

Fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros y mitigación del manganeso en minería

Geochemical fractionation of mining effluents and manganese mitigation in mining

Recibido: 25 de agosto de 2025 | Revisado: 14 de septiembre de 2025 | Aceptado: 10 de diciembre de 2025

Atilio Mendoza Apolaya¹

¹ Escuela Universitaria de Posgrado – Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú

Correo: amendoza@uni.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-6790-0458>

<https://doi.org/10.62428/rcvp2025422078>

Abstract

The objective was to optimize economic recovery in the treatment of acidic mining waste effluents. Their metallic components were fractionated through geochemical processes, utilizing their physicochemical properties and stability of the elements Fe^{+3} , Mn^{+4} , and Zn^{+2} , converting them from liquid to solid phases, controlling the pH with a saturated solution of lime and sodium sulfide. Sludges with economic values for iron, manganese, and zinc were obtained; Mn^{+2} was also removed by oxidation with chlorine to its solid phase. All of the above was used to design a plant for its mitigation and to meet water quality standards and achieve economic, social, and environmental sustainability.

Keywords: Acid drainage, geochemical fractionation, mitigation, environmental sustainability.

Resumen

El objetivo fue optimizar la recuperación económica en el tratamiento de efluentes ácidos de residuos mineros. Se fraccionaron sus componentes metálicos por procesos geoquímicos utilizando sus propiedades físico-químicas y estabilidad de los elementos Fe^{+3} , Mn^{+4} y Zn^{+2} pasando de fases líquida a sus fases sólidas controlando el pH con solución saturada de cal y sulfuro de sodio. Se obtuvo lodos con valores económicos en hierro, manganeso y zinc; asimismo la remoción del Mn^{+2} por oxidación con cloro hasta su fase sólida. Todo lo anterior sirvió en diseñar una planta para su mitigación y cumplir con los estándares de la calidad del agua y lograr la sostenibilidad económica, social y ambiental.

Palabras clave: Drenaje ácido, fraccionamiento geoquímico, mitigación, sostenibilidad ambiental.



Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Introducción

La presente investigación estudia el fraccionamiento o separación de los elementos metálicos económicos como Fe, Mn y Zn de un efluente líquido ácido; ya que lo clásico que se realiza es una neutralización total con cal (Aduvire et al. 2006), obteniéndose grandes volúmenes de lodos complejos cuya disposición ocupa mucho tratamiento, espacio y drenajes críticos de controlar; respecto a trabajos similares son muy escasos en las publicaciones conocidas Adrianto et al. (2023).

Aduvire (2006), Santofimia et al. (2022) y Han et al. (2023) consideran los procesos convencionales la incorporación de agentes alcalinizantes principalmente cal hidratada, caliza triturada, soda cáustica, carbonato sódico o amoníaco para neutralizar la acidez y establecer las condiciones necesarias que permitan la precipitación de metales pesados.

Gonçalves et al. (2024), indican que la industria minera es una de las mayores fuentes de preocupación ambiental a nivel mundial. Yan et al. (2022) y Du et al. (2022) explican que el drenaje ácido de minas (AMD) es un problema global y causa impactos ambientales dañinos. AMD tiene alta acidez y contiene una alta concentración de metales pesados y metaloides, lo que lo hace tóxico para plantas, animales y humanos.

Thomas et al. (2022) y Sarker et al. (2023) establecen que el drenaje ácido minero (DAM), residuo resultante de las operaciones extractivas caracterizado por su contenido de sulfatos, hierro y metales pesados, constituye un factor crítico para la salud pública y el desarrollo sustentable.

Hermassi et al. (2022) enfatizan que el drenaje ácido de mina (DAM) todavía se considera uno de los mayores desafíos de sostenibilidad minera debido a los grandes volúmenes de residuos generados y el elevado coste de tratamiento asociado. Jiménez et al. (2023) explican que las aguas subterráneas contaminadas son un problema grave en los países desarrollados. Tum et al. (2022) en la provincia de Mondulkiri, describen que, en Camboya, los mineros artesanales de oro vierten relaves y aguas residuales del procesamiento de oro en un afluente del río Prek Te. Durante el período pluvial, las concentraciones de metales pesados en el efluente se reducen mediante procesos de atenuación natural hasta alcanzar valores inferiores a los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud para agua de consumo humano; sin embargo, esto no ocurre en condiciones secas.

