

Evaluation of Electrocoagulation for the Removal of Heavy Metals in Acid Mine Drainage (AMD): A Sustainable Alternative

Abstract – This study evaluates the use of electrocoagulation with iron and aluminum electrodes to treat Acid Mine Drainage (AMD), focusing on removing heavy metals. The aim was to evaluate the effectiveness of electrocoagulation in removing heavy metals from AMD. The method included taking samples from the AMD, placing them in an electrocoagulation cell, and treating them for 10, 20, and 30 minutes with each type of electrode (iron and aluminum). This research allowed us to evaluate the removal capacity of the iron and aluminum electrodes in the electrocoagulation process, finding that aluminum electrodes have a greater capacity to remove heavy metals such as Mn, Fe, Cr, Cd, Cu, Co, Ni, Pb, and Zn, with removal rates ranging from 83% to 99.5% after 30 minutes. At the end of the process, water of category 3 is obtained, meaning it can be used for irrigation of plants and animal drinking water, according to DS N° 004-2017, which approves the Environmental Quality Standards (ECA) for Water in Peru.

Keywords - Electrocoagulation, acid mine drainage, environmental remediation, heavy metals, water treatment.

Evaluación de la electrocoagulación para la remoción de metales pesados en Drenajes Ácidos de Minas (DAM): una alternativa sostenible

Diana Analy Chávez Zamora¹ ; Julián Díaz-Ruiz², ; Jimmy Oblitas-Cruz³ 
dianaanalyc@gmail.com Universidad Privada del Norte Cajamarca Perú
Julian.diaz@upn.pe Universidad Privada del Norte Cajamarca Perú
jimmy.oblitas@upn.edu.pe Universidad Privada del Norte Cajamarca Perú

Resumen– El presente estudio evalúa el uso de la electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio para remediar drenajes ácidos de mina (DAM), enfocado en la remoción de metales pesados. Así mismo, se planteó el objetivo de evaluar la efectividad de la electrocoagulación en la remoción de metales pesados en drenajes ácidos de mina (DAM)”. La metodología incluyó la toma de muestras del DAM a tratar, colocándolo en una celda de electrocoagulación, contiempos determinados de 10, 20 y 30 minutos con cada tipo de electrodo (hierro y aluminio). La presente investigación nos permitió evaluar la capacidad de remoción que presentan los electrodos de hierro y aluminio en el proceso de electrocoagulación, llegando a determinar que el uso de electrodos de aluminio tiene una mayor capacidad de remoción de metales pesados como son: Mn, Fe, Cr, Cd, Cu, Co, Ni, Pb y Zn que oscila entre el 83 y 99.5 % de remoción, en un tiempo de 30 minutos y al término del procedimiento se logra obtener agua categoría 3, es decir se puede hacer uso para el riego de vegetales y bebida de animales, según DS N° 004-2017 que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua del Perú.

Palabras clave– Electrocoagulación, drenajes ácidos de mina, remediación Ambiental, metales pesados, tratamiento de aguas.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el acceso al agua limpia ha sufrido una enorme disminución debido a la polución y las actividades antropogénicas [1], las cuales son la causa principal de los altos niveles de metales pesados que se hallan en los ecosistemas acuáticos [2]. En ese contexto, el tratamiento de las aguas residuales sigue siendo un desafío global debido a la presencia de metales pesados, que son una amenaza para la salud humana y el medio ambiente si no se manejan correctamente. Actualmente la minería, es una de las fuentes de contaminación con metales pesados, se trata de una actividad que inevitablemente afecta el medio ambiente y contamina el agua, suelo y aire. Se genera una gran descarga de material tóxico (DAM), partículas finas y gases contaminantes, se degrada el suelo y se arriesga la supervivencia de la biota que mantiene el equilibrio de los ecosistemas [3]. Miles de hectáreas de tierra han sido alteradas por actividades mineras en todo el mundo. El área minera está asociados con altas concentraciones de metales pesados y metaloides [4].

En ese contexto, Estos efluentes, al no ser tratados adecuadamente, pueden causar daños irreversibles a cuerpos

de agua, suelos y biodiversidad en áreas cercanas, además de representar un riesgo directo para comunidades locales que dependen de estos recursos [5]. La composición de los recursos hídricos puede verse afectada por diferentes factores, uno de los cuales puede ser el drenaje ácido de minas y lixiviados, sólidos suspendidos, erosión del suelo [6]. En el Perú las empresas mineras al no ejecutar un adecuado plan de cierre de minas vienen dejando innumerables pasivos ambientales (PAM) a nivel nacional. De acuerdo, al último inventario de PAM, realizado en agosto del 2020, existen un total de 7956, las regiones que presentan mayor número de pasivos son: Áncash (15,5%), Cajamarca (14,5%) y Puno (11,6%). Al mismo tiempo, Cajamarca (30,7%), Áncash (17,5%) y Lima (11,6%) son las regiones con mayores PAM de niveles de riesgo alto y muy alto [7].

