

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN UN SUELO URBANO INDUSTRIAL Y EN LA VEGETACIÓN DEL SITIO

* Abelardo González Aragón¹
Margarita Beltrán Villavicencio¹
Ilse Ayala Quiroz¹
Mabel Vaca Mier¹
Alethia Vázquez Morillas¹

HEAVY METALS POLLUTION OF URBAN-INDUSTRIAL
SOIL AND ITS VEGETATION

Recibido el 19 de agosto de 2011; Aceptado el 10 de abril de 2012

Abstract

Pollution of soil by heavy metals is established by comparison against the defined value in the local regulations. In Mexico the NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 defines the concentration criteria for As, Ba, Be, Cd, Cr VI, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl and V that must be achieved in order to consider that a contaminated soil has been remediated.

The goals of this project were: 1) to evaluate the metals distribution and pollution level; and 2) the metals assimilation in the tissue of plants, of an urban-industrial site located north of Mexico City that had been exposed to pollution by heavy metals for more than five decades, as a result of uncontrolled process leaks; the infiltration had reached up to 15 m depth. Due to the site background, it was assumed that Ni, As and Cu were present in soil. Heavy metals were measured in both, the soil in site and the vegetation of the surrounding area.

Soil samples taken between 3.2 and 5.0 m depth showed a Ni content up to 2010 ppm, while As was 4580 ppm and Cu was up to 29222 ppm. Heavy metals were also found in the leaves of trees of the surrounding area, confirming metals assimilation through their roots. Metal concentration in plant tissue (reported as ppm metal per biomass dry weight) was found up to 60 ppm Ni, 472 ppm Cu and 85.4 ppm As. These values are higher than the average metal concentration found for plants.

Key words: heavy metals, sampling, soils, vegetation.

¹Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana

*Autor correspondiente: Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana. Av. San Pablo 180, Col. ReynosaTamaulipas, Azcapotzalco, D.F. C.P. 02200, México. Email: mbv@correo.azc.uam.mx

Resumen

Para determinar la contaminación de un suelo por metales pesados es necesario comparar las concentraciones de metales existentes con los límites establecidos por la norma que rige en cada país. En México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por As, Ba, Be, Cd, Cr hexavalente, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y/o V.

El objetivo de este proyecto fue evidenciar el grado y la distribución de la contaminación de un suelo con metales pesados, así como su asimilación en el tejido vegetal de las plantas en los alrededores del sitio. La zona de estudio es urbano-industrial, en el norte de la Ciudad de México, y fue expuesta a contaminación de metales pesados por más de cinco décadas, debido a un escurrimiento mal controlado en un proceso, que fue infiltrándose hasta llegar a profundidades de 15 m. Por antecedentes se presume la existencia de metales como Ni, As y Cu, para tal efecto se caracterizó el suelo, se determinaron las concentraciones de los metales pesados en diferentes perfiles del suelo y se evaluaron las concentraciones en la vegetación circundante.

En el suelo de estudio se observaron concentraciones de hasta 2010 ppm de Ni, 4580 ppm de As y 29222 ppm de Cu en profundidades entre 3.2 y 5 m. Se encontraron concentraciones de metales pesados en las hojas de los árboles del sitio, confirmando así la asimilación de estos vía raíz, con concentraciones de hasta 60 ppm de Ni en tejido vegetal seco, de 472 ppm de Cu y de 85.4 ppm de As, concentraciones que en todos los casos exceden los valores promedio "normales" para especies vegetales.

Palabras clave: especies vegetales, metales pesados, muestreo, suelo.

Introducción

Es importante considerar la contaminación del suelo por metales pesados debido a que la infiltración de los contaminantes puede dirigirse hacia el acuífero y contaminar el agua, así como por los posibles daños que pueden ocasionar a la vegetación del lugar y por que la toxicidad de algunos de ellos puede causar efectos nocivos a la salud. Los suelos contaminados se han visto en incremento en las áreas urbanas en comparación con las rurales, incluso en áreas alejadas a fuentes de contaminación puede existir la probabilidad de ingesta diaria de metales pesados en exceso en niños (Ljung *et al.*, 2006).

