

Evaluación química y mineralógica de mercurio en desechos mineros de la comunidad de Huahuaxtla, Taxco de Alarcón, Guerrero, México

Alejandro H. Ramírez-Guzmán^{1,2}, Rocío García-Martínez^{3,*},
Óscar Talavera- Mendoza^{1,2} y Jazmín A. López-Díaz^{1,2}

¹ Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Exhacienda de San Juan Bautista s/n, C.P. 40323, Taxco el Viejo, Guerrero, México.

² Maestría en Recursos Naturales y Ecología, Facultad de Ecología Marina, Universidad Autónoma de Guerrero, Av. Gran Vía Tropical No. 20, Fracc. Las Playas, C.P. 39390, Acapulco, Guerrero, México.

³ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

* Autor de correspondencia (R. García-Martínez): gmrocio@atmosfera.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4446-0968>

EDITORES:

Luigi A. Solarí
Charles Canet

CÓMO CITAR:

Ramírez-Guzmán, A. H., García-Martínez, R., Talavera- Mendoza O., & López-Díaz J. A. (2025). Evaluación química y mineralógica de mercurio en desechos mineros de la comunidad de Huahuaxtla, Taxco de Alarcón; Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 42(3), 170–179. DOI: <https://dx.doi.org/10.22201/igc.20072902e.2025.3.1899>

Manuscrito recibido: agosto 5, 2025

Manuscrito corregido recibido: octubre 21, 2025

Manuscrito aceptado: octubre 21, 2025

Publicado en línea: diciembre 1, 2025

COPYRIGHT

© 2025 Los autores.

Este es un artículo de acceso-abierto publicado y distribuido por la Universidad Nacional Autónoma de México bajo los términos de una [Licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento 4.0 Internacional \(CC BY\)](#), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se de crédito al autor original y la fuente.



RESUMEN

La minería en México ha estado presente desde la época prehispánica como parte fundamental del desarrollo socioeconómico del país. Los yacimientos minerales del Distrito Minero de Taxco al norte del Estado de Guerrero se han dividido en cuatro zonas mineralizadas para su mejor descripción: Huahuaxtla, Coxcatlán-Tlmacazapa, Buenavista de Cuéllar y Taxco de Alarcón. Este estudio se centra en la zona de Huahuaxtla, donde hasta la década de 1960 se extrajo exhaustivamente mercurio, un elemento altamente tóxico con efectos irreversibles en la salud humana y ecológica. El objetivo de este trabajo fue estudiar la asociación química y mineralógica de la roca procedente de obras mineras antiguas y de los desechos mineros (DM) de Huahuaxtla, con el fin de evaluar el potencial de liberación de Hg al ambiente. Las técnicas utilizadas para este estudio fueron fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (MEB-EDS), además de la cuantificación de mercurio total (HgT).

La composición química (elementos mayores) de los DM analizados estuvo dominada por el óxido de calcio. Este compuesto está vinculado con la mineralización primaria. La caracterización mineralógica y geoquímica muestra baja concentración de sulfuros metálicos, abundancia de carbonatos y baja concentración de HgT. Por su naturaleza mineralógica estos residuos suponen un bajo riesgo ambiental a corto plazo. Esto se debe principalmente a la capacidad neutralizadora de las rocas carbonatadas que evita la producción de drenaje ácido de mina (DAM) lo que restringe la solubilidad, movilidad y biodisponibilidad del mercurio en suelos y aguas circundantes.

Palabras clave: minería; mercurio; desechos mineros; riesgo ambiental; Huahuaxtla; Taxco de Alarcón; Guerrero; México.

ABSTRACT

Mining in Mexico has been present since pre-Hispanic times, playing a fundamental role in the country's socioeconomic development. The mineral deposits of the Taxco Mining District (northern Guerrero State) are divided into four mineralized zones: Huahuaxtla, Coxcatlán-Tlmacazapa, Buenavista de Cuéllar, and Taxco de Alarcón. This study focuses on the Huahuaxtla region, where mercury, a highly toxic element with irreversible effects on human and environmental health, was

exhaustively extracted until the 1960s. The objective of this work was to investigate the chemical and mineralogical characteristics of rocks from historical mining works and mine wastes (MW) in Huahuaxtla to assess the potential for Hg release into the environment. Characterization techniques included X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), and total mercury (THg) quantification.

The composition of MW was dominated by calcium oxide, linked to the primary mineralization. Mineralogical and geochemical analyses revealed a low concentration of metallic sulfides, a high abundance of carbonates, and low THg levels. The mineralogical composition suggests these wastes pose a low short-term environmental risk. This is primarily due to their strong neutralizing capacity, which prevents the generation of acid mine drainage (AMD) and consequently limits the solubility, mobility, and bioavailability of mercury in the surrounding environment.

Keywords: mining; mercury; mining waste; environmental risk; Huahuaxtla; Taxco de Alarcón; Guerrero; Mexico.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, una de las principales preocupaciones ambientales está asociada con la contaminación a gran escala por metales y metaloides generados por antiguas actividades mineras. Estos contaminantes son liberados y dispersados al ambiente, generando graves consecuencias para los ecosistemas y la salud humana (Talavera-Mendoza *et al.*, 2016; Mergler, 2021). El Hg es un elemento químico de alta toxicidad; su presencia en la atmósfera, la hidrosfera y la pedosfera está regulada por un ciclo complejo de emisión, transporte, depósito y reemisión, en el cual intervienen fuentes naturales y antropogénicas. De acuerdo con la Evaluación Mundial del Mercurio (Global Mercury Assessment) elaborada por el Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP, 2019), el balance atmosférico global anual de Hg se estima en ~7500 toneladas por año (t/año). De esta cantidad, los ciclos biogeoquímicos aportan la fracción más significativa ~4400 t/año, asociada principalmente a la reemisión del Hg antropogénico histórico acumulado con el tiempo en los suelos y cuerpos de agua; mientras que las actividades antropogénicas aportan ~2200 t/año, originadas principalmente por la quema de combustibles fósiles para la producción de energía, así como por actividades industriales como la producción de cemento y procesos metalúrgicos. Las fuentes naturales, como las erupciones volcánicas, los procesos geotérmicos y la combustión de biomasa, aportan ~1100 t/año. Este balance evidencia la importancia de las emisiones históricas y actuales que tienen impacto en la atmósfera, así como la necesidad de comprender las interacciones ambientales para evaluar los flujos y la persistencia del Hg a escala mundial (Angot *et al.*, 2016; Bargagli, 2016). La complejidad del ciclo biogeoquímico del Hg y su capacidad de permanecer en la atmósfera hasta dos años son características que favorecen la contaminación global y a su amplia distribución e impacto ambiental (Gaioli *et al.*, 2012; García-Martínez *et al.*, 2021; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2005; Wang *et al.*, 2013; Hsu-Kim *et al.*, 2018; Schiavo *et al.*, 2022; Bencardino *et al.*, 2025).

