

Potentially toxic minerals in environmental liabilities in Noria de Ángeles, Zacatecas

Minerales potencialmente tóxicos en pasivos ambientales de Noria de Ángeles, Zacatecas

Carolina Cerón-Rivera¹; Juan F. Martínez-Montoya^{1*}; Genaro Olmos-Oropeza¹; Jorge Palacio-Núñez¹; Guillermo Espinosa-Reyes²

¹Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Postgrado en Innovación en Manejo de Recursos Naturales. Iturbide 73. C. P. 78622. Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México.

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación Aplicada en Ambiente y Salud (CIAAS), Facultad de Medicina. Av. Sierra Leona núm. 550, col. Lomas 2.ª sección. C. P. 78210. San Luis Potosí, México.

*Corresponding author: fmontoya@colpos.mx, tel.: +52 (496) 963 0240

Abstract

Introduction: Sites polluted by mining activity represent a risk to human health.

Objective: To determine the concentration of toxic minerals (Hg, Pb, Cd and As) in two environmental liabilities (ELs) in Noria de Ángeles, Zacatecas.

Materials and methods: Soil samples from two ELs and a reference site were taken based on NMX-AA-132-SCFI-2006; in addition, a spring and waterbodies adjacent to or on the ELs were sampled, in accordance with NOM-230-SSA1-2002. Toxic elements in soil and water were analyzed in accordance with NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 and NOM-127-SSA1-1994, respectively. The concentrations of elements in the soil were subjected to an analysis of variance and Tukey's range test ($P < 0.05$).

Results and discussion: The Hg concentration was higher ($P < 0.05$) in the ELs than in the reference site, but it did not exceed the maximum permissible limits (MPL) established by the standards. The Cd and As in the soil of the ELs and reference site exceeded the MPL, and the Pb only in the ELs. It is deduced that the As has a mainly geological origin, since its content in the reference site was higher than the recent EL. In the waterbodies, the Pb, Hg, Cd and As concentrations were much higher than the MPL.

Conclusion: The Pb, Cd and As in the ELs, and the Pb, Cd, Hg and As in the waterbodies pose a risk to the health of the residents of Noria de Ángeles, Zacatecas.

Keywords: Cadmium; mercury; lead; arsenic; polluting elements; mining activity.

Resumen

Introducción: Los sitios contaminados a causa de la actividad minera representan un riesgo para la salud humana.

Objetivo: Determinar la concentración de minerales tóxicos (Hg, Pb, Cd y As) en dos pasivos ambientales (PA) en Noria de Ángeles, Zacatecas.

Materiales y métodos: Se tomaron muestras de suelo de dos PA y de un sitio de referencia con base en la NMX-AA-132-SCFI-2006; además, se muestrearon un manantial y cuerpos de agua adyacentes o sobre los PA, conforme a la NOM-230-SSA1-2002. Los elementos tóxicos en el suelo y agua se analizaron de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y NOM-127-SSA1-1994, respectivamente. Las concentraciones de elementos en el suelo se sometieron a análisis de varianza y comparación de medias Tukey ($P < 0.05$).

Resultados y discusión: La concentración de Hg fue mayor ($P < 0.05$) en los PA respecto al sitio de referencia, pero no rebasó los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por las normas. El Cd y As en el suelo de los PA y sitio de referencia rebasaron el LMP, y el Pb solo en los PA. Se deduce que el As tiene origen geológico principalmente, ya que su contenido en el sitio de referencia fue superior al PA reciente. En los cuerpos de agua, las concentraciones de Pb, Hg, Cd y As fueron muy superiores a los LMP.

Conclusión: El Pb, Cd y As en los PA, y el Pb, Cd, Hg y As en los cuerpos de agua representan un riesgo para la salud de la población de Noria de Ángeles, Zacatecas.

Palabras clave: Cadmio; mercurio; plomo; arsénico; elementos contaminantes; actividad minera.

Introduction

Mexico has a wealth of metallic and non-metallic minerals throughout its territory (Dirección General de Minas, 2015). This has caused problems arising from mineral extraction and the processes of mining activity, reflected mainly in the northern area where the soils are more polluted (Mendez & Maier, 2008). In the state of Zacatecas, located in the northern center of the country, mining activity began in the sixteenth century, which has generated large amounts of waste deposits known as environmental liabilities (ELs). The problem of this activity is the historically accepted practice of abandoning mines and ELs when the minerals of interest are exhausted (Himley, 2014; Unger, Lechner, Kenway, Glenn, & Walton, 2015); in 2013, there were 3 241 abandoned ELs in Mexico (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2014). These ELs are a source of heavy metals, which are dispersed by the wind and water (Adriano, 2001; Navarro et al., 2008), since they are associated with clays migrating as composite particles in the sediments (Balderas-Plata, Gutiérrez-Castorena, Carrillo-González, Ortiz-Solorio, & Lugo-de la Fuente, 2006), thus increasing the risk of pollution. The presence of metals in the soil and waterbodies increases the chronic health risks of living organisms, including humans (García-Rico et al., 2016; McSwane, French, & Klein, 2015).