A nivel mundial, México ocupa el tercer lugar en producción de Ag, el quinto en producción de Pb y el noveno en Au. En cuanto al Cu mundialmente ocupa el lugar número once, con una producción de 352.3 mil toneladas en el año 2005, y es uno de los principales productores de As con cerca del 20% de la producción mundial (INEGI, 2005). Estas cifras dejan ver que se tiene una alta producción de metales que, debido a prácticas muy antiguas que implican poca o nula consideración de los efectos ambientales adversos, generaron depósitos contaminantes en agua, suelo e incluso el subsuelo y mantos subterráneos. Normalmente los metales no se presentan solos en la naturaleza, por lo tanto durante el proceso de extracción y hasta el beneficio de los minerales, se generan residuos con altas concentraciones de diversos metales pesados.

El Cu no se encuentra normado en México, ya que no es considerado tóxico en suelos, sólo en su forma de polvos y neblinas se tiene el registro de efectos adversos a la salud (ATSDR, 2002),

aun así, existen en otros países reportes de concentraciones de hasta 3700 ppm en suelos contaminados con este metal en industrias metalúrgicas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). El Ni y el As presentan alta toxicidad. El Ni causa irritación en la piel para personas sensibles; por inhalación produce bronquitis crónica y cáncer de pulmón y de los senos nasales. Por ingestión en grandes cantidades o en forma crónica es teratogénico (ATSDR, 2003). Se tienen registros de suelos altamente contaminados por industrias metalúrgicas en intervalos de 206 ppm hasta 26,000 ppm de Ni y desde 38 ppm hasta 2470 ppm de As (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). La toxicidad del As es compleja pues depende de la vía de exposición, el As es un agente teratogénico, mutagénico y carcinogénico. Las principales vías de entrada de As al organismo son el tracto gastrointestinal y el respiratorio. Los compuestos arsenicales tienden a acumularse principalmente en hígado, riñón, pulmón y bazo (Albert, 1997).

En especies vegetales, el As se considera suficiente o normal a concentraciones de 0.5 ppm, excesivo o tóxico de 5 a 10 ppm; para el Cu se considera deficiente en intervalos de 2.0 a 5.0 ppm, suficiente o normal de 5.0 a 30 ppm, y excesivo de 20 a 100 ppm; y para el Ni de 0.1 a 5.0 ppm normal, y excesivo de 10 a 100 ppm (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). A la captación de metales contaminantes por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas se le denomina fitoacumulación o fitoextracción. Los mejores candidatos para la fitoextracción son el Ni, Zn y Cu porque son los preferidos de 400 plantas, que se sabe que absorben cantidades extraordinarias de metales (EPA-b, 1996). El helecho *Pteris vitatta*, es el primer hiperacumulador natural de As identificado (Xie *et al.*, 2009). Las plantas muestran diferentes respuestas morfo-fisiológicas a la contaminación del suelo por metales, algunas presentan sensibilidad a bajas concentraciones, otras desarrollan tolerancia y un número reducido muestra hiperacumulación, éstas últimas deben presentar características como crecimiento rápido, alta generación de biomasa y adaptabilidad, un sistema extendido de raíces, tolerancia a altas concentraciones de metales en el tejido y un alto factor de traslocación (Vamerli *et al.*, 2010).

Metodología

Se llevó a cabo el muestreo y la caracterización del suelo, muestreo de la vegetación, determinación de la concentración de metales pesados en el suelo y en el tejido vegetal y la identificación de las especies vegetales.

Muestreo

Fue de tipo exploratorio y en dirección vertical. Se excavaron 5 pozos de una profundidad de 5 m, para valorar la migración vertical de los contaminantes, se utilizó una perforadora hidráulica Modelo SCRC 25 de muestreo con tubo shelby de 1.75 pulgadas y auger externo de 6 pulgadas, para muestreo ambiental inalterado (Figura 1). Las muestras se tomaron por triplicado, en estratos de 0 a 1.50, de 1.50 a 3.20 y de 3.20 a 5.00 metros de profundidad y se colocaron en

liners porta muestra de PET silanizado, se sellaron con tapas de polietileno de sello preciso y se les colocó su número de identificación (Figura 2).