La toxicidad del Hg depende de su forma química; los compuestos orgánicos, como el metilmercurio, son hidrosolubles y tienen la capacidad de bioacumularse a lo largo de la cadena alimentaria. Esta forma es más tóxica para los organismos vivos que las formas inorgánicas, que a su vez pueden transformarse en compuestos orgánicos (Boening, 2000). La enfermedad de Minamata ha sido reconocida mundialmente como un desastre ambiental causado por intoxicación con Hg. El Convenio de Minamata sobre el Mercurio (2024) es un tratado global que busca proteger el medio ambiente y la salud humana frente a las emisiones y liberaciones de Hg,

promoviendo además la investigación sobre sus fuentes y pasivos ambientales.

Los efectos del envenenamiento por Hg en humanos incluyen: hipertensión, enfermedad coronaria, arritmias cardíacas, obstrucción de la arteria carótida, trastornos hematológicos, aterosclerosis generalizada, afectación del sistema nervioso central, edema pulmonar, lesiones gastrointestinales, insuficiencia renal, y la exposición aguda puede causar la muerte (García-Martínez *et al.*, 2021; Li *et al.* 2008, PNUMA 2005; Houston, 2011; Quevedo-Castañón *et al.*, 2020; Mergler, 2021; Novo *et al.*, 2021).

En México, en los últimos años se han publicado diversos estudios sobre las emisiones atmosféricas de mercurio elemental gaseoso (MEG) y su dispersión a partir de fuentes naturales y antropogénicas. Entre las fuentes naturales destacan el volcán Popocatepetl y la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo; donde se han registrado concentraciones de 10 y 36 ng/m³, respectivamente. Se observó que ambos sitios se emiten MEG en niveles significativamente bajos, sin representar un riesgo para la salud por exposición crónica mediante inhalación (Schiavo *et al.*, 2020; Jiménez-Franco *et al.*, 2024).

Por otro lado, en un estudio sobre emisiones atmosféricas de origen antropogénico urbano realizado en la Ciudad de México, se reportaron concentraciones máximas de 30 ng/m³ (Schiavo *et al.*, 2022). En contraste, en la zona de minería artesanal de cinabrio en la Sierra Gorda de Querétaro se registraron concentraciones mucho más elevadas, alcanzando valores de hasta 235 ng/m³. Este valor supera el límite de 200 ng/m³ establecido por la OMS para exposición prolongada, lo que evidencia el riesgo potencial asociado a las actividades mineras (García-Martínez *et al.*, 2021). Los resultados indican que los pasivos mineros antiguos constituyen una fuente potencial capaz de liberar cantidades significativas de mercurio a la atmósfera, principalmente en su forma elemental (Hg⁰), altamente volátil.

En el estado de Guerrero no se han realizado estudios de emisiones de MEG o sobre el potencial de liberación de Hg al ambiente. Esto resulta particularmente relevante considerando que el Distrito Minero de Taxco es reconocido mundialmente por su histórica producción de Ag y su abundancia en sulfuros metálicos, con más de 500 años de explotación de metales base y preciosos. Diversas investigaciones han reportado concentraciones elevadas de metales y metaloides en jales de esta región, aunque sin evidencia de la presencia de Hg (Talavera-Mendoza *et al.*, 2016; Dótor Almazán *et al.*, 2014; Quevedo-Castañón *et al.*, 2020).

En la zona mineralizada de Huitzuco, localizada a 34 km al suroeste de Huahuaxtla, se ha documentado la extracción de mercurio y antimonio, asociados con mineralización de sulfuros metálicos

complejos (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2004). Sin embargo, la zona minera de Huahuaxtla carece de estudios recientes. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue analizar la asociación química y mineralógica de la roca proveniente de obras mineras antiguas y de los DM de Huahuaxtla, con el propósito de evaluar el potencial de liberación de Hg al ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en la Región Norte del Estado de Guerrero, en la comunidad de Huahuaxtla, Municipio de Taxco de Alarcón. Geográficamente, la comunidad se ubica en los 18°24'09" de latitud Norte y 99°36'35" de longitud Oeste (Figura 1), a una altitud de 1270 metros sobre el nivel del mar. Los 600 habitantes de la población

de Huahuaxtla (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020) están asentados cerca de las antiguas minas de Hg; incluso algunas casas fueron construidas sobre los desechos mineros de esta actividad, lo que representa una vía de exposición directa y un posible riesgo a la salud humana.

En el área afloran rocas sedimentarias de la Plataforma Guerrero-Morelos, constituida por bancos calcáreos del Aptiano-Cenomaniano, además de lutitas y areniscas del Turoniano-Campaniano de la Formación Mezcala (Morán-Zenteno *et al.*, 2004). La mineralización en la zona de Huahuaxtla se relaciona con el subtipo de depósitos epitermales de baja sulfuración (Camprubí y Albinson, 2006, 2007) y está originada por la actividad hidrotermal asociada al magmatismo de la Sierra Madre del Sur (Camprubí, 2013; Farfán-Panamá *et al.*, 2015).

Los trabajos mineros de Huahuaxtla tienen estrecha relación con las fallas de rumbo NW-SE (Gallagher y Pérez, 1948) y remplazamiento mineral en rocas (Figura 2). Desde el descubrimiento de Hg en

