

Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en *Prosopis laevigata* en depósitos mineros

Exploratory study of lead and copper accumulation in *Prosopis laevigata* in mine tailings

Víctor Manuel Duarte-Zaragoza¹ ,
Victoria Sabrina Pérez-Hernández² ,
Elizabeth Hernández-Acosta^{2*} ,
Antonio Villanueva-Morales² 

¹Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México. Paraje San Isidro s/n, Barrio de Tecamachalco, CP. 56400, La Paz, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo Carretera México-Texcoco km 38.5, CP. 56230. Chapingo, Estado de México.

*Autor de correspondencia: ehernandez@chapingo.mx

Nota científica

Recibido: 27 de mayo de 2019

Aceptado: 20 de junio de 2020

Como citar: Duarte-Zaragoza VM, Pérez-Hernández VS, Hernández-Acosta E, Villanueva-Morales A (2020) Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en *Prosopis laevigata* en depósitos mineros. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 7(2): e2311. DOI: 10.19136/era.a7n2.2311

RESUMEN. Se realizó un estudio exploratorio para ubicar el potencial de *P. laevigata* en la acumulación de Pb y Cu en pequeñas islas de vegetación establecidas sobre depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, México. Se efectuó un muestreo superficial de residuos mineros en tres depósitos, donde además se colectaron muestras de follaje de *P. laevigata*. En laboratorio, se realizó la caracterización física y química de residuos mineros y se evaluó la concentración extractable de Pb y Cu. En el follaje de *P. laevigata* se determinó la concentración total de Pb y Cu y se calculó el Factor de bioacumulación. En el depósito San Juan se registró la concentración más alta de Pb y Cu en residuos y hojas de *P. laevigata*; la cual bioacumula Pb y Cu y se desarrolla en condiciones de contaminación extrema por lo que se sugiere su uso en programas de revegetación de sitios contaminados.

Palabras clave: Contaminación, metales, minería, plantas, toxicidad.

ABSTRACT. An exploratory study was conducted to locate the potential of *P. laevigata* in the accumulation of lead (Pb) and copper (Cu) in small vegetation islands established on mining reservoirs in Zimapán, Hidalgo, Mexico. Mining residues were sampled in three reservoirs and within *P. laevigata* foliage. In laboratory, the physical and chemical characterization was carried out in mineral residues and was evaluated the extractable concentration of Pb and Cu. In *P. laevigata* foliage, the total concentration of Pb and Cu was determined, and the bioaccumulation factor was calculated. At the reservoir of San Juan, the highest concentration of Pb and Cu was found in residues and leaves of *P. laevigata*, which bio-accumulates Pb and Cu and flourishes under extreme contamination conditions, therefore its use is suggested for revegetation programs in contaminated sites.

Key words: Pollution, metals, mining, plants, toxicity.

INTRODUCCIÓN

La minería, es una actividad que provee materia prima para la producción de artículos utilizados en la vida diaria; pero a pesar de las normas y leyes que regulan la emisión de contaminantes derivados de la minería, aún existen decenas de depósitos de residuos sin el manejo adecuado para minimizar los daños ambientales que ocasiona (Méndez-Ramírez y Armienta 2012). Después de una explotación minera, los sitios quedan afectados al alojar residuos, porque tienen ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, bajo contenido de nutrientes, retención de agua y presencia de compuestos tóxicos como el cadmio, plomo y zinc (Puga *et al.* 2006). En los depósitos mineros establecidos en zonas áridas con alta precipitación, el escurrimiento superficial del drenaje ácido y la dispersión de partículas por el viento son factores de riesgo ambiental y de salud pública (Hernández-Acosta *et al.* 2009, Gavilán-García *et al.* 2020).

