfera recorre grandes distancias si las partículas de plomo son muy pequeñas (5).

En cuanto a las concentraciones encontradas de Cu permitieron observar una distancia de $108,52 \text{ mg kg}^{-1}$ del uso de suelo minero y el uso de suelo agropecuario. Las concentraciones de Cu en suelo oscilan de 2 a 100 mg kg^{-1} y su presencia se le atribuye a la contaminación por el uso de fertilizantes en la agricultura, pesticidas, residuos agrícolas o municipales y emisiones industriales (19, 28). Para ATSDR (4) se considera que la presencia de este metal en el suelo sería de 50 mg kg^{-1} , y su presencia también puede atribuirse a láminas de metal, cañerías, compuestos agrícolas, vegetación en descomposición, quema de biomasa (incendios forestales), fundiciones y actividad minera. De acuerdo con esta referencia, se considera que los niveles encontrados estuvieron altos.

Las observaciones en cuanto a las concentraciones de Zn indican una diferencia de $156,56 \text{ mg kg}^{-1}$ entre el uso de suelo minero y agropecuario. Derivado de esta tendencia alta, en la zona agropecuaria, la colindancia con áreas de extracción de material rocoso y el paso del transporte pesado con el acarreo de material puede considerarse como incidente en los resultados. En cuanto al efecto estacional, el verano 2009 así como el invierno 2010 presentaron la misma cantidad promedio de $156,94 \text{ mg kg}^{-1}$ en las concentraciones de Zn. A pesar de ello, hubo una diferencia de $71,8 \text{ mg kg}^{-1}$ con respecto a estas dos estaciones y la de otoño 2009 que fue la que promedió la menor concentración. Para Ramos *et al.* (23) la variación estacional de Zn es incidente en el contenido y la solubilidad. Según la USEPA (28) los niveles de Zn en suelo oscilan de 10 a 300 mg kg^{-1} , usualmente de 30 a 150 mg kg^{-1} y su presencia puede ser atribuida a residuos de pintura, aleaciones, cosméticos, copiadoras de papel, vidrio, entre otras (19).

En otro marco comparativo, Martí *et al.* (13) indican que para la Legislación Argentina los niveles de Cu, Zn, Pb y Cd para un uso de suelo agrícola estaría en el orden de 150, 600, 375 y 3 mg kg^{-1} respectivamente. En cuanto al uso de suelo residencial esta legislación establece para estos elementos niveles de 100, 500, 500 y 5 mg kg^{-1} . Asimismo, para un uso de suelo industrial niveles de 500, 1500, 1000 y 20 mg kg^{-1} respectivamente. Por lo tanto, los niveles medios de Cd en el estudio rebasaron la normativa referida para los usos de suelo agrícola y residencial.

En general, la actividad minera en la región y la dinámica de desarrollo urbano se muestran incidentes en el impacto de las concentraciones de los metales pesados en suelo, esto considerando el primero de los análisis en el cual la relación de concentración media fue $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu}$ y para el segundo $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$. Las correlaciones positivas y significativas entre los elementos pueden derivar de la emisión de partículas y residuos que pueden incorporarse a través del tiempo y el espacio en el suelo e impactar en su concentración. La influencia de la actividad industrial y minera en la zona puede ser un factor determinante. Esto es apoyado por Martí *et al.* (13) quienes indican que una alta concentración de población, sumada a equipamientos, infraestructura y actividades varias contribuirían a la acumulación de metales, destacándose la contaminación difusa provocada por el tránsito vehicular y la contaminación puntual debida la producción de residuos sólidos urbanos.

Con los dos análisis de componentes principales el PC1 y PC2 pudieron explicar 86,4% de la variación de los datos con respecto a Cu, Zn y Pb y el 84% al asociar Cu, Zn, Pb y Cd respectivamente. En los dos casos, el Cu, Zn y Pb, así como el uso de suelo minero y las estaciones de verano 2009, otoño 2009, primavera 2010 se asociaron a la variabilidad de los datos. Hay estudios que indican que la concentración media y asociación de estos elementos puede estar dada por la cercanía de los puntos de muestreo a las fuentes de contaminación minera, así como por la capacidad de dispersarse por el viento o depositarse en el suelo (15, 24). La concentración de estos metales en estos usos de suelo no sólo puede deberse a la dinámica de estos sitios, también puede obedecer a la contaminación derivada por el transporte vehicular y el arrastre de material (12).