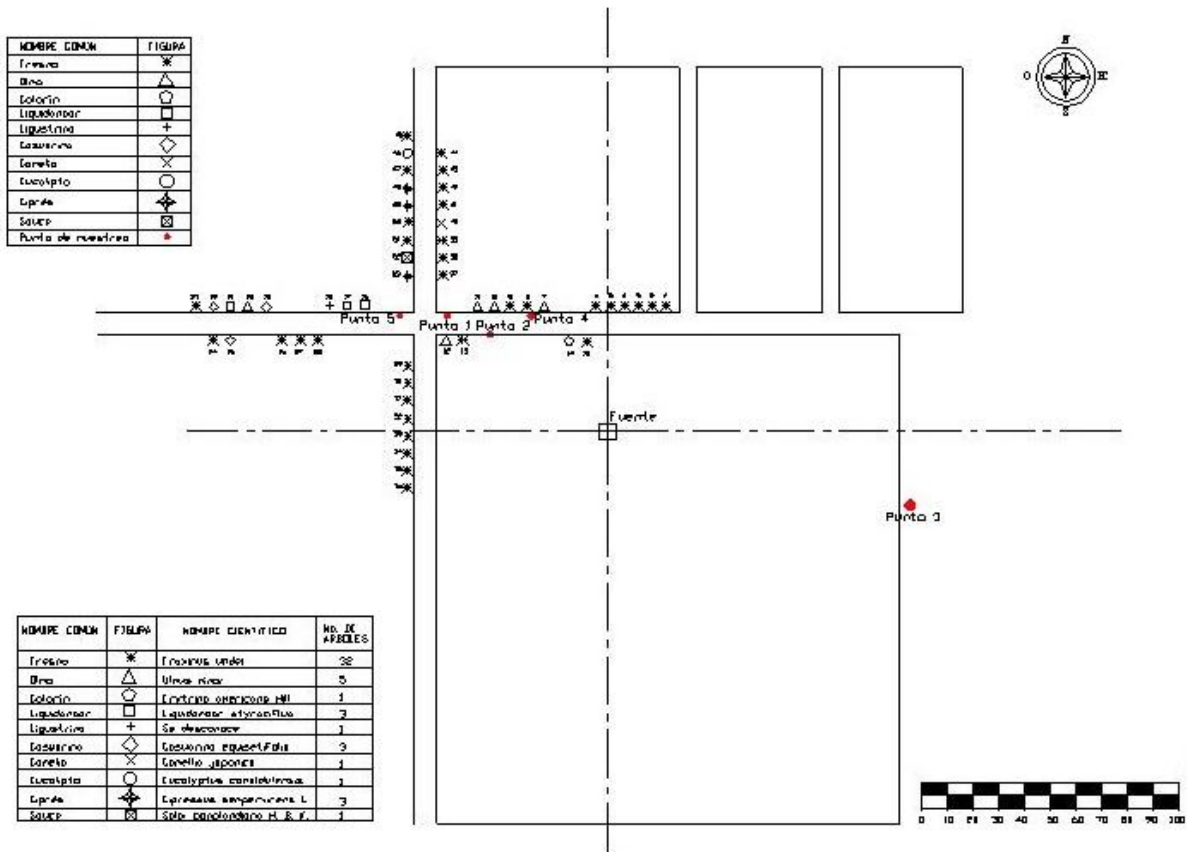


Figura 1. Ubicación de los cinco pozos perforados y localización de los árboles muestreados



Figura 2. Detalles del trabajo de campo: perforadora hidráulica y muestras

Caracterización del suelo

Se llevó a cabo mediante la medición de los siguientes parámetros (analizados por triplicado): clase textural, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total, fósforo total, potasio, espacio poroso, densidad real y aparente. Se determinaron las concentraciones de Ni, As y Cu para cada estrato (de 0 a 1.5, de 1.5 a 3.2 y de 3.2 a 5 metros).

Determinación de metales pesados en las especies vegetales

En el sitio se muestrearon 52 árboles y 1 arbusto, cuatro especies constituyen el 80% de la variedad total de individuos, lo que se considera una diversidad biológica baja. El olmo (*Ulmus minor*), el sauce (*Salix bonplandiana H.B.K.*) y el fresno (*Fraxinus uhdei*) se encuentran dentro de los primeros 4, también se encontraron especies de colorín (*Erythrina americana Mill*), ciprés (*Cupressus sempervirens L.*) y casuarinas (*Casuarina equisetifolia*). Se muestrearon los tallos y las hojas de los árboles que se encontraban en el perímetro más cercano al foco de contaminación y, por ende, más contaminado. No se tuvo acceso a las raíces debido a la capa asfáltica (Figura 3).

Tanto para el suelo y el tejido vegetal se realizó la digestión ácida de las muestras mediante el método US-EPA 3051 (EPA, 1994), en un horno de microondas marca Mars 5, con una presión de 300 psi y 100 % de potencia. Después se determinaron las concentraciones de metales pesados en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian modelo Espectra AA-200 mediante los siguientes métodos EPA: el 7520 para el Ni, el 7061 para el As y el 7210 para el Cu (EPA-a, 1996).