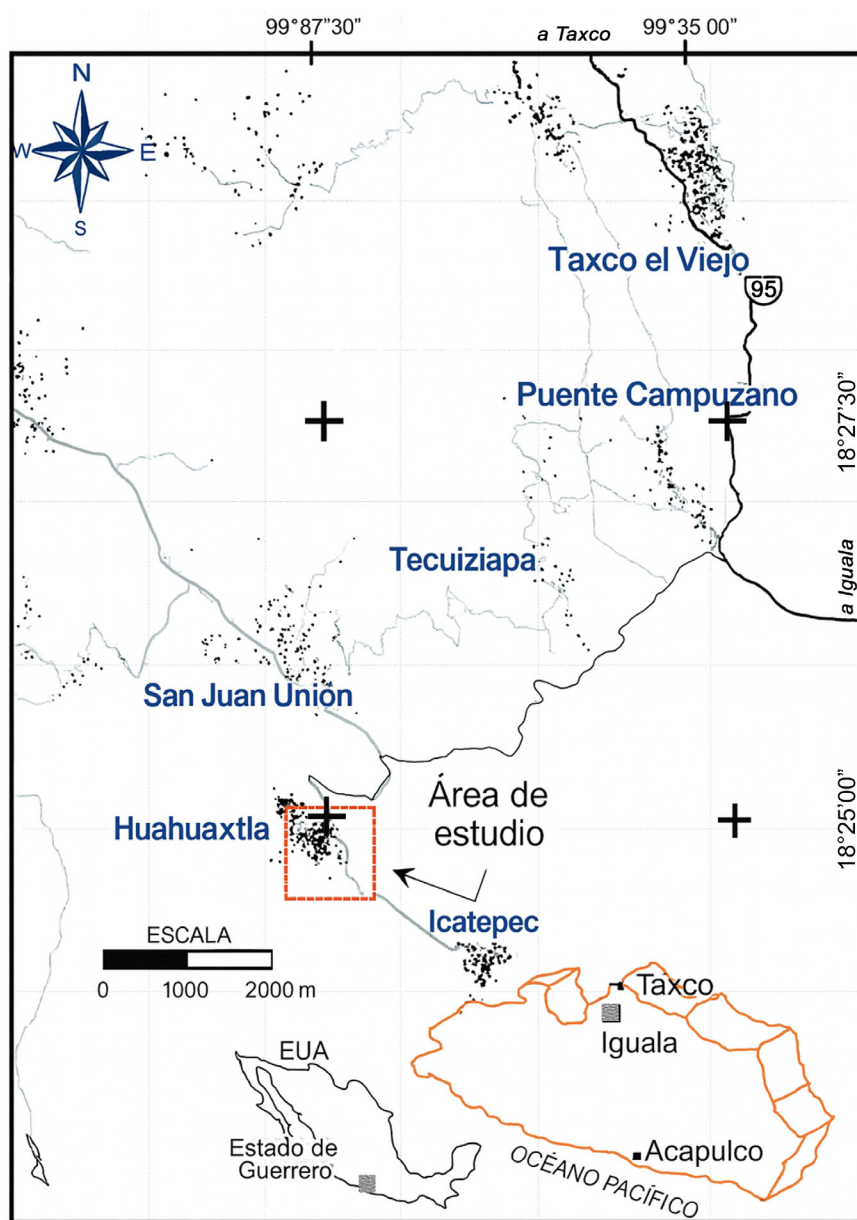


Figura 1. Ubicación de Huahuaxtla, Guerrero (sur de México) en la región norte del Estado de Guerrero. La distribución de la población se indica por medio de pequeños cuadros negros.

Huahuaxtla en el año 1923, su obtención se realizó de manera artesanal en hornos de retorta. La calcinación de roca caliza se realizaba con leña, con trituration gruesa, sin la intervención de otros procesos de separación metalúrgica, ni la producción de jales. Se tiene registro de que desde el inicio de la explotación en la zona de Huahuaxtla, con las minas La Aurora y la Esperanza y posteriormente con las minas La Guillermina, San Luis y El Aguacate, se obtuvo una producción total de 416 000 kg de Hg (Gallagher y Pérez, 1948). El auge de extracción de Hg en la comunidad de Huahuaxtla tuvo lugar durante el período de la Segunda Guerra Mundial y en los años de 1948 a 1962 (Werre Keeman y Estrada Rodarte, 1999).

Gallagher y Pérez (1948) reportaron la existencia de mercurio nativo y especies de los minerales primarios cinabrio/metacinaabrio (HgS), y los minerales secundarios calomel (Hg_2Cl_2), terlinguaíta (Hg_2OCl_2), montroydita (HgO) y eglestonita ($\text{Hg}_4\text{Cl}_2\text{O}$).

Muestreo y análisis

Para la presente investigación se recolectaron cuatro muestras de roca del interior de los antiguos trabajos mineros (Figura 2): La Aurora (HXR1), La Guillermina (HXR2), El Aguacate (HXR3) y San Luis (HXR4). El muestreo consistió en la recolección sistemática de 2 kg de roca fresca, a una altura de 1.5 m, provenientes de la Formación Morelos. Posteriormente la muestra fue triturada y preparada para su análisis por las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX). Así mismo se colectaron ocho muestras de desechos mineros (DM) (HxJ1, HxJ2, HxJ3, HxJ4, HxJ5, HxJ6, HxJ7 y HxJ8) (Figura 2). En ambos casos se realizó el cuarteo correspondiente a cada muestra de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, para homogenización de suelos. Para el análisis por microscopía electrónica y para la evaluación de mercurio total (HgT) se tomaron las muestras con mayor contenido de Hg

(comunicación verbal de pobladores que pertenecieron a antiguos colectivos mineros), correspondientes a las muestras HxJ1 y HxJ5.

Los análisis de FRX y DRX se realizaron en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El análisis por medio de microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (MEB-EDS) se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis de la Universidad Autónoma de Guerrero. La determinación de la concentración de HgT se realizó en el Laboratorio de Aerosoles Atmosféricos del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM.

Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se trituraron las muestras de roca con martillo y un mortero de hierro hasta un tamaño 1 mm. Cada muestra triturada se homogenizó por "cuarteo" para obtener mejor distribución del contenido de minerales y posteriormente se pesaron 15 g. Posteriormente se sometió a un segundo proceso de trituración para obtener partículas de 200 μm de tamaño, usando un molino de bolas de carburo de tungsteno. La muestra molida se colocó en un vaso de precipitados de vidrio de 250 ml para ser secada en un horno convencional marca Barnstead-Thermolyne modelo 1400 Furnace a 110 °C durante 12 h. Se pesaron 5 g de la muestra seca y se agregó 0.5 g de aglutinante en micropolvo; esta mezcla se homogenizó en un mortero de ágata. Posteriormente, la mezcla se vertió en un dado de acero inoxidable y se colocó en una prensa hidráulica marca Graseby-Specac modelo T-40 a 26 toneladas/pulgadas² durante 30 s. Las pastillas preparadas fueron analizadas en un equipo de FRX marca Siemens SRS 3000, equipado con un tubo de Rodio y ventana de Berilo de 125 μm . Además, se determinó la pérdida por calcinación de cada muestra.