Adrianto et al. (2023) señalan que recientemente ha aumentado el interés hacia el reprocesamiento de residuos mineros, proceso dirigido a extraer materiales de valor. Pincetti-Zúniga et al. (2022) indican que los medios de vida de los ciudadanos de los valles agrícolas rurales de la árida Región de Arica y Parinacota, más al norte de Chile, dependen en gran medida del agua procedente de las precipitaciones a gran altura y de la escorrentía hacia zonas de menor elevación. No obstante, las concentraciones elevadas de arsénico, boro y otros elementos potencialmente tóxicos afectan la calidad hídrica.

Xu et al. (2023) y Heim et al. (2023) indican que los minerales de óxido de manganeso (Mn) naturales a menudo se forman por oxidación microbiana de Mn (II), lo que resulta en fases de óxido de Mn (III/IV) nanocristalinas con alta reactividad que pueden influir en la absorción y liberación de muchos metales (por ejemplo, Ni, Cu, Co y Zn).

Visto lo anterior, el objetivo es optimizar la recuperación económica en el tratamiento de efluentes ácidos de residuos mineros.

Materiales y métodos

El tipo de diseño fue experimental. Se aplicó un fraccionamiento secuencial sistemático del efluente minero ácido para obtener metales económicos utilizando un reactor y un clarificador para cada elemento separado y lograr al final agua tratada de calidad para los cuerpos receptores, dentro del marco de la sostenibilidad ambiental.

Para desarrollar el estudio se realizó primeramente una caracterización de los parámetros y componentes del efluente ácido de mina utilizando potenciómetros para medir el pH, conductividad de Takeno et al. (2005),

pruebas de separación utilizando principalmente soluciones de cal y de sulfuros; teniendo en cuenta los diagramas de estabilidad y datos termodinámicos de los elementos a ser separados.

Los instrumentos utilizados corresponden a equipos para operaciones unitarias en agitación, floculación y sedimentación; análisis espectral en la identificación y cuantificación de elementos del proceso de fraccionamiento orientados por fichas de tablas de estabilidad físico-química y termodinámicas respecto a posibilidades de ocurrencia de reacciones químicas; asimismo, fichas de estándares de calidad de agua.

- Etapa 1: Seleccionar drenajes ácidos de unidades mineras que utilizan el método clásico de neutralización con cal, floculación y sedimentación con disposición final de lodos totales ocupando grandes áreas.
- Etapa 2: Analizar las muestras a fin establecer un fraccionamiento o separación sistemática de metales de importancia en la sostenibilidad ambiental; asimismo conocer los caudales.

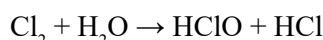
Para el fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros se utilizó el principio del producto de solubilidad K_{ps} , que determina las condiciones requeridas para la formación de fases sólidas en medio acuoso. Esta formación ocurre cuando el producto de la concentración iónica Q en solución supera el valor de la constante del producto de solubilidad K_{sp} , cumpliendo la relación $(K_{sp}/Q) < 1$, lo que permite el fraccionamiento controlado de iones desde la solución hacia una fase sólida.

Asimismo, la utilización de los diagramas de estabilidad metálica en función del pH y potencial redox Eh para implementar mecanismos de acondicionamiento en intervalos específicos, logrando la formación de fases sólidas que faciliten su eliminación mediante procesos de separación sólido/líquido como se indica en los diagramas del hierro y del manganeso.

- Etapa 3: Formulación del proceso secuencial de innovación para el fraccionamiento en base a las propiedades de estabilidad físico-química y termodinámica de los metales seleccionados.

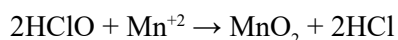
El proceso de remoción del manganeso de un efluente seleccionado incluye un proceso de oxidación del manganeso con cloro seguido de un ajuste del pH en medio alcalino a fin de coprecipitarlo con hidróxido de hierro.

Cuando el cloro es adicionado al agua ocurre la siguiente reacción reversible:



La solución resultante contiene cantidades equimolares del ácido débil hipocloroso y el ácido fuerte de ácido clorhídrico.

