

Artículo Original

Evaluación Geoquímica y Ambiental de Residuos Mineros en la Planta C-4 de Catavi, Potosí, Bolivia

Geochemical and Environmental Assessment of Mining Waste at the C-4 Plant in Catavi, Potosí, Bolivia

Rubén Nestor Zambrana Martínez^{1*}

*Autor de correspondencia: rubennzm@gmail.com

¹Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera Ingeniería de Minas-Topografía, Potosí, Bolivia

Recibido: 21/11/2024 Aceptado para publicación: 01/12/2024

Resumen

Este estudio evalúa los residuos mineros (RM) generados en la Planta C-4 de Catavi, Potosí, Bolivia, analizando su impacto ambiental y su potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR). Se llevaron a cabo análisis geoquímicos integrales, que incluyeron muestreo, caracterización química, mineralógica y granulométrica, además de pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas. Los resultados evidenciaron altas concentraciones de elementos contaminantes como Fe, As, Pb y Zn, que superan los límites permisibles. El análisis mineralógico identificó un predominio de sílice (69.89%) y un contenido significativo de pirita (1.16%), un componente clave en la generación de DAR. Las pruebas estáticas determinaron un Potencial Neto de Neutralización (NNP) de 0.99 kg CaCO₃/t, situándolo en la zona de incertidumbre, mientras que el NPR (4.96) lo clasifica como no generador de DAR, aunque cercano al límite. Se recomienda realizar pruebas dinámicas adicionales para evaluar su comportamiento geoquímico a largo plazo. Este estudio proporciona información crítica para la gestión de residuos mineros y la mitigación de impactos ambientales en Bolivia.

Palabras clave: análisis mineralógico, contaminación minera, metales pesados, sulfuros

Abstract

This study evaluates the mining waste (MW) from the C-4 Plant in Catavi, Potosí, Bolivia, analyzing its environmental impact and acid rock drainage (ARD) potential. Comprehensive geochemical analyses, including sampling, chemical, mineralogical, and granulometric characterization, as well as static and dynamic tests, were conducted. Results revealed elevated concentrations of Fe, As, Pb, and Zn, exceeding permissible limits. Mineralogical analysis showed a predominance of silica (69.89%) and significant pyrite content (1.16%), a key component in ARD generation. Static tests indicated a Net Neutralization Potential (NNP) of 0.99 kg CaCO₃/t, placing the waste in the uncertainty zone, while the NPR (4.96) classifies it as non-ARD generating but close to the threshold. Additional dynamic tests are essential to confirm long-term geochemical behavior. This study provides critical information for managing mining waste and mitigating environmental impacts.

Keywords: mineralogical analysis, mining contamination, heavy metals, sulfides

Introducción

La minería en Bolivia es una actividad económica crucial, representando una parte significativa del Producto Interno Bruto (PIB) del país y proporcionando empleo a miles de personas en diversas regiones, como el departamento de Potosí. Sin embargo, esta industria también genera importantes impactos ambientales, especialmente en áreas donde se procesan minerales ricos en sulfuros. En particular, las actividades mineras en Catavi, un área tradicionalmente productora de minerales, han contribuido a la contaminación de recursos hídricos y suelos, con consecuencias tanto ecológicas como para la salud humana (Strosnider *et al.*, 2011; Ramos Ramos *et al.*, 2014).

Uno de los principales problemas ambientales asociados con los residuos mineros, como los relaves o colas-arenas, es la generación de drenaje ácido de roca (DAR). Este fenómeno ocurre cuando los minerales de sulfuro, como la pirita, se oxidan en presencia de agua y oxígeno, produciendo ácido sulfúrico que lixivia metales pesados y metaloides al medio ambiente (Lubkova *et al.*, 2016; Romero *et al.*, 2014). En Bolivia, este problema ha sido particularmente relevante en la cuenca del río Pilcomayo, donde el DAR ha afectado tanto las aguas superficiales como los sedimentos, incrementando la concentración de metales pesados como arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd) y zinc (Zn), con graves repercusiones para la biodiversidad y la salud humana (Strosnider *et al.*, 2011).

Además del impacto sobre las fuentes de agua, las actividades mineras en Bolivia han causado una considerable contaminación del suelo y los sedimentos, lo que agrava la pérdida de biodiversidad y la alteración de ecosistemas enteros (Espinosa-Reyes *et al.*, 2014). Este escenario subraya la necesidad urgente de desarrollar e implementar prácticas de manejo y remediación que minimicen estos impactos, asegurando la sostenibilidad de las operaciones mineras y la protección del medio ambiente (Singh, 2013).