Monroy *et al.* (14), al observar concentraciones promedio de 200 mg kg⁻¹ de Cu, 450 mg kg⁻¹ de Pb y 270 mg kg⁻¹ de Zn en suelos de una comunidad minera de San Luis Potosí, concluyen que el transporte eólico y pluvial es reconocido como factor de dispersión de estos metales. Para ESA (8), los cambios en el uso de suelo impactan en los regímenes naturales y generan nuevos disturbios en la abundancia de especies, composición de las comunidades y funcionalidad del ecosistema. Esto implica que al considerarse una prioridad la caracterización de áreas contaminadas del suelo en los municipios de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, los resultados de este estudio en cuanto a la concentración de Cu, Zn, Pb y Cd reflejan la incidencia del poder indicativo del suelo en el cual se desarrollan estas especies vegetales como parte del soporte ecológico de esta zona.

Consecuentemente, las políticas de uso de suelo deben estar basadas en el entendimiento a los cambios del ecosistema, contribuyendo a una mejor planificación y toma de decisiones bajo una perspectiva sustentable (8). Alcalá *et al.* (1) consideran que en la dinámica de los usos de suelo es necesario poner mayor atención a las áreas verdes y corredores ecológicos que puedan contribuir al mejoramiento de la calidad ambiental, considerando que la calidad del suelo es parte importante de su funcionalidad.

CONCLUSIONES

Las prácticas dominantes de uso del suelo, principalmente el minero y residencial urbano, tienen incidencia en la presencia de Cu, Zn, Pb y Cd dentro del corredor ecológico de Soledad de Graciano Sánchez-San Luis Potosí. Con el Zn, el factor estacional contribuyó a su presencia en los sitios evaluados, considerando que su incidencia tiene efectos en la concentración y solubilidad, teniendo el mismo resultado de las concentraciones en verano e invierno. La mayor cantidad de metales pesados se produce en el uso de suelo minero y los menores en la actividad agropecuaria. Los niveles de los metales se encuentran en el rango marcado como alto por el EPA y por otras fuentes técnicas. El Cd y Pb no superan la NOM-147-SEMARNAT-SSA1.