The Real de Ángeles mine, located in Noria de Ángeles, Zacatecas, is constituted by alternating sandstones, siltstones and argillites (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2016). The risk of pollution depends on the associated rock and the host rock of the deposit. The main minerals in the mine are: argentite (Ag_2S), sphalerite (ZnS), chalcopyrite (CuFeS_2), arsenopyrite (FeAsS), pyrrhotite (Fe_{1-X}S), argentiferous galena ($\text{PbS}\cdot\text{Ag}$), freibergite ($3\text{Cu}_2\text{Ag}\cdot\text{S}\cdot\text{Sb}_2\text{S}_3$), tetrahedrite ($\text{Cu}_3\text{SbS}_{4.3}$), anglesite (PbSO_4) and cerussite (PbCO_3) (Bravo-Nieto, 1988). The above shows the possible presence, perhaps at pollutant levels, of lead, zinc, arsenic, silver, iron, strontium and antimony in ELs; the presence of these heavy metals in soil, dust and water could put public and environmental health at risk (Balderas-Plata et al., 2006; García-Rico et al., 2016; McSwane et al., 2015). In this context, the objective of this research was to determine the concentration of potentially toxic minerals (Hg, Pb, Cd and As) in two environmental liabilities and in waterbodies that are adjacent to or on these liabilities in Noria de Ángeles, Zacatecas.

Materials and methods

The study was conducted in Noria de Ángeles, located in the southeast of the state of Zacatecas, where there are two ELs (Figure 1). The first (historical) dates from

Introducción

México cuenta con riqueza amplia de minerales metálicos y no metálicos en todo su territorio (Dirección General de Minas, 2015). Esto ha ocasionado problemas derivados de la extracción y procesos de la actividad minera, reflejados principalmente en la zona norte donde los suelos están más contaminados (Mendez & Maier, 2008). En el estado de Zacatecas, ubicado en el centro norte del país, la actividad minera empezó desde el siglo XVI, la cual ha generado gran cantidad de depósitos de residuos conocidos como pasivos ambientales (PA). El problema de esta actividad es una práctica, históricamente aceptada, que consiste en abandonar las minas y los PA cuando los minerales de interés se agotan (Himley, 2014; Unger, Lechner, Kenway, Glenn, & Walton, 2015); en 2013, existían 3 241 PA abandonados en México (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2014). Estos PA son fuente de metales pesados, los cuales son dispersados por el viento y el agua (Adriano, 2001; Navarro et al., 2008), ya que se asocian a las arcillas emigrando como partículas compuestas en los sedimentos (Balderas-Plata, Gutiérrez-Castorena, Carrillo-González, Ortiz-Solorio, & Lugo-de la Fuente, 2006), incrementando así el riesgo de contaminación. La presencia de metales en el suelo y en cuerpos de agua aumenta cada vez más los riesgos crónicos para la salud de los organismos vivos, incluyendo humanos (García-Rico et al., 2016; McSwane, French, & Klein, 2015).

La mina Real de Ángeles, ubicada en Noria de Ángeles, Zacatecas, está constituida por una alternancia de areniscas, limolitas y argilitas (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2016). El riesgo de contaminación depende de la roca asociada y de la roca huésped del yacimiento. Los principales minerales en la mina son: argentita (Ag_2S), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS), pirrotita (Fe_{1-X}S), galena argentífera ($\text{PbS}\cdot\text{Ag}$), freibergita ($3\text{Cu}_2\text{Ag}\cdot\text{S}\cdot\text{Sb}_2\text{S}_3$), tetraedrita ($\text{Cu}_3\text{SbS}_{4.3}$), anglesita (PbSO_4) y cerusita (PbCO_3) (Bravo-Nieto, 1988). Lo anterior evidencia la posible presencia, quizá en niveles contaminantes, de plomo, zinc, arsénico, plata, hierro, estroncio y antimonio en los PA; la presencia de estos metales pesados en el suelo, polvo y agua podrían poner en riesgo la salud pública y ambiental (Balderas-Plata et al., 2006; García-Rico et al., 2016; McSwane et al., 2015). En tal contexto, el objetivo de esta investigación fue conocer la concentración de minerales potencialmente tóxicos (Hg, Pb, Cd y As) en dos pasivos ambientales y en cuerpos de agua que están adyacentes o encima de tales pasivos en Noria de Ángeles, Zacatecas.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en Noria de Ángeles, ubicado al sureste del estado de Zacatecas, donde existen dos

