



Título del artículo.

Fraccionamiento geoquímico de elementos potencialmente tóxicos en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

Título del artículo en idioma inglés.

Geochemical fractionation of potentially toxic elements in tailings mining of deposit Guerrero I in Taxco, Guerrero, Mexico

Autores.

Natasha Mylena Quevedo-Castañón
Oscar Talavera-Mendoza
Alejandro H. Ramírez-Guzmán
Azucena Dótor-Almazán
José Daniel Chávez-González
María Laura Sampedro-Rosas
José Luis Rosas-Acevedo

Referencia bibliográfica:

MLA

Quevedo-Castañón, Natasha Mylena, Oscar Talavera-Mendoza, Alejandro H. Ramírez-Guzmán, Azucena Dótor-Almazán, José Daniel Chávez-González, María Laura Sampedro-Rosas y José Luis Rosas-Acevedo. "Fraccionamiento geoquímico de elementos potencialmente tóxicos en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México". *Tlamati* 10.2, 2019: 5-21. Print.

APA

Quevedo-Castañón, N. M., Talavera-Mendoza, O., Ramírez-Guzmán, A. H., Dótor-Almazán, A. Chávez-González, J. D., Sampedro-Rosas, M. L. Rosas-Acevedo, J. L. (2019). Fraccionamiento geoquímico de elementos potencialmente tóxicos en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México. *Tlamati*, 10(2), 5-21.

ISSN Revista Impresa: 2007-2066.

ISSN Revista Electrónica: En Trámite.

Publicado el 30 de diciembre del 2019

© 2019 Universidad Autónoma de Guerrero

TLAMATI, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma de Guerrero a través de la Dirección de Investigación. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Dirección de Investigación de la UAGro. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos previa cita de nuestra publicación.



Fraccionamiento geoquímico de elementos potencialmente tóxicos en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

Natasha Mylena Quevedo-Castañón^{1*}
 Oscar Talavera-Mendoza^{1,2}
 Alejandro H. Ramírez-Guzmán¹
 Azucena Dótor-Almazán³
 José Daniel Chávez-González⁴
 María Laura Sampedro-Rosas¹
 José Luis Rosas-Acevedo¹

¹Universidad Autónoma de Guerrero. Doctorado en Ciencias Ambientales. Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Privada de Laurel No. 13 Col. El Roble. C.P. 39640, Acapulco, Gro., México.

²Universidad Autónoma de Guerrero. Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Taxco el Viejo, Guerrero 40323, México.

³Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Laboratorio de Geoquímica Marina, Departamento de Recursos del Mar. Mérida, Yuc.

⁴Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. CINVESTAV Campus Irapuato, Irapuato, Guanajuato, México.

**Autor de correspondencia*
quevedoshka@hotmail.com

Resumen

La cuantificación de los contenidos de elementos tóxicos asociados a diferentes fracciones químicas de jales mineros es esencial para evaluar su verdadero impacto al medio ambiente, ya que arroja información sobre los procesos y tiempo necesario para que estos elementos tóxicos se conviertan en sustancias biodisponibles. Cuando estas determinaciones se combinan con la identificación de minerales portadores de Elementos Potencialmente Tóxicos, se obtiene información valiosa sobre los procesos que los hacen accesibles a la biota y al ser humano. En este estudio, se realizó la técnica de extracción secuencial y se cuantificaron los contenidos totales (Cd, Cu, Fe, Mn y Zn) y los asociados a cinco fracciones (soluble, adsorbida, asociado a carbonatos, asociado a oxihidróxidos de Fe y asociado a materia orgánica y sulfuros) en muestras de Jales no oxidados y fuertemente oxidados del depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero. El estudio se complementó con la identificación de las fases minerales mayoritarias a través de Difracción de Rayos X y EDS-MEB para la determinación de la distribución química de los Elementos Potencialmente Tóxicos y su potencial emisión al ambiente. Los resultados indican que en los jales no oxidados los metales están ligados preferencialmente a la materia orgánica/sulfuros y oxihidróxidos de Fe, fracciones que requieren condiciones fisicoquímicas extremas para liberar sus componentes al ambiente. En los jales oxidados, en cambio, los metales se asocian preferencialmente con la fracción soluble, es decir, a la fracción de mayor peligro ambiental. En la caracterización mineralógica, los jales no oxidados consisten en sulfuros quienes actúan como los principales portadores de metales tóxicos mientras que en los jales oxidados los minerales eflorescentes son los que constituyen los reservorios más relevantes. Los resultados alcanzados permiten concluir que los jales no oxidados no representan por el momento un peligro inminente para liberar metales tóxicos al ambiente, pero los jales oxidados, al contrario, ya

Como citar el artículo:

Quevedo-Castañón, N. M., Talavera-Mendoza, O., Ramírez-Guzmán, A. H., Dótor-Almazán, A. Chávez-González, J. D., Sampedro-Rosas, M. L. Rosas-Acevedo, J. L. (2019). Fraccionamiento geoquímico de elementos potencialmente tóxicos en los jales mineros del Depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero, México. *Tlamati*, 10(2), 5-21.

presentan un alto potencial de emisión de metales en formas químicas accesibles a la biota y al hombre. Se requieren estudios complementarios para conocer la dinámica de los contaminantes en los ecosistemas y evaluar el impacto real de los jales Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero.

Palabras clave: elementos potencialmente tóxicos, jales, extracción secuencial, caracterización mineralógica por DRX-SEM, Taxco, Guerrero

Abstract

Quantification of toxic element's contents associated with different chemical fractions of mining tailings is essential to assess their true impact on environment, since these measures provide necessary information about processes and times for these toxic elements to become bioassimilable substances. When these determinations are combined with identification of minerals carrying Potentially Toxic Elements, we obtain valuable information about processes that make them accessible to biota and humans. In this study, use of a sequential extraction technique for quantify total contents of Cd, Cu, Fe, Mn y Zn and those associated with five fractions (soluble, adsorbed, associated with carbonates, associated with oxyhydroxides of Fe and associated with organic matter and sulphides) from a sample of not-oxidized mining tailings and other from a strongly oxidized mining tailings from deposit Guerrero I of Taxco de Alarcón, Guerrero. This study was fulfilled with identification of majority mineral phases through X-Ray Diffraction and EDS-MEB for determining chemical distribution of Potentially Toxic Elements and their potential emission to the environment. Results indicate that, in the non-oxidized mining tailings, metals are preferentially bound to organic matter/sulphides and oxyhydroxides of Fe, fractions that require extreme physicochemical conditions to release their components to the environment. On the other hand, in oxidized mining tailings, metals are preferentially associated with a soluble fraction, to say so, the fraction of greatest environmental danger. In the mineralogical characterization, non-oxidized mining tailings are the main carriers of metals, while in oxidized mining tailings, efflorescent minerals are the most relevant reservoirs. Results achieved allow us to conclude that non-oxidized mining tailings at this moment, do not represent an imminent danger to release toxic metals to the environment, but oxidized mining tailings already have a high potential for emission of metals in chemical forms accessible to biota and man. Complementary studies are required to know dynamics of pollutants in ecosystems and assess the true impact in mining tailings at Guerrero I, Taxco of Alarcon, Guerrero.

Keywords: EFA, Pulls, Sequential extraction, Characterization, Taxco.

Introducción

La minería es una de las actividades productivas que mayor impacto genera al medio ambiente debido a la emisión de grandes cantidades de Elementos Potencialmente Tóxicos [EPT] como el As, Hg, Cr, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Zn, los cuales impactan severamente a los recursos naturales del entorno, así como a la flora, fauna y al ser humano (Fergusson, 1990; Álvarez, Pérez y Calvo, 1993; Blowes, Ptacek, Jambor y Weisener, 2014; Amos, Blowes, Bailey, Segó, Smith y Ritchie, 2015). Los residuos mineros que resultan de la explotación de depósitos minerales sulfurados, denominados jales mineros, representan los mayores puntos de emisión de EPT sobre la tierra (Simate y Ndlovu, 2014). La interacción de los minerales sulfurados residuales (principalmente pirita y pirrotita) contenidos en los jales mineros con el oxígeno atmosférico y el agua meteórica inducen su oxidación generando el llamado Drenaje Acido de Mina [DAM]; ampliamente documentados por Dold y Friese, (2007); Nordstrom, (2011a); Lindsay, Moncur, Bain, Jambor, Ptacek y Blowes (2015), entre otros. El DAM se caracteriza por valores bajos de pH (<2.5), altos contenidos de SO₄²⁻ y alta concentración de EPT en formas químicas biodisponibles (Ortiz, Chávez y Fernández, 2007; Jacobs, Lehr y Testa, 2014; Simate y Ndlovu, 2014; Iakovleva, Mäkilä, Salonen, Sitarz, Wang y Sillanpää,

2015; Valente, Grande, de la Torre, Gomes, Santisteban, Borrego y Sequeira Braga, 2015). La prevención y la neutralización del DAM representan los retos tecnológicos más importantes de la industria minera con el propósito de hacer de la minería una actividad más amigable con el medio ambiente (Sahoo, Equeenuddin y Powell, 2013).

La cuantificación de los contenidos totales de los EPT en jales mineros ha sido utilizada desde hace mucho tiempo como una vía para evaluar el riesgo potencial que tienen de ser liberados al ambiente (Ritcey, 1989; Fergusson, 1990; Lindsay et al., 2015). Sin embargo, autores como Tessier, Campbell, y Bisson (1979); Clevenger (1990); Conesa, Schulín y Nowack, (2008); Solongo, Kaoru, Koichiro, Bolormaa, Ochirkhuyag y Makiko, (2016) y Li, Zeng, Fu, Chen, He y He, (2017) han señalado que la cuantificación de las concentraciones totales no toma en consideración la forma química o fases minerales en los que se encuentran los EPT. Al contrario, dichos autores consideran que la cuantificación de los EPT contenidos en las fracciones soluble, intercambiable o biodisponible es más apropiada para evaluar el impacto real que producen los contaminantes en los ecosistemas del entorno (Concas, Ardaú, Cristini, Zuddas y Cao, 2006; Courtin-Nomade, Waltzing, Evrard, Soubrand, Lenain, Ducloux, Ghorbel, Grosbois y Bril, 2016).