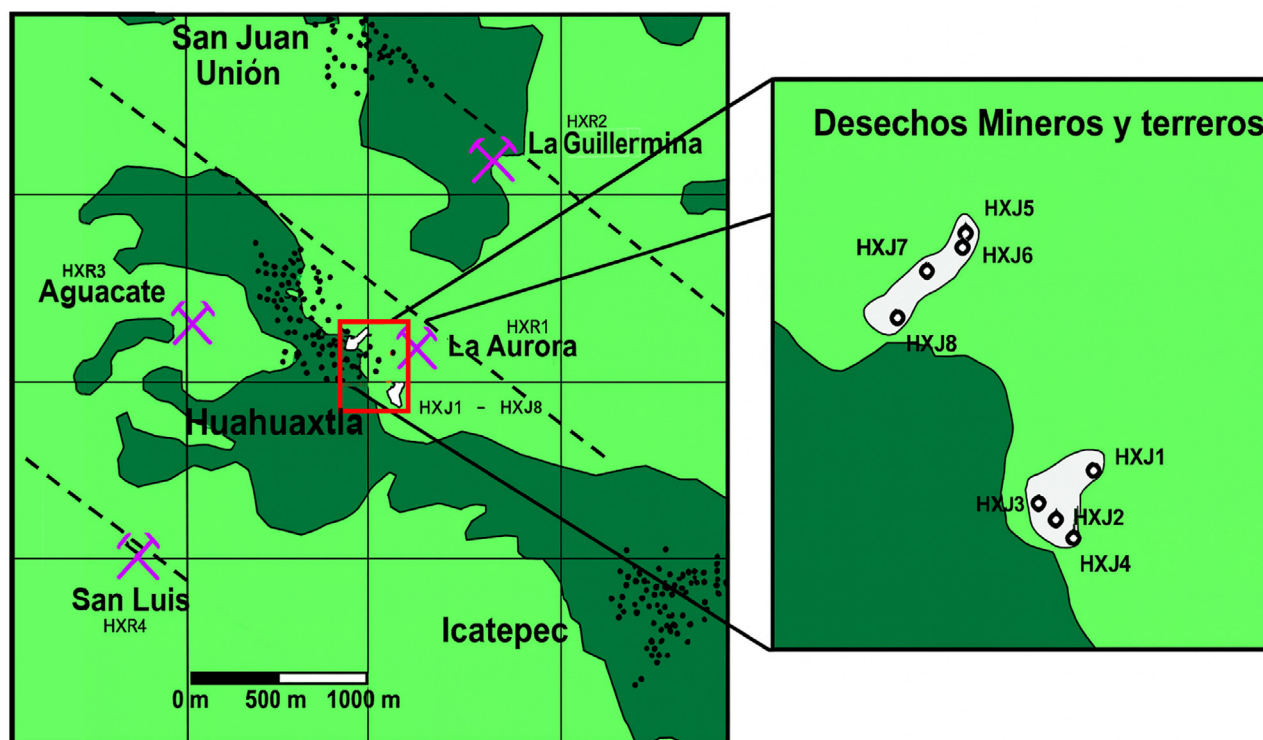


Figura 2. Mapa geológico del área de Huahuaxtla. Se presenta la ubicación de los sitios de colecta de las muestras de roca en las minas: La Aurora (HXR1), La Guillermina (HXR2), El Aguacate (HXR3) y San Luis (HXR4), así como las muestras de desechos mineros (HxJ1-HxJ8). Formación Morelos (verde brillante), Formación Mexcala (verde oscuro). La distribución de la población se indica por medio de pequeños cuadros negros.

Difracción de rayos X (DRX)

Las muestras de roca y DM fueron sometidas a trituration para obtener partículas de 200 µm, con el mismo procedimiento descrito para FRX. Se analizaron en un difractómetro Marca Philips, Modelo 1130/96. Los difractogramas permiten identificar de forma cualitativa los minerales cristalinos que componen la muestra con un límite de detección del orden del 1 %.

Microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (MEB-EDS)

Las muestras HxJ1 y HxJ5 de DM fueron sometidas a un proceso de preconcentración gravimétrica, empleando el método de decantación y batea con agua destilada. Mediante un microscopio estereoscópico, se identificaron cristales color rojo escarlata (cinabrio) del material. Estas muestras se recubrieron con grafito usando una pulverizadora Marca DENTON VACUUM, Modelo Desk Carbon Accessory a 150 mTorr de vacío durante 3 s a 50 A. Las pastillas preparadas fueron analizadas en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) Marca JEOL, Modelo JSM-IT300 LV; con EDS Marca Bruker, Modelo XFlas 6/30, bajo las siguientes condiciones de trabajo: ángulo de escape 35°, 20 keV y distancia de trabajo (WD) = 10 ± 0.5 mm. El límite de detección aceptado para EDS es de 0.1 % (1000 ppm).

Mercurio total (HgT)

En las muestras donde el MEB-EDS delató la presencia de Hg (HxJ1 y HxJ5), se tomaron 10 g para su digestión con HNO₃. Se tomó una alícuota de 10 ml y se llevó a digestión en un horno de microondas marca CEM, modelo MARS5, durante 20 minutos a 180 °C, 250 psi y 1200 W. La concentración total de Hg se determinó en un espectrofotómetro de absorción atómica acoplado a un generador de hidruros por el método de vapor frío (GBC 932 AA, HG3000), utilizando una lámpara de catodo hueco de Hg marca Photronlamps, longitud de onda 253.7 nm. Para el análisis se utilizó argón de ultra-alta pureza marca INFRA México SA de CV. La calibración se realizó empleando un estándar certificado de Hg marca High Purity (Hg-1000 mg/L) lote 1207328. La curva se preparó dentro del intervalo de concentración esperado de las muestras trazables a NIST (Nacional Institute of Standard and Technology). El control de calidad del análisis se realizó con curvas de calibración con cuatro puntos más un blanco de reactivo, se revisó periódicamente la estabilidad de la lectura con uno o dos patrones de verificación, cuyo valor obtenido no superó ± 10 % del valor esperado.

Se realizaron dos análisis por triplicado para cada muestra. La calibración se realizó con estándares de 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 µg/L; los valores de R² de las curvas de calibración fueron de 0.995 y 0.996, respectivamente, y se estableció un límite de detección de 0.009 mg/L.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis químicos y mineralógicos proporcionan una visión de la composición de las rocas originales y de los DM procesados, revelando las transformaciones ocurridas durante la actividad minera histórica. La Tabla 1 muestra los resultados del análisis por FRX de las cuatro muestras de roca (HXR1-HXR4) y las ocho muestras de DM (HxJ1-HxJ8). Los análisis de roca indican que el CaO es el constituyente más abundante, con valores que varían de 34.45–54.20 % (en HXR2 y HXR1), seguido por el SiO₂ que oscila entre 5.37–31.95 % (en HXR1 y HXR2). En cuanto al TiO₂, solo se identificó en HXR2 con 0.73 %; mientras que los contenidos de Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃, As₂O₃, Sb₂O₅ son menores a 0.1 %, excepto para HXR2 que corresponde a una muestra de roca mineralizada con sulfuros la cual presentó un valor de SO₃ de 3.44 %. La prueba de pérdida por calcinación (PXC) varió de 24.14 a 38.80 %.

Los resultados de los DM indican que el SiO₂ es el compuesto con el mayor porcentaje presente en todas las muestras, con valores que van 51.10 a 62.2 %. El CaO presenta valores que varían de 6.14 a 25.81 %. El contenido más alto de MgO estuvo presente en la muestra HxJ7 con 7.97 %, mientras que los valores mayores de Fe₂O₃ y SO₃ se detectaron en la muestra HxJ1 con 11.10 % y 9.70 %, respectivamente. El P₂O₅ no se detectó en las muestras HxJ1 y HxJ4, y el mayor porcentaje en peso se detectó en la muestra HxJ6 con 0.15 %. El TiO₂ no se detectó en HxJ3 y el mayor porcentaje se detectó en HxJ4 con 1.10 %. Se detectó As₂O₃ en siete muestras, con un rango de 0.04–0.94 %. El Sb₂O₅ se detectó solo en las muestras HxJ4 y HxJ5 con 0.07 y 0.03 %, respectivamente. La pérdida por calcinación varió de 8.06 a 17.45 %. La comparación de la PXC en roca y DM muestra, como era de esperar, un mayor porcentaje de volátiles presentes en las muestras de roca. En los DM, este valor es considerablemente menor debido a los procesos de calcinación a los que fueron sometidos y al efecto del intemperismo subsecuente.

La Tabla 2 presenta los resultados del análisis mineralógico cualitativo por DRX en roca. En HxR1 se encontró la mayor abundancia relativa minerales de calcita y cuarzo al igual que en

Tabla 1. Resultados del análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX) de muestras de roca y desechos mineros (-: no detectado, PXC: pérdida por calcinación).

