

# **Evaluación del grado de contaminación por arsénico y cobre en sedimentos y suelos del río Bacanuchi ocasionado por un derrame minero**

**Icela D. Barceló-Quintal<sup>1\*</sup>, Araceli Vega-Paz<sup>2</sup>, Julisa García-Albortante<sup>1</sup>, Hugo E. Solís-Correa<sup>1</sup>, Sergio Gómez-Salazar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Avenida San Pablo No. 180. Colonia Reynosa Tamaulipas, México D.F., CP 02200*

<sup>2</sup>*Dirección de Desarrollo de Materiales y Productos Químicos, Instituto Mexicano del Petróleo. Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152, Col. San Bartolo Atepehuacan. C.P.07730.*

<sup>3</sup>*Departamento de Ingeniería Química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán No.1421, Guadalajara, Jalisco, México, C.P. 44430.*

*Fecha de recepción: 10 de diciembre de 2019 - Fecha de aceptación: 01 de julio de 2020*

## **Resumen**

México se encuentra entre los países con mayor producción minera, la mayoría de las áreas mineras están ubicadas en el norte del país. Los elementos As y Cu se determinaron en algunos suelos y sedimentos del río Bacanuchi, un afluente del río Sonora, que se contaminó accidentalmente con el derrame de ácido lixiviado de un proceso de extracción. Para la interpretación del grado de contaminación por As y Cu en un conjunto de sitios muestreados, se utilizaron algunos criterios. Para los suelos, se utilizaron los criterios de Novotny, Bowie y Thornton y Bowen; en el caso del As, se excedieron algunos criterios, para Cu se excedieron prácticamente todos, por lo que se concluye que existe contaminación de Cu en los suelos estudiados. En el caso de los sedimentos, se utilizaron los criterios de Thomas y Mudroch (1979), Ministerio de Medio Ambiente de Ontario (MOE, 1976) y US.EPA, 1975. Además, para Cu se utilizó una norma francesa, dos criterios canadienses y el US.EPA, 2003; Con el criterio de la US.EPA.2003, los valores se excedieron, se concluye que el sedimento está contaminado, los otros criterios y la norma francesa no se excedieron. La fuerte acidez del derrame fue lo que afectó a los suelos y sedimentos.

**Palabras Clave:** Suelos, sedimentos, arsénico, cobre, metales, derrame minero

## **Evaluation of contamination degree by As and Cu in sediments and soils of The Bacanuchi River caused by a mining spill**

---

\* ibarceloq@gmail.com

## Abstract

Mexico is among the countries with the highest mining production, most of mining areas are in the north of the country. The **As** and **Cu** elements were determined in some soils and sediments of The Bacanuchi River, a Sonora river tributary, which was accidentally contaminated with leached acid spillage from an extraction process. For contamination degree interpretation by As and Cu in a set of sampled sites, some criteria were used. For soils, Novotny, Bowie and Thornton and Bowen criteria were used; in the case of As, some criteria were exceeded, for Cu practically all was exceeded, so it is concluded that there is Cu contamination in studied soils. In sediments case, Thomas and Mudroch (1979), Ministry of Environment of Ontario (MOE, 1976) and US.EPA, 1975 criteria were used. In addition for Cu a French standard was used, two criteria Canadian and US.EPA, 2003; with US.EPA, 2003 criteria the values were above, it is concluded that sediment is contaminated, the other criteria and French standard, were not exceeded. What most soils and sediments affected was the strong acidity of spill.

**KEY WORDS:** Soils, sediments, arsenic, metals, mining spill

## Introducción

En la actualidad México forma parte de la lista de los países con mayor producción minera en el mundo, durante 1989-1994 la industria minera proporcionó el 1% del empleo nacional, según (Volke y Velasco, 2002), la minería es una de las actividades económicas. El mayor estado productor de cobre en México es Sonora con 85.6% de la producción total, este valor se conforma primordialmente por las aportaciones de las minas Buenavista del

Cobre y La Caridad, consideradas como las principales productoras del cobre en el país, pertenecientes al complejo minero de Cananea, son zonas ricas en pórfidos de cobre (Ochoa-Landín *et al.*, 2011; Valencia *et al.*, 2005, Tumialán-De la Cruz, 2003); en la Figura 1 se indica en círculos blancos la ubicación de los distintos depósitos de pórfidos de cobre (Pérez-Segura, *et al.*, 2009), en los distritos de Cananea, esta importante zona minera de México es propiedad del Grupo México, (Valencia *et al.*, 2005).

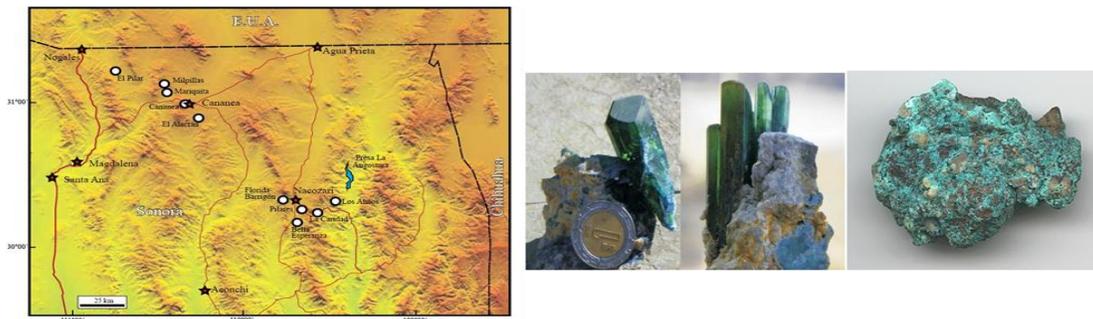


Figura 1. Sitios ricos en pórfidos de cobre

Tomado de Google (junio 6 de 2018)