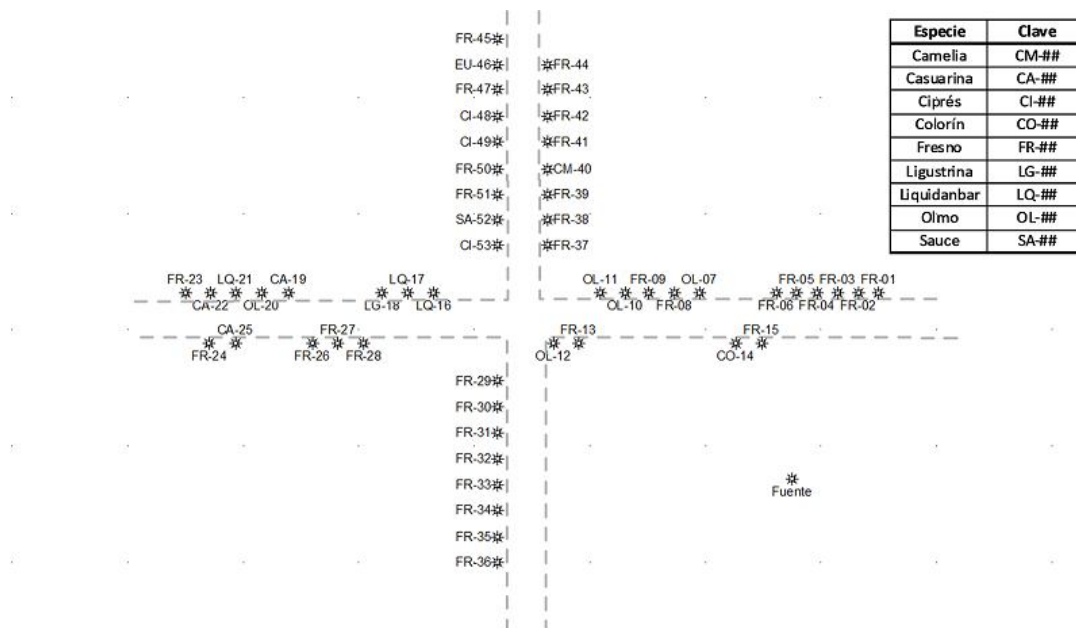


Figura 3. Localización de las especies de árboles en la zona de estudio

Resultados

Caracterización de suelo

Las muestras de suelo presentaron una textura compuesta de 33% arcilla, 13% limo y 55% arena en general, en los diferentes estratos muestreados, lo que lo ubica en la clase textural de suelo franco-arcillo-arenoso. El suelo del sitio efectivamente está constituido por diversos materiales, desde arcillosos-blandos, con regiones areno-arcillosas y areno-limosas, palustres (pantanosas). Presenta 39 ± 3.9 ppm de fósforo, 87 ± 13 ppm de potasio y 180 ± 0.35 ppm de nitrógeno en promedio. Lo que demuestra altos contenidos de fósforo y potasio, que significan un depósito de nutrientes en el suelo disponible para las plantas. El contenido de nitrógeno es bajo. La capacidad de intercambio catiónico fue de 18.43 ± 0.5 meq Na/100 g suelo.

En la Tabla 1 se muestra el espacio poroso, la materia orgánica y la humedad del suelo, para los diferentes estratos y los 5 puntos muestreados. Se observa que el suelo tiene un porcentaje alto de espacio poroso probablemente debido al alto contenido de humedad. El contenido de materia orgánica en el suelo es medianamente rico en los perfiles más altos disminuyendo con la profundidad a niveles bajos.

Tabla 1. Espacio poroso, materia orgánica y humedad en los puntos de muestreo

Determinación	Profundidad, m	Pozo				
		1	2	3	4	5
Espacio poroso, %	---	71.78 ± 0.71	78.14 ± 1.0	79.67 ± 0.54	78.87 ± 0.73	74.08 ± 0.57
	0-1.5	1.03 ± 0.03	2.77 ± 0.5	2.30 ± 0.4	1.46 ± 0.07	1.74 ± 0.2
Materia orgánica, %	1.5-3.2	1.59 ± 0.2	1.59 ± 0.1	1.1 ± 0.08	0.8 ± 0.03	0.7 ± 0.1
	3.2-5	0.47 ± 0.09	0.45 ± 0.09	0.7 ± 0.1	0.41 ± 0.03	0.38 ± 0.05
Humedad, %	0-1.5	32.0 ± 2.81	42.1 ± 4.1	38.1 ± 0.46	36.4 ± 1.9	37.8 ± 3.2
	1.5-3.2	39.6 ± 1.76	46.7 ± 2.8	53.0 ± 0.78	48.2 ± 1.34	48.9 ± 4.5
	3.2-5	67.1 ± 0.58	49.1 ± 4.6	51.9 ± 0.7	72.2 ± 1.56	45.1 ± 3.9