Muestra % en masa	Roca				Desechos mineros							
	HXR1	HXR2	HXR3	HXR4	HxJ1	HxJ2	HxJ3	HxJ4	HxJ5	HxJ6	HxJ7	HxJ8
SiO ₂	5.37	31.95	8.18	29.75	61.20	46.11	46.05	58.32	56.22	51.10	40.53	62.21
TiO ₂	-	0.73	-	-	1.02	0.75	-	1.12	0.86	0.47	0.63	0.90
Fe ₂ O ₃	0.71	3.29	3.76	1.39	11.1	5.63	5.01	6.38	5.42	2.82	7.99	7.51
MgO	0.86	3.03	1.05	0.87	2.04	2.86	6.04	5.72	6.32	7.79	7.97	4.37
CaO	54.20	34.45	51.4	39.30	6.14	25.81	23.01	12.52	12.82	16.90	19.33	11.61
Na ₂ O	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	0.09	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	2.26	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	0.04	-	-	0.12	0.11	-	0.12	0.15	0.12	0.08
SO ₃	0.05	3.44	0.09	0.06	9.66	0.27	2.46	5.81	6.86	4.48	9.64	4.77
As ₂ O ₃	-	-	0.04	0.02	0.94	-	0.05	0.08	0.05	0.04	0.09	0.08
Sb ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	0.07	0.03	-	-	-
PXC	38.80	24.14	35.43	28.65	8.06	18.45	17.27	9.98	9.04	16.16	13.70	8.47
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabla 2. Resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) en muestras de roca y desechos mineros. La abundancia de las fases minerales se representa de la siguiente manera: (xxx = abundante, xx = moderada, x = baja, - no detectado).

Muestra	Roca				Desechos mineros							
	HXR1	HXR2	HXR3	HXR4	HxJ1	HxJ2	HxJ3	HxJ4	HxJ5	HxJ6	HxJ7	HxJ8
Minerales												
Calcita ($CaCO_3$)	xxx	xx	xx	xxx	-	xxx	xx	xx	x	xx	xx	xx
Cuarzo (SiO_2)	xxx	xx	xx	xxx	xx	xx	x	x	x	xx	x	xx
Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	-	x	-	-	xx	-	x	x	x	x	x	x
Hematita (Fe_2O_3)	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	x	-
Magnetita (Fe_3O_4)	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-
Arcilla	-	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x

HxR4. Esta composición mineralógica es coherente con los resultados obtenidos por FRX, donde se registran los valores más altos de CaO y SiO_2 , correspondientes a la presencia dominante de dichos minerales. La muestra HxR2 se compone de cuarzo, calcita, yeso e illita (Figura 3a). En HxR3 la mineralogía es de calcita, cuarzo y hematita. Los resultados mineralógicos para los desechos mineros indican un contenido de cuarzo, yeso, hematita e illita en HxJ1. Para la muestra HxJ2 la composición es de calcita, cuarzo e illita. En las muestras HxJ3, HxJ4, HxJ5 (Figura 2b) y HxJ7 se identificaron los minerales calcita, cuarzo, yeso, hematita e illita, con la excepción de la magnetita que únicamente fue detectada en HxJ5 (Figura 3b). Para HxJ6 y HxJ8 la mineralogía es de calcita, cuarzo, yeso e illita.

El análisis de muestras de DM por MEB-EDS reveló la presencia de partículas de $1 \mu m$ a $200 \mu m$, que muestran un fuerte contraste de grises claros a oscuros, relacionados con su composición química (Figura 4). Del microanálisis por EDS de cinco minerales en la muestra HxJ1 (M1-M5) y tres minerales en HxJ2 (M6-M8) se encontró lo siguiente (Tabla 3; Figura 4).

En el mineral M1 se realizaron dos análisis puntuales (Figura 4a); los cuales indican contenidos de $\sim 60\%$ de Hg y $\sim 30\%$ de S, lo que podría corresponder a cinabrio (Klein y Hurlbut, 1997), el porcentaje restante es de una mezcla de óxidos. En el mineral M2 se hizo un análisis puntual (Figura 4a), con resultados que indican una composición de 97% de SiO_2 , el porcentaje restante del 3% son óxidos de aluminio,

hierro y titanio. En el mineral M3 se hizo un análisis puntual (Figura 4b), los resultados indican que el mineral está compuesto de $\sim 60\%$ de Hg y $\sim 30\%$ de S, lo que podría indicar que corresponde a cinabrio. El análisis del mineral M4 (Figura 4b) indica que está compuesto por $\sim 50\%$ de TiO_2 y $\sim 40\%$ de FeO ; esto podría corresponder a ilmenita. En el mineral M5 se hicieron tres análisis (Figura 4c); los resultados indican que el mineral está compuesto por $\sim 60\%$ de Hg y $\sim 30\%$ de S, lo que podría corresponder nuevamente a cinabrio. El análisis de los minerales M6, M7 y M8 (Figura 4d), presentan similitud en composición, el FeO presenta valores entre un $\sim 40\%$, el $TiO_2 \sim 40\%$, el Al_2O_3 y SiO_2 hasta $\sim 15\%$, sugiriendo que se trata de ilmenita (Klein y Hurlbut, 1997).

La concentración de HgT en muestras de DM se presenta en la Tabla 4. El valor promedio en la muestra HxJ1 fue de 1.088 ± 0.093 mg/kg, mientras que para la muestra HxJ5 fue de 1.392 ± 0.080 mg/kg. Dado que ambas muestras fueron identificadas como representativas, el promedio general de 1.24 ± 0.18 mg/kg puede considerarse como el valor característico de HgT en los DM.

DISCUSIÓN

En el presente estudio, el valor promedio de HgT determinado en los DM de Huahuaxtla fue de 1.24 ± 0.18 mg/kg, valor

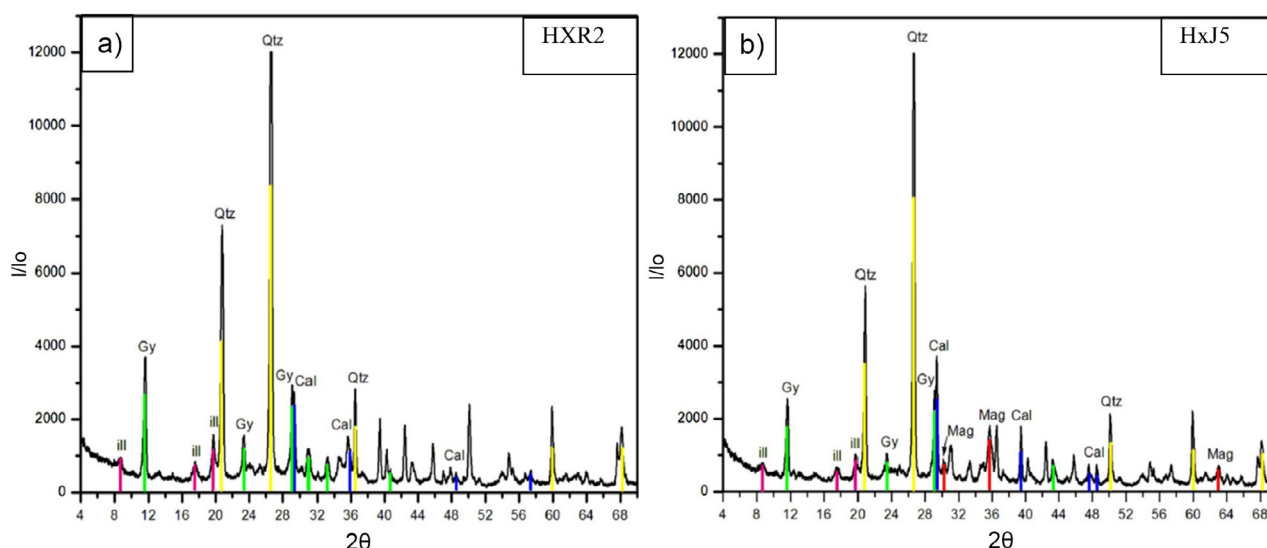


Figura 3. a). Difractograma de la muestra de roca HXR2. b) Difractograma de la muestra HxJ5 de desechos mineros. Cal: calcita; Gy: yeso; ill: illita; Mag: magnetita; Qtz: cuarzo.