[https://www.google.com.mx/search?biw=1527&bih=742&tbm=isch&sa=1&ei=ljc4W8z8OMvUsAXTpb3lBQ&q="+mina+de+La+caridad+en+sonora&oq.](https://www.google.com.mx/search?biw=1527&bih=742&tbm=isch&sa=1&ei=ljc4W8z8OMvUsAXTpb3lBQ&q=)

Del conjunto minero de Cananea, donde pertenece la mina Buenavista del Cobre, se obtienen varios minerales como, cobre (120 mil toneladas al año), molibdeno (19,500 toneladas al año), oro y plata (Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano, 2013). Las asociaciones minerales de los yacimientos en estas regiones mineras permiten establecer tres zonas características: una zona de oxidación con goethita, hematites y limonitas, una zona de sulfuros primarios con calcopirita, pirita y molibdenita, y por último una zona de sulfuros primarios con calcopirita, pirita y molibdenita. Debido al desarrollo y

modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país. En la Tabla 1 se resumen las etapas de los procesos mineros y su relación en cuanto a impacto al ambiente. En general, todas las etapas que incluye un proceso minero, con excepción de la prospección, que implica estudios preliminares, generan problemas ambientales de alto impacto.

Tabla 1: Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente  
(SEMIP 1994, tomado a su vez de Volke y Velasco, 2002)

Fase	Descripción	Impacto Ambiental
<b>Exploración</b>	Barrenación, obras y perforaciones	Destrucción de vegetación
<b>Explotación</b>	Obras diversas: tiros, socavones, patios para depósito de minerales, zonas para descarga de materiales	Operación de presas de jales: arrastre de residuos peligrosos.
<b>Beneficio</b>	Concentración, trituración y molienda Tratamientos previos	Generación de ruido
<b>Fundición y refinación</b>	Obtención de metales y sus aleaciones (uso de hornos industriales). Eliminación de impurezas en los metales para aumentar la ley de contenido	Emisiones a la atmósfera, residuos peligrosos y aguas residuales

Como puede verse, en todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y en algunos casos emisiones a la atmósfera. Sin embargo, dos de las etapas que más contaminación producen son las de explotación de los minerales y la de fundición/refinación, así la minería es una de las industrias que mayor impacto ambiental produce, ya que durante todo el procesamiento del material extraído, existen múltiples factores de riesgo de contaminación al ambiente (Tumialán-De la Cruz, 2003). El grado de contaminación también depende del tipo de extracción que se realice, ya sea subterránea o a cielo abierto y del mineral a extraer, la contaminación producida por la extracción subterránea es la que más perjudica al ambiente. Por una parte debido a la excavación de grandes rocas

subterráneas con reactivos que son expuestos al aire o al agua como el ácido sulfúrico, que causa acidez al agua. Por otra parte los lixiviados pueden infiltrarse a las capas profundas de la tierra provocando contaminación de los mantos acuíferos. Otro tipo de contaminación surge por el desecho de los productos químicos utilizados en la separación de los metales de interés. Dichos desechos suelen ser vertidos directamente a los ríos, lagos o lagunas, lo cual es una intensa contaminación que acaba con la biodiversidad de la zona afectada. En cuanto a residuos sólidos, se producen en gran cantidad en todas las minas. En el tipo de minería a cielo abierto, el daño al medio ambiente es debido a la deforestación por abarcar grandes extensiones de terreno, así como la desertificación de zonas

aledañas. Finalmente el riesgo a la salud de los trabajadores es elevado, pues si no se tienen las condiciones de protección adecuadas, pueden ocurrir accidentes de intoxicación o derrumbes que afectan la integridad de los trabajadores. Uno de los elementos importantes en cuanto a la contaminación en las zonas mineras es el As, además del Cu. El As se encuentra en forma geológica, en forma natural se encuentra en las rocas ígneas. En las zonas mineras de Sonora, Zacatecas y Guanajuato es común su presencia y se le puede hallar formando compuestos inorgánicos y orgánicos en un amplio intervalo de concentraciones en aire, agua, suelos, sedimentos, vegetales y animales.

El 6 de agosto de 2014, accidentalmente por falla estructural en el Bordo Poniente de la mina Buenavista del Cobre del complejo minero de Cananea, hubo un derrame de 40,000 metros cúbicos de lixiviado conteniendo sulfato de cobre muy acidulado que se vertieron en el Arroyo Tinajas (17.6 km), pasando al río Bacanuchi (64 km) y posteriormente al Río Sonora (Figura 1), el cual posee una longitud de 420 km y la cuenca abarca una superficie de 28 950 km<sup>2</sup>, en la Figura 2, se presenta la Cuenca del río Sonora, donde la SEMARNAT (Periódico La jornada, 2014) aplicó multas a los responsables del derrame, (Periódico La Jornada, 2015, PROFEPA, 2015).