La extracción secuencial es una metodología analítica

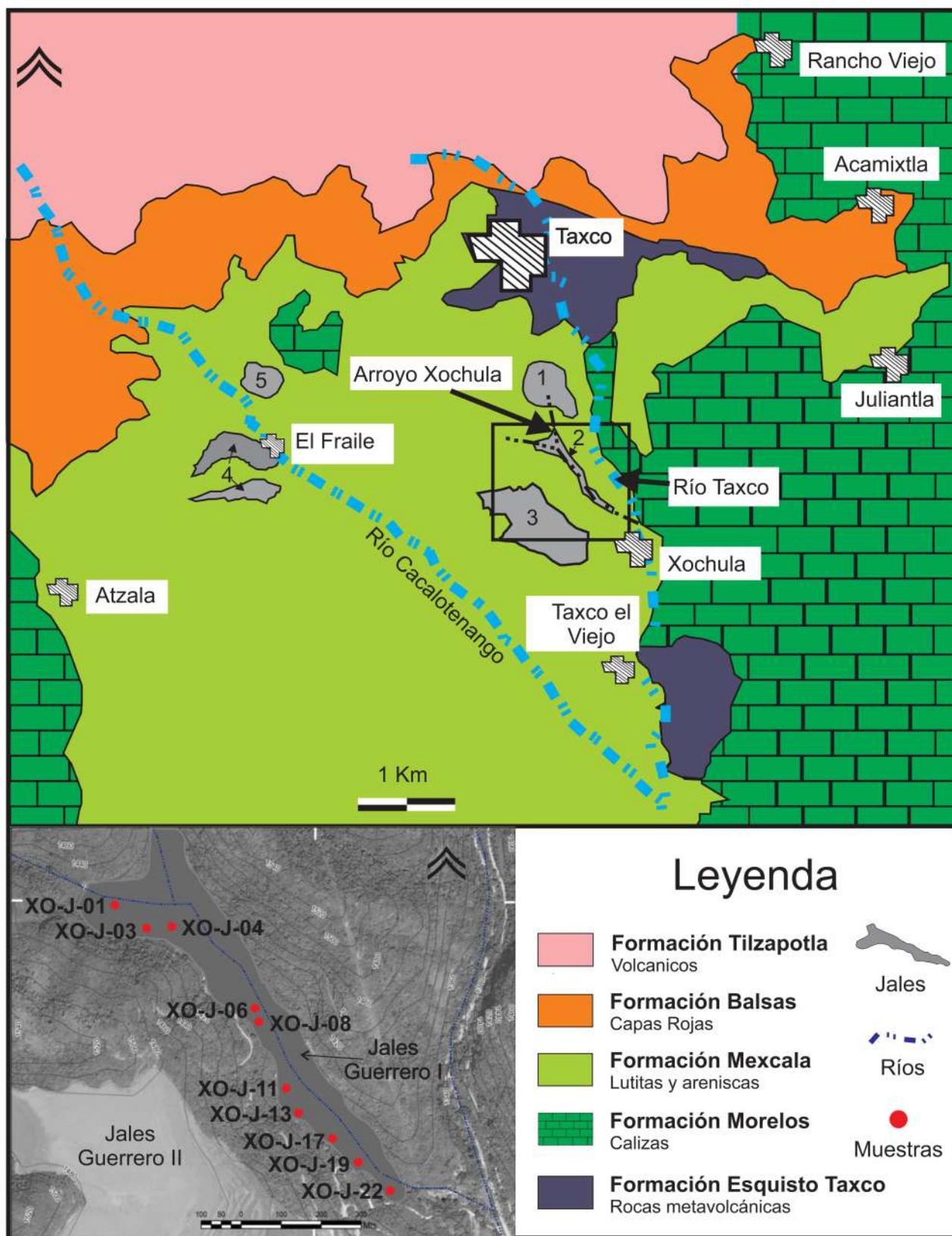


Figura 1. Mapa geológico de la región de Taxco de Alarcón, Guerrero según Campa y Ramírez (1979) mostrando la ubicación de los depósitos de jales mineros: 1. Jales El Solar; 2. Jales Guerrero I; 3. Jales Guerrero II; 4. Jales El Fraile; 5. Jales La Concha. En el recuadro se muestra la ubicación de los Jales Guerrero I y la localización de las muestras estudiadas.

utilizada para evaluar de manera integral el potencial de emisión de EPT provenientes de materiales granulados (suelos, sedimentos, jales, polvo) al ambiente. Tal y como fue originalmente planteada por Tessier et al. (1979), la extracción secuencial cuantifica los EPT asociados a cinco fracciones: 1) intercambiable; 2) asociada a carbonatos; 3) asociada a oxihidróxidos de Fe-Mn; 4) asociada a la materia orgánica/sulfuros; y, 5) fracción residual. Aunque se han propuesto un gran número de modificaciones, el procedimiento (con modificaciones o no) sigue siendo ampliamente utilizado ya que cuantifica las fracciones que pueden ser emitidas al medio ambiente bajo diferentes condiciones, por diferentes mecanismos y en distintos tiempos.

En este estudio se realizó la caracterización mineralógica y se cuantificaron los contenidos de Cd, Cu, Fe, Mn y Zn asociados a cinco fracciones químicas (Sol: Solubles; Ads: Adsorbida; Carb: Carbonatos; Fe-OH: Oxihidróxidos de Fe y OM/S: Materia Orgánica/Sulfuros) y los contenidos totales en los Jales Guerrero I ubicados en el Distrito Minero de Taxco de Alarcón, en el Estado de Guerrero, México con los propósitos de:

- 1.- Determinar la evolución mineralógica durante los procesos de oxidación;
- 2.- Evaluar el potencial real de emisión de EPT al ambiente e identificar su probable forma química de emisión de acuerdo con la fracción en que se encuentre asociado;
- 3.- Determinar la fracción ambientalmente biodisponible y;
- 4.- Determinar el fraccionamiento geoquímico de los EPT entre los jales no oxidados y los oxidados.

Marco ambiental del Distrito Minero de Taxco de Alarcón, Guerrero

La región minera de Taxco se localiza en la zona norte

del Estado de Guerrero, sur de México en las coordenadas 18° 33' 16" N y 99° 36' 21" W (véase Figura 1). Las unidades litológicas reconocidas en el área incluyen rocas metamórficas de la Formación Esquistos Taxco del Cretácico Inferior, calizas arrecifales de la Formación Morelos del Albiano-Cenomaniano, lutitas y areniscas de la Formación Mezcala del Turoniano-Maastrichtiano, capas rojas de la Formación Balsas del Eoceno, y rocas volcánicas ácidas de la Formación Tilzapotla del Eoceno-Oligoceno (Campa y Ramírez, 1979; Campa, Torres de León, Iriondo y Premo, 2015).

El Distrito Minero de Taxco de Alarcón Guerrero es uno de distritos más antiguos de América con evidencias de explotación desde la Época Precolombina (Consejo de Recursos Minerales [CRM], 1999). Con más de 500 años de explotación de metales preciosos (Ag, Au) y metales base (Cu, Pb, Zn) utilizando una variedad de métodos de procesamiento metalúrgico (e.g. reducción por fuego, amalgamación, flotación selectiva). La actividad minera ha producido grandes cantidades de desechos mineros que han sido acumulados en los alrededores de las minas. Debido a que muchos de los desechos de mina más antiguos (antes del siglo XX) se encuentran enterrados o han sido reprocesados, no existen muchas evidencias visuales de residuos mineros antiguos en la región. En cambio, los depósitos de residuos mineros producidos en la última etapa de explotación (1920 a la fecha) son fácilmente visibles en la zona (véase Figura 1). Se han reconocido seis grandes acumulaciones o presas de jales (La Concha, El Fraile, Barrio de los Jales, El Solar, Guerrero I y Guerrero II), las cuales contienen alrededor de 55 millones de toneladas de residuos con diferentes grados de oxidación desde no oxidados hasta fuertemente oxidados (Talavera, Yta, Moreno y Dótor, 2005). Las presas de jales fueron invariablemente construidas como rellenos de barrancas.

Ha sido claramente establecido que los depósitos de

Tabla 1. Localización geográfica en coordenadas UTM, pH y conductividad eléctrica de las muestras de jales no oxidados y oxidados estudiados del depósito Guerrero I de Taxco, Guerrero.

Muestra	Coordenadas		pH	Conductividad Eléctrica
	NORTE	OESTE		mS/cm
Jales no oxidados				
XO-J-01	2049289	14 Q 437056	7.46	0.63
XO-J-03	2049240	14 Q 437131	7.64	0.45
XO-J-04	2049244	14 Q 437197	6.76	0.30
Jales oxidados				
XO-J-06	2049051	14 Q 437405	2.90	0.30
XO-J-08	2049019	14 Q 437419	2.80	0.69
XO-J-11	2048871	14 Q 437484	2.45	1.30
XO-J-13	2048814	14 Q 437514	2.20	0.69
XO-J-17	2048755	14 Q 437602	3.09	0.23
XO-J-19	2048699	14 Q 437664	2.40	0.39
XO-J-22	2048637	14 Q 437746	3.70	0.30

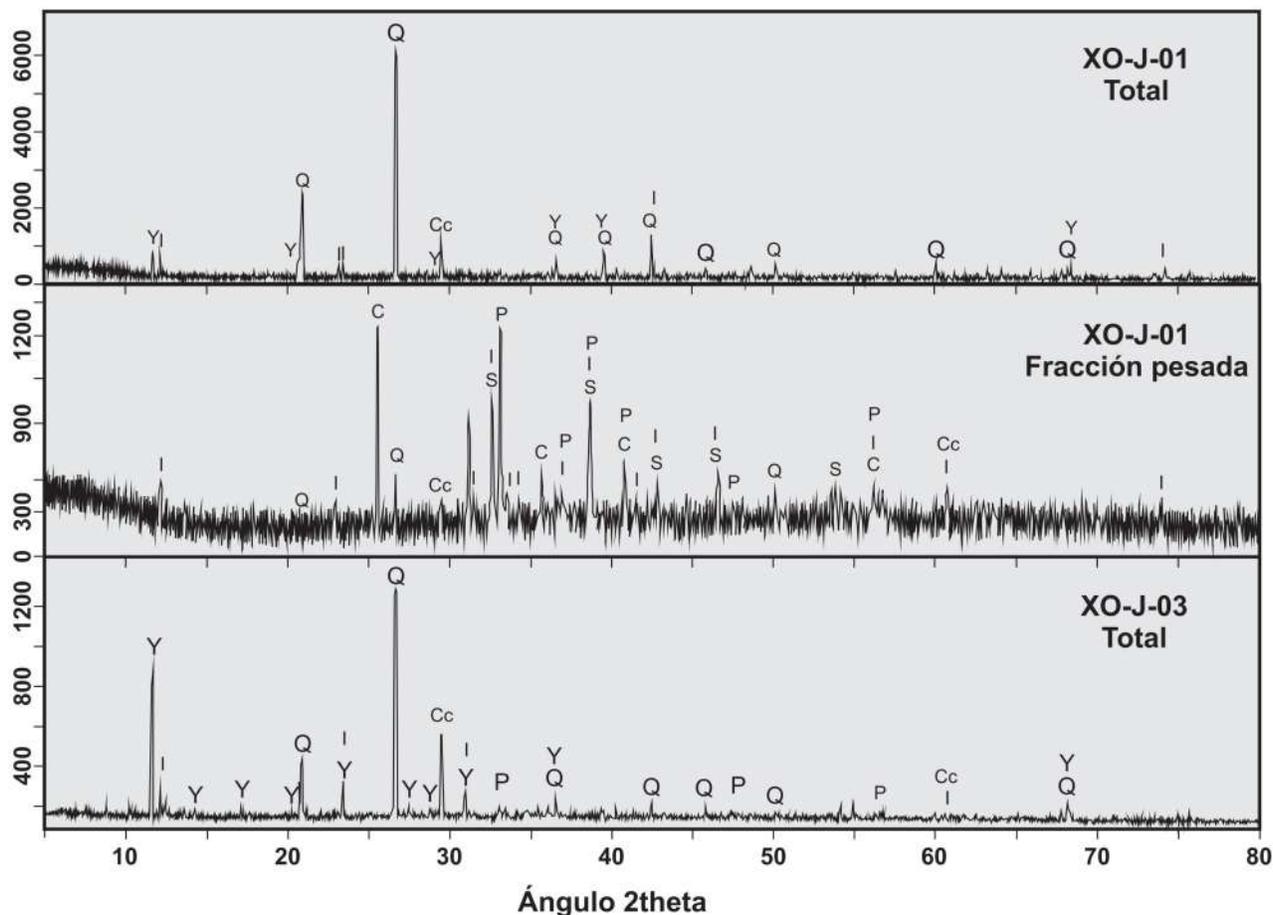


Figura 2.- Difractogramas de muestras representativas de jales no oxidados del depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero. Q = Cuarzo; Cc = Calcita; Y = Yeso; I = Ilvaíta; P = Pirita; S = Smithsonita; C = Cerusita.