Para solucionar dichos problemas, en los últimos años se investiga el uso de plantas tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, como *Acacia farnesiana*, *Acacia macracantha*, *Acacia visco*, *Buddleja coriacea*, *Eucalyptus globulus*, *Myoporum laetum*, *Polylepis racemosa*, *P. laevigata* y *Schinus molle*; especies que responden de forma eficiente a la fitoestabilización de sitios contaminados con metales pesados (Landeros-Márquez *et al.* 2011, Blaz y Rodríguez 2015, Paredes 2015). En lo referente a *P. laevigata*, es un árbol que crece en los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, en pequeñas islas de vegetación, en donde juega un papel ecológico importante, porque evita la dispersión de partículas y la liberación de altas concentraciones de metales pesados (Gómez-Bernal *et al.* 2010). Por lo anterior el objetivo del presente trabajo fue realizar un estudio exploratorio para ubicar el potencial de *P. laevigata* en la acumulación de Pb y Cu, en pequeñas islas de vegetación de los depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio.

La zona de estudio se ubica en el municipio de Zimapán, Hidalgo, México a 144 kilómetros de la ciudad de Pachuca, entre los 900 y 2 900 m de altitud; entre los paralelos 20° 39' y 20° 58' de LN y los meridianos 99° 11' y 99° 33' de LO. Con una superficie de 870.93 km², limita al norte con Pacula y Jacala de Ledezma, al este con Jacala de Ledezma, Nicolás Flores e Ixmiquilpan, al sur con Tasquillo, Ixmiquilpan y Tecozautla y al oeste con Tecozautla y el estado de Querétaro. La temperatura media anual es de 19 °C, con precipitación pluvial media de 400 mm. El clima templado semiárido con lluvias en verano favorece el crecimiento de nopaleras, arbustos bajos, matorral alto, maguey, órganos, cardones, biznagas, huizaches, hortigas y mezquites.

Muestreo de los depósitos mineros y plantas

El muestreo de residuos mineros se realizó el mes de septiembre de 2018 conforme a la NMX-AA-132-SCFI-2006 (SEMARNAT 2006), de forma superficial, en tres islas de vegetación ubicadas sobre tres depósitos mineros. 1) Depósito Santa María I se colectaron 14 submuestras, se ubica a 20° 44' LN y 99° 24' LO, con 40 años en el lugar y superficie de 21 048 ha; 2) Depósito Santa María II se obtuvieron 16 submuestras, se ubica a 20° 44' LN y 99° 23' LO, tiene 30 años en el sitio y un área de 33 584 ha, y 3) Depósito San Juan donde se colectaron 12 submuestras, se localiza a 20° 43' LN y 99° 23' LO, con 60 años en el lugar y una superficie de 10 464 ha. Cubriendo un área aproximada de 20 m² en cada sitio, las muestras se colectaron de manera aleatoria a profundidad de 30 cm con una pala de mano de acero inoxidable tomando aproximadamente 1 kg de residuos. De las muestras obtenidas en cada depósito minero se preparó una muestra compuesta para su análisis (Figura 1).

Las islas de vegetación encontradas sobre los depósitos mineros, además de *P. laevigata*, contienen arbustos de huizache (*Vachellia farnesiana*) y herbáceas como *Gnaphalium canescens*, *Adenophyllum cancellatum*, *Bidens pilosa*, *Brickellia subuligera*, *Ca-*