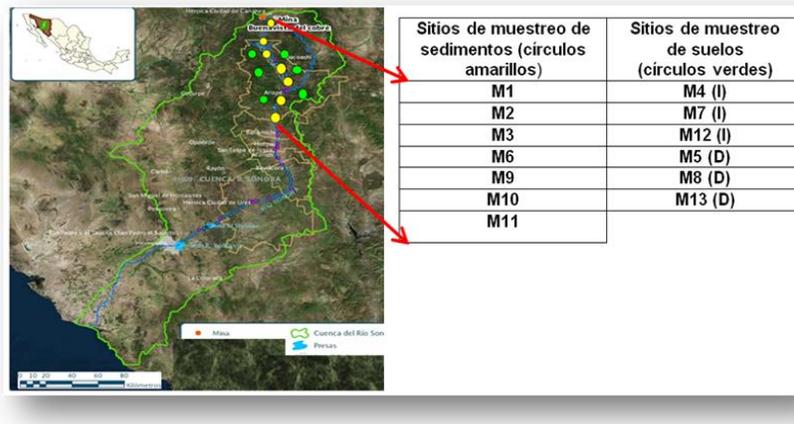


Figura 2: Cuenca Río Sonora

El objetivo de este trabajo consistió en determinar el grado de contaminación en sedimentos y suelos generado por el derrame de la mina Buenavista del Cobre afectando el río Bacanuchi influente del río Sonora, donde se midieron los elementos As y Cu a lo largo de 40 kilómetros entre suelos y sedimentos del río por el que corrió el material contaminante y realizándose una evaluación con el fin de determinar el grado de contaminación de los sedimentos y suelos de la sección estudiada, considerando varios criterios, tanto para los

sedimentos como para los suelos de los alrededores y poder establecer un criterio del grado de contaminación desde varios aspectos.

### Metodología

En el mes de abril de 2015 se obtuvieron muestras de sedimento y suelos de una parte de la zona afectada por la contaminación de restos de material minero procesado, en sedimentos del río Bacanuchi y suelos aledaños, donde compuestos y soluciones altamente ácidas, agua, sulfato de cobre y otros metales, fluyeron

por arroyos afluentes de este río y que en algunos casos se dispersaron en suelos agrícolas y ganaderas aledaños. Los análisis de cada metal, se realizaron por triplicado. En la

Tabla 2, se indica la clave de cada muestra por sitio en el orden de avance a través del cauce del río que estaba relativamente seco durante el muestreo y suelos aledaños.

Tabla 2: Muestras de sedimento del lecho del río y de suelos

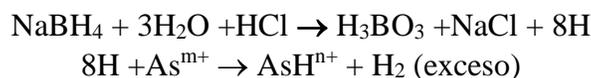
Muestras	Material recolectado
M1	Sedimento
M2	Sedimento
M3	Sedimento
M4	Suelo
M5	Suelo
M6	Sedimento
M7	Suelo
M8	Suelo
M9	sedimento
M10	sedimento
M11	sedimento
M12	Suelo
M13	Suelo

Para determinar la dispersión de Cu y As, se efectuó un monitoreo y recolección de muestras de sedimento y suelos siguiendo el método de cuarteo por zona, Figura 2, donde se señalan con círculos amarillos para sedimentos y verdes para suelos, desde el inicio del derrame hacia el río con distancias de aproximadamente 7 kilómetros entre cada sitio sobre el cauce del río. Las muestras de sedimentos (círculos amarillos) se recolectaron en las zonas del río, como se señala en la Figura 2. Con círculos de color verde se recolectaron muestras de suelos en ambos lados del cauce del río, mirando el plano, las muestras van de M4, M7 y M12 del lado izquierdo del río (símbolo I) y M5, M8 y M13 del lado derecho (símbolo D); cada muestreo se efectuó aproximadamente a una distancia entre 12 y 20 metros del río, ya que dependió de la dificultad de la orografía. Se tomaron tanto para suelos como para sedimentos, cada muestra se colectó en radios de tres metros (cuatro muestras en promedio y seleccionando muestras compuestas por cuarteo haciendo por cada

muestreo tres réplicas por sitio), con el fin de homogeneizar las muestras, tanto en suelo como en el sedimento, se tomaron a 30 cm de profundidad, con el fin de medir el curso de los contaminantes del derrame, no se trabajó a mayor profundidad para no afectar la medición de los contaminantes del derrame reciente. Las 13 muestras recibidas se secaron a 60° en una estufa, se molieron y se pasaron por mallas Tyler, -8 (diámetro de partícula de 0.2007cm), -14 (diámetro de partícula de 0.1001cm), -20 (diámetro de partícula de 0.0711 cm), -35 (diámetro de partícula de 0.0356 cm), -65 a +100 (diámetro de partícula de 0.0178 cm), se seleccionó el material retenido en malla +100 (65/100) por ser de un buen tamaño de grano y tener la mayor cantidad de material. Se midió el pH de las muestras pesando 5 gramos de cada una, en medio acuoso con agitación, con posterior sedimentación para medir el pH del líquido sobrenadante en un equipo Metrohm 720. Posteriormente se trató 1g de cada muestra compuesta por sitio, por digestión ácida utilizando HNO<sub>3</sub> marca Baker grado

Suprapur en un horno de microondas marca CEM-MARS 5, previa eliminación de la sílice con HF marca Baker grado Suprapur. El Cu de las muestras digeridas se analizó por absorción atómica en un equipo ThermoElemental, modelo SOLAAR M6. En el caso del arsénico, se utilizó la técnica por espectrofotometría en un equipo Marca PS Analytical ITD, Modelo

10.55, Millennium, Para el análisis de As, la solución de la muestra se aciduló con HCl y tratada con TRETAHIDROBORATO de sodio en medio alcalino para generar el H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> gaseoso con liberación de hidrógeno naciente (H), de manera que se forma un hidruro de As (arsina) y exceso de hidrógeno molecular, según las reacciones:



Si es As (III), entonces:  $8\text{H} + \text{As}^{3+} \rightarrow \text{AsH}_3 + \text{nH}_2 \text{ en exceso}$

Si es As (V), entonces:  $8\text{H} + \text{As}^{5+} \rightarrow \text{AsH}_5 + \text{nH}_2 \text{ en exceso}$

## Resultados y su interpretación

En la Tabla 3 se indican los valores del pH de cada sitio tanto en sedimentos como en suelos, se observaron valores de pH muy ácidos, lo que

se debió a la fuerte acidez del derrame. A medida que avanzó el muestreo, el pH en cada caso aumentó, los sedimentos mostraron ser más ácidos que los suelos.