En este contexto, el presente estudio se centra en la evaluación geoquímica y ambiental de los residuos mineros generados en la Planta C-4 de Catavi, en Potosí, Bolivia. El objetivo principal es identificar el riesgo potencial de generación de DAR en estos residuos, así como su impacto en los recursos hídricos y suelos circundantes, contribuyendo así a la gestión ambiental más eficaz de los desechos mineros en la región.

Materiales y Métodos

Localización del estudio

Este estudio se centró en los residuos mineros generados en la Planta C-4 de Catavi, ubicada en Potosí, Bolivia. Para asegurar la representatividad de las muestras, se utilizó el método de muestreo tipo Vezin, tomando dos muestras de los residuos en los meses de julio y agosto (M1 y M2). Las muestras fueron sometidas a un proceso de secado, decantación y cuarteo para garantizar su homogeneidad y adecuación para los análisis posteriores.

Caracterización del Residuo

Análisis Químico: Para determinar la concentración de elementos contaminantes, como hierro (Fe), arsénico (As), plomo (Pb) y zinc (Zn), se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF), utilizando un equipo Genius 7000-XRF, según lo descrito por Goldthorp & Lambert (2007).

Análisis Mineralógico: La difracción de rayos X (DRX) se aplicó para identificar los minerales presentes, especialmente aquellos responsables de la acidificación, como la pirita (FeS₂), siguiendo las recomendaciones de Burkett, Graham & Ward (2015).

Análisis Granulométrico: La distribución del tamaño de grano de los residuos se determinó mediante un agitador de tamices, usando tamices estándar para calcular el parámetro d₅₀, de acuerdo con el procedimiento de El-Sayed & Mostafa (2014).

Pruebas Geoquímicas Estáticas

Se llevaron a cabo diversas pruebas estáticas para evaluar el potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR) de los residuos mineros:

Potencial de Neutralización (NP): Este parámetro se determinó usando el método Sobek modificado, tal como lo indican Gushchina et al. (2021), para evaluar la capacidad de los residuos para neutralizar los ácidos producidos por la oxidación de los sulfuros presentes.

Potencial de Acidez (AP): Se calculó el Potencial de Acidez en función del contenido de azufre total (S total) y sulfatos (SO_4^{2-}), basándose en el método descrito por Mahanta et al. (2017).

Potencial Neto de Neutralización (NNP): El NNP se calculó como la diferencia entre el NP y el AP, siguiendo la fórmula propuesta por Karagüzel et al. (2020).

Relación Neutralization Potential Ratio (NPR): Para clasificar el residuo según su potencial de generar DAR, se evaluó la Relación NPR, de acuerdo con el método indicado por Karagüzel et al. (2020).

Resultados

Análisis Químico Ambiental

Los residuos mineros (M1 y M2) presentan concentraciones de elementos contaminantes que superan los límites permisibles, como se muestra en la Tabla 1. Las concentraciones elevadas de Fe, As, Pb y Zn sugieren un alto riesgo de contaminación si estos residuos no se manejan adecuadamente.

Tabla 1. Concentración de elementos contaminantes en los residuos mineros

Elemento	Muestra 1		Muestra 2	
	julio (ppm)	julio (%)	agosto (ppm)	agosto (%)
Fe	20121,9	2,0122	20027,1	2,0027
Mn	214,2	0,0214	210,0	0,0210
As	143,2	0,0143	173,6	0,0173
Zn	56,3	0,0056	91,1	0,0091
Pb	63,3	0,0063	68,4	0,0068
Cu	7,0	0,0007	12,4	0,0012
Cr	6,3	0,0006	5,9	0,0006

Análisis Mineralógico Ambiental

Los análisis de difracción de rayos X revelaron la presencia predominante de sílice (SiO_2) y piritita (FeS_2), como se muestra en la Tabla 2. La composición mineralógica de los residuos mineros muestra que el Cuarzo (SiO_2) es el componente predominante con valores superiores al 69%, registrando un leve incremento de +0,720 entre julio y agosto, lo que indica estabilidad en su presencia. La Alúmina (Al_2O_3) disminuye ligeramente en -0,278, lo que podría reflejar variaciones en el proceso de extracción. Los minerales de hierro, como Hematita (Fe_2O_3) y Piritita (FeS_2), presentan aumentos moderados de +0,338 y +0,070, respectivamente, lo que sugiere una mayor presencia de hierro oxidado y sulfuros.