En la Tabla 2 se muestran los valores de pH medidos en el suelo a diferentes profundidades. En el pozo 2 se registran los valores más bajos, que van de 3.5 a 4.4, lo que indica un suelo extremadamente ácido y de condiciones desfavorables para las especies vegetales, este punto es el que se encuentra más cercano al foco de contaminación. La mayoría de los pozos presenta un descenso en el pH con respecto a la profundidad, por lo que se supone que la contaminación aumenta con la profundidad. El pozo 3, el más alejado del foco de contaminación, registra valores de pH de neutros a básicos, lo que indica que la contaminación por metales no ha llegado hasta ese punto.

Tabla 2. pH del suelo a diferentes profundidades

Profundidad	pH				
	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5
0 - 1.5 m	8.06 ± 0.69	3.98 ± 0.18	7.19 ± 0.30	7.99 ± 0.29	7.66 ± 0.58
1.5 - 3.2 m	7.49 ± 1.25	4.35 ± 0.25	7.2 ± 0.10	6.56 ± 0.36	7.12 ± 0.37
3.2 - 5 m	5.52 ± 0.99	3.59 ± 0.07	9.07 ± 0.78	3.6 ± 10.07	4.92 ± 0.72

Concentración de metales pesados en el suelo y especies vegetales

Las concentraciones de Cu, Ni y As encontradas en los cinco puntos de muestreo en las diferentes profundidades a 0-1.5, 1.5-3.2 y 3.2-5 metros, así como en las especies vegetales se presentan en esta sección.

La Figura 4 muestra que la concentración de Cu en el foco de contaminación disminuye respecto a la profundidad. Mientras que la concentración de este metal aumenta con la profundidad en los puntos de muestreo 2 y 4 (que son los más cercanos al foco de contaminación); y en el punto 1 la mayor concentración se ubicó en el estrato intermedio; en los puntos 3 y 5 (los más alejados del foco de contaminación) ésta disminuye a mayor profundidad. Los valores de este metal alcanzan los 29222 mg/kg de suelo seco (ppm) a una profundidad de 3.2 m en el estrato intermedio del pozo de muestreo 1.