jales de Taxco tienen un gran potencial para dispersar los EPT tanto en particulado como en formas químicas fácilmente asimilables por la biota incluyendo el hombre (Armienta-Hernández, Talavera, Villaseñor, Espinosa, Pérez-Martínez, Cruz, Ceniceros y Aguayo, 2004; Talavera et al., 2005; Romero, Armienta y González-Hernández, 2007). Debido al importante papel que juega el agua superficial en la vida cotidiana de los pobladores de la zona, la afectación de los recursos hídricos ha sido ampliamente estudiada. Los estudios indican que los dos principales ríos de la región, el Río Cacalotenango y el Río Taxco (además de sus afluentes), presentan altas concentraciones de EPT (Arcega-Cabrera, Armienta, Daesslé, Castillo-Blum, Talavera y Dótor, 2009; Dótor-Almazán, Armienta, Arcega-Cabrera y Talavera, 2014; Talavera, Ruiz, Díaz-Villaseñor, Ramírez-Guzmán, Cortés, Salgado-Souto, Dótor-Almazán y Rivera-Bustos, 2016). Por otro lado, los suelos de cultivo y urbanos localizados alrededor de los depósitos de jales se encuentran severamente afectados con concentraciones que superan en más de un orden de magnitud los valores regionales de fondo geoquímico (Talavera et al., 2005; Dótor-Almazán, Armienta, Talavera y Ruiz, 2018). Los estudios de Gómez-Bernal, Santana-Carrillo, Romero-Martin, Armienta, Morton-Bermea y

Ruiz-Huerta en el 2010, así como los de Ruiz-Huerta y Armienta en el 2012, indican que tanto las plantas nativas como las de consumo humano translocan EPT y representan una importante vía de acceso tanto a la fauna como al hombre. Finalmente, se indica que tanto los niños como las mujeres en edad reproductiva presentan evidencias de ingestión de EPT representando así un potencial riesgo para su salud (Moreno-Godínez, Acosta-Saavedra, Meza-Figueroa, Vera, Cebrián, Ostrosky-Wegman y Calderón-Aranda, 2010; Vázquez-Bahena, Talavera, Moreno-Godínez, Salgado-Souto, Ruiz y Huerta-Beristain, 2017; Soto-Ríos, Juárez-Pérez, Rendón-Gandarilla, Talavera y Aguilar-Madrid, 2017).

Materiales y Métodos

Se estudiaron diez muestras del depósito de Jales Guerrero I depositados a lo largo del cauce del Arroyo Xochula al sureste de la ciudad de Taxco, Guerrero (véase Tabla 1). Tres muestras (XO-J-01, XO-J-03 y XO-J-04) provienen de jales no oxidados y las siete restantes (XO-J-06, XO-J-08, XO-J-11, XO-J-13, XO-J-17, XO-J-19 y XO-J-22) fueron tomadas de horizontes fuertemente oxidados. En este estudio se consideran jales no oxidados aquellos jales de color grisáceo que no muestran signos visibles de

Tabla 2. Extracción secuencial y contenidos totales de los jales no oxidados del depósito Guerrero I de Taxco, Guerrero. La tabla en gris contiene la media aritmética \pm DE de cada una de las fracciones analizadas. FAD = Fracción Ambientalmente Disponible.

XO-J-01						
Fracción	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn kg ⁻¹	mg Zn	mg kg ⁻¹
Sol	0.150	<LD	1.43	0.475		3.70
Ads	4.125	0.300	0.150	11.0		51
Carb	16.10	21.73	58	1139		996
Fe-OH	53	11.6	4032	4221		6920
OM	108	101	25750	1854		2165
Sum	181	135	29841	7225		10136
Total	263	138	90167	13508		11061
FAD (%)	68.8	97.7	33.1	53.5		91.6

XO-J-03						
Fracción	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn kg ⁻¹	mg Zn	mg kg ⁻¹
Sol	0.100	0.025	1.50	0.425		2.28
Ads	7.20	0.275	0.050	10.8		33.8
Carb	23.0	26.3	125	1037		1643
Fe-OH	14.15	10.5	3028	4384		2903
OM	28.3	65	19470	1271		1611
Sum	73	102	22624	6703		6192
Total	110	101	57427	10026		6550
FAD (%)	66.1	100.3	39.4	66.9		94.5

XO-J-04						
Fracción	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn kg ⁻¹	mg Zn	mg kg ⁻¹
Sol	0.100	0.050	0.700	0.400		1.58
Ads	5.53	0.325	0.050	13.9		41.9
Carb	14.05	24.7	137	1371		941
Fe-OH	13.05	9.85	656	4538		1765
OM	21.8	73	19795	1478		1330
Sum	54	108	20589	7400		4078
Total	101	105	57475	10116		4266
FAD (%)	53.9	102.1	35.8	73.2		95.6

Estadística básica (media \pm DE) de los jales no oxidados					
Fracción	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Sol	0.117 \pm 0.029	0.038 \pm 0.025	1.21 \pm 0.442	0.433 \pm 0.038	2.52 \pm 1.08
Ads	5.62 \pm 1.54	0.300 \pm 0.025	0.083 \pm 0.058	11.8 \pm 1.71	42.4 \pm 8.80
Carb	17.73 \pm 4.70	24.3 \pm 2.32	107 \pm 42.5	1182 \pm 171	1193 \pm 390
Fe-OH	26.8 \pm 22.9	10.6 \pm 0.862	2572 \pm 1733	4381 \pm 159	3863 \pm 2708
OM	53 \pm 47.8	80 \pm 19.1	21672 \pm 3536	1534 \pm 295	1702 \pm 425

oxidación mientras que se consideran jales oxidados aquellos de color amarillo-rojizo con evidentes signos de oxidación. De cada muestra se recolectó alrededor de un Kg. utilizando materiales de polipropileno de baja densidad previamente lavados con HNO_3 y agua desionizada.

Se colocaron en bolsas de plástico perfectamente selladas. Posteriormente, fueron trasladadas al Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero para su conservación y procesamiento. Una vez en el laboratorio, las muestras se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron con malla No. 10 para recuperar las partículas menores a 2 mm de diámetro. Posteriormente, alrededor de 250 g. de esta fracción fue pulverizada utilizando un mortero de ágata para recuperar la fracción $< 63 \mu\text{m}$, la cual fue utili-

zada para los análisis químicos.

La caracterización mineralógica se realizó utilizando una combinación de la técnica de Difracción de Rayos X con un Difractómetro Bruker D8 modelo Advance de ECO y la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido [MEB] usando un Microscopio Electrónico de Barrido Jeol modelo IT300, para la identificación de las diferentes fases químicas, la obtención de imágenes, y los microanálisis se realizaron por espectroscopía de energía dispersiva y de longitud de onda [EDS-WDS de Bruker] en los Laboratorios de Geoquímica y Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero. Estos estudios se realizaron en dos muestras representativas de los jales no oxidados (XO-J-01 y XO-J-03) y dos de los jales oxida-

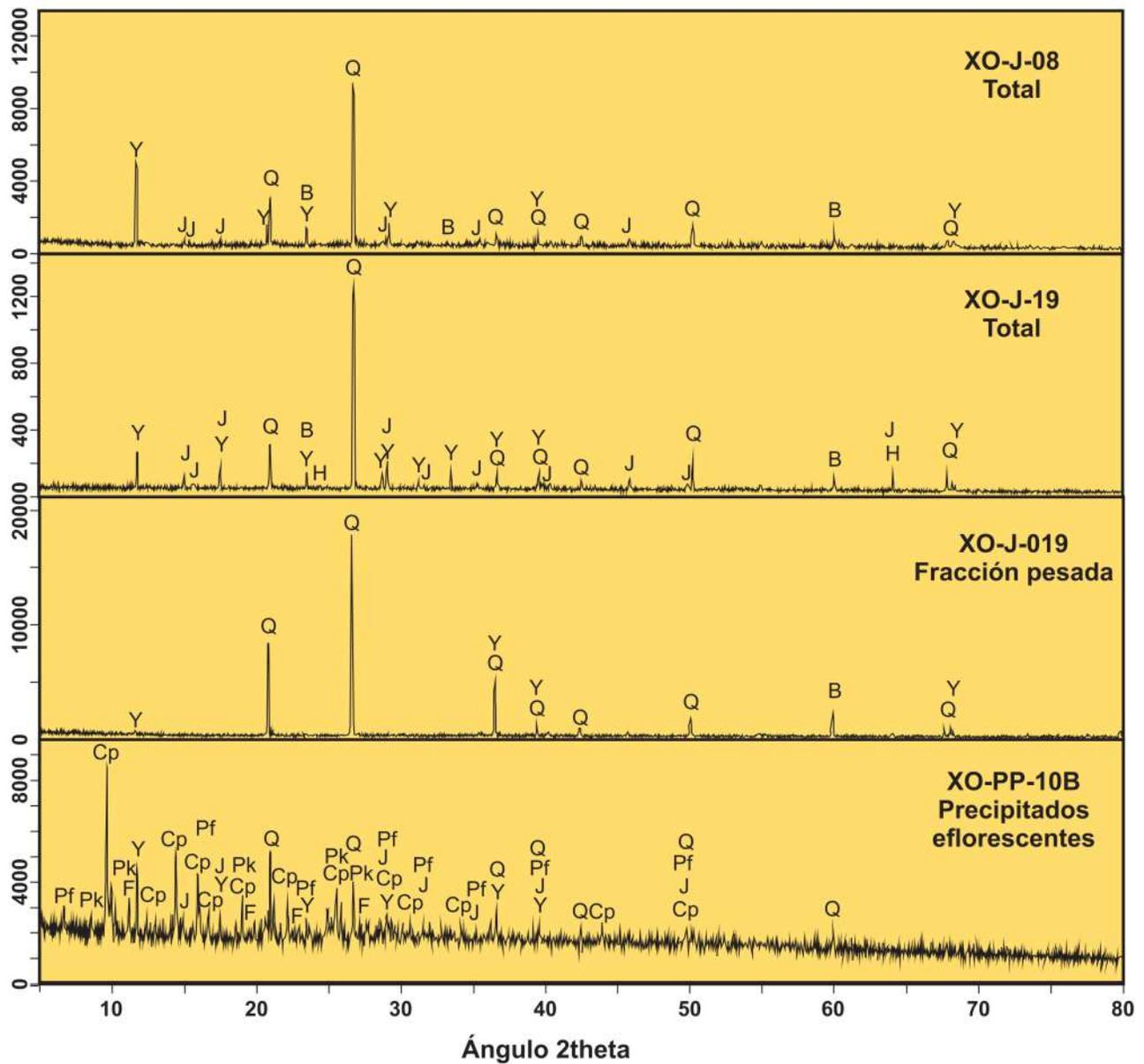


Figura 3. Difractogramas de muestras representativas de jales oxidados del depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero. Q = Cuarzo; Y = Yeso; Pf = Picrofarmacolita; Pk = Pikeringita; Cp = Copiapita; F = Hidroniumfarmacosiderita; J = Jarosita; B = Bernalita