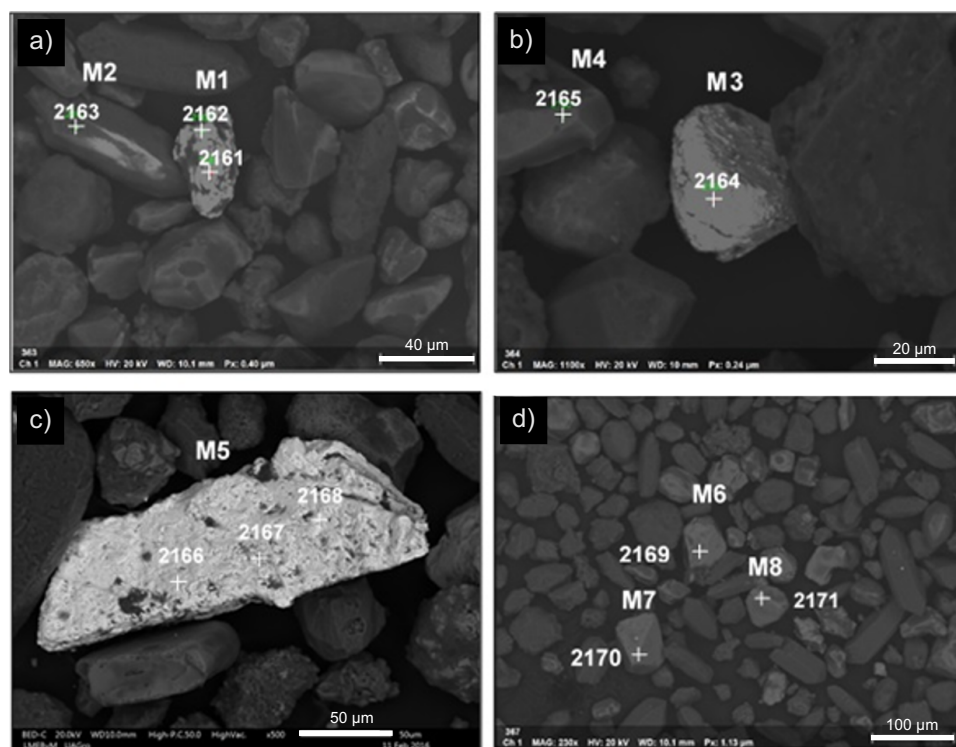


Figura 4. Microfotografías de minerales representativos analizados por MEB-EDS en las muestras HxJ1 y HxJ2 de desechos mineros, mostrando los números de cada análisis como se reportan en la Tabla 3. a) Minerales M1 y M2: ~60 % Hg y ~30 % S (cinabrio). b) Minerales M3 y M4: ~97 % SiO_2 y ~3 % de óxidos de Al, Fe y Ti. c) Mineral M5: ~60 % Hg y ~30 % S (cinabrio). d) Minerales M6–M8: ~40–50 % TiO_2 y ~40 % FeO, con hasta ~15 % de Al_2O_3 y SiO_2 (ilmenita).

considerablemente inferior al límite máximo permisible de 23 mg/kg establecido por la (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), así como al valor de referencia de 17 mg/kg propuesto por la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2017). En el estado de Guerrero, Tafoya-Hernández *et al.* (2022) reportaron concentraciones promedio de HgT de 40.8 mg/kg en jales localizados en la población de Huitzuco. Ambos resultados contrastan con los valores reportados en otros distritos mineros, como es el caso del estudio realizado por Martínez-Trinidad *et al.* (2013) donde se detectaron concentraciones de 4164 mg/kg de HgT en jales de la región minera de San Joaquín, Querétaro, las cuales concuerdan con las altas concentraciones de mercurio elemental gaseoso (MEG) en el aire reportadas por García-Martínez *et al.* (2021).

En Cedral, San Luis Potosí (México), donde se emplearon procesos metalúrgicos de amalgamación para la recuperación de Ag, se han reportado concentraciones de HgT de 548 mg/kg en jales mineros y 116 mg/kg en suelos. Asimismo, los jales reprocesados mostraron una mayor fracción soluble de Hg bajo condiciones simuladas de agua meteórica, en comparación con los jales no reprocesados (Leura Vicencio *et al.*, 2017).

Morton Bermea *et al.* (2020) evaluaron la exposición a Hg en niños en edad escolar residentes en la comunidad de Cedral y confirmaron la presencia de altas concentraciones de Hg en suelos y jales, siendo la inhalación la principal vía de exposición. Las concentraciones de MEG alcanzaron 1793 ng/m³, lo que representa aproximadamente nueve veces el límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para exposición crónica (200 ng/m³).

No obstante, los autores consideraron que la exposición al MEG es relativamente baja debido a su limitada biodisponibilidad en relación con el mercurio inorgánico asociado a partículas finas (PM_{2.5}). También observaron que los compuestos inorgánicos de Hg

generados por el reproceso de jales se concentraron preferentemente en esta fracción, con una concentración media de 23.6 ng/m³. Este tipo de Hg podría representar una mayor contribución a la exposición humana, dada su alta biodisponibilidad por inhalación. Además, se reportaron niveles de Hg en sangre en niños clasificados como exposición moderada (5.29 a 17.71 µg/L, con una media geométrica de 3.5 µg/L). Tomando en cuenta que algunas casas en el poblado El Cedral fueron construidas sobre los desechos mineros, la exposición por inhalación representa un riesgo potencial para la salud de esa comunidad.

En el presente estudio el análisis mediante MEB-EDS indica que el Hg se encuentra principalmente en forma de cinabrio, el cual es un mineral estable bajo condiciones de pH neutro. Por otra parte, la ausencia de pirita y sulfosales, tanto en las rocas encajonantes como en los DM, sugiere un bajo potencial de generación de acidez.

El análisis FRX de la roca reveló que el óxido dominante es CaO , seguido de SiO_2 . Los óxidos complementarios en el análisis se encontraron por debajo del 0.1 %, con la excepción de SO_3 , que alcanzó un valor de 3.44 %. En los DM, el compuesto con el mayor porcentaje en todas las muestras es SiO_2 , mientras que el segundo más abundante es CaO . El análisis mineralógico DRX indicó que las rocas están compuestas principalmente de calcita y cuarzo, con presencia secundaria de yeso, hematita e illita. En los DM, los minerales dominantes son cuarzo, calcita, yeso, hematita e illita, con pequeñas variaciones entre muestras. Estos resultados indican un alto potencial para neutralizar acidez que podría generarse en los DM; además, la ausencia de sulfuros como la pirita sugiere una baja probabilidad de generación de DAM en el entorno. Es importante considerar que la presencia de arcillas y óxidos de hierro, que proporcionan superficies activas de sorción, podría limitar la movilidad de contaminantes inorgánicos.