Ante esta problemática es importante y necesario hacer uso de tecnologías que nos permita tratar los DAM de una manera menos dañina para el entorno. Si bien es cierto, existen múltiples métodos para eliminar metales pesados, aunque no todas resultan igual de efectivas [8]. Las técnicas tradicionales como la precipitación química y el intercambio iónico producen desechos secundarios complicados o costosos de eliminar, mientras que la utilización de membranas conlleva altos gastos de operación y mantenimiento [9]. En ese contexto, hoy en día se vienen apostando por el uso de tecnologías amigable con el medio ambiente, uno de ellos es la electrocoagulación, es una alternativa rápida, económica y eficaz [10]. Esta técnica, es un proceso electroquímico que consiste en suministrar corriente eléctrica a electrodos de diversos materiales. En estos electrodos se generan coagulantes por la disolución de iones, lo que permite aglomerar las partículas coloidales y, por flotación, estas se depositan en la superficie [11].

En ese sentido, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo “evaluar la efectividad de la electrocoagulación en la remoción de metales pesados en los DAM”. Así mismo, considerar la optimización en el voltaje, el tiempo de tratamiento y el tipo de electrodos, con el fin de mejorar la eficiencia de remoción de metales pesados. La justificación de esta investigación radica en la necesidad de desarrollar soluciones más efectivas y sostenibles para el tratamiento de aguas ácidas provenientes de la minería, que puedan ser

aplicables en distintas condiciones ambientales y que minimicen el impacto ambiental de las actividades mineras.

II. METODOLOGÍA

A. Muestras

La población estuvo representada por Drenajes Ácidos de Mina (DAM), proveniente de un centro minero de Hualgayoc -Cajamarca - Perú.

B. Procedimiento

El procedimiento fue un sistema controlado de laboratorio (figura 1), permitiendo la toma de muestras a intervalos de tiempo específicos (10, 20 y 30 minutos) con el fin de monitorear los cambios en el pH y la conductividad eléctrica. Las muestras recolectadas fueron analizadas respecto a su concentración de metales pesados (Mn, Fe, Cr, Cd, Cu, Co, Ni, Pb y Zn) mediante la técnica instrumental ICP tanto antes como después del tratamiento por electrocoagulación y determinar el nivel de remoción alcanzado en cada etapa del proceso.

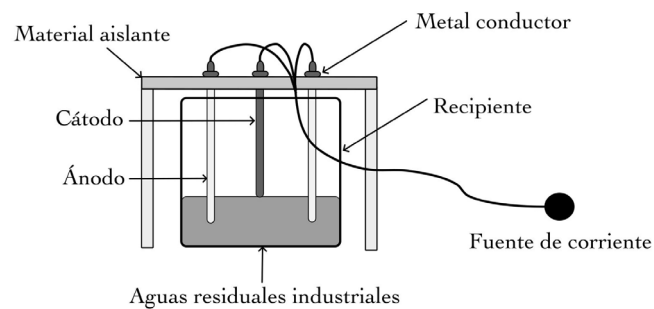


Fig. 1 Esquema experimental de sistema

Para el tratamiento se tomó una muestra de 20 litros de aguas acidas de mina, para pruebas se utilizó un reactor electroquímico experimental tradicional con una capacidad de operación de 1 L, el sistema completo se puede apreciar en la figura 2, en la que se muestran los componentes del sistema, donde (7 y 9) son utilizados para monitorear y ajustar el pH , el (8) corresponde a la bureta dosificadora de ácido sulfúrico, que se utilizó para mantener el pH constante durante las pruebas, el (2) es el reactor electroquímico, constituido por un recipiente de un litro, en el que se introdujo la solución de trabajo (1) y el par de electrodos (ánodo y cátodo) utilizados en el proceso de remoción de metales por medio del paso de corriente a través de los electrodos (de hierro y de grafito 3 y 4) soportados en material aislante,. Finalmente, el (5) corresponde sistema con agitación magnética utilizada para mantener el flujo turbulento dentro del reactor y el (6) es la fuente de corriente directa con la que se aplicaron diferentes intensidades de corriente, empleadas en la experimentación.