El cambio más relevante se observa en el Óxido de Manganeso (MnO), que incrementa significativamente en +0,142, posiblemente debido a una mayor liberación de manganeso o alteraciones geoquímicas. Por último, la Cal Viva (CaO) muestra un leve aumento de +0,034, asociado a materiales calcáreos. En general, los cambios son mínimos, destacando únicamente el comportamiento del MnO , que podría indicar una fuente de contaminación o variación en las condiciones ambientales.

Tabla 2. Composición mineralógica promedio de los residuos mineros

Mineral	Nombre	M1 (julio)	M2 (agosto)	Diferencia
SiO_2	Cuarzo	69,530	70,250	+0,720
Al_2O_3	Alúmina	11,134	10,856	-0,278
Fe_2O_3	Hematita	7,676	8,014	+0,338
FeS_2	Piritita	1,120	1,190	+0,070
MnO	Óxido de Mn	0,089	0,231	+0,142
CaO	Cal viva	0,367	0,401	+0,034

Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico realizado en julio y agosto revela diferencias significativas en la distribución de las partículas (Tabla 3). En julio, el 81,92% de las partículas pasa por el tamiz 40# (0,400 mm); en agosto, esta proporción es similar, alcanzando el 80,89%. Sin embargo, en los tamices más finos, como el 140# (0,105 mm) y el 200# (0,074 mm), el porcentaje acumulado que pasa disminuye en agosto, lo que indica una mayor retención de partículas finas. Además, en el tamiz >200#, el peso retenido es notablemente mayor en agosto (52,54 g frente a 31,29 g en julio), lo que sugiere un incremento en la proporción de partículas muy finas. En resumen, los datos de agosto muestran una mayor concentración de partículas en los extremos (gruesas y muy finas), mientras que en julio la distribución es más uniforme entre los diferentes tamaños. Estas diferencias podrían reflejar variaciones en el material procesado o en las condiciones operativas entre ambos meses.

Tabla 3. Análisis Granulométrico (julio y agosto)

Tamiz #TYLER	Abertura (mm)	Peso Retenido (g) julio	Peso Reten. Acum. (%) julio	Peso Acum. que pasa (%) julio	Peso Retenido (g) agosto	Peso Reten. Acum. (%) agosto	Peso Acum. que pasa (%) agosto
40#	0,400	50,49	18,08	81,92	67,36	19,11	80,89
60#	0,250	96,70	52,71	47,29	136,45	57,81	42,19
100#	0,149	65,58	76,19	23,81	85,11	81,95	41,12
140#	0,105	25,19	85,21	17,79	27,06	89,63	10,37
200#	0,074	10,00	88,79	11,21	13,61	93,49	6,51
<200#	—	31,29	100,00	—	22,95	100,00	—

Pruebas Geoquímicas Estáticas

La prueba geoquímica estática evalúa el equilibrio entre la capacidad acidificante (AP) y la capacidad neutralizante (NP) de un material, determinando su Potencial Neto de Neutralización (NNP) (Tabla 4). En este caso, el material analizado (COMÚN) presenta un AP de 0.25 Kg CaCO₃/t y un NP de 1.24 Kg CaCO₃/t, lo que da un NNP de 0.99 Kg CaCO₃/t. Este valor positivo indica una zona de incertidumbre, donde el material tiene capacidad para neutralizar la generación de acidez, pero no de forma concluyente. Por ello, se recomienda llevar a cabo una prueba geoquímica dinámica (PGD) para obtener resultados más precisos sobre su comportamiento a largo plazo.