Tabla 3. Valores de pH obtenido en sedimentos y suelos del río Bacanuchi

Sedimentos	pH	Suelos	pH
M1	2.24 ± 0.0286	M4 (I)	4.41 ± 0.1138
M2	2.24 ± 0.0286	M7 (I)	4.52 ± 0.1234
M3	2.24 ± 0.0286	M12 (I)	4.83 ± 0.1323
M6	2.24 ± 0.0286	M5 (D)	4.27 ± 0.1298
M9	2.24 ± 0.0286	M8 (D)	4.45 ± 0.1633
M10	2.24 ± 0.0286	M13 (D)	4.74 ± 0.1413
M11	2.24 ± 0.0286		

Para la interpretación de los resultados, se indican a continuación varios criterios para la evaluación de los sedimentos y suelos desde varios puntos de vista. Los elementos traza (metales pesados) más abundantes en los suelos pueden clasificarse en cinco categorías, de acuerdo con la forma química en que se encuentran en las soluciones del suelo Novotny, 1995, (Galán y Romero, 2008): Cationes (Ag<sup>+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>,

Ni<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>), Metales nativos (Hg, V), Oxianiones (AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, MnO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HSeO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Halogenuros (F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>), Organocomplejos (Ag, As, Hg, Se, Te, Tl). Estas categorías no se excluyen mutuamente, porque algunos elementos pueden aparecer con más de una forma. Para Novotny (Galán y Romero, 2008), para Cu y As, los valores se encuentran en un intervalo entre 0.1-250 mg/kg. Bowie y Thornton (1985) y Bowen,

(1979), presentan valores en suelos como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Límite de concentraciones y concentraciones anómalas de elementos en suelos

Elemento	Intervalo normal (Bowen) mg/kg	Concentraciones anómalas (Bowie-Thorton) mg/kg
As	<5-40	Hasta 5000
Cu	2-60	Hasta 2000

Tanto, Novotny, (1995) como Bowie y Thornton (1985), indican que de todos los elementos traza encontrados en los suelos hay 17 que se consideran como potencialidad tóxica y a la vez fácilmente disponibles en muchos suelos en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad, donde se encuentra el Cu. La U.S. Environmental Protection Agency (EPA), incluye en la lista de contaminantes prioritarios los siguientes trece elementos traza: Sb, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y Zn (Galán y Romero, 2008; Novotny, 1995). Los suelos actúan como depuradores por su contenido de materia orgánica, carbonatos, y óxidos hidratados de hierro y manganeso, y propiedades físicas como textura, permeabilidad y actividad microbiana, además de la capacidad de filtrar, descomponer, neutralizar o almacenar contaminantes, el poder depurador de un suelo tiene un límite. Cuando se superan esos límites para una o varias sustancias, el suelo funciona como contaminado y es a su vez fuente de contaminantes. En cuanto a lo referente a los sedimentos, éstos contienen una gran

diversidad de componentes como: arcillas, coloides inorgánicos como los óxidos hidratados de Fe, Mn y Al, (Barceló-Quintal *et al.*, 2017) y materia orgánica del suelo, que consiste en sustancias húmicas, (Barceló-Quintal *et al.*, 2015) y biomasa parcialmente descompuesta. Todos estos componentes presentan grandes superficies de interacción que permiten incorporar por diferentes procesos químicos y fisicoquímicos a una gran variedad de metales que juegan un papel importante en la movilidad química de éstos. Se han sugerido varios criterios por Agencias Gubernamentales de Canadá, como: el Thomas and Mudroch (1979), el Ontario Ministry of the Environment (MOE, 1976), asimismo la United Environmental Protection Agency (EPA, 1975) de los Estados Unidos, Tabla 5, para la presencia de metales como el cobre en los sedimentos de los cuerpos de agua, debido a su importancia como adsorbentes de metales, donde su movilidad, como en los procesos de desorción pueden poner en riesgo a la biota presente. En la Tabla 5 se indican estos criterios y los Valores límite para cada metal.

Tabla 5: Criterios recomendados para sedimentos en mg/kg

Metal	Criterio M.O.E. (mg/kg)	Criterio Thomas-Mudroch (mg/kg)	EPA, 1975 (mg/kg)
Cobre	25	45	50

En la Tabla 6 se consideró la Norma Francesa AFNOR U44-041 de 1975, (Flores, 1992), las recomendaciones canadienses de Ontario y Columbia Británica para su empleo de sedimento (lodos) en uso agrícola (Webber,

1988) y los valores de la EPA, (2003), criterios que se aplicarán en este trabajo para sedimentos del río afectado por el accidente minero y que fueron arrastrados a suelos agrícolas.

Tabla 6: Concentración máxima autorizada en sedimentos para su empleo en uso agrícola (Francia: Norme AFNOR U44-041, criterios canadienses (Ontario y Columbia Británica) para uso de sedimentos en suelos agrícolas y EPA, 2003, para lodos en uso agrícola).