La oxidación del manganeso ocurre según la reacción:



El procedimiento para el desarrollo del fraccionamiento de metales de drenajes ácidos y remoción del manganeso es según Hernández-Sampieri et al. (2014):

- Etapa 4: Selección del reactor, agitador, reactivos y sensores a utilizar durante el proceso experimental de fraccionamiento para un determinado volumen de drenaje ácido.
- Etapa 5: Desarrollo de pruebas experimentales a fin de optimizar la eficiencia del proceso.
- Etapa 6: Separaciones sólido/líquido, donde el sólido es la fracción de uno de los metales separados y el líquido contiene otro metal a ser separado hasta el final, donde se tiene el agua tratada.
- Etapa 7: Análisis cuantitativo por métodos espectrométricos de los componentes de las fases sólidas y líquidas.
- Etapa 8: Balance de masas de los metales recuperados.
- Etapa 9: Diseño de planta piloto para recuperación en continuo de metales incluyendo un reactor con agitador y clarificador para la separación de cada metal.
- Etapa 10: Discusión de proceso, conclusiones y recomendaciones.

Resultados

El fraccionamiento de un efluente ácido en pH 1.5 con 1,432 mg/L de hierro se realiza en un reactor con 2 litros en agitación controlada a 250 revoluciones por minuto (RPM) (Figura 1) con adición del álcali de neutralización, floculación y sedimentación y control del pH y Eh; a fin de controlar los factores físico-químicos.

Figura 1
Efluente minero inicial



Fraccionamiento del hierro

Adicionando solución de cal al 10% hasta pH 5 y luego la adición de floculante magnafloc al 0.05% seguido de una sedimentación. En la Figura 2 se muestra la separación del hierro en función del pH y en la Figura 3 la fracción de hierro separado.

Figura 2
Separación del hierro en pH 5

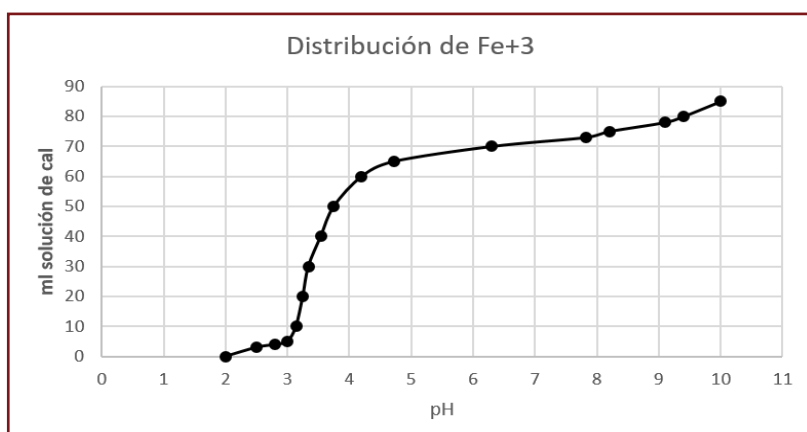
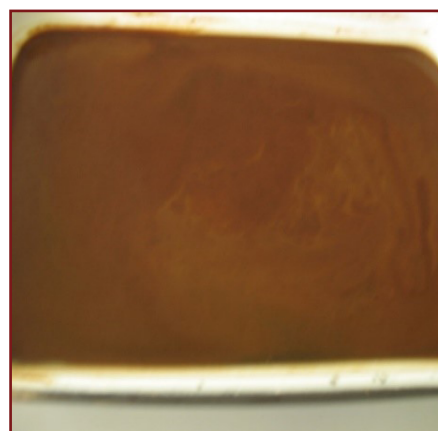


Figura 3
Fracción de hierro separado



Fraccionamiento del manganeso

Aumentado el pH con agitación a 250 RPM, se inicia la precipitación entre 8.5 y 9.5 de pH, lográndose la separación del manganeso. En la Figura 4 se muestra la separación de manganeso a pH 9 y en la figura 5 la fracción de manganeso separado.