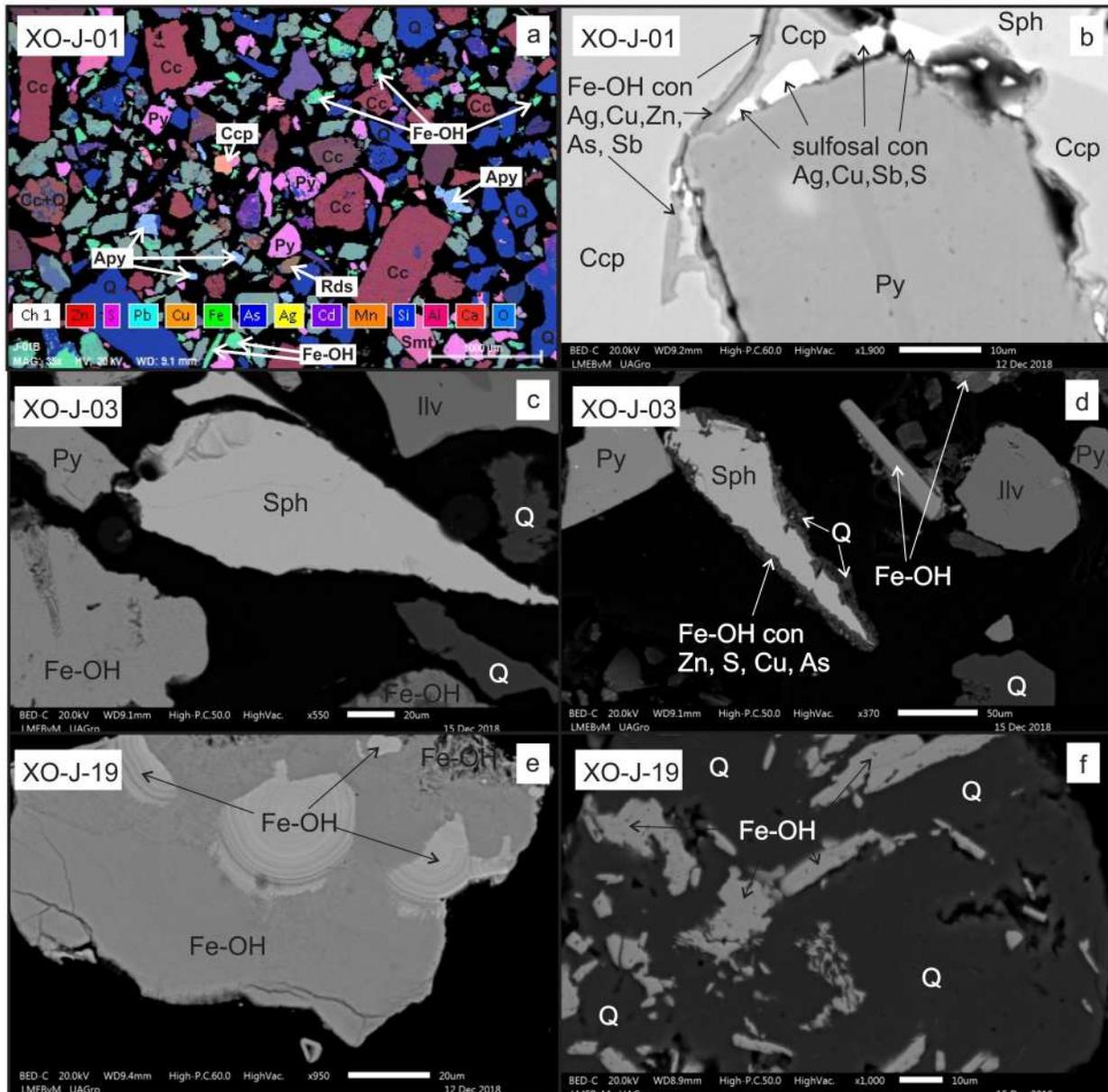


Figura 4.- Imágenes de electrones retrodispersados de muestras representativas de jales no oxidados y oxidados del depósito Guerrero I de Taxco, Guerrero. **a)** mapa composicional de la muestra XO-J-01 mostrando la diversidad mineralógica de los jales no oxidados; **b)** Calcopirita y esfalerita asociadas a una sulfosal de Ag, Cu, Sb y S en la misma muestra de jales no oxidados XO-J-01. Se observa oxidación incipiente de los sulfuros generando oxihidróxidos de Fe conteniendo Ag, Pb, Zn, As y Sb; **c)** y **d)** Mineralogía de una muestra representativa (XO-J-03) de los jales no oxidados donde se reconocen cuarzo, ilvaite, esfalerita, pirita y oxihidróxidos de Fe cristalinos y como producto de transformación de esfalerita rica en Fe (marmatita); **e)** y **f)** Mineralogía representativa de una muestra representativa (XO-J-19) de jales oxidados donde se reconocen oxihidróxidos de Fe concrecionales, cristalinos y aciculares. Estos últimos encapsulados en cuarzo. Ccp = Calcopirita; Py = Pirita; Fe-OH Oxihidróxidos de Fe; Q = Cuarzo; Ilv = Ilvaite; Sph = Esfalerita; Apy = Arsenopirita; Cc = Calcita; Rds = Rodocrosita.

dos (XO-J-08 y XO-J-19). A las muestras XO-J-01 y XO-J-19 se les realizó adicionalmente, una preconcentración de la fracción mineral pesada con plato de gambusino para resaltar las potenciales fases portadoras de EPT haciendo uso de XRD y EDS-MEB.

El pH y la Conductividad Eléctrica [CE] de los jales mineros se determinaron en la fracción < 2 mm en una solución en proporción de 1:5 p/v (jales/agua desionizada)

siguiendo el método 9045D de la *United States Environmental Protection Agency* [USEPA] (2000). El pH se midió utilizando un potenciómetro OAKTON pH 11 series y la CE con un conductímetro HORIBA, modelo ES14E con estabilización y compensación automática de temperatura.

La extracción secuencial química se realizó siguiendo una modificación del método de Tessier et al. (1979), de acuerdo con Loring y Rantala (1992). Se determinaron las

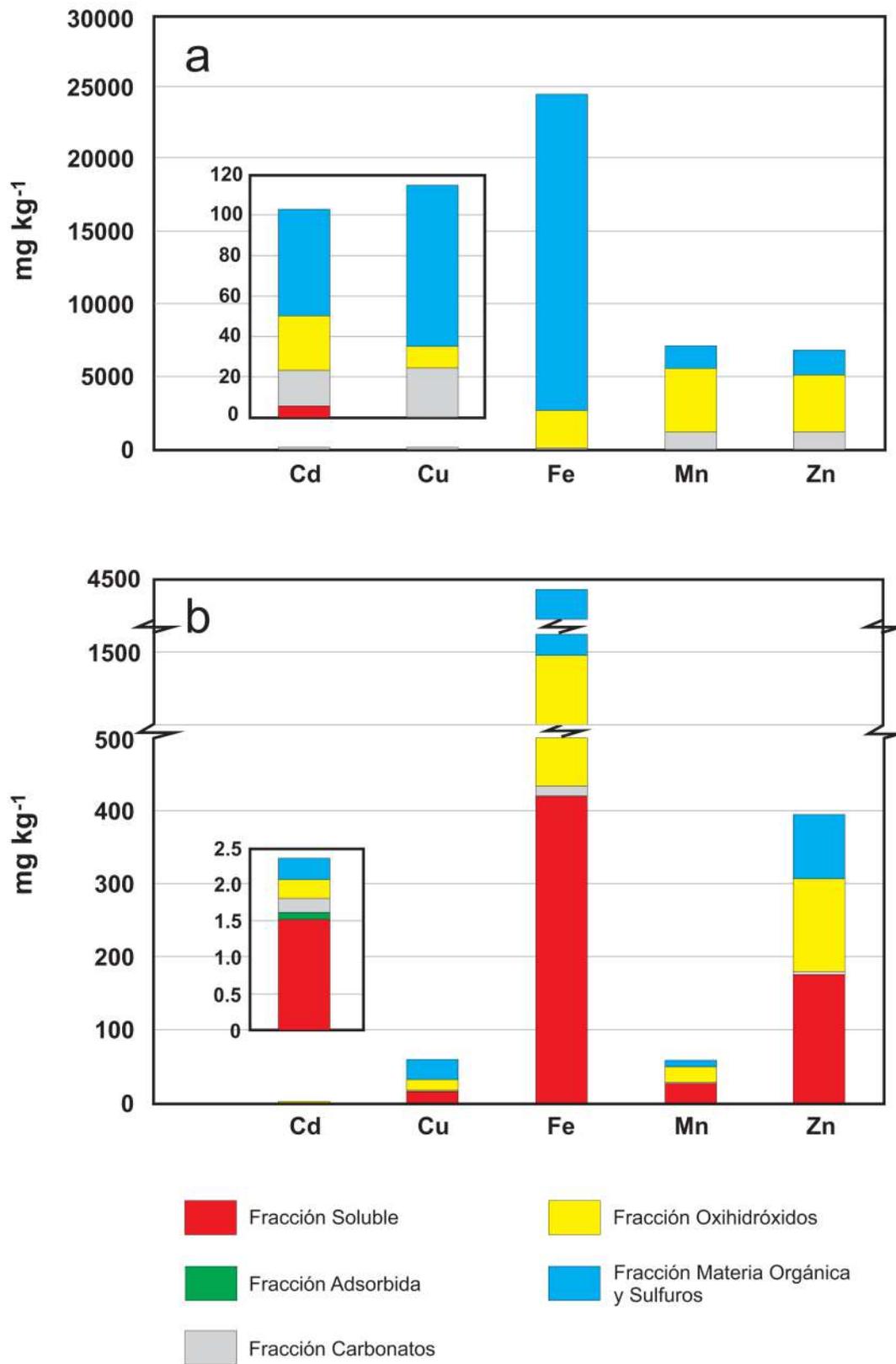


Figura 5. Distribución del Cd, Cu, Fe, Mn y Zn en las fracciones químicas soluble, adsorbida, carbonatos, oxihidróxidos de Fe y materia orgánica/sulfuros en los jales no oxidados (a) y oxidados (b) del depósito Guerrero I de Taxco, Guerrero.

fracciones soluble (H_2O ; 1 h); adsorbida (NaOAc 1 M, 1 h); asociada a carbonatos [NaOAc 1M (pH 5), 5 h]; asociada a oxihidróxidos de Fe ($\text{NH}_2\text{OH} + \text{HCl}$ 0.04 M en 25% v/v OHAc , 6 h) y la asociada a materia orgánica/sulfuros [HNO_3 0.02 M + H_2O_2 al 30% (pH 2)]; posteriormente acetato de amonio 3.2 M en 20 % v/v HNO_3 , 0.5 h]. La suma de los contenidos de estas fracciones es considerada como la fracción máxima de contaminantes que pueden liberarse al ambiente a través de procesos naturales también conocida como la Fracción Ambientalmente Disponible [FAD] de acuerdo con McGeer, Henningsen, Lanno, Fisher, Sappington y Drexler (2004). La concentración total de los EPT en los jales mineros se determinó de acuerdo con el método EPA 3050B. Las concentraciones de los EPT tanto en las fracciones analizadas como en la total se analizaron por espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado utilizando un ICP-AES Perkin-Elmer Optima 3200 DV usando los estándares multielementales certificados CWW-TM-D; CWW-TM-H; CWW-TM-A, CWW-TM-E para la calibración y el estándar CWW-SOIL-B para chequeo. Los límites de cuantificación del método para los diferentes elementos fueron reportados por Talavera, Armienta, García-Abundis y Flores-Mundo (2006) y son: Cd = 0.005 mg L⁻¹; As and Pb = 0.010 mg L⁻¹; Fe, Mn, Cu y Zn = 0.025 mg L⁻¹. Estas determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica de la Universidad Autónoma de Guerrero.

Resultados

Caracterización mineralógica

La identificación de las fases minerales a través de la DRX (véase Figura 2) revela que los jales no oxidados están constituidos mayoritariamente por cuarzo [SiO_2], calcita [CaCO_3], hematita [Fe_2O_3], ilvaíta [$\text{CaFe}_3(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})$], biotita [$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2)$], pirita [FeS_2], esfalerita [ZnS], smithsonita [ZnCO_3], cerusita [PbCO_3], hidrotalcita [$\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$] y yeso [$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$]. Por su parte, el uso de EDS acoplado a un MEB (véase Figura 4), revela que los jales no oxidados contienen trazas de otros minerales como la calcopirita [CuFeS_2], arsenopirita [FeAsS], galena [PbS], pirargirita [Ag_3SbS_3], bournonita [PbCuSbS_3], dolomita [$(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$], manganocalcita [$(\text{Ca}, \text{Mn})\text{CO}_3$], rodocrosita [MnCO_3], barita [BaSO_4] y clorita [$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Li})_6\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$]. Además, se detectó por primera vez una fase compuesta de S, Ag, Cu y Sb que no ha podido ser identificada hasta el momento, pero cuya estequiometría sugiere que se trata de un sulfosal de la serie argentotenantita-argentotetraedrita.