Tabla 4 . Resultados de la prueba geoquímica estática

Código Cliente	AP (Kg CaCO ₃ /t)	NP (Kg CaCO ₃ /t)	NNP (Kg CaCO ₃ /t)	DAR
Común	0.25	1.24	0.99	No Genera

Discusión

Los resultados obtenidos del análisis químico ambiental evidencian concentraciones elevadas de elementos contaminantes como Fe, As, Pb y Zn, que superan los límites permisibles, especialmente en las muestras recolectadas durante agosto. Estas concentraciones sugieren un alto riesgo de contaminación de suelos y cuerpos de agua si los residuos mineros no se gestionan adecuadamente. La presencia significativa de As y Pb es particularmente preocupante debido a su toxicidad y movilidad en el medio ambiente, lo que representa un peligro directo para la salud humana y la biodiversidad circundante (Strosnider *et al.*, 2011; Espinosa-Reyes *et al.*, 2014). Esto coincide con estudios previos en la región, como los realizados en la cuenca del río Pilcomayo, donde la lixiviación de estos metales pesados ha generado un impacto ambiental crítico. Asimismo, la presencia de manganeso y zinc en niveles superiores en agosto podría indicar procesos geoquímicos activos, como oxidación de sulfuros y liberación

de metales, agravando el riesgo de contaminación en la zona (Lubkova *et al.*, 2016).

Por otra parte, los análisis mineralógicos revelan que la pirita (FeS₂) es uno de los minerales predominantes en los residuos mineros, lo que incrementa la probabilidad de generación de drenaje ácido de roca (DAR) en presencia de agua y oxígeno (Romero *et al.*, 2014). La estabilidad observada en la concentración de cuarzo (SiO₂) indica que no hay cambios significativos en los materiales inertes, pero el incremento notable del óxido de manganeso (MnO) sugiere alteraciones geoquímicas que podrían estar favoreciendo la liberación de manganeso al ambiente. Este fenómeno no solo agrava la contaminación del agua y el suelo, sino que también requiere especial atención, ya que el manganeso en concentraciones elevadas puede ser perjudicial para la salud humana (Singh, 2013). En conjunto, estos resultados subrayan la urgente necesidad de implementar medidas de mitigación y remediación ambiental, tales como sistemas de neutralización de drenaje ácido y confinamiento adecuado de residuos, para reducir los impactos negativos generados por las actividades mineras en Catavi (Strosnider *et al.*, 2011; Ramos Ramos *et al.*, 2014).

Conclusión

Los residuos mineros de la Planta C-4 de Catavi, representan un riesgo potencial de contaminación ambiental, requiriendo pruebas dinámicas adicionales y estrategias de mitigación adecuadas para garantizar su manejo sostenible.

Declaración de conflictos

Los autores no tienen conflicto de interés

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento al Ing. Cristian Zolá, al Ing. René Janijani y a los estudiantes de la asignatura de Medio Ambiente del segundo curso, gestión 2020, por su colaboración en este trabajo de investigación. Además, un reconocimiento especial al Dr. C. Canet y a Nayelli Soto de la UNAM-México, así como al Ing. Lucio Sánchez de la Cooperativa Minera Catavi Siglo XX Ltda., por su valioso apoyo y contribuciones durante el desarrollo de este estudio.

Referencias

- Lubkova, T., Yablonskaya, D., Shestakova, T., Strilchuk, N., & Oleynikova, O. (2016). Geochemical investigations for the acid rock drainage prediction applied to the Nakhodka porphyry copper system (Western Chukotka, Russia). In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM (Vol. 2, pp. 381–388).
- Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D. J., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Mejía-Saavedra, J., Cilia-López, V. G., Costilla-Salazar, R., & Díaz-Barriga, F. (2014). Effect of mining activities in biotic communities of Villa de La Paz, San Luis Potosí, Mexico. *BioMed Research International*, 2014, Article 165046. <https://doi.org/10.1155/2014/165046>
- Ramos Ramos, O. E., Rötting, T. S., French, M., Sracek, O., Bundschuh, J., Quintanilla, J., & Bhattacharya, P. (2014). Geochemical processes controlling mobilization of arsenic and trace elements in shallow aquifers and surface waters in the Antequera and Poopó mining regions, Bolivian Altiplano. *Journal of Hydrology*, 518, 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.019>
- Romero, F. M., Canet, C., Alfonso, P., Zambrana, R. N., & Soto, N. (2014). The role of cassiterite controlling arsenic mobility in an abandoned stanniferous tailings impoundment at Llallagua, Bolivia. *Science of the Total Environment*, 481(1), 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.002>
- Strosnider, W. H. J., Llanos López, F. S., & Nairn, R. W. (2011). Acid mine drainage at Cerro Rico de Potosí I: Unabated high-strength discharges reflect a five century legacy of mining. *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 899–910. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0996-x>
- Singh, G. (2013). Environmental issues with best management practices of responsible mining. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 61(7–8), 152–162.