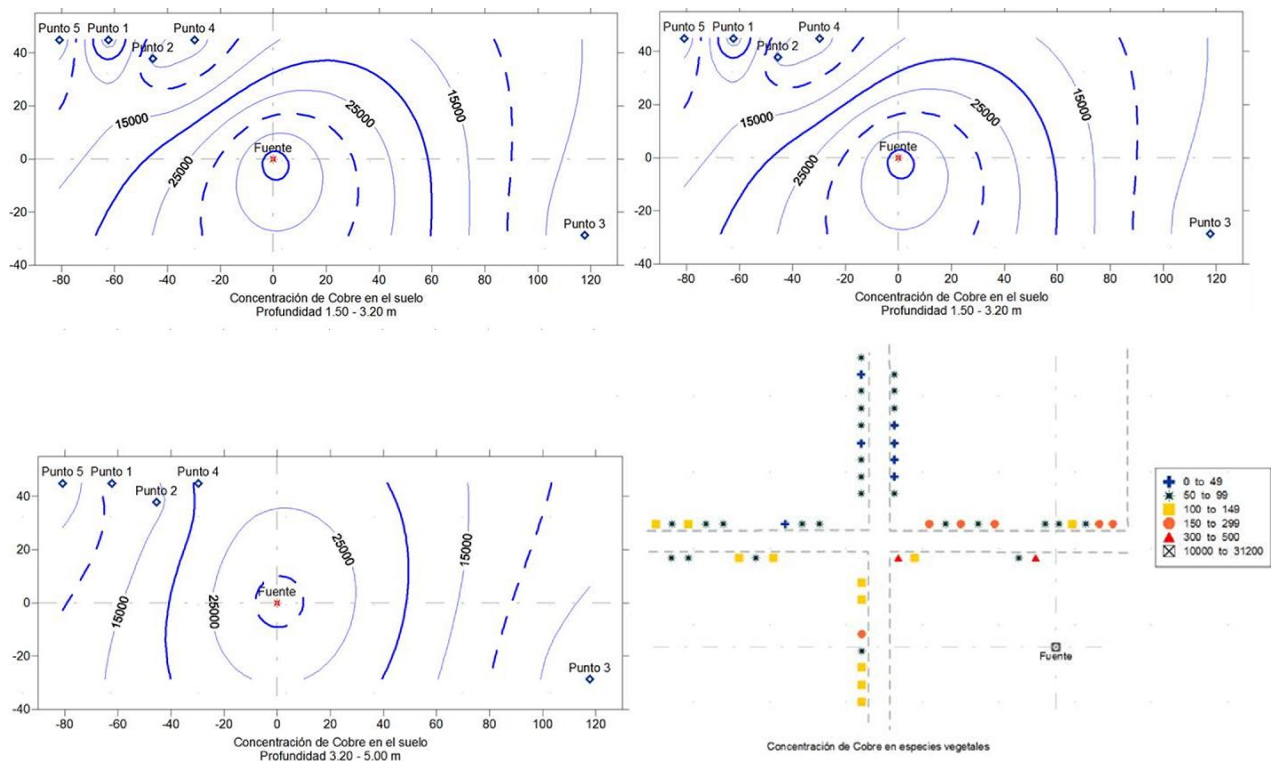


Figura 4. Comportamiento del Cu en el suelo y especies vegetales

El contenido de Cu encontrado en el tejido nuevo (hojas) de las especies vegetales del área circundante al foco de contaminación fue superior a 100 mg/kg de biomasa en base seca en la mayoría de los individuos localizados en un radio menor a 80 m de distancia del foco de contaminación. Mientras que los árboles más alejados presentaron concentraciones de 66 mg/kg en promedio (Figura 4). Según Kabata-Pendias y Pendias (1992), cantidades de Cu superiores a 20 mg/kg en plantas se consideran excesivas y tóxicas, en todos los casos analizados este valor se sobrepasó.

Con respecto al Ni, en la Figura 5 se observa que su distribución es más uniforme en los tres estratos analizados, y no se encontraron diferencias importantes en las concentraciones reportadas para las tres profundidades. Así mismo, se nota un aumento de la concentración con la profundidad en los sitios 2, 4 y 5; mientras que en el sitio 1, la mayor concentración de Ni fue observada en el estrato intermedio, y en el sitio 3 (el más alejado al foco de contaminación) la concentración disminuyó con la profundidad. Se tienen concentraciones que van de 45.3 ppm en el estrato más profundo del pozo de muestreo 3 hasta 2010.7 ppm en la mayor profundidad del pozo 4, sin embargo estas concentraciones no exceden los límites máximos de referencia de la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSAI-2004 para suelos de uso industrial (DOF, 2007).