La mineralogía de los jales oxidados cambia sustancialmente y la DRX en combinación con el EDS-MEB (véanse Figuras 3 y 4), indican que están constituidos mayoritariamente por cuarzo, yeso, barita, ilvaíta, hematita, bernalita [$\text{Fe}(\text{OH})_3$], jarosita [$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$], feldspato potásico [$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$] y vermiculita [$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$]. Talavera et al. (2005), reportan trazas de calcosina [Cu^2S]. Los jales oxidados muestran una gran cantidad de minerales eflorescentes producidos por la evaporación de los lixiviados generados por la interacción del agua meteórica con los jales. Una muestra (XO-10B) de estos minerales eflorescentes indica que están

constituidos por copiapita [$\text{Fe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2\cdot 20\text{H}_2\text{O}$], magnesiocopiapita [$\text{MgFe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2\cdot 20\text{H}_2\text{O}$], carfosiderita [$(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$] hidroniumfarmacosiderita [$(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$], picrofarmacolita [$\text{Ca}_4\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2(\text{HAsO}_4)_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$], yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y pickeringita [$\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4\cdot 22\text{H}_2\text{O}$]. Otros minerales eflorescentes reportados por Talavera et al. (2005) en los jales oxidados de la presa Guerrero I son nimita [$(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$] y rozenita [$\text{FeSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$].

Extracción secuencial

Jales no oxidados

Los resultados de la extracción secuencial, así como la estadística básica de las muestras de jales no oxidados del depósito Guerrero I se presentan en la Tabla 2 y los resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 5a. La distribución general de las fracciones en los jales no oxidados es:

Cd	OM/S > Fe-OH > Carb > Ads > Sol
Cu	OM/S > Carb > Fe-OH > Ads > Sol
Fe	OM/S > Fe-OH > Carb > Sol > Ads
Mn	Fe-OH > OM/S > Carb > Ads > Sol
Zn	Fe-OH > OM/S > Carb > Ads > Sol

Las fracciones Sol y Ads son las más lábiles y, por lo tanto, las fracciones que mayor impacto causan en los recursos naturales y en la biota (Tessier et al., 1979). Afortunadamente, estas fracciones son las que presentan las concentraciones más bajas en los jales no oxidados. La media aritmética \pm desviación estándar de Cd en la fracción Sol es de 0.117 ± 0.029 mg kg⁻¹ mientras que en la fracción Ads es de 5.62 ± 1.54 mg kg⁻¹. Por su parte, el Cd asociado a la fracción MO/S y a los Fe-OH es mucho más elevado alcanzando concentraciones de 53 ± 47.8 mg kg⁻¹ y de 26.8 ± 22.9 mg kg⁻¹, respectivamente. El Cd asociado a la fracción Carb (17.73 ± 4.70 mg kg⁻¹) presenta concentraciones intermedias.

Las concentraciones de Cu fueron las más bajas en las fracciones Sol (0.038 ± 0.025 mg kg⁻¹) y Ads (0.300 ± 0.025 mg kg⁻¹). El Cu se encuentra mayoritariamente asociado a las fracciones MO/S (80 ± 19.1 mg kg⁻¹) y Carb (24.3 ± 2.32 mg kg⁻¹), siendo la concentración asociada a los Fe-OH ligeramente menor (10.6 ± 0.862 mg kg⁻¹). La distribución del Fe fue similar al Cu en las fracciones Sol (1.21 ± 0.442 mg kg⁻¹) y Ads (0.083 ± 0.058 mg kg⁻¹), que reportaron los menores contenidos para ambos elementos, en tanto que las concentraciones en las fracciones asociadas a la MO/S ($21\ 672 \pm 3\ 536$ mg kg⁻¹) y Fe-OH ($2\ 572 \pm 1\ 733$ mg kg⁻¹) fueron las más altas.

El contenido de Fe en la fracción de Carb (107 ± 42.5 mg kg⁻¹) fue intermedia entre estos dos grupos. El Mn y el Zn presentaron la misma distribución. Las concentraciones menores se encontraron en las fracciones Sol y Ads. En el caso del Mn, las concentraciones fueron de 0.433 ± 0.038 mg kg⁻¹ para la fracción Sol y de 11.8 ± 1.71 mg kg⁻¹ para la fracción Ads. Para el Zn de 2.52 ± 1.08 mg kg⁻¹ en la fracción Sol y 42.4 ± 8.80 mg kg⁻¹ en la fracción Ads. Las concentraciones asociadas a los Fe-OH y a la MO/S son las más abundantes en ambos ele-

Tabla 3. Extracción secuencial y contenidos totales de los jales oxidados del depósito Guerrero I de Taxco, Guerrero. La tabla en gris contiene la media aritmética \pm DE de cada una de las fracciones analizadas. FAD = Fracción Ambientalmente Disponible.

XO-J-06					
Fraction	Cd mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Mn mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
Sol	1.28	8.38	2.08	19.5	107
Ads	0.125	0.225	0.075	0.225	0.325
Carb	0.300	5.75	78	<LD	7.7
Fe-OH	0.25	10.4	237	28.9	91
OM/S	0.15	26.5	2955	10.8	63
Sum	2.10	51	3272	59	270
Total	7.44	189	43074	114	751
FAD (%)	28.2	27.1	7.6	52.2	35.9
XO-J-08					
Fraction	Cd mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Mn mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
Sol	3.00	21.4	43.3	41.7	339
Ads	0.100	0.200	0.075	0.325	0.350
Carb	0.275	3.13	18.1	1.83	11.0
Fe-OH	0.300	36.3	242	22.9	439
OM/S	0.200	54	2121	28.6	242
Sum	3.88	115	2424	95	1032
Total	9.41	424	69934	302	3002
FAD (%)	41.2	27.0	3.5	31.5	34.4
XO-J-11					
Fraction	Cd mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Mn mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
Sol	2.23	6.13	7.68	59	264
Ads	0.150	<LD	0.175	0.250	0.200
Carb	0.425	0.225	0.400	<LD	2.10
Fe-OH	0.450	8.75	1024	19.0	83
OM/S	1.15	33.0	5330	<LD	167
Sum	4.40	48.1	6362	78	517
Total	15.3	192	54635	232	1339
FAD (%)	28.8	25.1	11.6	33.6	38.6
XO-J-13					
Fraction	Cd mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Mn mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
Sol	2.35	58	2880	16.6	337
Ads	0.075	0.225	0.150	0.125	0.425
Carb	0.100	0.325	2.73	1.03	1.18
Fe-OH	0.150	11.9	1863	8.50	58
OM/S	0.100	30.4	1940	1.05	33.4
Sum	2.78	100	6685	27.3	429.85
Total	4.55	140	18425	29.4	503
FAD (%)	61.1	71.9	36.3	92.7	85.5
XO-J-17					
Fraction	Cd mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Mn mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
Sol	0.025	0.875	2.15	1.48	3.13
Ads	0.050	0.275	0.225	0.050	0.150
Carb	0.075	0.325	1.53	0.700	0.650
Fe-OH	0.050	9.10	1211	15.0	45.5
OM/S	0.050	12.7	2781	2.40	20.1
Sum	0.250	23.28	3995	19.63	69
Total	0.330	49.0	13708	29.4	155
FAD (%)	76	47	29	67	45
XO-J-19					
Fraction	Cd mg kg⁻¹	Cu mg kg⁻¹	Fe mg kg⁻¹	Mn mg kg⁻¹	Zn mg kg⁻¹
Sol	1.45	13.675	2.48	43.5	156.5
Ads	0.075	0.250	0.125	0.075	0.100
Carb	0.075	0.850	1.15	1.30	1.15
Fe-OH	0.150	16.0	1986	18.0	78
OM/S	0.150	24.40	2483	3.05	51
Sum	1.90	55	4472	66	287
Total	2.63	114	14313	95	644
FAD (%)	72.20	48	31	69	45

Tabla 3 (Cont..). Extracción secuencial y contenidos totales de los jales oxidados del depósito Guerrero I de Taxco, Guerrero. La tabla en gris contiene la media aritmética \pm DE de cada una de las fracciones analizadas. FAD = Fracción Ambientalmente Disponible.

XO-J-22					
Fraction	Cd mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
Sol	0.350	0.350	0.900	4.83	21.8
Ads	0.075	0.250	0.075	0.075	0.075
Carb	0.125	0.375	0.450	1.55	2.83
Fe-OH	0.400	9.05	938	37.1	97
OM/S	0.250	14.4	2643	6.20	36.7
Sum	1.20	24.4	3582	50	159
Total	1.16	34.0	11711	42.2	216
FAD (%)	103.9	71.7	30.6	117.6	73.4

Estadística básica (media \pm DE) de los jales oxidados					
Fracción	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Sol	1.53 \pm 1.08	15.48 \pm 19.96	420 \pm 1085	26.6 \pm 21.6	176 \pm 141
Ads	0.093 \pm 0.035	0.238 \pm 0.093	0.129 \pm 0.059	0.161 \pm 0.106	0.232 \pm 0.135
Carb	0.196 \pm 0.137	1.57 \pm 2.11	14.5 \pm 28.5	1.28 \pm 0.720	3.79 \pm 3.96
Fe-OH	0.250 \pm 0.144	14.5 \pm 9.95	1071 \pm 694	21.3 \pm 9.38	127 \pm 139
OM/S	0.293 \pm 0.383	27.8 \pm 13.7	2893 \pm 1132	8.68 \pm 9.99	87.7 \pm 84

mentos. Para el Mn la concentración promedio en la fracción de Fe-OH es de $4\,381 \pm 159$ mg kg⁻¹ y en la fracción de MO/S es $1\,534 \pm 295$ mg kg⁻¹. Para el Zn, la concentración en estas fracciones es de $3\,863 \pm 2708$ mg kg⁻¹ en los Fe-OH y de $1\,702 \pm 425$ mg kg⁻¹ en la MO/S.