Metal	Norme AFNOR Concentración máxima en sedimentos (mg/kg)	Ontario Concentración máxima en sedimentos (mg/kg)	Columbia Británica Concentración máxima en sedimentos (mg/kg)	EPA, 2003 Concentración máxima en sedimentos (mg/kg)
As	--	---	---	75
Cu	1,500	17,000	---	4300

Para Micó *et al.*, (2006), es importante una evaluación del contenido de metales pesados en suelos agrícolas en cada región para la identificación de áreas con problemas de contaminación. Cada país e incluso a veces cada región, estado o comunidad, proponen

concentraciones máximas, para ello se indica en la Tabla 7 los valores para diferentes países, ya que los niveles máximos permitidos para cada suelo difieren en función de condiciones locales, uso, historia de la región, tipo de suelo, clima, entre otros.

Tabla 7. Propuesta de concentración máxima aceptable de metales traza considerados en suelos agrícolas (mg/kg) en diferentes países (Galán y Romero, 2008)

Metal	Austria	Canadá	Polonia	Japón	Reino Unido*	Alemania**
As	50	25	30	15	20	40 (50)
Cu	100	100	100	150	50 (100)	50 (200)

Para el cobre la US.EPA (1996) plantea que el intervalo normal de Cu en el suelo es de 5 a 30 mg/kg, valores menores que los considerados en la Tabla 7, donde el Reino Unido y Alemania consideran un valor máximo de 50 mg/kg. Los demás países de la Tabla proponen 100 mg/kg. Para el As, Japón es el más estricto seguido de Canadá y Polonia.

A continuación se presentan los resultados de As y Cu en este trabajo. Se observa en la Figura 3, la variación de la concentración (mg/kg) de arsénico en los sedimentos y suelos de 13

muestras analizadas de los sitios mencionados en la Tabla 1. A medida que corrió el contaminante, se observó una tendencia a la disminución en los primeros sitios **M1**, **M2**, **M3** y **M6** de los sedimentos, posiblemente por la hidráulica del río en el momento del derrame y la curvatura del mismo ver Figura 2, la concentración de As en los sitios **M9**, **M10** y **M11** de los sedimentos aumentó, aparentemente hubo una concentración de As, sin embargo a partir de **M10**, continuó la tendencia a la disminución. En cuanto a los **suelos**, los sitios **M4**, **M7** y **M12** del lado

izquierdo del río y los sitios **M5, M8 y M13** del lado derecho, (mirando el plano), se observó una acumulación mayor del arsénico en los

sitios **M5, M7 y M8** y concentraciones menores en los demás sitios.

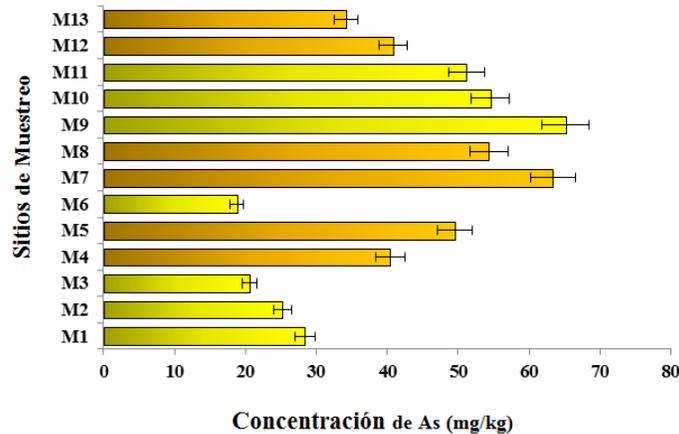


Figura 3: Valores de As en los sedimentos y suelos de los diferentes sitios muestreados

\*El color anaranjado corresponde a suelos y el amarillo a sedimentos

Cabe indicar que en los suelos de la región existe As por naturaleza, y al no poder conocer la antigüedad del suelo, es prudente considerara que no todo el As hallado necesariamente corresponde al vertido, sin embargo, es importante tener en cuenta esta concentración puntual. Los límites permitidos por la Agencia de Protección del Ambiente (US.EPA, 1993), para As total recomienda como límite en suelos urbanos y rurales (no hay

para sedimentos) de 100 mg/kg. Considerando los valores encontrados en los suelos, indicados en la Tabla 8, no se rebasó en ningún sitio los 100 mg/kg. Sin embargo, países como Austria, Canadá, Polonia, Japón, Reino Unido y Alemania presenta límites menores, y si se consideran estos valores, entonces todos los suelos sobrepasaron los diferentes valores límite de los países ver Tabla 7.

Tabla 8: Evaluación para As en suelos y sedimentos (Novoty, 1993, Galán y Romero, 2008, Bowie y Thornton, 1985, Bowen, 1979 y US.EPA, 2003).

Sitio	Arsénico total medido mg/kg	Evaluación Novoty (0.1-250 mg/kg)	Valores "Normales" de Bowie-Thornton y Bowen <5-40 mg/kg	US.EPA, 2003 75 mg/kg
<b>M1</b>	28.36 ± 1.078	No rebasa	<b>En el intervalo (con riesgo)</b>	No rebasa
<b>M2</b>	25.23 ± 1.034	No rebasa	<b>En el intervalo (con riesgo)</b>	No rebasa
<b>M3</b>	20.62 ± 0.907	No rebasa	<b>En el intervalo (con riesgo)</b>	No rebasa
<b>M4</b>	40.41 ± 1.572	No rebasa	<b>Ligeramente arriba con riesgo</b>	No rebasa
<b>M5</b>	49.54 ± 2.527	No rebasa	<b>Rebasa</b>	No rebasa
<b>M6</b>	18.82 ± 0.896	No rebasa	<b>En el intervalo (con riesgo)</b>	No rebasa
<b>M7</b>	63.3 ± 2.399	No rebasa	<b>Rebasa</b>	No rebasa
<b>M8</b>	54.33 ± 2.641	No rebasa	<b>Rebasa</b>	No rebasa
<b>M9</b>	65.11 ± 2.657	No rebasa)	<b>Rebasa</b>	No rebasa
<b>M10</b>	54.53 ± 2.176	No rebasa	<b>Rebasa</b>	No rebasa
<b>M11</b>	51.16 ± 2.611	No rebasa	<b>Rebasa</b>	No rebasa
<b>M12</b>	40.82 ± 1.951	No rebasa	<b>Ligeramente arriba con riesgo</b>	No rebasa
<b>M13</b>	34.21 ± 1.712	No rebasa	<b>En el intervalo (con riesgo)</b>	No rebasa