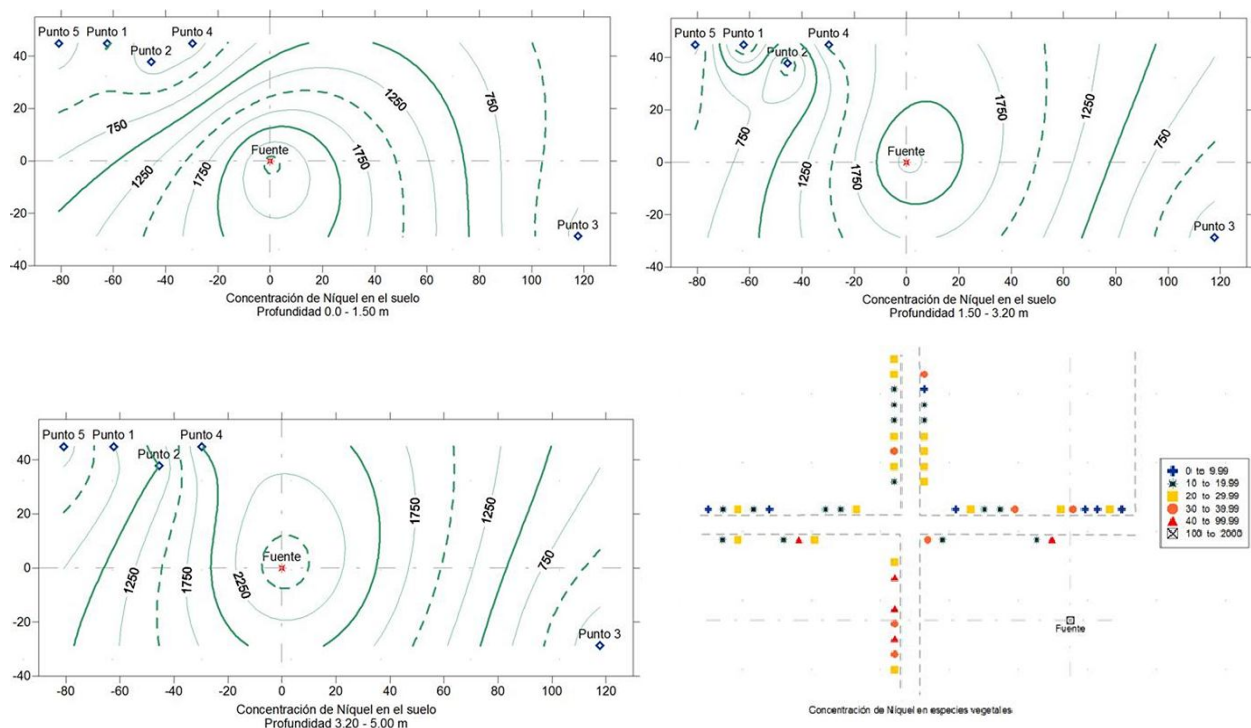


Figura 5. Comportamiento del Ni en el suelo y especies vegetales

Las concentraciones de Ni encontradas en tejido nuevo de los árboles muestreados no presentan un patrón definido respecto a la distancia, siendo el intervalo de 20 a 30 mg/kg el más frecuente (Figura 5). Se ha reportado que cantidades de Ni por encima de 10 mg/kg en plantas se consideran concentraciones excesivas y tóxicas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992), y aun cuando se detectaron algunos casos en donde este valor no se excedió, en promedio la concentración de Ni en las hojas fue más alta. El As excede los límites máximos de referencia de la norma vigente en cuatro de los pozos de muestreo a diversas profundidades ya que se tienen concentraciones de hasta 4579.9 ppm en el estrato superficial del sitio 2. El sitio 3 no presenta problemas de As (Figura 6). No se encontró As en el 30% de los individuos analizados. Del 70% restante, se encontró un promedio de 34 mg/kg de biomasa seca, que es excesivo y tóxico (As > 5 mg/kg, [Kabata-Pendias y Pendias, 1992]).