Figura 4

Separación de manganeso a pH 9

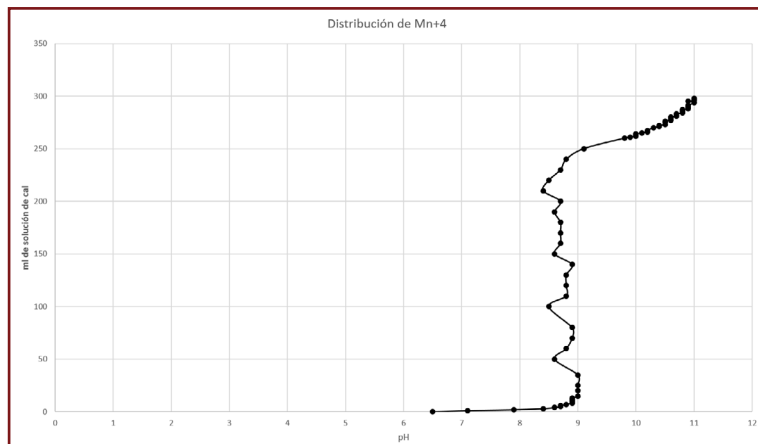


Figura 5

Fracción de manganeso separado



Fraccionamiento del zinc

Separación del zinc como sulfuro de zinc por adición de sulfuro de sodio en pH 5 ($\text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{S} \rightarrow \text{ZnS} + \text{Na}_2\text{SO}_4$). En la Figura 6 se muestra la reacción del Zn con sulfuro y en la Figura 7 muestra la separación del Zn como ZnS.

Figura 6

Reacción del Zn con sulfuro

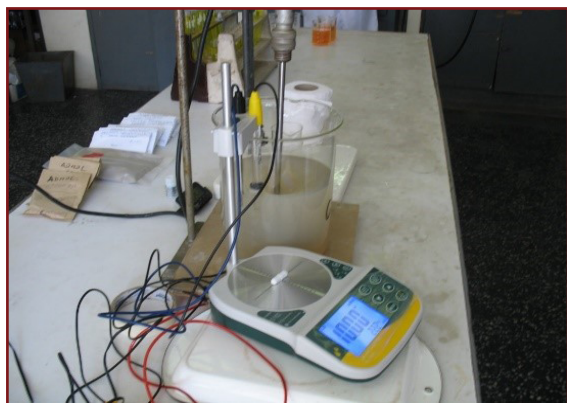


Figura 7

Separación del Zn como ZnS

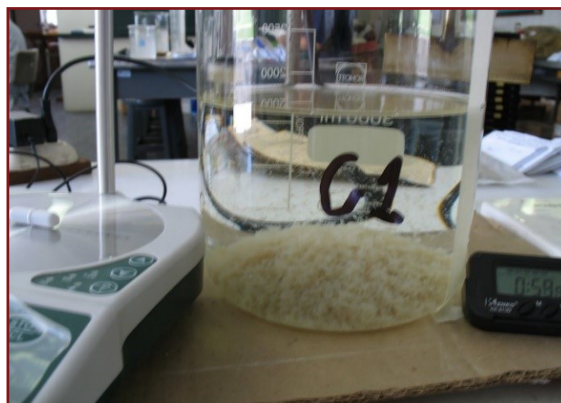


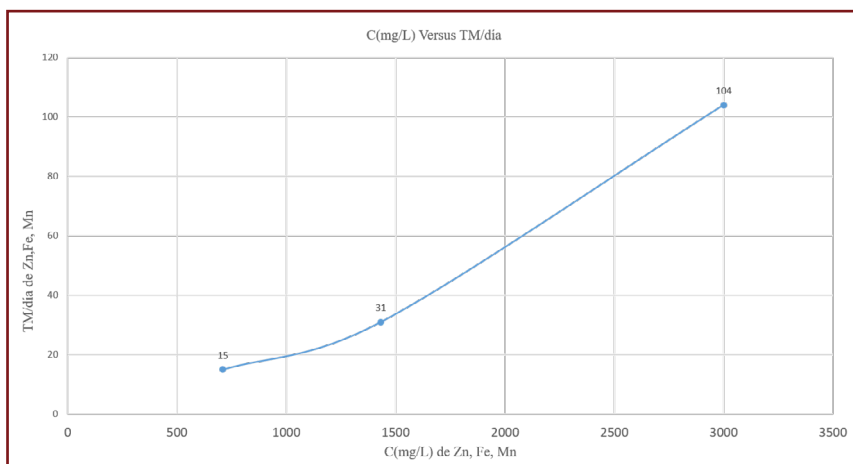
Tabla 1

Balance de fraccionamiento del Fe, Mn y Zn

Elemento	L/seg	mg/L	mg/seg	g/seg	g/día	Kg/día	TM/día
Fe	250	1432	358000	358	30931200	30931	31
Mn	400	3000	1200000	1200	103680000	103680	104
Zn	250	710	177500	178	15336000	15336	15