Jales oxidados

La distribución de los EPT analizados en los jales oxidados del depósito Guerrero I se presentan en la Tabla 3 y en la Figura 5b. La distribución general de las fracciones en los jales no oxidados es:

Cd	Sol > MO/S > Fe-OH > Carb > Ads
Cu	MO/S > Sol > Fe-OH > Carb > Ads
Fe	MO/S > Fe-OH > Sol > Carb > Ads
Mn	Sol > Fe-OH > MO/S > Carb > Ads
Zn	Sol > Fe-OH > MO/S > Carb > Ads

La distribución de EPT en los jales oxidados fue marcadamente diferente con respecto a los no oxidados. De manera general, la liberación de EPT se incrementó sustancialmente de tal manera que para el Cd, Mn y Zn en la fracción Sol reportó las concentraciones más altas. Por el contrario, fue la fracción Ads donde se determinaron las menores concentraciones. La concentración de Cd en la fracción Sol fue de 1.53 ± 1.08 mg kg⁻¹ mientras que, el Cd en la fracción Ads fue de 0.093 ± 0.035 mg kg⁻¹. Al igual que en los jales no oxidados, el Cd asociado a la fracción MO/S fue el más abundante, aunque globalmente con bajas concentraciones (0.293 ± 0.383 mg kg⁻¹) seguido del Cd asociado a los Fe-OH (0.250 ± 0.144 mg kg⁻¹). El Cd asociado a la fracción de los Carb (0.196 ± 0.137 mg kg⁻¹) presenta concentraciones intermedias. En el Cu, la fracción Sol tuvo valores más variables pero elevados (15.48 ± 19.96 mg kg⁻¹) mientras que en la fracción Ads fueron más homogéneos y menores (0.238 ± 0.093 mg kg⁻¹). El Cu asociado a la MO/S representó la fracción con la concentración más alta (27.8 ± 13.7 mg kg⁻¹), mientras que la fracción de los Fe-OH tuvo concentraciones ligeramente menores (14.5 ± 9.95 mg kg⁻¹). La fracción asociada

a Carb tuvo concentraciones relativamente bajas (1.57 ± 2.11 mg kg⁻¹). El Fe en la fracción Sol presentó concentraciones altas y extremadamente variables de $420 \pm 1\,085$ mg kg⁻¹. La muestra XO-J-13 presentó las mayores concentraciones de $2\,880$ mg kg⁻¹ en la fracción Sol. Si esta muestra no fuera considerada en la estadística, la media aritmética baja de $1\,085$ a 9.76 mg kg⁻¹ aunque la desviación estándar ± 17.9 sigue siendo variable. En la fracción Ads la concentración determinada de Fe fue de 0.129 ± 0.059 mg kg⁻¹. El Fe asociado a la fracción MO/S tuvo las mayores concentraciones ($2\,893 \pm 1\,132$ mg kg⁻¹) seguido del Fe asociado a los Fe-OH con $1\,071 \pm 694$ mg kg⁻¹. El Fe asociado a la fracción de Carb fue relativamente bajo (14.5 ± 28.5 mg kg⁻¹). Al igual que en los jales no oxidados, el Mn y el Zn presentan una distribución de elementos idéntica. La fracción Sol es la que contiene mayores concentraciones de ambos elementos siendo de 26.6 ± 21.6 mg kg⁻¹ para el Mn y de 176 ± 141 mg kg⁻¹ para el Zn. La fracción Ads es la de menor concentración con un valor de 0.161 ± 0.106 mg kg⁻¹ (Mn) y de 0.232 ± 0.135 mg kg⁻¹ (Zn). En ambos elementos, la fracción asociada a los Fe-OH tuvo las mayores concentraciones de Mn 21.3 ± 9.38 mg kg⁻¹ y de Zn 127 ± 139 mg kg⁻¹ seguido de la fracción asociada a la MO/S con 8.68 ± 9.99 mg kg⁻¹ (Mn) y 87.7 ± 84 mg kg⁻¹ (Zn). La fracción asociada a Carb tuvo concentraciones relativamente bajas en ambos elementos (Mn = 1.28 ± 0.720 mg kg⁻¹; Zn = 3.79 ± 3.96 mg kg⁻¹).

Concentraciones totales

Las concentraciones totales de Cd, Cu, Fe, Mn, Zn y As en las muestras no oxidadas de los Jales Guerrero I fueron variables, pero generalmente altas (véase Tabla 2). El Cd varió de 101 a 263 mg kg⁻¹ con una concentración media de 158 ± 91 mg kg⁻¹. Las concentraciones de Cu fueron muy similares oscilando entre 101 y 138 mg kg⁻¹ con una media de 115 ± 20 mg kg⁻¹. Las concentraciones de Fe, Mn, Zn, As fueron sustancialmente mayores. El Fe fue el elemento con la mayor concentración registrada oscilando entre $57\,427$ y $90\,167$ mg kg⁻¹ con una media de $68\,356 \pm 18\,888$ mg kg⁻¹. El Mn es el segundo elemento

más abundante en los jales estudiados y su concentración varía entre 10 026 y 13 508 mg kg⁻¹, cuya media fue de 11 216 ± 1 985 mg kg⁻¹. Por su parte, el Zn fue el elemento que registró la mayor variación oscilando entre 4 266 y 11 061 mg kg⁻¹. Su concentración media fue de 7 292 ± 3 458 mg kg⁻¹.

En los jales oxidados, las concentraciones totales de los elementos medidos fueron diferentes (véase Tabla 3). Con excepción del Cu que arrojó mayores concentraciones en los jales oxidados, las concentraciones de los demás elementos son sustancialmente menores en los jales oxidados. Las concentraciones de Cd fueron muy bajas oscilando entre en límite de cuantificación y 15 mg kg⁻¹ mientras que el Cu arrojó concentraciones entre 34 y 424 mg kg⁻¹ con una media aritmética de 163 ± 131 mg kg⁻¹. Al igual que en los jales no oxidados, el Fe fue el elemento con las mayores concentraciones variando entre 11 711 y 69 934 mg kg⁻¹ con una media de 32 257 ± 23 512 mg kg⁻¹. Por su parte, el Mn presentó también bajas concentraciones totales cayendo en el rango entre 29 y 302 mg kg⁻¹ con una media aritmética y desviación estándar de 121 ± 107 mg kg⁻¹. El Zn fue uno de los elementos que mayor variabilidad registró con concentraciones mínimas y máximas de 155 y 3002 mg kg⁻¹. Esta alta variabilidad se vio reflejada en su media y desviación estándar que fueron de 944 ± 989 mg kg⁻¹.

Discusión

Evolución mineralógica durante la oxidación de los jales Guerrero I

Las fases mineralógicas identificadas por DRX y EDS-MEB en los jales no oxidados coinciden con las fases hipogénicas más abundantes reportadas en el yacimiento mineral de Taxco y en las litologías que hospedan la mineralización (Campa y Ramírez, 1979; Camprubí, González-Partida y Torres-Tafolla, 2006; Farfán-Panamá, Camprubí, González-Partida, Iriondo y González-Torres, 2015). En el yacimiento se han reportado otras especies particularmente de sulfuros (argentita, acantita, pirrotita, bornita, etc) y sulfosales (proustita, freibergita, polibasita, boulangerita, jamesonite, etc) que no fueron detectadas a través de la DRX en las muestras de los jales debido a que probablemente el proceso de beneficio moderno fue más eficiente con respecto al de beneficio de patio y su contenido actual en los jales debe ser muy bajo (<1%). Por otro lado, la DRX reveló la presencia de yeso e hidrotalcita, fases minerales que comúnmente se forman por la disolución y reacción de fases primarias como los sulfuros y los carbonatos. El yeso es una fase secundaria común en depósitos de jales y se origina por la oxidación de minerales sulfurados y la disolución de la calcita durante los procesos de neutralización de drenaje ácido de mina (Grover, Johnson, Billing, Weiersbye y Tutu, 2016; Van Driessche, Stawski, Benning y Kellermeier, 2017). La hidrotalcita, por su parte, es un mineral del grupo de las arcillas que se forma en condiciones neutras a alcalinas durante los procesos de neutralización y juega un papel importante en la retención de EPT (Douglas, Wendling, Pleysier y Trefry, 2010; Jawad, Peng, Liao, Zhou, Shahzad, Ifthikar, Zhao, Chen y Chen, 2019). Estos hallazgos nos indican que, aunque los jales no oxidados no muestran evidencias visibles de oxidación masiva, localmente este fenómeno ocurre generando condiciones

ácidas que son casi inmediatamente neutralizadas permitiendo la precipitación de estas fases minerales. Las observaciones realizadas a través del MEB indican que la oxidación ha tenido lugar en estos jales, aunque de manera limitada (véase Figura 4b). Es posible que los jales contengan aún residuos de iones del sulfato usado durante el proceso de flotación. Aunque este ion es generalmente lixiviable durante el lavado de los jales, sus residuos pueden quedar atrapados en el agua de poro de los jales y posteriormente reaccionar con los iones de calcio libres para formar yeso, lo que coincide con la hipótesis sugerida por Dótor-Almazán et al. (2018).

La mineralogía de los jales oxidados cambia sustancialmente debido a los procesos de oxidación de los sulfuros y a los procesos de neutralización. En los jales oxidados, ya no se detectaron sulfuros/sulfosales indicando que, en estos jales, el proceso de oxidación se encuentra en estado muy avanzado. La morfología de los oxihidróxidos de Fe revelada en el MEB es muy variada y sugiere que existen diferentes tipos y generaciones de oxihidróxidos de Fe (véase Figura 4). Algunos oxihidróxidos de hábito prismático se encuentran encapsulados en granos de cuarzo sugiriendo un origen hipogénico. Otros se originaron claramente por transformación de sulfuros primarios como la pirrita, otros más forman concreciones concéntricas o forman cristales aciculares. Estos tres últimos de oxihidróxidos parecen provenir de los procesos de oxidación en los jales mineros. Contrario a lo registrado en los jales no oxidados, los depósitos oxidados no contienen carbonatos lo cual indica que la capacidad de neutralización de estos jales ha alcanzado su límite. Estas observaciones son consistentes con el pH ácido generalizado de los jales oxidados haciéndolos un material muy susceptible de liberación de elementos tóxicos al ambiente.

La presencia de minerales eflorescentes, particularmente abundantes en época de secas, es un tópico de relevancia ambiental (Buzatu, Dill, Buzgar, Damian, Maftai y Apopei, 2016; Fosso-Kankeu, Manyatshe y Waanders, 2016; Goienaga, Carrero, Zuazagoitia, Baceta, Murelaga, Fernández y Madariaga, 2015; Valente et al., 2015). Aunque los minerales eflorescentes identificados a la fecha en la zona son principalmente sulfatos hidratados de Fe, Mg y Al, destaca la presencia de hidroniumfarmacosiderita y picrofarmacolita, arsenatos hidratados de Fe y Ca-Mg. Muchos estudios han demostrado que los minerales eflorescentes constituyen un reservorio importante de elementos tóxicos como el As, Pb, Cd, Cu, Fe y Zn, ya sea como especies absorbidas o adsorbidas y, que debido a que estos minerales tienen baja densidad y alta solubilidad, tienen gran potencial de dispersión de contaminantes por acción del viento o de la lluvia (Bigham y Nordstrom, 2000; Jambor, Nordstrom y Alpers, 2000; Nordstrom, 2011b; Grover et al., 2016). El estudio realizado por Lagunas-Núñez (2018) indica que los minerales eflorescentes del depósito estudiado contienen, además de altas concentraciones de As, Fe y Al, concentraciones significativas de Co (3.3-25.1 mg kg⁻¹), Cr (7.2-17.5 mg kg⁻¹), Ni (7.1-80 mg kg⁻¹) y V (<13.0 mg kg⁻¹), lo cual indica el alto peligro de contaminación por estos minerales.

Fraccionamiento Geoquímico

Los datos obtenidos en la extracción secuencial indica que, en los jales no oxidados, el Cd, Cu y Fe están ligados

principalmente a la fracción MO/S, particularmente a las fases sulfuradas debido al bajo contenido de materia orgánica reportado en el depósito (Talavera et al., 2005). A la fecha, no existen reportes de minerales sulfurados de Cd en el yacimiento mineral de Taxco, pero los análisis demuestran que el Cd es un elemento traza que se asocia al zinc en fases como la esfalerita y la smithsonita. Esto es consistente con los datos de Romero et al. (2007) quienes reportan altas concentraciones de Cd en la esfalerita. Por su parte, Talavera et al. (2005) señalan que, en los jales mineros de Taxco, el Cd y el Zn tienen un comportamiento geoquímico similar. Esto produce una correlación alta y evidencia una estrecha relación genética que explica la fuerte afinidad del Cd por la fracción de MO/S. El Cu y Fe se encuentran ligados probablemente a la calcopirita y pirita mientras que el Zn y una parte significativa de Fe están asociados a la esfalerita, tres fases minerales muy abundantes en el depósito mineral de Taxco y que fueron registradas como fases minerales residuales en los jales estudiados.