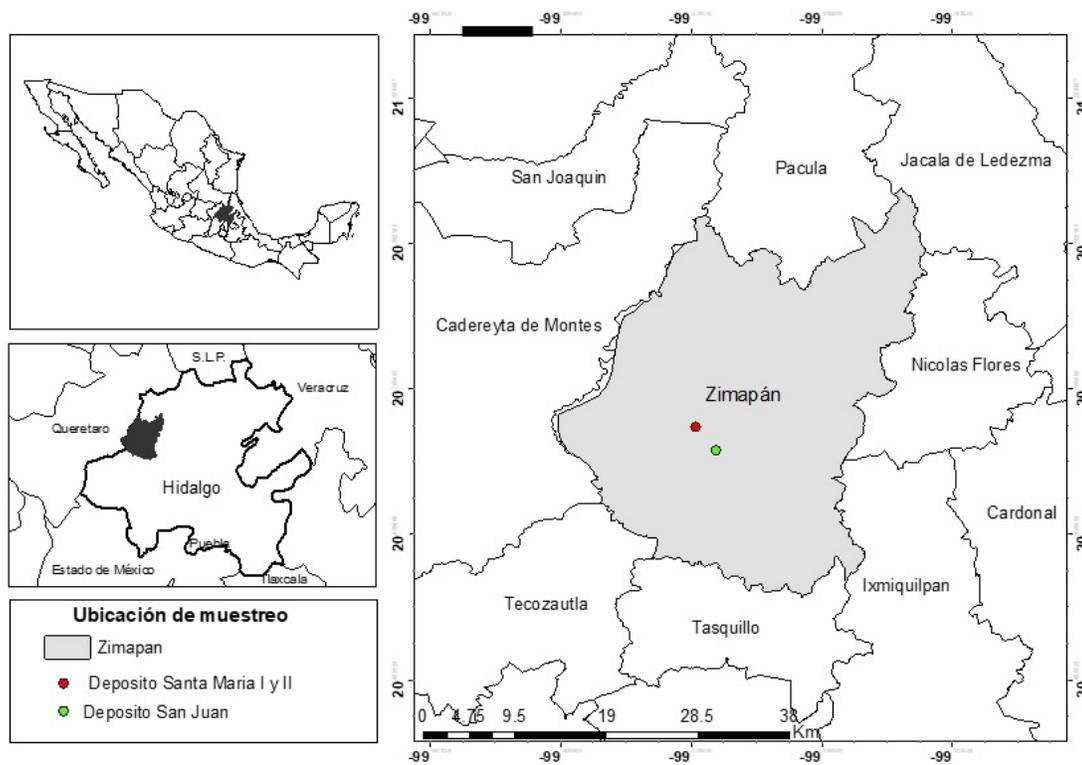


Figura 1. Localización de los depósitos de mina estudiados.

lyptocarpus vialis Less, *Gnaphalium* sp., *Perymenium* sp. y *Sanvitalia procumbens* Lam. Pero en esta prospección se decidió analizar *P. laevigata* con individuos de al menos 10 o más años. En cada sitio se colectaron muestras de follaje de tres ejemplares adultos de *P. laevigata* de aproximadamente 2.50 m de altura cada uno, que se trasladó al laboratorio en bolsas de papel para su análisis.

Preparación de las muestras y análisis de laboratorio

Los residuos mineros se secaron en la sombra, para luego tamizarlos con una malla de 10 mm de apertura; mientras que el material vegetal se secó en una estufa a 85°C por 7 h, para después molerlo y tamizarlo en una malla de acero inoxidable con apertura de 500 μ m. Los análisis de los residuos de las minas y del material vegetal se realizaron por triplicado.

La caracterización física y química de los residuos de las minas se determinó por medio de

los procedimientos establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-RECNAT-2000 (SEMARNAT 2000), determinando el color del suelo con la Tabla Munsell; la textura por el método de Bouyucos; la capacidad de intercambio catiónico por el método acetato de amonio 1N a pH 7.0; el porcentaje de materia orgánica por el método de Walkley y Black; pH por potenciometría (relación suelo:agua 1:2); conductividad eléctrica (CE) con un conductivimetría y fósforo asimilable con el método Bray 1 en una relación solución:suelo (1:8). La extracción de Pb y Cu en los residuos mineros se realizó con DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético) 0.005 M relación solución:suelo (1:4) (Berrow y Mitchell 1980); mientras que las muestras vegetales se destruyeron a partir de una digestión ácida, con la mezcla HNO₃:HClO₄:H₂O₂ (4:1:1). La concentración extractable de plomo y cobre en los depósitos mineros y muestras vegetales se cuantificó con el espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) GBC, modelo SAVANTAA SIGMA. La curva de calibración se realizó con estándares Perkin Elmer certificadas y

se revisó cada 10 muestras.

Factor de bioconcentración (FBC) en las muestras vegetales

El FBC utilizado para determinar la eficiencia de la planta como acumuladora de metales pesados provenientes del suelo o residuo en el que se establecen, se calculó de la siguiente manera:

$$FBC = \frac{CMt}{CMs}$$

Donde: CMt representa la concentración de metal determinada en el follaje de *P. laevigata*; y CMs la concentración biodisponible de metal en el suelo (Covarrubias y Peña 2017).