Tomando en cuenta la Tabla 8 y considerando los criterios de Novotny, (Galán y Romero, 2008), que recomiendan un intervalo de 0.1-250 mg/kg, si se toma el valor máximo de 250 mg/kg no se rebasó el límite. En función de los valores de Bowie-Thornton (1985) y Bowen, (1979), Tabla 4, los sitios **M5**, **M7**, **M8**, para suelo y **M9**, **M10** y **M11** para sedimentos (si se consideran estos criterios en forma aproximada para sedimentos), tomando el valor máximo más alto (40 mg/kg), rebasaron los límites “Nomal” y los sitios **M1**, **M2**, **M3** y **M6** para sedimentos y el suelo **M13** se encontraron en el intervalo de 5-40 mg/kg, por lo que se les puede considerar con riesgo, finalmente el sitio **M12** de suelos se encontró ligeramente arriba del valor máximo, por lo que es un suelo con riesgo alto de contaminación. Si se consideran las concentraciones anómalas de Bowen y Bowie-Thornton, ningún sitio se puede considerar de alta contaminación, al menos para las muestras de los sedimentos y suelos obtenidos a una profundidad de 30 cm. Basándose en la Tabla 6 (US.EPA, 2003,

Norma CFR 40 Parte 503) para sedimento que se podrían utilizar para suelos no se rebasó el valor, por lo que al menos en el tiempo del muestreo este elemento no representa ningún riesgo en el caso del sedimento, que por arrastre fue conducido hacia los suelos, sin embargo por no tener valores muy lejanos a 75.00 mg/kg, los sedimento **M9**, **M10** y **M11** pudieran ser de riesgo, asimismo el suelo **M7**. Según el estudio realizado para la situación del río, es conveniente considerar principalmente los sitios de la curvatura del río, para la recuperación de los sitios que rebasaron los valores límite y de los que están en riesgo, lo que economizaría tiempo y esfuerzo para la limpieza y la recuperación del ecosistema, pero a su vez tener cuidado de derrames futuros.

En cuanto al cobre, en la Figura 4 se presentan los valores obtenidos para el cobre tanto en sedimentos del lecho del río como de los suelos en los sitios estudiados.

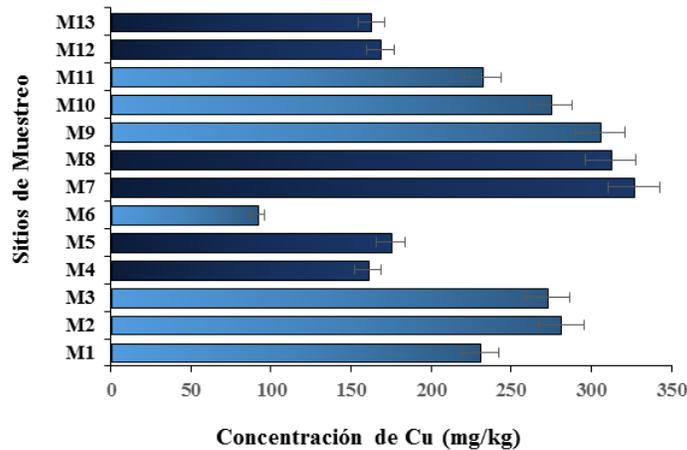


Figura 4: Valores de Cu en los sedimentos y suelos de los diferentes sitios muestreados  
\*El color azul obscuro corresponde a suelos y el azul claro a los sedimentos

Los sitios que presentaron las concentraciones más altas fueron **M7** y **M8** de los suelos, en el caso de los sedimentos **M9** fue el de la mayor

concentración, se observó que en general los sedimentos presentaron concentraciones más altas que los suelos, con excepción del sitio **M6**

que presentó la concentración más baja e incluso de los suelos. En la Tabla 9 se indica la evaluación para el cobre, primeramente, siguiendo lo indicado por Novotny, (Galán-Romero, 2008), los sitios **M1, M2, M3, M9** y **M10** de los sedimentos rebasaron el valor máximo, esto es lógico ya que es uno de los metales importantes en esta mina. Según los valores de la Tabla 9 para el Cu, tanto los sitios de sedimentos como de suelos rebasaron los valores límites de los países citados en la Tabla 7. Para los criterios propuestos por Bowie-

Thornton (1985) y Bowen (1979), los valores tanto de sedimento como de los suelos rebasaron los valores límite de estos criterios, sin embargo no resultaron concentraciones anómalas, ya que el valor límite para el valor “anómalo” es de 5000 mg/kg, sin embargo otros criterios como los citados en el párrafo anterior indican que los valores encontrados en la zona se rebasaron, por lo que, tanto los sedimentos como los suelos se deben de considerar en riesgo.