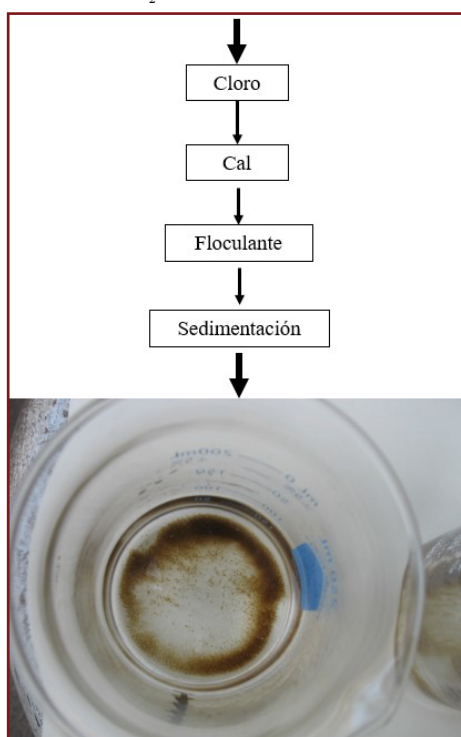
Elemento	C(mg/L)	TM/día	%Recuperación
Zn	710	15	95
Fe	1432	31	92
Mn	3000	104	90

Figura 8
Recuperación de Zn, Fe y Mn en TM por día



Para la remoción del manganeso el proceso comprende la adición de cloro para oxidación del manganeso, un ajuste del pH con cal, un floculante y luego sedimentación, lo cual se indica en siguiente diagrama de flujo.

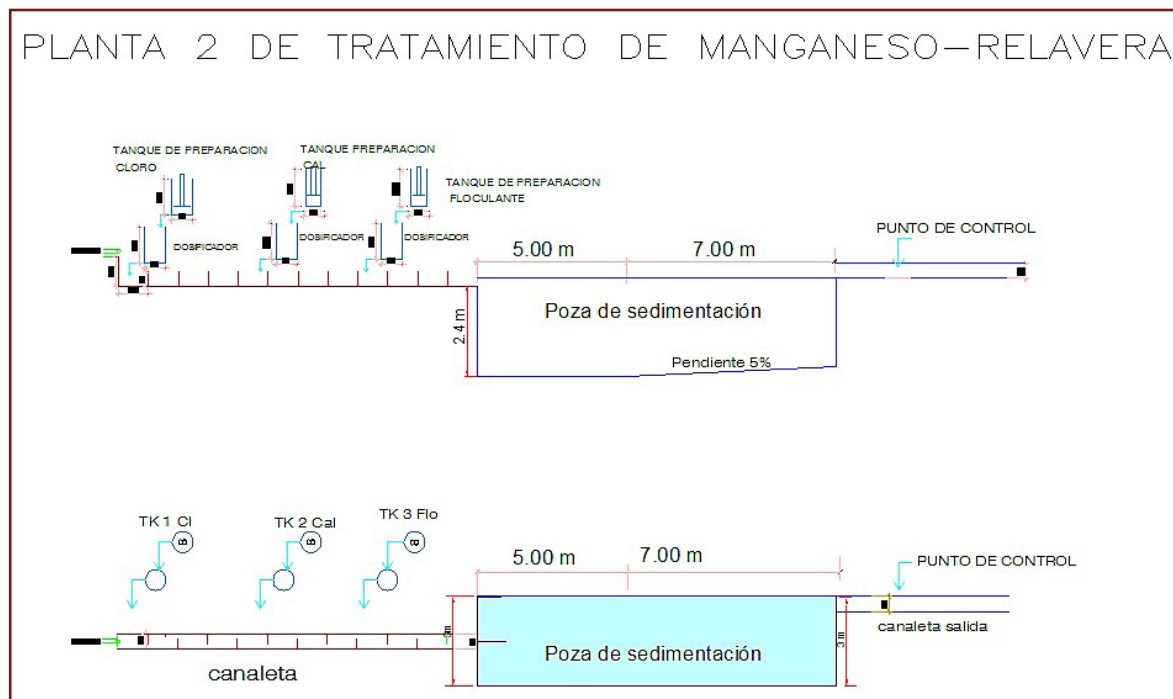
Figura 9
Separación del manganeso de efluente por acción del Cl_2



El diseño de la planta comprende la entrada del efluente, seguido de una dosificación de cloro, luego solución de cal y adición de floculante a través de una canaleta con pantallas para mezcla con los dosificantes e ingreso a una poza de sedimentación con un punto de control de calidad en el canal de salida.