the colonial era (Arellano, 1970), covers an area of approximately 2 ha, has no protection and is within the urban area; adjacent to this EL is a spring that forms a stream, with the water used by domestic livestock. The second EL (recent) began its activities in 1982 and corresponds to the Real de Ángeles mine. This EL covers a 360-ha area and has an approximately 40-cm-thick protective layer; however, it has areas without protection and with outcrops due to water erosion. In this EL there are waterbodies adjacent to and above it that are used as drinking troughs for domestic livestock. The climate is semi-dry temperate (BS_1kw) with summer rains; according to weather station data for Villa González Ortega, Zacatecas, the average annual temperature is 13.7 °C, average annual rainfall is 342.6 mm and potential evapotranspiration is 2 023.4 mm (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2017).

The ELs were sampled in August 2015, following the specifications of Mexican Standard NMX-AA-132-SCFI-2006 (Secretaría de Economía [SE], 2006). A reference site (22.56497° NL - 101.653022° WL) located in Salinas, San Luis Potosí, was also sampled. In the historic EL and reference site, three, 50-m transects were located; every 10 m a sample was taken at a depth of 0 to 20 cm. The direction of each transect was chosen based on the last three digits of 200 MXN banknotes, which were considered as degrees. The recent EL is “protected” with a 40-cm layer of uncontaminated material; however, it has outcrops due to water erosion or areas that were not properly protected. Therefore, sampling was carried out in 15 of these outcrops. In each one a 1-m² square was established where gravel, vegetation and mulch were removed; the corners and the center were sampled, with which a composite sample was obtained (SE, 2006).

In June 2016, three water samples were taken from a spring adjacent to the historic EL (1), and from three waterbodies located above (2) or adjacent (3 and 4) to the recent EL (Figure 1), according to NOM-230-SSA1-2002 (Secretaría de Salud y Asistencia [SSA], 2003) and NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007). Samples were placed in sterile disposable bottles, 1 mL of concentrated nitric acid was added per 100 mL of sample and they were kept at 4 °C until analysis.

The EL and reference site soil samples were analyzed for lead, mercury, cadmium and arsenic, in accordance with NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). The presence of these metals and metalloid in the water was determined in accordance with NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), using atomic absorption equipment (Aurora Instruments Model AI-1200).

Metal and metalloid concentrations in the historical and recent ELs and in the reference site were subjected

PA (Figura 1). El primero (histórico) data de la época de la colonia (Arellano, 1970) con superficie de 2 ha aproximadamente, no tiene protección y está dentro de la zona urbana; adyacente a este PA nace un manantial que forma un arroyo y el agua es utilizada por el ganado doméstico. El segundo PA (reciente) inició sus actividades en 1982 y corresponde a la mina Real de Ángeles. Este PA tiene superficie de 360 ha con capa protectora de aproximadamente 40 cm de espesor; sin embargo, presenta áreas sin protección y con afloramientos por erosión hídrica. En este PA existen cuerpos de agua adyacentes y encima de él que se utilizan como abrevaderos para el ganado doméstico. El clima es semiseco templado (BS_1kw) con lluvias en verano; de acuerdo con los datos de la normal climatológica Villa González Ortega, Zacatecas, la temperatura media anual es 13.7 °C, la precipitación promedio anual es 342.6 mm y la evapotranspiración potencial es 2 023.4 mm (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2017).

Los PA se muestrearon en agosto de 2015, siguiendo las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 (Secretaría de Economía [SE], 2006). También se muestreó un sitio de referencia (22.56497° LN - 101.653022° LO) ubicado en Salinas, San Luis Potosí. En el PA histórico y sitio de referencia se ubicaron tres transectos de 50 m; cada 10 m se tomó una muestra a profundidad de 0 a 20 cm. La dirección de cada transecto se eligió con base en los últimos tres dígitos de billetes de 200 MXN, que se consideraron como grados. El PA reciente está “protegido” con una capa de 40 cm de material no contaminado; sin embargo, presenta afloramientos por erosión hídrica o áreas que no quedaron debidamente protegidas, por ello el muestreo se realizó en 15 de estos afloramientos. En cada uno se trazó un cuadro de 1 m² donde se eliminó grava, vegetación y mantillo; se muestrearon las esquinas y el centro, para obtener una muestra compuesta (SE, 2006).

En junio de 2016, tres muestras de agua se tomaron de un manantial adyacente al PA histórico (1), y de tres cuerpos de agua ubicados encima (2) o adyacentes (3 y 4) al PA reciente (Figura 1), conforme a las NOM-230-SSA1-2002 (Secretaría de Salud y Asistencia [SSA], 2003) y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007). Las muestras se depositaron en frascos desechables estériles, se agregó 1 mL de ácido nítrico concentrado por cada 100 mL de muestra y se mantuvieron a 4 °C hasta su análisis.