Estos resultados reflejan el potencial indicativo del suelo en la evaluación de la calidad ambiental; sin embargo, se requiere continuar con un monitoreo de metales pesados en la zona y la posible inclusión de otros elementos de estudio para un mejor resultado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alcalá, J.; Sosa, M.; Moreno, M.; Rodríguez, J. C.; Quintana, C.; Terrazas, C.; Rivero, O. 2009. Metales pesados en suelo urbano como indicador de la calidad ambiental. *Revista Multequina*. 18:54-67
2. Anderson, J. R.; Hardy, E. E.; Roach, J. T.; Witmer, R. E. 2001. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. Geological Survey Professional Paper 964. United State Government Printing Office. 41 pp.
3. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 1995. Resumen de Salud Pública. Cadmio (Cadmium) CAS # 7440-43-9. División de Toxicología. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades. Estados Unidos.
4. ATSDR. 2004. Resumen de Salud Pública. Cobre CAS#: 7440-50-8. División de Toxicología. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades. Estados Unidos.
5. ATSDR. 2007. Resumen de Salud Pública. Plomo CAS#:7439-92-1. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Estados Unidos.
6. Bautista, A. C.; Etchevers, J. B.; Del Castillo, R. F.; Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2): 90-97.
7. Carpena, R. O.; Bernal, M. P. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas* 16(2): 1-3.
8. ESA. 2000. Ecological Principles for Managing Land Use. The Ecological Society of American's Committee of Land Use. April. 12 p.
9. Fergusson, J. 1990. The heavy elements. Chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press. Oxford. p. 175-182.
10. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Anuario Estadístico de San Luis Potosí 2009. www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sisnav/
11. INEGI. 2009. Guía para la interpretación de cartografía, uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie III. INEGI. 74 p.
12. López, S. C.; Perelman, P. E.; Rivara, M.; Castro, M. A.; Faggi, A. 2006. Características del suelo y concentraciones de metales a lo largo de un gradiente de urbanización en Buenos Aires, Argentina. *Multequina* 15: 69-80.
13. Martí, L.; Filippini, M. F.; Salcedo, C.; Drovandi, A.; Troilo, S.; Valdés, A. 2011. Evaluación de metales pesados en suelos de los oasis irrigados de la Provincia de Mendoza: I. Concentraciones totales de Zn, Pb, Cd y Cu. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*. 43(2): 203-221.
14. Monroy, M. G., Díaz-Barriga, F.; Razo, I.; Carrizales, L. 2002. Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cd y Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P. *Nota Informativa*. 7 p.
15. Montenegro, G.; Fredes, C.; Mejías, E.; Bonomelli, C.; Olivares, L. 2009. Contenidos de metales pesados en suelos cercanos a un relave cuprífero Chileno. *Agrociencia* 43: 427-435.
16. Murray, K. S., Rogers, D. T.; Kaufman, M. M. 2004. Heavy Metals in an Urban Watershed in Southeastern Michigan. *J. Environ. Qual.* 33:163-172.
17. NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos.
18. Ortiz, B. I.; Sanz, J. G.; Dorado, M. V.; Villar, S. F. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica. Universidad de Alcalá. Dirección General de Universidades e Investigación. España.
19. Pais, I.; Benton, J. J. 1997. *The Handbook Trace Elements*. St. Lucie Press. 222 p.
20. Plan del Centro de Población Estratégico San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. 2003. Proyecto de Actualización. H. Ayuntamiento de San Luis Potosí. 171 p.
21. Plan Municipal de Desarrollo 2007-2009. H. Ayuntamiento. Soledad de Graciano Sánchez. COPLADEM. 110 p.
22. Plan Municipal de Desarrollo 2009-2012. San Luis Potosí. H. Ayuntamiento San Luis Potosí. 101 p.
23. Ramos, A.; Cabrera, M. C.; Astigarraga, L.; Saadoun, A. 2007. Variaciones estacionales del contenido de Ca, P, Mg, S, Fe, Zn y Cu de Alfalfa, Trébol rojo y Lotus y de su bioaccesibilidad por un método rápido *in vitro*. APPA-ALFA. Cusco, Perú. Sitio Argentino en Producción Animal. 1-6 p. En: http://www.produccion-animal.com.ar/suplementacion_mineral/88-Ramos-bioaccesibilidad.pdf
24. Rivera, H.; Chira, J.; Zambrano, K.; Petersen, P. 2007. Dispersión secundaria de los metales pesados en sedimentos de los ríos Chillón, Rímac y Lurín Departamento de Lima. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol.* 10:20:19-25. UNMSM.

25. Rodríguez, V. M. 2005. Indicadores ambientales para el uso de suelo [en línea]. Cuba. www.gama.gov.co
26. Sbarato, D.; Sbarato, V. M.; Ortega; J. E. 2007. Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmósfera. C. I. S. A. Centro de Investigación y Formación en Salud Ambiental. Colección Salud Ambiental. Encuentro Grupo Editor. Argentina. 153 p.
27. SGM. 2008. Panorama Minero de San Luis Potosí. Servicio Geológico Mexicano Secretaría de Economía. Gobierno Federal.
28. USEPA. 1992. Guide to Site and Soil description of hazardous waste site characterization. Volume 1. Metals. 288 p.
29. Varian. 1989. Analytical Methods. Flame Atomic Absorption Spectrometry. Australia. 146 p.
30. Volke, S. T.; Velasco, J. A. T.; De la Rosa, P. D. A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. 144 p.

Agradecimiento

Al Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP/103.5/10/5456).