Figura 10

Planta de remoción de manganeso – en zona de relavera



Discusión

El fraccionamiento geoquímico de efluentes mineros corresponde a una serie de procesos físico-químicos secuenciales a fin de obtener fracciones independientes de metales como el caso del hierro, manganeso y zinc; los dos primeros como hidróxidos y el tercero como sulfuro; diferente a los métodos experimentales convencionales de obtener un lodo final constituido por una mezcla de material con usos muy restringidos; mostrándose en la Tabla 2 la recuperación por día.

Tabla 2

Recuperación por día de los elementos

Elementos	TM/día
Fe	31
Mn	104
Zn	15

El fraccionamiento geoquímico de un efluente nos lleva a una disminución de los residuos y a condiciones de sostenibilidad ambiental por el valor económico asociado a cada fracción de elemento independiente; asimismo, una menor área para disposición de residuos.

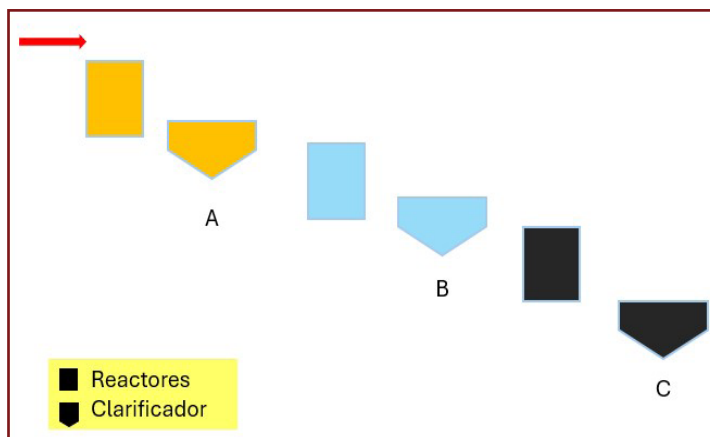
Los resultados del fraccionamiento de efluentes ácidos que permiten separar el hierro, manganeso y zinc nos permite inducir el desarrollo de un proceso de fraccionamiento en continuo utilizando el efluente ácido como materia inicial y un conjunto de reactores y clarificadores que nos permitan separar productos A, B y C como se indica en la Figura 11, obteniéndose un efluente final controlado lo cual llevaría a una sostenibilidad ambiental y preservación de ecosistemas.

El diseño del proceso depende fundamentalmente de las características del efluente que se genera durante el desarrollo de la operación minera, lo cual estaría relacionado al tipo de yacimiento mineral.; así podríamos tener fraccionamientos Fe y Cu o Fe,Cu, Mo, etc.

Los diagramas de pH versus Eh (potencial redox) son de importancia a fin de orientar la transición para pasar de una fase acuosa a una fase sólida donde se recupera el metal como hidróxido o sulfuro.

Figura 11

Planta de remoción de manganeso – en zona de relavera



Durante el proceso de separación de una fase líquida del sólido con el metal hemos utilizado una bomba peristáltica, para pasar la fase líquida remanente a otro reactor; esto nos permite desarrollar un proceso secuencial a una escala piloto; siendo a escala de planta un reactor y un clarificador que permite una separación sólido/líquido a gran velocidad.

Otro aspecto de importancia es que podemos utilizar diferentes sustancias que reaccionen específicamente con el elemento que deseamos separar verificado por las condiciones termodinámicas; siendo un ejemplo muy interesante la separación del zinc donde utilizamos sulfuro de sodio a fin de precipitar sulfuro de zinc equivalente a la esfalerita.

Los efluentes mineros de drenajes ácidos investigados corresponden a sistemas acuosos con predominancia de cationes como hierro, manganeso, zinc y aniones principalmente sulfatos relacionados al tipo de yacimiento donde han ocurrido la hidrólisis y oxidación de los sulfuros, es necesario verificarlo durante la caracterización inicial del efluente.