Tabla 9: Evaluación para Cu en suelos y sedimentos (Novoty, 1993, Bowie y Thornton, 1985, Bowen, 1979, y US.EPA 2003)

Sitio	Cobre total medido mg/kg	Evaluación Novoty, (0.1-250 mg/kg)	Valores Normales de Bowie-Thornton y Bowen, 2-60 mg/kg	US.EPA, 2003 4300 mg/kg
<b>M1</b>	230.87±7.58	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	No Rebasa
<b>M2</b>	281.13±8.02	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M3</b>	272.75±7.52	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M4</b>	160.56±8.62	No rebasa	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M5</b>	174.82±9.28	No rebasa	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M6</b>	91.65±2.47	No rebasa	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M7</b>	326.49±8.32	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M8</b>	312.15±6.92	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M9</b>	305.84±7.63	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M10</b>	274.64±5.77	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M11</b>	231.86±6.46	<b>En el intervalo (con riesgo)</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M12</b>	168.41±3.39	No rebasa	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M13</b>	162.65±5.77	No rebasa	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>

En la Tabla 10 se presenta otra evaluación para sedimentos en los cuerpos de agua que contienen biota, considerando esto se utilizó la

Tabla 5, donde se observa que los valores fueron rebasados para la salud del río, por lo que es un sedimento considerado contaminado.

Tabla 10: Evaluación del cobre en función de los criterios MOE, Thomas-Mudroch y US.EPA, 1975

Sitio	Cobre total medido mg/kg	Criterio MOE 25 mg/kg	Criterio Thomas y Mudroch 45 mg/kg	Criterio EPA, 1975 50 mg/kg
<b>M1</b>	230.87 ± 7.58	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M2</b>	281.13 ± 8.02	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M3</b>	272.75 ± 7.52	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M6</b>	91.65 ± 2.47	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M9</b>	305.84 ± 7.63	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M10</b>	274.64 ± 5.77	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>
<b>M11</b>	231.86 ± 6.46	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>	<b>Rebasa</b>

En la Tabla 11 se indican las concentraciones de este metal en función de la Norma Francesa y los Criterios Canadienses y de la US.EPA (2003) para sedimentos que pueden ser usados en agricultura. Se utilizaron estos criterios debido a que el derrame de lixiviados abarcó suelos al arrastrar al río el material

contaminante y al llover en forma inusual el río inundó suelos arrastrando sedimentos a estos suelos, sin embargo, considerando los criterios de la Tabla 6, ninguno de los sitios de los suelos rebasó los valores límite de los criterios, por lo que este metal no representa un riesgo de alta contaminación por lo pronto en estos suelos.

Tabla 11: Relación de las concentraciones de Cu para lodos y sedimentos que se pueden utilizar en agricultura en suelos. (Considerando la Norma Francesa, los criterios canadienses y de la US.EPA, 2003 para agricultura)

Sitio	Cobre total medido mg/kg	Norme AFNOR U44-041 1,500 mg/kg	Ontario 17,000 mg/kg	Columbia Británica -----	US. EPA, 2003 4300 mg/kg mg/kg
M4	160.56±8.62	No rebasa	No rebasa	-----	No rebasa
M5	174.82±9.28	No rebasa	No rebasa	-----	No rebasa
M7	326.49±8.32	No rebasa	No rebasa	-----	No rebasa
M8	312.15±6.92	No rebasa	No rebasa	-----	No rebasa
M12	168.41±3.39	No rebasa	No rebasa	-----	No rebasa
M13	162.65±5.77	No rebasa	No rebasa	-----	No rebasa

## Conclusiones

Se puede concluir considerando lo siguiente:

### 1. Para los sedimentos:

- Según los criterios de Ontario Ministry of the Environment (MOE, 1976), el Thomas and Mudroch (1979), asimismo la United Environmental Protection Agency (EPA, 1975), para el Cu, todos los valores de la concentración límite de los tres criterios fueron rebasados para tener en buena salud al río y sobre todo para la preservación de la biota del mismo, que fue alterada por el derrame, ya que el sedimento del río se considera contaminado por este metal.
- Tomando en consideración la Norma Francesa AFNOR U44-041 de 1975, las recomendaciones Canadienses de Ontario y Columbia Británica para el empleo de sedimentos en uso agrícola y los valores de la EPA, 2003, Norma CFR 40 Parte 503, el Cu no rebasó los valores límite de todos estos criterios

### 2. Para los suelos

- Para los criterios de Novotny, que considera para As y Cu valores entre 0.1-250 mg/kg, respecto al As, algunos sitios se encontraron en riesgo e incluso algunos rebasaron el valor límite; para el Cu ninguno de los suelos rebasó el valor límite.
- Según el criterio de la US.EPA, 1996, ningún suelo rebasó el límite para el arsénico.
- Comparando la concentración máxima aceptable de metales traza respecto a los suelos según los criterios de los diferentes países (Tabla 7) para uso agrícolas respecto a los suelos afectados por el derrame, tanto el arsénico como el cobre rebasaron los valores límite.
- En el caso de los criterios de Bowen y Bowie-Thornton, para el arsénico tres suelos rebasaron el valor límite considerado como “normal” y los demás se encontraron en el intervalo

que proponen, pero con riesgo. Para el cobre se rebasaron los valores límite.

- Para la US.EPA, 2003, el arsénico no rebasó el valor límite, para el cobre

todos los sitios del suelo rebasaron el valor límite.