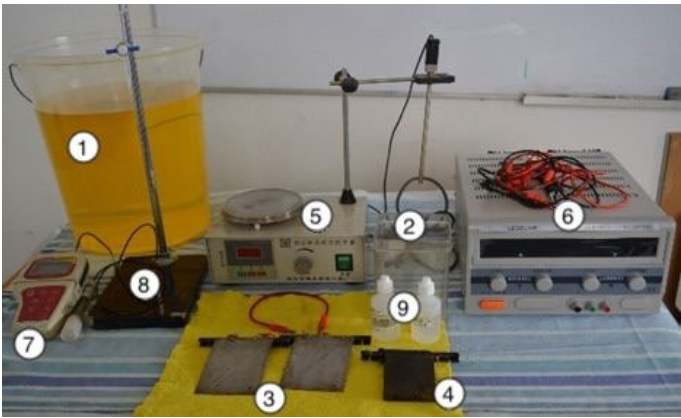


Fig. 2 Componentes del reactor electroquímico.

Los estándares de los metales estudiados se muestran en la Tabla I y están en base Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM — Aprueba Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua [12].

TABLA I
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA

ECA	Categoría 1: Poblacional y Recreacional (mg/L)	Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales (mg/L)	Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales (mg/L)
Cadmio	0.01	0.01	0.01
Cobalto			1
Cobre	2	0.2	0.2
Cromo	0.05	0.05	0.1
Hierro	1		5
Manganeso	0.5		0.2
Níquel	0.07	0.052	0.2
Plomo	0.05	0.0025	0.05
Selenio	0.04	0.005	0.05
Zinc	5	0.12	2

III. RESULTADOS

A. Efectos del material del electrodo

Electrodos de Hierro (Fe): En la tabla II se puede apreciar los diferentes metales pesados estudiados en donde se ha considerado como cabeza DAM a los elementos más altos que salió en el resultado del laboratorio. Luego se han considerado tres tiempos para la remoción de los metales pesados con electrodos de Hierro (Fe).

TABLA II

ANÁLISIS DE METALES PESADOS CON ELECTRODOS DE HIERRO (mg/L)

METAL	Cabeza	10 minutos	20 minutos	30 minutos
Cadmio	2.39100	2.44300	2.33900	1.49000
Cobalto	1.90800	1.82400	1.49850	0.59150
Cobre	141.10000	121.65000	77.20000	0.93900
Cromo	22.4350	10.5050	0.1735	0.1015
Aluminio	0.658	1.2220	0.9760	0.0030
Manganeso	3.23200	3.77000	4.34000	6.55000
Níquel	2.12550	1.9565	1.5650	0.9215
Plomo	1.1210	1.7800	1.03	0
Zinc	3.7225	3.5520	2.7215	0.1110

ANÁLISIS DE METALES PESADOS CON ELECTRODOS DE ALUMINIO (mg/L)

METAL	Cabeza	10 minutos	20 minutos	30 minutos
Cadmio	2.39100	2.37300	0.90550	0.04600
Cobalto	1.90800	1.71050	0.52500	0.01500
Cobre	141.10000	86.65000	19.55500	0.42150
Cromo	22.4350	12.9500	5.2050	1.5370
Hierro	5.2800	0.1810	0.7560	0.5195
Manganeso	3.23000	3.31000	3.37000	3.03000
Níquel	2.12550	1.7180	0.5195	0.0145
Plomo	1.1210	0	0.0035	0.0090
Zinc	3.7225	3.1020	0.5520	0.0060

Los electrodos de Fe tienden a presentar valores iniciales más altos que los de aluminio, lo que podrá atribuirse a su mayor reactividad o capacidad de interacción con ciertos metales. Los electrodos de Al, aunque con valores iniciales menores, parecen mantener una disminución más estable y moderada en varios casos.

La figura 3 muestra el comportamiento cinético de cada metal estudiado para el electrodo de hierro, de la misma forma la figura 4 lo muestra para el electrodo de aluminio.