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron con el paquete estadístico SAS v 9.4, por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) y estadísticas descriptivas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas y químicas de los residuos de mina

Los sitios presentaron diferentes características, el sitio Santa María I tuvo una textura franco-arenosa, de coloración gris-rojizo, pH 7.04, CE de 2.59 dSm⁻¹, contenido de MO de 1.19%, CIC de 6.8 Cmol (+) kg⁻¹ y 3.39 mg kg⁻¹ de P. El sitio Santa María II tuvo una textura arenosa, color gris-claro, pH de 6.91, CE de 2.33 dSm⁻¹, contenido de MO de 0.99%, CIC de 3.33 Cmol (+) kg⁻¹ y 12.53 mg kg⁻¹ de P. Mientras que en el sitio San Juan, tuvo una textura franco-arenosa, color naranja, pH de 2.16, CE de 13.71 dSm⁻¹, contenido de MO de 0.99%, CIC de 9.1 Cmol (+) kg⁻¹ y 382.33 mg kg⁻¹ de P (Tabla 1). Los resultados muestran que los sitios mineros abandonados de Zimapán representan una fuente importante de contaminación de Pb y Cu. Al respecto, Duarte et al. (2015) mencionan que dichos metales afectan el suelo, los cuerpos de agua superficiales y la salud pública en las zonas aledañas a los depósitos. Las partículas arenosas prevalecieron en los tres

depósitos mineros, lo cual favorece la erosión eólica y el arrastre hídrico, así como una alta permeabilidad y los procesos de oxidación; lo que coincide con lo reportado por Amezcua-Ávila et al. (2020) en jales de mina de Pachuca, Hidalgo.

Los colores moteados que presentaron los depósitos mineros (grises-claro, gris-rojizo y naranja) se atribuyen a su composición mineral, de igual forma los cambios de color de gris claro a amarillo-rojizo corresponde a la oxidación de minerales piríticos como la pirita o arsenopirita (Moreno et al. 2009, Pérez-Martínez y Romero 2015). Los residuos grises suelen presentar condiciones de pH neutro y también llegan a mostrar elevada CE, situación que cambia con la oxidación, originando que disminuya el pH y se incremente la CE (Duarte et al. 2019); lo que se observó en los tres depósitos mineros. El porcentaje de materia orgánica se encontró en valores muy bajos, como lo reportó para estos depósitos mineros (Duarte et al. 2015), lo anterior se debe a la escasa de vegetación establecida lo que ocasiona bajos o nulos aportes de materia orgánica (Bautista et al. 2016).

Contenido de plomo y cobre en los depósitos mineros

En la Tabla 2, se presenta la concentración de Pb y Cu de las muestras de los depósitos mineros. En Santa María I se registró un promedio de 18.40 mg kg⁻¹ de Pb, en Santa María II un valor de 20.11 mg kg⁻¹ de Pb y en San Juan fue de 4.85 mg kg⁻¹ de Pb. Mientras que la concentración promedio del Cu fue de 11.84 mg kg⁻¹ en Santa María I, de 3.94 mg kg⁻¹ de Cu en Santa María II y de 30.42 mg kg⁻¹ en San Juan. En el sitio San Juan, el Pb presentó mayor variabilidad entre las muestras analizadas, con coeficiente de variación (CV) de 0.68, mientras que en los otros dos sitios el CV fue de 0.08 y 0.15, respectivamente. El análisis de varianza con $\alpha = 0.05$ mostró que la concentración de Pb registró diferencias significativas entre los depósitos mineros ($p < 0.001$). El depósito Santa María II tuvo la mayor concentración (23.56 mg kg⁻¹), mientras que los sitios Santa María I y San Juan tuvieron valores de 20.12 y 8.9 mg kg⁻¹, respectivamente. Para el Cu, el depósito que presentó mayor concentración fue San Juan (32.86

Tabla 1. Características físicas y químicas de residuos de mina.