## Referencias

Barceló-Quintal I.D., Martínez Méndez Y., Cetina-Alcalá V.M., García-Albortante J., Solís-Correa H.E., Gómez-Salazar S., Bárcenas Soto M. (2015). “Especiación del material húmico en dos tipos de giros agrícolas en la zona aguacatera del Estado de Michoacán”. Eds. Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia, y Gestión Ambiental (AMICA), Puebla, Puebla, México, 1-6.

Barceló-Quintal I.D., Solís-Correa H.E., Jorge Jiménez-Campos J., García-Albortante J., Magdalena García-Martínez M., Osornio-Berthet L. (2017). “Evaluación de metales potencialmente tóxicos para la biota en el sedimento de la laguna de Chignahuapan en el Estado de México”. Eds. Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia, y Gestión Ambiental (AMICA), Villahermosa, Tabasco, México, 1-8.

Bowen, H.J.M. (1979): “Environmental chemistry of the elements. of the elements”. Eds. Academic Press, London. ISBN 0-12-120450-2.

Bowie, S.H.U., Thornton, I. (1985): “Environmental Geochemistry and Health, Kluwer”. Eds. Academic Publ., Hingham. MA.

Flores J. (1992). “Les métaux toxiques dans les eaux pluviales en milieu urbain: caractéristiques physico-chimiques”. Thèse doctorale, Université Paris XII-Val de Marne.

Galán H. E, Romero B. A. (2008). “Contaminación de Suelos por Metales Pesados”. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 10, 48-60.

Kabata-Pendias A; Pendias H, (2001). “Trace Elements in Soils and Plants”. Eds. CRC Press, Boca Raton, FL.

Kabata-Pendias A. (2004). “Soil–plant transfer of trace elements an environmental” *Geoderma* 122, 143-149.

Micó C, Recatalá L, Peris M, Sánchez J. (2006). “Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis”. *Chemosphere* 65, 863-872.

Novotny, V. (1993): “Diffuse sources of pollution by toxic metals and impact on receiving waters. In *Heavy Metals*”, Eds. Salomons W., Förstner U., Mader P., 35-52. Springer-Verlag, Berlin.

Ontario Ministry of the Environment (MOE) (1976). “Evaluating construction activities impacting on water resources part III A”. Handbook for dredging and dredged material disposal in Ontario. Legislation policies, sediment classification and disposal options. Ontario Ministry of the Environment and Energy. Guideline. Toronto, Canada, 49.

Ochoa-Landín L., Pérez-Segura E, Del Río-Salas R., Valencia-Moreno M. (2011). “Depósitos minerales de Sonora, México, Panorama de la geología de Sonora, México”. Eds. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano.

Pérez-Segura E., Espinoza-Medina E., Mendoza-Córdova A., Jesús Vidal-Solano J. (2009). “Descubrimiento de vivianita en la mina La Caridad, Sonora, México”. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222009000300014](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222009000300014). Consultado el 12 de Junio 2018.

Periódico la Jornada (2014). “Grupo México causó derrame, afirma Semarnat”. Consultado 15 de agosto de 2015

Periódico La jornada (2015). “La contaminación en los ríos Sonora y Bacanuchi, de largo plazo: ONG”. Consultado el 15 de agosto de 2015

PROFEPA, (2015). “Constata procurador Haro Bélchez impacto ambiental causado por derrame de minera Buenavista del Cobre”. 25 de agosto de 2014. Consultado el 15 de agosto de 2015.

Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano (2013). “Panorama Minero del Estado de Sonora”

Thomas R.L., Mudroch A. (1979). “Small craft harbours-sediment survey, Lakes Ontario, Erie and Lake St. Clair, 1978. Dredging summary and protocol”. Report to the Great Lakes Biolimnology Laboratory, Burlington, Ont.

Tumialán De la Cruz PH., (2003). “Compendio de Yacimientos Minerales de Perú”. Instituto Minero y Geológico (INGEMMET). (Boletín B-10), Disponible en [gob.pe:84/xmlui/handle/123456789/2734](http://gob.pe:84/xmlui/handle/123456789/2734).

US.EPA. United States Environmental Protection Agency (1975). Regulations governing discharge of dredged or filled material in navigable waters. Federal Register 41, 292-98.

US.EPA (1993). EPA-625-R-93-003a. “Subsurface characterization and monitoring techniques, a desk reference guide. Vol I: Solids and ground water”. United States Environmental Protection Agency. Manual. Washington, D.C.

US.EPA. United States Environmental Protection Agency (1996). Soil screening guidance: technical background. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, p A-5.

US.EPA, 2003. “Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge”. Disponible en: <http://www.epa.gov/OR/D/NRMRL/pubs/625r92013/625R92013.pdf>.

Valencia, V.A., Ruiz, J., Barra, F., Gehrels, G., Ducea, M., Titley, S.R., Ochoa-Landin, L. (2005). “U–Pb zircon and Re–Os molybdenite geochronology from La Caridad porphyry copper deposit: insights for the duration of magmatism and mineralization in the Nacozari District, Sonora, Mexico”, *Mineralium Deposita*, 40, 99–105.

Volke-Sepúlveda T., Velasco-Trejo J.A. (2002). “Tecnologías de remediación de suelos”. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. Disponible en [https://www.researchgate.net/.../31851896\\_Tecnologias\\_de\\_remediacion\\_para\\_suelos](https://www.researchgate.net/.../31851896_Tecnologias_de_remediacion_para_suelos). Consultado el 12 de junio de 2018.

Webber M.D. (1988). “Contrôle de la concentration de métaux lourds dans les sols après épandage de boues d’égout municipales: l’approche canadienne”. *Science et techniques de l’Eau* 21, 45-51.