En las muestras de suelo de los PA y del sitio de referencia se analizaron plomo, mercurio, cadmio y arsénico, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). La presencia de dichos metales y metaloide en el agua se determinó de acuerdo con

to an analysis of variance in a completely randomized design using the PROC GLM of SAS (Statistical Analysis Software Inc. [SAS], 2015) and Tukey's range test (Steel & Torrie, 1980). The minimum, maximum and average values of metals and metalloid in the samples were obtained for each waterbody.

la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), utilizando un equipo de absorción atómica (Aurora Instruments Modelo AI-1200).

Las concentraciones de los metales y metaloides en los PA histórico y reciente y en el sitio de referencia

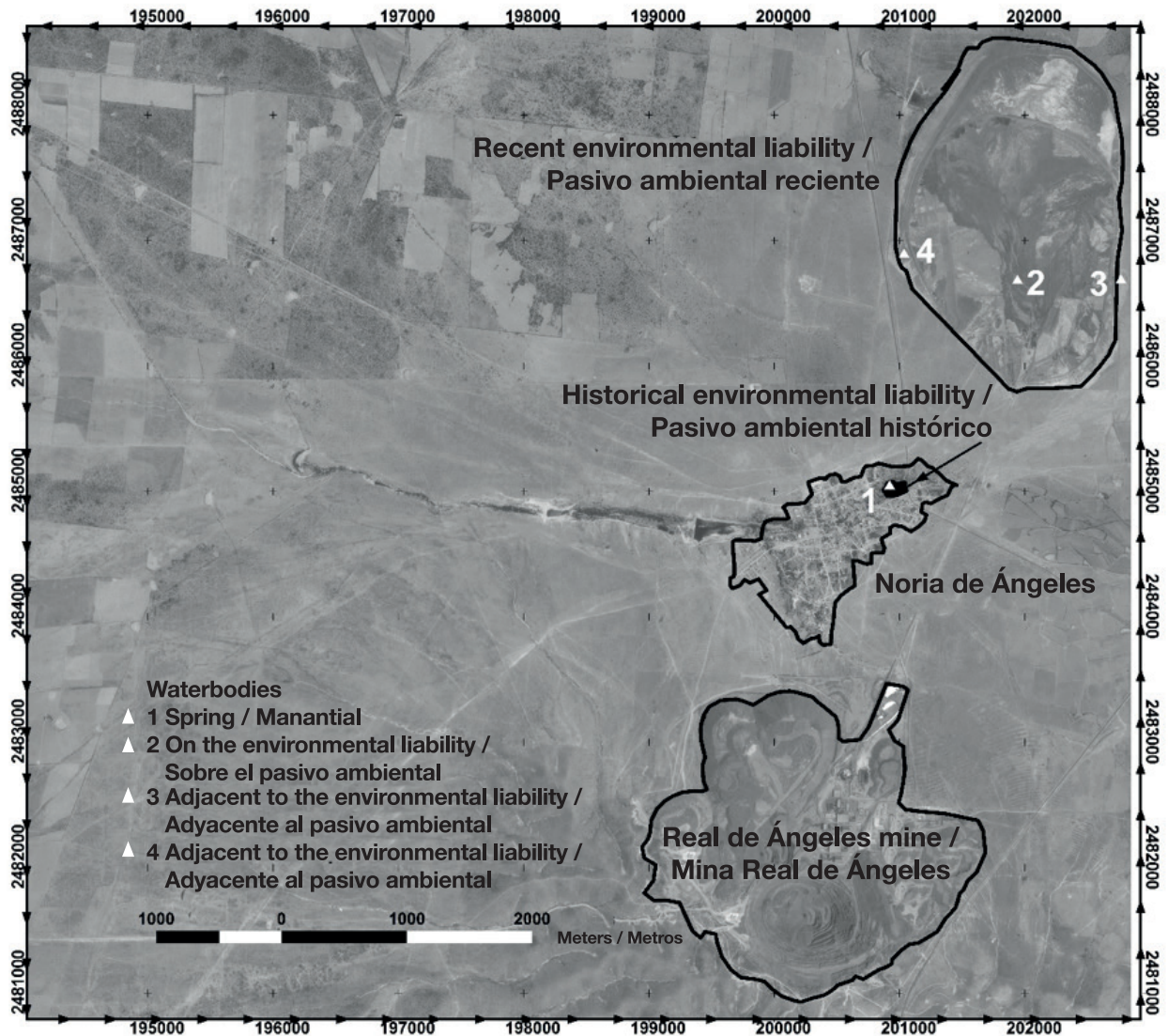


Figure 1. Location of environmental liabilities and waterbodies sampled in Zacatecas. UTM and Datum WGS84 projection. Source: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015).