El manganeso ocurre comúnmente en los efluentes como Mn^{+2} por lo cual requerimos oxidarlo con aire durante la agitación para pasarlo a Mn^{+4} en la etapa de neutralización, lográndose pasarlo a una fase sólida en un pH de 10 o mayor y luego el efluente residual hay que disminuir el pH para cumplir con la normatividad ambiental; sin embargo en la investigación realizada logramos innovar haciendo una oxidación con cloro; lo cual nos permite precipitarlo en el rango del pH de la normatividad ambiental.

El análisis del costo/beneficio del fraccionamiento se ilustra en la Tabla 3 siguiente para los casos del zinc, hierro y manganeso; donde los beneficios son mayores que los costos.

Tabla 3

Balance de costo / beneficio de la recuperación

Productos	\$/TM	\$/TM	\$/TM	TM/día	\$/día	\$/día	\$/día
Zn (ZnS)	2616			15	39240		
Fe (Fe ₂ O ₃)		100		31		3100	
Mn (MnO ₂)			3	104			312

Los costos de planta, reactivos, operatividad, energía y otros serían del orden del 60% quedando un 40% para usos en sostenibilidad ambiental.

Los valores de abundancia normal geoquímica de elementos en rocas, sedimentos y aguas permiten establecer un marco referencial respecto a las anomalías antropogénicas generadas por la actividad minera; lo cual se ha demostrado en base a trabajos relacionados a impactos ambientales y planes de mitigación.

Conclusiones

Se evaluó el fraccionamiento físico-químico de drenajes ácidos y se demostró que influye positivamente en la sostenibilidad ambiental minera al recuperar metales con valores económicos y disminuyendo las zonas para disposición de residuos que permiten preservar los ecosistemas y cuerpos receptores.

1. El fraccionamiento del drenaje ácido se logra con variaciones químicas selectivas del pH en la solubilidad de los elementos utilizando cal y sulfuro de sodio que permite la separación del Fe, Mn y Zn (Tabla 3); en un proceso que utiliza reactores y clarificadores en forma secuencial.
2. El fraccionamiento geoquímico de los efluentes mineros y la mitigación del manganeso influyen en la disminución física de las zonas de disposición para la acumulación de residuos lodosos (Tabla 1) eliminando impactos ambientales sobre los ecosistemas.
3. Se cuantifica el balance de masa de los residuos obtenidos por los procesos clásicos de neutralización y los procesos de fraccionamientos del drenaje ácido, disminuye a un orden del 10%; lo cual lleva a utilizar áreas pequeñas para la disposición de los residuos finales; asimismo permite recuperar valores de zinc, hierro y manganeso obtenidos al final del proceso correspondiendo a recuperaciones del 95%, 92% y 90% (Tabla 1) necesarios para uso industrial. La mitigación del manganeso se realiza utilizando cloro como oxidante del manganeso que permite optimizar la remoción del manganeso y diseñar plantas para su tratamiento. Los costos de remoción del manganeso son del orden de 0,06 \$/m³, disminuyendo su valor en época de estiaje.
4. Se determina que la sostenibilidad ambiental permite disminuir los costos de tratamiento de efluentes ácidos por la adición de metales recuperados que aumentan los valores (Tabla 3) en la comercialización de los metales y cumplir con los estándares de calidad ambiental.

Recomendaciones

- Se requiere diseñar una planta con una serie de reactores con agitación y clarificadores en serie que permitan acondicionar y separar las fracciones metálicas del efluente ácido minero en continuo.
- Durante el acondicionamiento puede utilizarse caliza en malla -200 que permite llevar el pH hasta 5; lo cual llevaría a una disminución del consumo de cal.
- Emplear solución saturada de cal para optimizar el control en la separación de hierro y manganeso.
- La aireación mediante agitación facilita la oxidación del Mn⁺² a Mn⁺⁴; no obstante, es posible acelerar esta cinética mediante la utilización de H₂O₂.
- La cinética de oxidación del Mn⁺² utilizando cloro permite remover el manganeso como MnO₂ en el rango de pH entre 8.5 y 9.0 utilizando cal seguido de una floculación y sedimentación que nos permite descargar el efluente tratado a los cuerpos receptores cumpliendo con los criterios de calidad ambiental que permiten la preservación de los ecosistemas.
- Implicancias en el desarrollo de las comunidades aledañas por el aumento del índice de desarrollo humano relacionado a la salud, educación y economía.