En los jales no oxidados, el Mn se encuentra asociado preferencialmente a los Fe-OH. En este estudio no se registraron oxihidróxidos de Mn, pero existen reportes sobre la presencia de pirolusita (MnO_2) en el depósito mineral de Taxco, aunque no se establece ni su abundancia ni su origen (Mindat, 2019). Se sabe, por otro lado, que el Mn presenta una gran afinidad con el Fe co-precipitando para formar oxihidróxidos o adsorbido en sus superficies particularmente en fases criptocristalinas o pobremente cristalizadas (Conrad, Hein, Paytan y Clague, 2017; Zhang, Zhou, Chen, Sun, Shi, Zhao y Chen, 2018). Aunque se han encontrado evidencias de oxidación por la presencia de yeso en los jales no oxidados, ésta es muy incipiente por lo que es más probable que los óxidos de Mn y la co-precipitación de este elemento en los Fe-OH sean las responsables del fraccionamiento preferencial del Mn por los Fe-OH. El Mn es un elemento que raramente forma minerales sulfurados en yacimientos epigenéticos de sulfidación intermedia como el de Taxco y no existe hasta la fecha ninguna fase sulfurada de Mn reportada en el yacimiento. Como se estableció anteriormente, el contenido de materia orgánica en los jales oxidados de Taxco es muy bajo y, por lo tanto, se requieren estudios detallados para determinar la estrecha asociación encontrada en este estudio entre el Mn y la fracción de MO/S. Finalmente, la asociación del Mn con las fases carbonatadas se debe a la variedad y abundancia de las fases carbonatadas reportadas en el yacimiento (i.e. rodocrosita, kutnohorita, manganoalcita y dolomita manganesífera).

El Zn presenta la misma distribución que el Mn lo cual sugiere que ambos elementos tienen cierta afinidad geoquímica. No se han reportado óxidos o hidróxidos de Zn en el yacimiento de Taxco por lo que la asociación mostrada por el Zn con los Fe-OH puede deberse a la gran afinidad que tiene el Fe con el Zn. Los resultados de este estudio demuestran que, en el yacimiento de Taxco, el Fe está siempre presente en cantidades variables y elevadas (0.92-7.13%) en la esfalerita y menores, pero significativas, en la smithsonita (0.56-1.18%). Sin embargo, en los Fe-OH, las concentraciones de Zn co-precipitado oscila entre el 2.29 y el 7.52%, lo cual podría explicar la gran afinidad del Zn con los Fe-OH. La asociación del Zn por la fracción de MO/S se debe a la presencia de esfalerita residual en los

jales, mientras que su asociación con los Carb está relacionada a la presencia de smithsonita.

En los jales oxidados, la distribución de los elementos cambia sustancialmente. La concentración de los EPT en la fracción soluble representa el cambio más sobresaliente lo cual demuestra que los procesos de oxidación aumentan la biodisponibilidad de los elementos estudiados. La fracción soluble es la fracción con mayor concentración de Cd, Mn y Zn mientras que para el Cu y Fe, esta fracción es la segunda después de la fracción de MO/S que permanece como fracción dominante en los jales oxidados. Estos datos indican que la oxidación de la esfalerita controla la disponibilidad del Zn y Cd, mientras que la disolución de los Fe-OH controla la concentración de Mn. Aunque en los jales oxidados no se encontraron relictos de sulfuros, la asociación preferencial del Cu y Fe a esta fracción y en menor proporción el Cd, Mn y Zn, indican que existen aún residuos de sulfuros en los jales oxidados que controlan la distribución de los EPT estudiados. Las concentraciones de EPT asociados en los Fe-OH son elevadas en el Fe, Mn y Zn y ligeramente menores en el Cd y Cu. Los Fe-OH son el producto más común de los procesos de oxidación de los jales mineros, por lo que la afinidad de los EPT estudiados por estas fases, es consistente con otros estudios reportado en muchas regiones de México y del mundo (Carrillo-Chávez, Salas-Megchún, Levresse, Muñoz-Torres, Pérez-Arvizu y Gerke, 2014; Ortiz, et al., 2007; Seo, Cheong, Yim, Min y Geroni 2017).

La presencia de EPT asociados a los Carb, aunque en concentraciones relativamente bajas, llama la atención debido al pH ácido que predomina en los jales oxidados (<4.0), el cual se encuentra por debajo del campo de estabilidad de los carbonatos (>6.5). Su presencia nos indica que en los jales oxidados deben existir aún fases carbonatadas que no han sido completamente destruidas. Aunque los análisis y observaciones no detectaron la existencia de fases carbonatadas en los jales oxidados, Talavera et al. (2005) reportan que en el depósito de jales oxidados de El Fraile (véase Figura 1), existen carbonatos en zonas restringidas por lo que no es imposible que en los jales estudiados existan aún relictos de estas fases. Las bajas concentraciones de EPT en esta fracción indican que su contenido en los jales oxidados Guerrero I debe ser muy bajo indicando, a su vez, que la presencia de carbonatos y los EPT asociados en los jales será de corta duración.

Potencial impacto ambiental de los Jales Guerrero I

La extracción secuencial indica que los jales no oxidados no representan un peligro potencial de impacto ambiental en el corto plazo debido a que los EPT se encuentran asociados a fases que requieren condiciones fisicoquímicas extremas para su liberación, así como un tiempo relativamente grande (Tessier et al., 1979). Los EPT estudiados en los jales presentan las concentraciones más bajas en las fracciones soluble y adsorbida, consideradas como las más lábiles y de mayor biodisponibilidad. Los EPT asociados a la fracción de Carb, aunque requieren mayor tiempo para ser liberados, son vulnerables a la acción de la lluvia ácida, un fenómeno que se ha acentuado en las últimas décadas aún en regiones no industriales (Baedecker y Reddy, 1993). Los EPT asociados a esta fracción son los terceros más bajos en los jales no oxidados, con excepción

del Cu que representa la segunda fracción en abundancia. Por otro lado, los datos indican que en estos jales el Cu y el Zn constituyen mayoritariamente la FAD (99.8% y 93.3%, respectivamente) y que sólo una fracción menor del Zn (~6.7%) se encuentra asociada a la fracción residual formando fases relativamente estables como silicatos o sales complejas (Tessier et al., 1979). Aun cuando el Cd y Mn constituyen la mayor parte de la FAD (Cd=65.0; Mn=63.4%, respectivamente), un gran porcentaje de estos elementos se encuentran en la fracción residual. De los EPT analizados, el Fe es el elemento que menos contribuye a la FAD (~35.6%) indicando que, en los jales no oxidados, la mayor parte del Fe está asociado a fases silicatadas. Así, la extracción secuencial indica que los jales no oxidados no presentan un peligro inminente de liberación de EPT al ambiente en el corto plazo pero que a mediano y largo plazo tienen el potencial de liberar una fracción significativa de EPT particularmente de Cu y Zn. En el cual, el potencial de liberación de EPT tiene el siguiente orden: Cu>Zn>Mn>Cd>Fe (Tabla 2).

En los jales oxidados, en cambio, el Cd, Mn y Zn están asociados a la fracción Sol y son los EPT detectados con la mayor concentración, la segunda mayor abundante para el Cu, lo cual indica el peligro ambiental que representan estos jales en la actualidad. En los jales oxidados, el Fe sufrió transformaciones importantes y ocurre en especies mucho más solubles comparado con los jales no oxidados y representa la tercera fracción más soluble. Los EPT asociados a las fracciones Ads y de Carb son las más bajas en estos jales. A pesar de esto, el hecho de que la fracción soluble se haya incrementado en estos jales los convierte en una fuente muy importante de emisión de los EPT estudiados (y potencialmente de otros), al medio ambiente. En estos jales, la FAD no representa la fracción mayoritaria en ninguno de los elementos analizados (Cd=40.4%, Cu=36.5%, Fe=13.6%, Mn=46.8% y Zn=41.8%) indicando que una buena parte de los EPT o han sido ya lixiviados o han formado compuestos estables formando parte ahora de las fases que componen la fracción residual. La disminución de los contenidos totales de Cd, Fe, Mn y Zn, entre los jales no oxidados y los jales oxidados (véanse Tablas 2 y 3) sugiere que tanto la reducción de la FAD como la total se deben probablemente a la lixiviación de los EPT de los jales.

Conclusiones

1. Los jales no oxidados del depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón, Guerrero tienen un pH neutro, moderada conductividad eléctrica y se caracterizan por contener una gran variedad de minerales entre los que sobresalen fases sulfuradas (pirita, esfalerita, calcopirita, arsenopirita y sulfosales de Ag) y carbonatadas (calcita, manganoalcita, dolomita, kutnohorita, rodocrosita). Estas fases están prácticamente ausentes en los jales oxidados y estos últimos están dominados por oxihidróxidos de Fe (hematita, bernalita).

2. Los jales oxidados del depósito Guerrero I de Taxco de Alarcón Guerrero presentan pH ácido y variable pero generalmente alta conductividad eléctrica. Estos jales oxidados se forman una gran variedad de minerales eflorescentes sulfatados de Ca, Mg y Al. Se destaca la presencia de hidroniumfarmacosiderita, un arsenato que atestigüa la cantidad de As soluble liberado por estos jales. Los mine-

rales eflorescentes representan un reservorio de elementos tóxicos en las formas químicas más disponibles en el ambiente.

3. La identificación de las fases minerales primarias y secundarias identificadas en los jales estudiados pueden aportar mucha información acerca de los procesos de transformación y liberación de EPT al ambiente.

4. Tanto los jales no oxidados como los oxidados contienen altas concentraciones de los metales Cd, Cu, Fe, Mn y Zn que los convierte en posibles emisores al medio ambiente, siendo los jales no oxidados los que contienen las mayores concentraciones. 5. Los jales no oxidados, no representan en la actualidad un peligro inminente para el ambiente ni para la biota, debido a que la mayor parte de los EPT estudiados se encuentran asociados a las fracciones geoquímicas menos lábiles.

6. Los jales oxidados presentan un alto potencial de emisión de EPT tóxicos al ambiente, ya que las mayores concentraciones se encuentran en la fracción soluble considerada como la ambientalmente más peligrosa para los ecosistemas.

7. Los resultados resaltan el importante potencial de emisión de EPT de estos jales mineros y la potencial afectación a los recursos naturales y ecosistemas del entorno.

Agradecimientos

Este artículo forma parte del trabajo de tesis doctoral de la autora NMQC quien agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT], el apoyo económico brindado a través de la beca doctoral para la realización de sus estudios de posgrado. Los autores expresan su agradecimiento a la M. en C. Analine B. Vázquez Bahena por el apoyo y entrenamiento a NMQC en la obtención de los datos geoquímicos en el Laboratorio de Geoquímica. Se agradece igualmente a la M. en C. Jazmín A. López Díaz por su asistencia en la obtención de imágenes y datos por MEB y EDS en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis. El apoyo brindado por el M. en C. Mauro García, responsable del Laboratorio de Difracción de Rayos X, en la obtención de la composición mineralógica, es de igual manera reconocido. Se agradecen los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos los cuales ayudaron a mejorar sustancialmente el manuscrito.