Figura 1. Localización de los pasivos ambientales y de los cuerpos de agua muestreados en Zacatecas. Proyección UTM y Datum WGS84. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015).

Results and discussion

Table 1 contains the average values of the metals in the ELs of Noria de Ángeles, Zacatecas, as well as the permissible limits established by NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) and the USEPA (United States Environmental Protection Agency, 2017). This table shows that the Hg concentration was higher ($P < 0.05$) in the ELs than in the reference site, but it did not exceed the maximum permissible limits established by the standards.

With respect to Cd, the maximum concentrations in the three sites exceeded the limits of the aforementioned standards; however, the average value was only higher in the recent EL, being statistically higher ($P < 0.05$) than that of the other sites.

On the other hand, the maximum and average As values in the three sites were higher than the maximum permissible limits established in the two standards. It should be noted that although the As concentration in the reference site was lower than in the EL, the value was almost five times higher than the maximum allowable, which indicates a source of contamination of surface waterbodies, soil, and forage that domestic livestock consume and, therefore, represent a risk to the health of animals and the human population (Kyunghee et al., 2013). The historical EL had the highest As concentration ($P < 0.05$).

The maximum and average Pb values in the historical EL exceeded the maximum permissible limits of both standards; in the recent EL, the values exceeded only the limits established by the USEPA (2017). The high Pb concentrations are related to the argentiferous galena (PbS·Ag), anglesite (PbSO₄) and cerussite (PbCO₃) minerals present in a deposit (Bravo-Nieto, 1988). With respect to the reference site, the Pb concentration was found to be well below the permissible limits. The Pb and As values were lower than those found by Navarro et al. (2008) in abandoned mine deposits.

According to the results, the Pb, Hg and Cd pollutants of the ELs are mainly of anthropogenic origin since the concentrations were higher than in the reference site. On the contrary, it is deduced that the As has anthropogenic and geological origins, since its content in the reference site was higher than in the recent EL, but less than in the historical one. Both ELs constitute a threat to public health and wildlife, through the ingestion of dust with a high content of heavy metals, mainly As, Cd and Pb (García-Rico et al., 2016; Jeong-Hun & Kyoung-Kyoon, 2013) since these are near (recent EL with poor protection) or within (historical EL without protection) urban areas.

se sometieron a un análisis de varianza en un diseño completamente al azar mediante el procedimiento PROC GLM de SAS (Statistical Analysis Software Inc. [SAS], 2015), y a una comparación de medias de Tukey (Steel & Torrie, 1980). Los valores mínimo, máximo y promedio de metales y metaloides en las muestras se obtuvieron para cada cuerpo de agua.

Resultados y discusión

El Cuadro 1 contiene los valores medios de los metales en los PA de Noria de Ángeles, Zacatecas, así como los límites permisibles establecidos por la NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y la USEPA (United States Environmental Protection Agency, 2017). En tal cuadro se observa que la concentración de Hg fue mayor ($P < 0.05$) en los PA respecto al sitio de referencia, pero no rebasó los límites máximos permisibles establecidos por las normas.

Con respecto al Cd, las concentraciones máximas en los tres sitios rebasaron los límites de las normas mencionadas; sin embargo, el valor promedio solo fue superior en el PA reciente, siendo estadísticamente mayor ($P < 0.05$) que el de los otros sitios.

Por otra parte, los valores máximos y medios de As en los tres sitios fueron superiores a los límites máximos permisibles establecidos en las dos normas. Cabe destacar que, aunque la concentración de As en el sitio de referencia fue menor que en los PA, el valor fue casi cinco veces superior al máximo permisible, lo cual indica una fuente de contaminación de los cuerpos de agua superficiales, suelo, y forraje que el ganado doméstico consume y, por lo tanto, representa un riesgo para la salud de los animales y la población humana (Kyunghee et al., 2013). El PA histórico tuvo la concentración más alta de As ($P < 0.05$).

Los valores máximos y medios de Pb en el PA histórico rebasaron los límites máximos permisibles de ambas normas; en el PA reciente, los valores superaron solo los límites establecidos por la USEPA (2017). Las concentraciones altas de Pb se relacionan con los minerales galena argentífera (PbS·Ag), anglesita (PbSO₄) y cerusita (PbCO₃) presentes en un yacimiento (Bravo-Nieto, 1988). Con respecto al sitio de referencia, la concentración de Pb se encontró muy por debajo de los límites permisibles. Los valores de Pb y As fueron inferiores a los encontrados por Navarro et al. (2008) en depósitos de minas abandonadas.

De acuerdo con los resultados, los contaminantes Pb, Hg y Cd de los PA son de origen antropogénico principalmente, ya que las concentraciones fueron mayores que en el sitio de referencia. Por el contrario,

Table 1. Concentrations of metals and metalloid in the historical environmental liability (HEL) and recent environmental liability (REL) in Noria de Ángeles, Zacatecas, and in the reference site (RS) in Salinas, San Luis Potosí. The maximum permissible limits correspond to those established by NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) and USEPA (2017).