Referencias

- Álvarez, C., & García, Y. (2015). *Relación entre deformidad angular y gonartrosis primaria. Acta ortopédica mexicana*, 29(4), 232-236. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2306-41022015000400007&lng=es&tlng=es
- Adrianto, L. R., Ciacci, L., Pfister, S., & Hellweg, S. (2023). Toward sustainable reprocessing and valorization of sulfidic copper tailings: Scenarios and prospective LCA. *Science of The Total Environment*, 871, 162038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162038>
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina. Generación y Tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Du, T., Bogush, A., Mašek, O., Purton, S., & Campos, L. C. (2022). Algae, biochar and bacteria for acid mine drainage (AMD) remediation: A review. *Chemosphere*, 304, 135284. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135284>
- Gonçalves, N. P. F., Da Silva, E. F., Tarelho, L. A. C., Labrincha, J. A., & Novais, R. M. (2024). Simultaneous removal of multiple metal(loid)s and neutralization of acid mine drainage using 3D-printed bauxite-containing geopolymers.

Journal of Hazardous Materials, 462, 132718. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132718>

- Han, Z., Levett, A., Edraki, M., Jones, M. W. M., Howard, D., & Southam, G. (2023). Accelerating bioleaching of tungsten mining wastes using indigenous acidophilic bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 454, 131490. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131490>
- Heim, W. A., Bosworth, D., DiGiorgio, C., Stephenson, M., & Gill, G. (2023). Effects of vegetation on methylmercury concentrations and loads in a mercury contaminated floodplain. *Science of The Total Environment*, 901, 165864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165864>
- Hermassi, M., Granados, M., Valderrama, C., Ayora, C., & Cortina, J. L. (2022). Recovery of rare earth elements from acidic mine waters: An unknown secondary resource. *Science of The Total Environment*, 810, 152258. <https://bit.ly/4kNzWoD>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Jiménez, J., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Martínez-León, J., Sanchez Navarro, J. Á., Cruz-Pérez, N., Santamarta, J. C., & García-Gil, A. (2023). The genesis of an extremely acidic perched aquifer within roasted pyrite waste in a fully urbanized area (Zaragoza, Spain). *Science of The Total Environment*, 896, 165293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165293>
- Pincetti-Zúñiga, G. P., Richards, L. A., Daniele, L., Boyce, A. J., & Polya, D. A. (2022). Hydrochemical characterization, spatial distribution, and geochemical controls on arsenic and boron in waters from arid Arica and Parinacota, northern Chile. *Science of The Total Environment*, 806, 150206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150206>
- Santofimia, E., González, F. J., Rincón-Tomás, B., López-Pamo, E., Marino, E., Reyes, J., & Bellido, E. (2022). The mobility of thorium, uranium and rare earth elements from Mid Ordovician black shales to acid waters and its removal by goethite and schwertmannite. *Chemosphere*, 307, 135907. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135907>
- Sarker, S. K., Pownceby, M. I., Bruckard, W., Haque, N., Bhuiyan, M., & Pramanik, B. K. (2023). Unlocking the potential of sulphide tailings: A comprehensive characterization study for critical mineral recovery. *Chemosphere*, 328, 138582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138582>
- Takeno, N. (2005). *Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases*. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.
- Thomas, G., Sheridan, C., & Holm, P. E. (2022). A critical review of phytoremediation for acid mine drainage-impacted environments. *Science of The Total Environment*, 811, 152230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152230>
- Tum, S., Toda, K., Matsui, T., Kikuchi, R., Kong, S., Meas, P., Ear, U., Ohtomo, Y., Otake, T., & Sato, T. (2022). Seasonal effects of natural attenuation on drainage contamination from artisanal gold mining, Cambodia: Implication for passive treatment. *Science of The Total Environment*, 806, 150398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150398>
- Xu, T., Roepke, E. W., Flynn, E. D., Rosenfeld, C. E., Balgooyen, S., Ginder-Vogel, M., Schuler, C. J., & Santelli, C. M. (2023). Aqueous Co removal by mycogenic Mn oxides from simulated mining wastewaters. *Chemosphere*, 327, 138467. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138467>
- Yan, S., Cheng, K. Y., Ginige, M. P., Morris, C., Deng, X., Li, J., Song, S., Zheng, G., Zhou, L., & Kaksonen, A. H. (2022). Sequential removal of selenate, nitrate and sulfate and recovery of elemental selenium in a multi-stage bioreactor process with redox potential feedback control. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127539. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127539>