Parámetro	Unidades	Sitio		
		Santa María I	Santa María II	San Juan
pH		7.04 ± 0.16	6.91 ± 0.84	2.160 ± 0
CE	dS m ⁻¹	2.59 ± 0.29	2.33 ± 0.06	13.71 ± 0.17
MO	%	1.19 ± 0.14	0.91 ± 0.06	0.91 ± 0.62
P	mg kg ⁻¹	3.39 ± 1.72	12.53 ± 2.62	382.36 ± 36.83
CIC	Cmol (+) kg ⁻¹ de suelo	6.80 ± 1.12	3.33 ± 0.85	9.10 ± 1.85
Arena	%	76.06	96.26	57.76
Limo	%	20.9	1.1	38.3
Arcilla	%	3.04	2.64	3.94
Color (Munsell)		Hue 5 YR 5/1	Hue 5PB 7/1	Hue 5YR 7/6

Tabla 2. Parámetros estadísticos de la concentración de Pb y Cu en residuos mineros (n = 3).

Parámetro	Sitio			Sitio		
	Santa María I	Santa María II	San Juan	Santa María I	Santa María II	San Juan
	Cu (mg kg ⁻¹)			Pb (mg kg ⁻¹)		
Mínimo	9.26	2.99	27.31	17.41	17.85	1.06
Máximo	13.75	4.86	32.86	20.12	23.56	8.9
Media	11.84	3.94	30.42	18.40	20.11	4.85
Desvest	2.32	0.94	2.83	1.50	3.04	1.93
C.V.*	0.20	0.24	0.09	0.08	0.15	0.68

*Coeficiente de variación.

mg kg⁻¹), seguidos por los depósitos Santa María I (13.75 mg kg⁻¹) y Santa María II (4.86 mg kg⁻¹). Sobre el contenido de Cu del depósito San Juan se debe poner atención, debido a que este contenido se encuentra cercano a los 50 y 63 mg kg⁻¹ considerados como riesgo ecológico en los Estados Unidos y Canadá (Gutiérrez *et al.* 2007).

Concentración de plomo y cobre en el material vegetal

Las concentraciones de plomo en hojas de *P. laevigata* en los tres depósitos mineros mostraron valores promedios de 69.48 mg kg⁻¹ para Santa María I, de 77.75 mg kg⁻¹ para Santa María II, y de 93.05 mg kg⁻¹ para San Juan. Mientras que las concentraciones de cobre en hojas de *P. laevigata* en los tres depósitos registraron un promedio de 18.90 mg kg⁻¹ en Santa María I; de 24.93 mg kg⁻¹ en Santa María II, y de 52.46 mg kg⁻¹ en San Juan. Presentando el depósito San Juan la mayor concentración. La disponibilidad de metales aumenta en pH bajos, lo cual hace que las concentraciones biodisponibles se incrementen y con esto, la posibilidad de que las plantas absorban mayor concentración de metales que en sitios con pH neutro y alcalino (Kabata y Pendías 2001). Como lo observado, debido a que

las mayores concentraciones de Pb y Cu en hojas se registró en el sitio San Juan que tuvo un pH ácido, lo cual concuerda con Blaz y Rodríguez (2015) quienes también encontraron la concentración más elevada en hojas de *Acacia macracantha* en residuos de mina con pH ácidos.

Factor de Bioconcentración (FBC)

Para ubicar especies de plantas fitoestabilizadoras de metales pesados en sitios contaminados, el FBC para Pb y Cu en *P. laevigata* tuvo valores de 3.78 en Santa María I, 3.87 en Santa María II y 36.60 en San Juan para el plomo; de 1.60 en Santa María I, 6.32 en Santa María II y 1.72 en San Juan para el cobre. El FBC de *P. laevigata* la cataloga como especie acumuladora en cobre e hiperacumuladora en plomo, lo que coincide con Covarrubias y Peña (2017) quienes señalan que las especies acumuladoras tienen un FBC ≤ 1 y las hiperacumuladoras ≥ 1. Estos resultados también coinciden con lo reportado por Buendía *et al.* (2010) quienes catalogan a *P. laevigata* como una especie apta para la bioconcentración de metales pesados. Mientras que Covarrubias y Peña (2017) y Buendía *et al.* (2010) señalan que *P. laevigata* es especie acumuladora de Pb y Cu. *P. laevigata* establecida en las islas de vegetación