Cuadro 1. Concentraciones de metales y metaloide en los pasivos ambientales histórico (PAH) y reciente (PAR) en Noria de Ángeles, Zacatecas, y en el sitio de referencia (SR) en Salinas, San Luis Potosí. Los límites máximos permisibles corresponden a lo señalado por la NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y USEPA (2017).

Metal or metalloid/ Metal o metaloide	Site/ Sitio	Maximum (mg·kg ⁻¹)/ Máximo (mg·kg ⁻¹)	Mean (mg·kg ⁻¹)/ Media (mg·kg ⁻¹)	NOM (mg·kg ⁻¹)	USEPA (mg·kg ⁻¹)
Hg	HEL/PAH	5.54	4.15 a	23	8
	REL/PAR	5.38	3.23 a		
	RS/SR	3.40	1.11 b		
Cd	HEL/PAH	66.78	23.88 b	37	20
	REL/PAR	257.20	202.65 a		
	RS/SR	39.96	19.10 b		
As	HEL/PAH	462.00	263.34 a	22	---
	REL/PAR	188.40	47.90 b		
	RS/SR	151.40	93.21 b		
Pb	HEL/PAH	480.80	248.80 a	400	150
	REL/PAR	394.40	149.67 a		
	RS/SR	4.28	2.81 b		

Means with a different letter for each element, in the same column, are statistically different according to Tukey's range test ($P < 0.05$).

Medias con letra distinta para cada elemento, en una misma columna, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

Table 2 shows the Pb, Cd, Hg and As concentrations in the waterbodies. The concentrations of these elements exceeded, in all cases, the maximum permissible values established by the Ministry of Health (SSA, 2003) and USEPA (2009). The Cd, Pb and As values found in this study are higher than those found by Steller, Domínguez-Mariani, Garrido, and Avilés (2015) in water samples taken from abandoned minefields in Huautla, Morelos, where the concentrations do not exceed 1.0 mg·L⁻¹. By contrast, in water sources of other abandoned mines, Elyaziji, Khalil, Hakkou, Benzaazoua, and Alansari (2016) and Oyarzún, Maturana, Paulo, and Pasiieczna (2003) found values similar or much higher than those found in the present work. Water contaminated by metals is common in abandoned mining areas, due to the weathering of minerals (Elyaziji et al., 2016; Steller et al., 2015).

se deduce que el As tiene origen antropogénico y geológico, ya que su contenido en el sitio de referencia fue superior al PA reciente, pero menor al histórico. Ambos PA constituyen una amenaza para la salud pública y para la vida silvestre, a través de la ingestión de polvo con alto contenido de metales pesados, principalmente As, Cd y Pb (García-Rico et al., 2016; Jeong-Hun & Kyoung-Kyoon, 2013), ya que estos se encuentran cerca (PA reciente con protección deficiente) o dentro (PA histórico sin protección) de las áreas urbanas.

El Cuadro 2 muestra las concentraciones de Pb, Cd, Hg y As en los cuerpos de agua. Las concentraciones de dichos elementos excedieron, en todos los casos, los valores máximos permisibles establecidos por la Secretaría de Salud (SSA, 2003) y USEPA (2009). Los

The waterbodies in the Noria de Angeles' ELs pose a major risk to domestic livestock and wildlife that consume water directly from these places. In addition, the toxic elements could be bioaccumulating in products such as meat and milk and thus pose a threat to the health of local people who consume these products (Nava-Ruíz & Méndez-Armenta, 2011; Nouri & Haddioui, 2015).

valores de Cd, Pb y As encontrados en este estudio son mayores que los encontrados por Steller, Domínguez-Mariani, Garrido, y Avilés (2015) en muestras de agua extraídas de fondos de minas abandonadas de Huautla, Morelos, donde las concentraciones no sobrepasaron 1.0 mg·L⁻¹. En contraste, en fuentes de agua de otras minas abandonadas, Elyaziji, Khalil, Hakkou, Benzaazoua, y Alansari (2016) y Oyarzún, Maturana, Paulo, y

Table 2. Concentrations of metals and metalloid in the waterbodies present in the historical environmental liability (CA1) and recent environmental liabilities (CA2, CA3 and CA4) of Noria de los Angeles, Zacatecas. The maximum permissible limits (MPL) correspond to those established by NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) and USEPA (2009).

Cuadro 2. Concentraciones de metales y metaloide en los cuerpos de agua presentes en los pasivos ambientales histórico (CA1) y reciente (CA2, CA3 y CA4) de Noria de los Ángeles, Zacatecas. Los límites máximos permisibles (LMP) corresponden a lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) y la USEPA (2009).