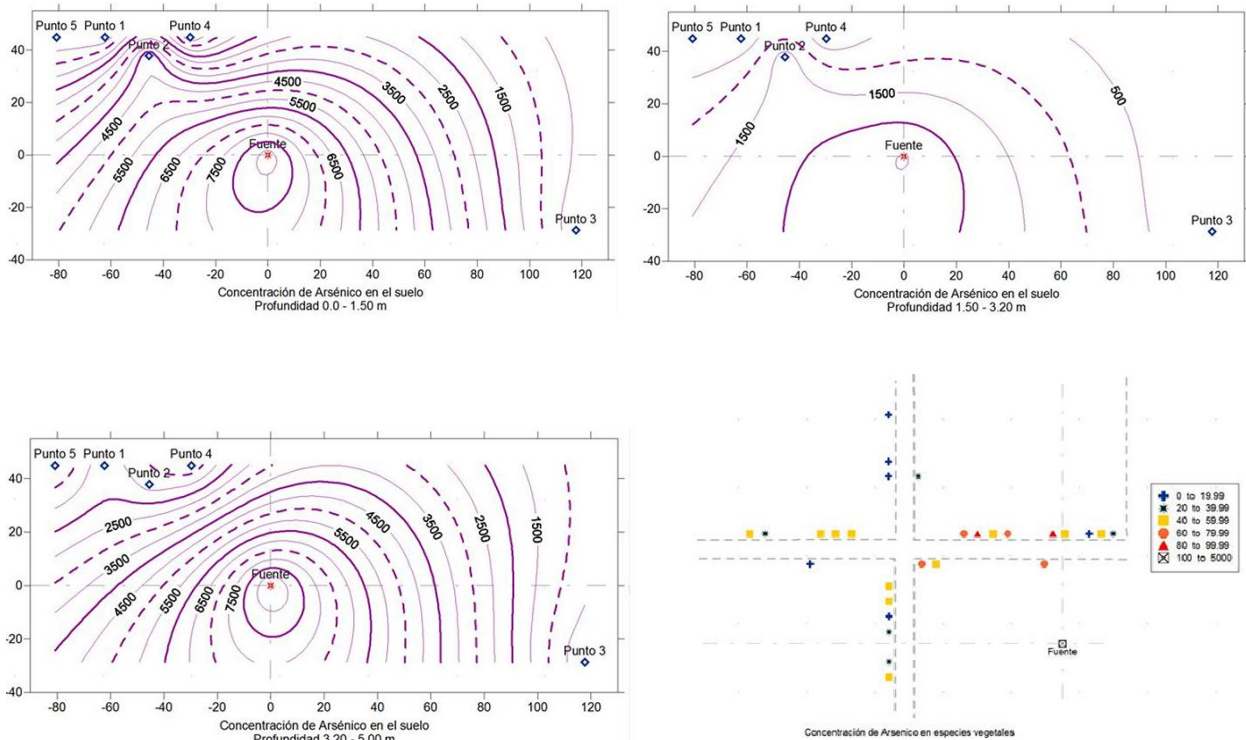


Figura 6. Comportamiento del As en el suelo y especies vegetales

Conclusiones

Se confirmó la existencia de Cu, As y Ni en el suelo urbano-industrial circundante al foco de contaminación. En general, se observó que la concentración de estos incrementa en los perfiles más profundos (5 m). Se determinó la existencia de concentraciones desde 17 hasta 29222 ppm

de Cu, 45 a 2010 ppm de Ni y 3 a 4580 ppm de As en base seca en perfiles que van de 0 a 1.5 m, 1,5 a 3.2 y 3.2 a 5m.

El As excedió los límites establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelos industriales sólo en algunos casos. El Ni no sobrepasó los límites permisibles en dicha norma para suelos industriales. El Cu no está reportado en la norma mexicana, sin embargo presentó cantidades excedidas a los valores promedio de suelos no contaminados.

Se confirmó que los contaminantes analizados se encontraron en el tejido nuevo de la mayoría de los árboles muestreados. Se registraron concentraciones de Cu que van de 14 a 472 ppm, de 5 a 60 ppm de Ni y de 0 a 85.4 ppm de As. Las concentraciones de metales pesados en el tejido vegetal en todos los casos excedieron las concentraciones "normales" y se encontraron presentes en cantidades fitotóxicas.

Se recomienda perforar pozos más profundos para valorar el alcance real de la contaminación en los perfiles del suelo. La contaminación por metales pesados en el sitio es suficiente para empezar a considerar la realización de algún tipo de restauración de acuerdo a la normatividad mexicana.

Referencias bibliográficas

- Albert, A.L. (1997) *Introducción a la Toxicología Ambiental*, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. México.
- ASTDR (2002) Agency for Toxic Substances and Disease Registry. ToxFAQs. *Cobre*. Cas # 7440-50-8. Septiembre.
- ASTDR (2003) Agency for Toxic Substances and Disease Registry. ToxFAQs. *Níquel*. Cas # 7440-02-0. Septiembre.
- DOF (2007) Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, viernes 2 de marzo.
- EPA (1994) US-Environmental Protection Agency, Método 3015 SW.846 Update II, Microwave-assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.
- EPA-a (1996) US-Environmental Protection Agency Cu, As, Ni (Atomic Absorption, Direct Aspiration), Métodos: 7210, 7061, 7520, respectivamente. Septiembre.
- EPA-b (1996) US-Environmental Protection Agency, Guía del Ciudadano: Medidas fitocorrectivas. Organismo para la Protección del Medio Ambiente (E.U.A). Desechos Sólidos y Respuesta en Situaciones de Emergencia (5102G). EPA 542-F-96-025 Septiembre.
- INEGI (2005) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Volumen de la Producción de los Principales Productos Minero Metalúrgicos, 1990 a 2005.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1992) *Trace Elements in Soils and Plants*, 2nd Edition, CRC Press.
- Ljung, K., Selinus, O., Otabbong, E., Berglund, M. (2006) *Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by children*, Applied Geochemistry, **21**(9), Sep.
- Vameralli, T., Bandiera, M., Mosca, G. (2010), *Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review*. Environ Chem Lett, 8:1-17 DOI 10.1007/s10311-009-0268-0.
- Xie, Q.E., Yan, X.L. Liao, X.Y., Li, X. (2009), *The Arsenic Hyperaccumulator Fern Pteris vittata L.*, Environ. Sci. Technol., **43**(22), pp 8488-8495.