sobre depósitos mineros de Zimapán, Hidalgo, es capaz de bioacumular Pb y Cu en su follaje, además de desarrollarse en condiciones de contaminación, lo que la posibilita como candidata en programas de revegetación de sitios contaminados.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma Chapingo, por el financiamiento de la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Amezcu-Ávila AV, Hernández-Acosta E, Díaz VP (2020) Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 7: 79-81. ISSN 2334-2501.
- Bautista GEJ, Hernández AE, Cristóbal AD, Quintero LR, Díaz VP, Robledo SE (2016) Extracción de metales pesados por *Lolium perenne* en residuos de mina. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 3: 1-16.
- Berrow M, Mitchell R (1980) Location of trace elements in soil profiles: total and extractable contents on individual horizons. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 71: 103-121.
- Blaz AMJ, Rodríguez EM (2015) Efecto del plomo en el crecimiento de plántulas de *Acacia macracantha* humb. & bonpl. ex willd. "espino" en condiciones de laboratorio. *SAGASTEGUIANA* 3: 87-104.
- Buendía GL, Orozco VJ, Cruz SF, Barrera DCE, Vernon CEJ (2010) *Prosopis laevigata* a potential chromium (VI) and cadmium (II) hyperaccumulator desert plant. *Bioresource Technology* 101: 5862-5867.
- Covarrubias SA, Peña CJJ (2017) Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista internacional de Contaminación Ambiental (Especial Biotecnología e Ingeniería Ambiental)* 33: 7-21.
- Duarte VM, Gutiérrez EV, Gutiérrez MC, Rogelio Carrillo GR, Ortiz CA, Trinidad SA (2015) Heavy metals contamination in soils around tailing heaps with various degrees of weathering in Zimapán, Mexico. *International Journal of Environmental Studies* 72: 24-40.
- Duarte VM, Carrillo VR, Lozano ML, Carrasco HV (2019) Fractionation of Heavy Metals in Mine Tailings Amended with Composted Manure. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 28: 148-161.
- Gavilán-García I, Ladino L, Franco E, Juárez J (2020) Determinación de factores involucrados en la valoración del riesgo potencial asociado a la dispersión atmosférica de jales mineros y a su ingestión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 36: 127-138.
- Gómez-Bernal JM, Santana-Carillo J, Romero-Martín F, Armienta-Hernández MA, Morton-Bermea O, Ruiz-Huerta EA (2010) Plantas de sitios contaminados con desechos mineros en Taxco, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 87: 131-133.
- Gutiérrez RM, Romero FM, González HG (2007) Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24: 170-184.
- Hernández-Acosta E, Mondragón RE, Cristóbal AD, Rubiños PJE, Robledo SE (2009) Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 109-114.
- Kabata PA, Pendias H (2001) Trace elements in soil and plants. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 413p.

- Landeros-Márquez O, Tejo-Calzada R, Reveles-Hernández M, Valdez-Cepeda RD, Arreola-Ávila JG, Pedroza-Sandoval A, Ruíz-Torres J (2011) Uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Willd.) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente (Edición Especial) 42: 11-20.
- Méndez-Ramírez M, Armenta HMA (2012) Distribution of Fe, Zn, Pb, Cu, Cd and As from mining wastes and wastewater along a transect of Taxco river in Guerrero, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 29: 450-462.
- Moreno TR, Barbanson L, Coreño AO (2009) Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. Minería y Geología 25: 1-31.
- Paredes MJ (2015) Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. Revista ECIPerú 11: 42-46
- Pérez-Martínez I, Romero FM (2015) Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 67: 1-12.
- Puga S, Sosa M, De la Mora A, Pinedo C, Jiménez J (2006) Concentraciones de As y Zn en vegetación nativa cercana a una presa de jales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 22: 75-82.
- SEMARNAT (2000) NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. SEMARNAT. México. 85p.
- SEMARNAT (2006) NMX-AA-132-SCFI-2006 Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación. SEMARNAT. México. 29p.