Waterbody/ Cuerpo de agua	Value/ Valor	Hg (mg·L ⁻¹)	Cd (mg·L ⁻¹)	As (mg·L ⁻¹)	Pb (mg·L ⁻¹)
CA1	Min	101.2	154.4	ND	0.20
	Max	104.8	164.4	55.6	0.40
	Ave/Prom	103.0	159.4	27.8	0.30
CA2	Min	73.6	17.2	140.8	0.30
	Max	75.2	34.0	148.8	0.40
	Ave/Prom	74.4	25.6	144.8	0.36
CA3	Min	76.8	40.8	102.4	0.20
	Max	86.4	48.4	138.8	0.40
	Ave/Prom	81.6	44.6	120.6	0.28
CA4	Min	82.4	47.6	40.4	0.04
	Max	84.0	54.8	76.4	0.28
	Ave/Prom	83.2	51.2	58.4	0.16
MPL /LMP	NOM	0.001	0.005	0.05	0.001
MPL/LMP	USEPA	0.002	0.005	0.01 - 0.05	0.01

ND: Not detected because it is present in a concentration lower than the sensitivity of the atomic absorption equipment used in the quantification.

ND: No detectado por estar presente en concentración menor a la sensibilidad del equipo de absorción atómica, utilizado en la cuantificación.

Conclusions

The concentrations of Pb, Cd and As of the environmental liabilities (ELs) and the concentrations of Pb, Cd, Hg and As in the waterbodies exceed the permissible limits established in national and international standards. Therefore, the ELs and waterbodies pose a risk to the health of the local population, wildlife and domestic animals, mainly due to dust inhalation and contaminated water ingestion.

Acknowledgments

The authors thank the National Science and Technology Council for the scholarship granted to the first author to carry out her Master of Science studies, and the Microrregión de Atención Prioritaria Salinas, Campus San Luis Potosí, Colegio de Postgraduados for the financial support provided for field work.

End of English version

References / Referencias

- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environmental biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals* (2nd ed.). New York, USA: Springer Verlag.
- Arellano, G. (1970). Cubica y muestreo de los jales de Noria de Ángeles, Zacatecas, ubicados dentro del terreno urbano denominado "La Hacienda Grande", propiedad del Sr. E. W. Bergmann. Zacatecas, México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables.
- Balderas-Plata, M. A., Gutiérrez-Castorena, M. C., Carrillo-González, R., Ortiz-Solorio, C. A., & Lugo-de la Fuente, J. A. (2006). Distribución de elementos traza en los suelos de las microcuencas en Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 451–461. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11799/39389>
- Bravo-Nieto, J. (1988). Geología del yacimiento Real de Ángeles, municipio de Noria de Ángeles, Zacatecas. En G. P. Salas (Ed.), *Geología Económica de México* (pp. 505–514). México: Fondo de Cultura Económica.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). Estaciones meteorológicas automáticas. Retrieved August 20, 2017, from <http://smn.cna.gob.mx/es/pronosticos/8-smn-general/38-estaciones-meteorologicas-automaticas-emas>
- Dirección General de Minas. (2015). Estadísticas 2015. Retrieved June 17, 2016 from http://www.siam.economia.gob.mx/swb/es/siam/p_Estadistica
- Elyaziji, A., Khalil, A., Hakkou, R., Benzaazoua, M., & Alansari, A. (2016). Assessment of trace elements in soils and mine water surrounding a closed manganese mine (Anti Atlas, Morocco). *Mine Water and the Environment*, 35(4), 486–496. doi: 10.1007/s10230-016-0397-1
- García-Rico, L., Meza-Figueroa, D., Gandolfi, J. A., Ríos-Salas, R. D., Romero, M. F., & Meza-Montenegro, M. M. (2016). Dust-metal source in an urbanized arid zone: Pasieczna (2003) encontraron valores parecidos o muy superiores a los encontrados en el presente trabajo. El agua contaminada por metales es frecuente en áreas de minería abandonadas, debido al intemperismo de los minerales (Elyaziji et al., 2016; Steller et al., 2015).
- Los cuerpos de agua en los PA de Noria de Ángeles representan un riesgo importante para el ganado doméstico y fauna silvestre que consumen agua directamente de estos lugares. Además, los elementos tóxicos se podrían estar bioacumulando en productos como la carne y leche, y representar una amenaza para la salud de los pobladores locales que consumen dichos productos (Nava-Ruíz & Méndez-Armenta, 2011; Nouri & Haddioui, 2015).
- Conclusiones**
- Las concentraciones de Pb, Cd y As de los pasivos ambientales (PA) y las concentraciones de Pb, Cd, Hg y As en los cuerpos de agua rebasan los límites permisibles establecidos en normas nacionales e internacionales. Por tanto, los PA y cuerpos de agua son un riesgo para la salud de la población, para la fauna silvestre y animales domésticos, principalmente por la inhalación de polvo e ingestión de agua contaminados.
- Agradecimientos**
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada a la primera autora para realizar sus estudios de Maestría en Ciencias. A la Microrregión de Atención Prioritaria Salinas, Campus San Luis Potosí, Colegio de Postgraduados, por el apoyo económico para el trabajo en campo.
- Fin de la versión en español*
- Implications for health-risk assessments. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(3), 522–533. doi: 10.1007/s00244-015-0229-5
- Himley, M. (2014). Mining history: Mobilizing the past in struggles over mineral extraction in Peru. *Geographical Review*, 104(2), 174–191. doi: 10.1111/j.1931-0846.2014.12016.x
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Ortofoto F14A71a escala 1:20000. México: Autor.
- Jeong-Hun, P., & Kyoung-Kyoon, C. (2013). Risk assessment of soil, water and crops in abandoned Geumryeong mine in South Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, 17–23. doi: 10.1016/j.gexplo.2013.02.004
- Kyunghee, J., Jungkon, K., Minjung, L., Soyong, P., Ho-Jang, K., Hae-Kwan, C., ...Kyungho, C. (2013). Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea. *Environmental Pollution*, 178, 322–328. doi: 10.1016/j.envpol.2013.03.031