Referencias

- Alvarez, E., Perez, A., y Calvo, R. (1993). Aluminium speciation in surface waters and soil solutions in areas of sulphide mineralization in Galicia (N.W. Spain). *Science of The Total Environment*, 133, 17-37.
- Amos, R.T., Blowes, D.W., Bailey, B.L., Segeo, D.C., Smith, L. y Ritchie, A.I.M. (2015). Waste-Rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 57, 140-156.
- Arcega-Cabrera, F., Armienta, M.A., Daesslé, L.W., Castillo-Blum, S.E., Talavera, M.O., y Armienta-Hernández, M.A., Talavera, M.O., Villaseñor, G., Espinosa, E., Pérez-Martínez, I., Cruz, O., Ceniceros, N. y Aguayo, A. (2004). Environmental behavior of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, Central Mexico. *Applied Earth Science*, 113, 76-82.
- Baedecker, P. A. y Reddy, M.M. (1993). The erosion of

- carbonate stone by acid rain: Laboratory and field investigations. *Journal of Chemical Education*, 70, 104-108.
- Bigham, J.M. y Nordstrom, D.K. (2000). Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40, 351-403.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L. y Weisener, C.G. (2014). *The Geochemistry of Acid Mine Drainage, Treatise on geochemistry. 2nd ed.* Oxford: Elsevier, 131-190.
- Buzatu, A., Dill, H.G., Buzgar, N., Damian, G., Maftei, A.E., y Apopei, A.I. (2016). Efflorescent sulfates from Baia Sprie mining area (Romania) — Acid mine drainage and climatological approach. *Science of The Total Environment Part A*, 542, 629-641.
- Campa, M.F. y Ramírez, E.J. (1979). La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero. *Serie Técnico-Científica*. Universidad Autónoma de Guerrero, 101p.
- Campa, M.F., Torres de León, R., Iriondo, A. y Premo, R. (2015). Caracterización geológica de los ensambles metamórficos de Taxco y Taxco el Viejo, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 369-385.
- Camprubí, A., González-Partida, E. y Torres-Tafolla, E. (2006). Fluid inclusion and stable isotope study of the Cobre-Babilonia polymetallic epithermal vein system, Taxco district, Guerrero, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 89, 33-38.
- Carrillo-Chávez, A., Salas-Megchún, E., Levresse, G., Muñoz-Torres, C., Pérez-Arvizu, O., y Gerke, T. (2014). Geochemistry and mineralogy of mine-waste material from a "skarn-type" deposit in central Mexico: Modeling geochemical controls of metals in the surface environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, Part A, 28-36.
- Clevenger, T.E. (1990). Use of sequential extraction to evaluate the heavy metals in mining wastes. *Water, Air and Soil Pollution*, 50, 241-254.
- Concas, A., Ardau, C., Cristini, A., Zuddas, P. y Cao, G. (2006). Mobility of heavy metals from tailings to stream waters in a mining activity contaminated site. *Chemosphere*, 63, 244-253.
- Conesa, H.M., Schulín, R. y Nowack, B. (2008). Mining landscape: A cultural tourist opportunity or an environmental problem? The study case of the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Ecological Economics*, 64, 690-700.
- Conrad, T., Hein, J.R., Paytan, A. y Clague, D.A. (2017). Formation of Fe-Mn crusts within continental margin environment. *Ore Geology Reviews*, 87, 25-40.
- Consejo de Recursos Minerales (1999). *Monografía Geológico-Minera del estado de Guerrero*. CRM. 261p.
- Courtin-Nomade, A., Waltzing, T., Evrard, C., Soubrand, M., Lenain, J-F., Ducloux, E., Ghorbel, S., Grosbois, C. y Bril, H. (2016). Arsenic and lead mobility: From tailing material to the aqueous compartment. *Applied Geochemistry*, 64, 10-21
- Dold, B. y Friese, K. (2007). Biogeochemical studies about the environmental impacts of mining on ground and surface water. *Journal of Geochemical Exploration*, 92, v-vi.
- Dótor-Almazán, A., Armienta, M. A., Talavera, M.O. y Ruíz J. (2018). Geochemical behavior of Cu and sulfur isotopes in the tropical mining region of Taxco, Guerrero (Southern Mexico), *Chemical Geology*, 471, 1-12.
- Dótor-Almazán, A., Armienta, M.A., Arcega-Cabrera, F. y Talavera, M.O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. *Hydrobiológica*, 24, 245-256.
- Douglas, G.B., Wendling, L.A., Pleysier, R. y Trefry, M.G. (2010). Hydrotalcite formation for contaminant removal from ranger mine process water. *Mine, Water and the Environment*, 29, 108-115.
- Farfán-Panamá, J.L., Camprubí, A., González-Partida, E., Iriondo, A. y González-Torres, E. (2015). Geocronología de los depósitos minerales mexicanos. III: Los depósitos epitermales de Taxco, Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67, 357-366.
- Fergusson, J.E. (1990). *The heavy elements: chemistry, environmental impact, and health effects*. Pergamon Press, 614p.
- Fosso-Kankeu, E., Manyatshe, A. y Waanders, F. (2016). Mobility potential of metals in acid mine drainage occurring in the Highveld area of Mpumalanga Province in South Africa: Implication of sediments and efflorescent crusts. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 661-670.
- Goienaga, N., Carrero, J.A., Zuazagoitia, D., Baceta, J.I., Murelaga, X., Fernández, L.A. y Madariaga, J.M. (2015). Recrystallization and stability of Zn and Pb minerals on their migration to groundwater in soils affected by Acid Mine Drainage under CO₂ rich atmospheric waters. *Chemosphere*, 119, 727-733.
- Gómez-Bernal, J.M., Santana-Carrillo, J., Romero-Martin, F., Armienta, M.A., Morton-Bermea, O. y Ruiz-Huerta, E.A. (2010). Plantas de sitios contaminados con desechos mineros en Taxco, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, 131-133.
- Grover, B.P., Johnson, R.H., Billing, D.G., Weiersbye, I.M. y Tutu, H. (2016). Mineralogy and geochemistry of efflorescent minerals on mine tailings and their potential impact on water chemistry. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23, 7338-7348.
- Iakovleva, E., Mäkilä, E., Salonen, J., Sitarz, M., Wang, S. y Sillanpää, M. (2015). Acid mine drainage (AMD) treatment: Neutralization and toxic elements removal with unmodified and modified limestone. *Ecological Engineering*, 81, 30-40.
- Jacobs, J.A., Lehr, J.H. y Testa, S.M. (2014). *Acid Mine Drainage, Rock Drainage and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention and Remediation*. John Wiley & Sons Inc, 504p.
- Jambor, J.L., Nordstrom, D.K. y Alpers, Ch.N. (2000). Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40, 303-350.
- Jaward, A., Peng, L., Liao, Z., Zhou, Z., Shahzad, A., Iftikhar, J., Zhao, M., Chen, Z. y Chen, Z. (2019). Selective removal of heavy metals by hydrotalcites as adsorbents in diverse wastewater: Different intercalated anions with different mechanisms. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1112-1126.
- Lagunas-Núñez, T.D. (2018). *Análisis geoquímicos en precipitados de jales mineros en el arroyo Xochula, del municipio de Taxco de Alarcón, Guerrero*. Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad Autónoma de Guerrero.

- Li, Ch., Zeng, L., Fu, H., Chen, J., He, J. y He, Z. (2017). Mineralogical and chemical characteristics of the lead-zinc tailing and contaminated soil from the mine tailing pond in Hunan Province (China). *Physicochemical Problems of Mineral Processes*, 53, 1133-1147.
- Lindsay, M.B., Moncur, M.C., Bain, J.G., Jambor, J.L., Ptacek, C.J. y Blowes, D. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 57, 157-177.
- Loring, D.H. y Rantala, R.T.T. (1992). Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth-Science Reviews*, 32, 235-283.
- McGeer, J., Henningsen, G., Lanno, R., Fisher, N., Sappington, K. y Drexler, J. (2004). *Issue Paper on the Bioavailability and Bioaccumulation of Metals*. Eastern Research Group, Inc, Lexington, 126p.
- Mindat. (2019). *Mapa de Taxco de Alarcón, Gro.* Mindat.org. Obtenido de: <https://www.mindat.org/loc-21178.html>
- Moreno-Godínez, M.E., Acosta-Saavedra, L.C., Meza-Figueroa, D., Vera, E., Cebrián, M. E., Ostrosky-Wegman, P. y Calderón-Aranda, E.S. (2010). Biomonitoring of metal in children living in a mine tailings zone in Southern Mexico: a pilot study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213, 252-258.
- Nordstrom, D.K. (2011a). Mine waters: acidic to circum-neutral. *Elements*, 7, 393-398.
- Nordstrom, D.K. (2011b). Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*, 26, 1777-1791.
- Ortiz, B., Chávez, A. y Fernández, M. (2007). Acid rock drainage and metal leaching from mine waste material (tailings) of a Pb-Zn-Ag skarn deposit: environmental assessment through static and kinetic laboratory tests. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 161-169.
- Ritcey, G.M., (1989). *Tailings management, problems and solutions in the mining industry*. Elsevier Science Publishing Co. Inc., 970 p.
- Romero, M.F., Armienta, M.A. y González-Hernández, G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment. *Applied Geochemistry*, 22, 109-127.
- Ruiz-Huerta, E. y Armienta, H.M.A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28, 103-117.
- Sahoo, P.K., Equeenuddin, K.K. y Powell, M.A. (2013). Current approaches for mitigating acid mine drainage. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 226, 1-32.
- Seo, E.Y., Cheong, Y.W., Yim, G.J., Min, K.W. y Geroni, J.N. (2017). Recovery of Fe, Al and Mn in acid coal mine drainage by sequential selective precipitation with control of pH. *CATENA*, 148, 11-16.
- Simate, G. y Ndlovu, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1785-1803.
- Solongo, E., Kaoru, O., Koichiro, S., Bolormaa, O., Ochirkhuyag, B. y Makiko, W. (2016). Assessment of Heavy Metals in Mining Tailing Around Boroo and Zuunkharaa Gold Mining Areas of Mongolia. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 379-389
- Soto-Ríos, M.L., Juárez-Pérez, C.A., Rendón-Gandarilla, F.J., Talavera, M.O. y Aguilar- Madrid, G., (2017). Elevated Blood Lead Levels in Children Associated with Living near Mining Waste Sites in Guerrero/Mexico. *Environments*, 4, 41.
- Talavera, M.O., Armienta, H.M.A., García-Abundis, J. y Flores-Mundo, N., (2006). Hydrogeochemistry of leachates from el fraile sulfide tailings Piles in Taxco, Guerrero, Southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 28, 243-265.
- Talavera, M.O., Ruiz, J., Díaz-Villaseñor, E., Ramírez-Guzmán, A., Cortés, A., Salgado- Souto, S.A., Dótor-Almazán, A. y Rivera-Bustos, R., (2016). Water-rock-tailings interactions and sources of sulfur and metals in the subtropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico): a multi-isotopic approach. *Applied Geochemistry*, 66, 73-81.
- Talavera, M.O., Yta, M., Moreno, T.R. y Dótor, A.A. (2005). Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact environmental impact. *Geofísica Internacional*, 2005 49-64.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. y Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the specification of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*. 51, 844-85.
- United States Environmental Protection Agency (2000). *Method pH in liquid and soil, Third update to the third edition of SW 846, Fed. Regis.* USEPA, 60, 37977.
- Valente, T., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Gomes, P., Santisteban, M., Borrego, J. y Sequeira Braga, M.A. (2015). Mineralogy and geochemistry of a clogged mining reservoir affected by historical acid mine drainage in an abandoned mining area. *Journal of Geochemical Exploration*, 157, 66-76.
- Van Driessche, A.E.S., Stawski, T.M., Benning, L.G. y Kellermeier, M. (2017). Calcium sulfate precipitation throughout its phase diagram. *New Perspectives on Mineral Nucleation and Growth*. Springer, 227-256.
- Vázquez-Bahena, A.B., Talavera, M.O., Moreno-Godínez, M.E., Salgado-Souto, S.A., Ruiz, J., y Huerta-Beristain, G., (2017). Source apportionment of lead in the blood of women of reproductive age living near tailings in Taxco, Guerrero, Mexico: An isotopic study. *Science of the Total Environment*, 583, 104-114.
- Zhang, J., Zhou, F., Chen, C., Sun, X., Shi, Y., Zhao, H. y Chen, F. (2018). Spatial distribution and correlation characteristics of heavy metals in the seawater, suspended particulate matter and sediments in hanjiang Bay, China. *PLoS ONE*, 13-8. Obtenido de: <https://www.mindat.org/loc-21178.html>