Tabla 3. Resultados del análisis con microscopía electrónica de barrido acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (MEB-EDS), de las muestras HxJ1 y HxJ5 de desechos mineros.

Muestra	Desechos mineros										
	HxJ1								HxJ5		
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Espectro	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171
Norm. %											
Mercurio	60.50	48.65	-	68.7	-	67.28	47.62	67.2	-	-	-
Azufre	30.65	25.45	-	26.05	-	18.21	19.32	29.32	-	-	-
Al ₂ O ₃	3.15	8.19	1.67	1.76	-	3.62	10.82	1.10	13.01	15.05	1.57
SiO ₂	2.30	10.98	97.50	1.83	-	7.55	12.02	0.85	15.51	14.45	0.88
FeO	2.15	2.86	0.57	1.18	44.20	2.31	6.59	0.75	40.20	39.30	46.96
CaO	0.08	0.02	-	0.18	-	0.45	0.96	0.61	0.30	0.37	-
K ₂ O	0.06	0.15	-	0.17	-	-	0.54	0.03	0.10	0.18	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-
MgO	0.07	0.18	-	0.02	0.99	-	0.75	-	0.62	1.07	4.08
MnO	0.07	0.03	-	-	3.43	0.05	-	0.03	0.16	0.14	-
Arsénico	-	-	-	-	-	0.09	1.00	-	-	-	-
Antimonio	-	-	-	0.05	-	-	-	0.04	-	-	-
Plomo	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-
ZnO	0.07	0.02	-	0.06	-	0.07	0.07	0.08	-	-	-
TiO ₂	0.90	3.47	0.28	-	51.40	0.37	0.29	-	30.1	29.45	46.55
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.04
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Los análisis químicos y mineralógicos realizados en este estudio evidencian diferencias significativas entre las zonas mineralizadas de Taxco de Alarcón y Huitzuco, resaltando el bajo contenido de sulfuros en Huahuaxtla; así como variaciones en las asociaciones mineralógicas.

La disposición a cielo abierto de DM en la zona urbana constituye un riesgo ambiental creciente, asociado al proceso de urbanización de la comunidad de Huahuaxtla. Los resultados obtenidos hasta el momento sugieren que la inhalación podría representar una vía potencial de exposición a compuestos inorgánicos contenidos en el material particulado suspendido. Sin embargo, sólo mediante la evaluación de las concentraciones de MEG, el análisis detallado del material particulado y la realización de estudios epidemiológicos será posible evaluar de manera precisa el impacto potencial del Hg en la comunidad de Huahuaxtla.

CONCLUSIONES

Los análisis químicos y mineralógicos realizados en roca y desechos mineros de la comunidad de Huahuaxtla, Guerrero, evidencian que el compuesto químico con mayor concentración

fue el óxido de calcio, lo que se relaciona con la abundancia de calcita en la mineralización primaria. Esta característica permite neutralizar el drenaje ácido de mina, lo cual contribuye a reducir la movilidad del Hg. Asimismo, concentraciones de mercurio total ($HgT=1.24\pm0.18$ mg/kg) determinadas en los DM son significativamente inferiores a los límites máximos permisibles establecidos a nivel nacional e internacional. Este resultado sugiere un menor riesgo toxicológico directo asociado al HgT, en comparación con otros distritos mineros de México, donde se han reportado valores considerablemente más altos y efectos comprobados sobre la salud humana.

Agradecimientos. Agradecemos a Manuel García por su apoyo técnico y a Carolina Muñoz-Torres por el análisis químico. Los valiosos comentarios de los revisores anónimos contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad del manuscrito. Los autores expresan su agradecimiento por sus generosas aportaciones.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto, ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo. Disponibilidad de datos. Se han compartido todos los datos en las

Tabla 4. Mercurio total en las muestras HxJ1 y HxJ5 de desechos mineros.

Muestra	HxJ1			HxJ5		
	Medición 1			Medición 2		
	1	2	3	1	2	3
Concentración de Hg (mg/kg)	1.187	1.075	1.001	1.322	1.480	1.375
Promedio		1.088			1.392	
Desviación estándar		0.093			0.080	
Promedio total				1.240 mg/kg		
Desviación estándar total				0.010 mg/kg		

tablas en el manuscrito y podemos distribuirlos de manera electrónica para los interesados en consultarlos y reproducirlos si se nos solicita oportunamente.

Contribución por coautor. Alejandro H. Ramírez-Guzmán: Conceptualización, investigación, metodología, curación de datos, recursos, redacción, borrador original. Rocío García Martínez: Conceptualización, análisis (HgT), metodología, supervisión, validación, revisión. Oscar Talavera-Mendoza: Conceptualización, metodología, validación, revisión. Jazmín A. López Díaz Investigación, metodología, análisis (MEB-EDS), curación de datos, redacción.

Financiamiento. Este trabajo fue financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM IA101313).