- McSwane, D., French, J., & Klein, R. (2015). Environmental health and safety. In B. Bradsher, G. Wojtala, C. Kaml, C. Weiss, & D. Read (Eds.), *Regulatory foundations for the food protection professional* (pp. 125–141). USA: Springer.
- Mendez, M. O., & Maier, R. M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semi-arid environments - An emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 278–283. doi: 10.1289/ehp.10608
- Nava-Ruíz, C., & Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16(3), 140–147. Retrieved from <http://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf>
- Navarro, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M., Vidal, J., Tovar, P. J., & Bechb, J. (2008). Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96(2-3), 183–193. doi: 10.1016/j.gexplo.2007.04.011
- Nouri, M., & Haddioui, A. (2015). Human and animal health risk assessment of metal contamination in soil and plants from Ait Ammar abandoned iron mine, Morocco. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1), 6. doi: 10.1007/s10661-015-5012-6
- Oyarzún, J., Maturana, H., Paulo, A., & Pasieczna, A. (2003). Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo region (Chile): Effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean Basin. *Mine Water and the Environment*, 22(3), 155–161. Retrieved from <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10230-003-0016-9.pdf>
- Secretaría de Economía (SE). (2006). Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NMX/Contaminaci%C3%B3n%20del%20Suelo/2.2006.pdf
- Secretaría de Salud y Asistencia (SSA). (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://www.agrolab.com.mx/sitev002/sitev001/assets/nom-127-ssa1-1994.pdf>
- Secretaría de Salud y Asistencia (SSA). (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/230ssa102.html>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2007). 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. México: Diario Oficial de la Federación (Segunda Sección). Retrieved from http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). El medio ambiente en México. Residuos peligrosos y sitios contaminados. Retrieved from http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/00_mensajes/07_residuos.html
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2016). Panorama minero del estado de Zacatecas. Retrieved from <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/ZACATECAS.pdf>
- Statistical Analysis Software Inc. (SAS). (2015). *SAS® 9.4 In-database products: User's guide* (6th ed.). Cary, NC, USA: Author. Retrieved from <http://support.sas.com/documentation/cdl/en/indebug/68442/PDF/default/indebug.pdf>
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1980). *Principles and procedures of statistics. A biometrical approach* (2nd ed.). USA: McGraw-Hill.
- Steller, M. V., Domínguez-Mariani, E., Garrido, S. E., & Avilés, M. (2015). Groundwater pollution by arsenic and other toxic elements in an abandoned silver mine, Mexico. *Environmental Earth Science*, 74(4), 2893–2906. doi: 10.1007/s12665-015-4315-9
- Unger, C. J., Lechner, A. M., Kenway, J., Glenn, V., & Walton, A. (2015). A jurisdictional maturity model for risk management, accountability and continual improvement of abandoned mine remediation programs. *Resources Policy*, 43, 1–10. doi: 10.1016/j.resourpol.2014.10.008
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2009). National primary drinking water regulations. US Federal MLCs. Esdat environmental database management software. EPA 816-09-004 Retrieved from <http://esdat.net/Environmental%20Standards/US/Federal/US%20Federal%20MLCs.pdf>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2017). Regional screening level (RSL) Summary table (TR=1E-06, HQ=0.1). Retrieved from http://esdat.net/Environmental%20Standards/US/Region_3_6_9/USEPA%20RSL%20June%202017%20THQ%20=%200.1.pdf