REFERENCIAS

- Angot, H., Dastoor, A., De Simone, F., Gårdfeldt, K., Gencarelli, C. N., Hedgecock, I. M., Langer, S., Magand, O., Mastromonaco, M. N., Nordström, C., Pfaffhuber, K. A., Pirrone, N., Ryjkov, A., Selin, N. E., Skov, H., Song, S., Sprovieri, F., Steffen, A., Toyota, K., Travnikov, O., Yang, X., & Dommergue, A. (2016). Chemical cycling and deposition of atmospheric mercury in polar regions: Review of recent measurements and comparison with models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 10735–10763. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10735-2016>
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (2019). *Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018*. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch.
- Bargagli, R. (2016). Atmospheric chemistry of mercury in Antarctica and the role of cryptogams to assess deposition patterns in coastal ice-free areas. *Chemosphere*, 163, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.007>
- Bencardino, M., Tassone, A., Martino, M., D'Amore, F., Sprovieri, T., Ungaro, C., Andreoli, V., Esposito, G., Silprandi, G., Lanzani, G., Angiuli, L., Nocioni, A., Leonardi, C., Sprovieri, F., & Pirrone, N. (2025). Establishing a national network for atmospheric mercury monitoring: preliminary spatial and temporal insights from Italy. *Atmospheric Environment*, 361, 121477. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121477>
- Boening, D. W. (2000). Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review. *Chemosphere*, 40(12), 1335–1351. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00283-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00283-0)
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58, 27–81. <https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n1a2>
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2007). Epithermal deposits in México – an update of current knowledge, and an empirical reclassification. In S. A. Alaniz-Álvarez, A. F. Nieto-Samaniego (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*: (Geological Society of America Special Paper, 422, pp. 377–415). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(14\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(14))
- Camprubí, A. (2013). Tectonic and metallogenic history of Mexico. In M. Colpron, T. Bissig, B. G., & Rusk, J. F. H., Thompson (Eds.), *Tectonics, Metallogeny, and Discovery: The North American Cordillera and Similar Accretionary Settings* (Special Publications of the Society of Economic Geologists, 17, pp. 201–243). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.17.06>
- Convenio de Minamata sobre el Mercurio (2024). *Convenio de Minamata sobre el mercurio, texto y anexos*. Organización de las Naciones Unidas. <https://minamataconvention.org/es/resources/convenio-de-minamata-sobre-el-mercurio-textos-y-anexos>
- Dótor Almazán, A., Armienta Hernández, M. A., Árcega Cabrera, F., & Talavera Mendoza, O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. *Hidrobiológica*, 24(3), 245–256. <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/601>
- Farfán-Panamá, J. L., Camprubí, A., González-Partida, E., Iriondo, A., & Gonzalez-Torres, E. (2015). Geochronology of Mexican mineral deposits: III: the Taxco epithermal deposits, Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 349–355. <https://doi.org/10.18268/BSGM2015v67n2a16>
- Gaioli, M., Amoedo, D., & González, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Archivos argentinos de pediatría*, 110(3), 259–264. <https://www.sap.org.ar/docs/publicaciones/archivosarg/2012/v110n3a18.pdf>
- Gallagher, D., & Pérez S. R. (1948). *Geology of the Huahuaxtla Mercury District State of Guerrero, Mexico* (Bulletin 960-E, pp. 149–175. United States Geological Survey.
- García-Martínez, R., Hernández-Silva, G., Pavia-Hernández, R., Schiavo, B., Flores-Espinosa, M., Wellens, A., Torres-Jardon, R., García-Reynoso, A., Martínez-Arroyo, A., Gavilán-García, A., & Ruiz-Suárez, L. G. (2021). Total gaseous mercury levels in the vicinity of the Central Mexico mountain mining zone and its dispersion area. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14, 1953–1967. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01068-w>
- Quevedo-Castañón, N. M., Talavera-Mendoza, O., Salgado-Souto, S. A., Ruiz, J., Dotor-Almazán, A., Ramírez-Guzmán, A. H., Sampedro-Rosas, L., Rosas-Acevedo, J. L., & Chavez-González, J. D. (2020). Temporal and spatial hydrogeochemical evolution and lead isotopic composition of a contaminated stream of Taxco, Guerrero, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37, 64–79. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.1.1087>
- Houston M. C. (2011). Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease and stroke. *Journal of Clinical Hypertension (Greenwich)*, 13(8), 681–627. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7176.2011.00489.x>
- Hsu-Kim, H., Eckley, C. S., Achá, D., Feng, X., Gilmour, C. C., Jonsson, S., & Mitchell, C. P. (2018). Challenges and opportunities for managing aquatic mercury pollution in altered landscapes. *Ambio*, 47(2), 141–169. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-1006-7>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. Recuperado el 26 de ENERO de 2021, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>
- Jiménez-Franco, A., Canet, C., Higuera, P., & Pi-Puig, T. (2024). Manifestaciones anómalas de mercurio atmosférico (GEM) y su relación con la actividad geotérmica de Pathé, estado de Hidalgo (México). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40. <https://doi.org/10.20937/rica.55090>
- Klein, C., & Hurlbut C. S. (1997). *Manual de Mineralogía* (cuarta edición). Reverte, S.A.
- Leura Vicencio, A. K., Carrizales Yañez, L., & Razo Soto, I. (2017). Mercury pollution assessment of mining wastes and soils from former silver amalgamation area in North-Central Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4), 655–669. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.04.09>
- Li P., Feng X., Shang L., Qiu G., Meng B., Liang P., & Zhang H. (2008). Mercury pollution from artisanal mercury mining in Tongren, Guizhou, China. *Applied Geochemistry*, 23, 2055–2064. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.04.020>
- Martínez-Trinidad, S., Hernández Silva, G., Ramírez Islas, M. E., Martínez Reyes, J., Solorio Munguía, G., Solís Valdez, S., & García Martínez, R. (2013). Total mercury in terrestrial systems (air-soil-plant-water) at the mining region of San Joaquín, Querétaro, Mexico. *Geofísica Internacional*, 52(1), 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71461-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71461-2)
- Mergler, D. (2021). Ecosystem approaches to mercury and human health: A way toward the future. *Ambio*, 50(3), 527–531. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01455-0>
- Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. A., Solé, J., & Iriondo, A. (2004). A major resurgent caldera in southern Mexico: the source of the late Eocene Tlaxiapa ignimbrite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136(1-2), 97–119.
- Novo, J. P., Martins, B., Raposo, R. S., Pereira, F. C., Oriá, R. B., Malva, J. O., & Fontes-Ribeiro, C. (2021). Cellular and Molecular Mechanisms Mediating Methylmercury Neurotoxicity and Neuroinflammation. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(6), 3101. <https://doi.org/10.3390/ijms22063101>
- Morton Bermea, O., Castro-Larragoitia, J., Arellano Álvarez A.A., Pérez-

- Rodríguez, R. J., Leura-Vicencio, A., Schiavo, B., Salgado-Martínez, E., Razo Soto, I., & Hernández Álvarez, E. (2021). Mercury in blood of children exposed to historical residues from metallurgical activity. *Exposure and Health*, 13, 281–292. <https://doi.org/10.1007/s12403-021-00382-z>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2005). *Evaluación Mundial Sobre el Mercurio*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Productos Químicos. <https://lac.saludsindanio.org/recursos/evaluacion-mundial-sobre-el-mercurio>
- Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Salgado-Martínez, E., & Hernández-Álvarez, E. (2020). Evaluation of possible impact on human health of atmospheric mercury emanations from the Popocatepetl volcano. *Environmental Geochemistry & Health*, 42(11), 3717–3729. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00610-6>
- Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Salgado-Martínez, E., García-Martínez, R., & Hernández-Álvarez, E. (2022). Health risk assessment of gaseous elemental mercury (GEM) in Mexico City. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(7), 456. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10107-7>
- Servicio Geológico Mexicano (2004). *Carta Geológico-Minera, Taxco E14-A68, 1:50,000*. Servicio Geológico Mexicano, Secretaría de Economía.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2004). *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Diario Oficial de la Federación. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Tafoya-Hernández, A., Talavera-Mendoza, O., Salgado-Souto, S. A., Ruiz, J., Hernández-Castro, E., Rosas-Acevedo, J. L., García-Ibáñez, S., Aguirre-Noyola, J. L., & Vázquez-Bahena, A. B. (2022). Impact assessment of Hg–Sb wastes to urban soils and shallow groundwater in the mining region of Huitzuco, Guerrero (southern Mexico) using mineralogical, geochemical and Sr–Pb isotopic tools. *Applied Geochemistry*, 138, 105213.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Villaseñor, E. D., Guzmán, A. R., Cortés, A., Souto, S. A. S., Dótor Almazán A., & Bustos, R. 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. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.12.002>
- United States Environmental Protection Agency (2017). Sewage Sludge (Biosolids). En *NPDES Compliance Inspection Manual* (US EPA publication 305-K-17-001, pp. 198–233). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-03/documents/npdesinspect-chapter-10.pdf>
- Wang, Y., Huang, J., Hopke, P. K., Rattigan, O. V., Chalupa, D. C., Utell, M. J., & Holsen, T. M. (2013). Effect of the shutdown of a large coal-fired power plant on ambient mercury species. *Chemosphere*, 92(4), 360–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.024>
- Werre Keeman, F. J., & Estrada Rodarte, G. (1999). *Monografía Geológica Minera del Estado de Guerrero*. Consejo de Recursos Minerales.