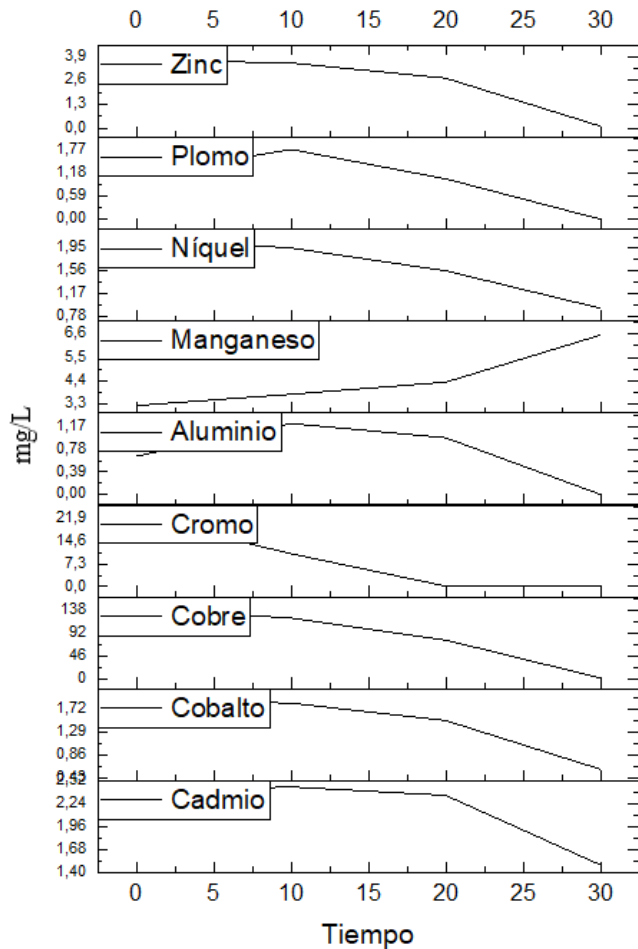


Fig. 3 Cinética de remoción para electrodo de hierro

Electrodos de Aluminio (Al): En la tabla III se puede apreciar los diferentes metales pesados estudiados en donde se ha considerado como cabeza DAM a los elementos más altos. Luego se han considerado tres tiempos para la remoción de los metales pesados con electrodos de aluminio.

TABLA III

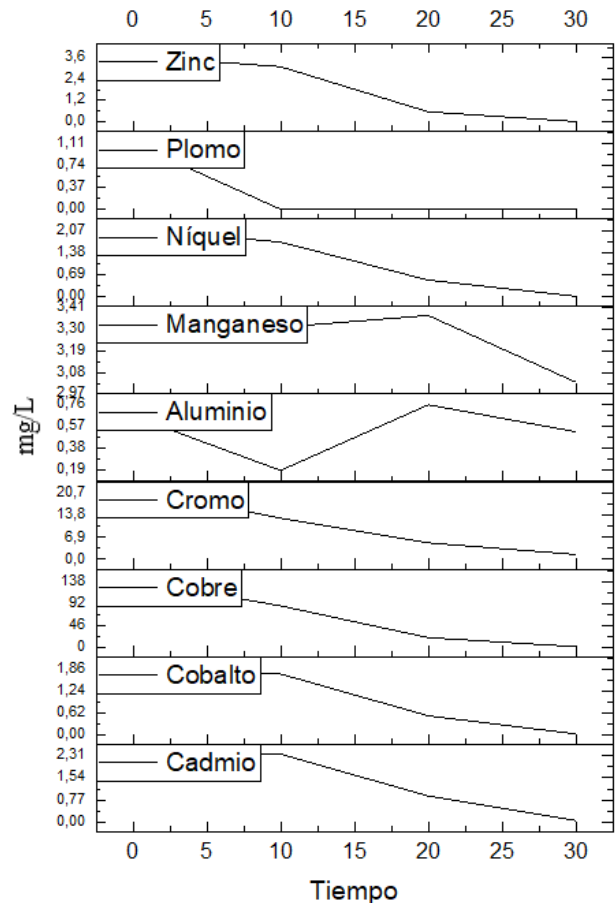


Fig. 4 Cinética de remoción para electrodo de aluminio

La velocidad de disminución varía según el tipo de metal y el electrodo utilizado: El hierro muestra una disminución rápida al inicio. El aluminio tiene un descenso más moderado y estable, alcanzando en algunos casos valores finales más bajos que el hierro (por ejemplo, en cromo y zinc). Cobre (Cu) y Cobalto (Co): La remoción es eficiente en ambos electrodos, con Fe presentando valores iniciales más altos, pero decreciendo de forma significativa. Cromo (Cr) y Manganeseo (Mn): Estos metales tienen patrones de remoción más pronunciados en Fe al inicio, pero el Al mantiene un comportamiento más uniforme en el tiempo. Plomo (Pb): Las fluctuaciones observadas indican que podría ser menos estable su remoción con electrocoagulación, especialmente con Fe. Níquel (Ni) y Zinc (Zn): Los valores muestran disminuciones constantes, con diferencias menores entre ambos electrodos.

B. Eficiencia en la remoción de metales

La figura 5 y 6 muestran que la remoción usando electrodos tuvo un impacto profundo en la remoción de los metales estudiados. El electrodo de hierro (Fe) presenta generalmente mayores valores iniciales, lo que indica una mayor actividad electroquímica inicial en comparación con los electrodos de aluminio (Al). Esto sugiere que el Fe tiene mayor capacidad para formar flóculos en las primeras etapas de tratamiento. A medida que transcurre el tiempo, los valores promedio (media) de los metales disminuyen de manera consistente para ambos tipos de electrodos, confirmando que la técnica de electrocoagulación es efectiva para la remoción gradual de metales.

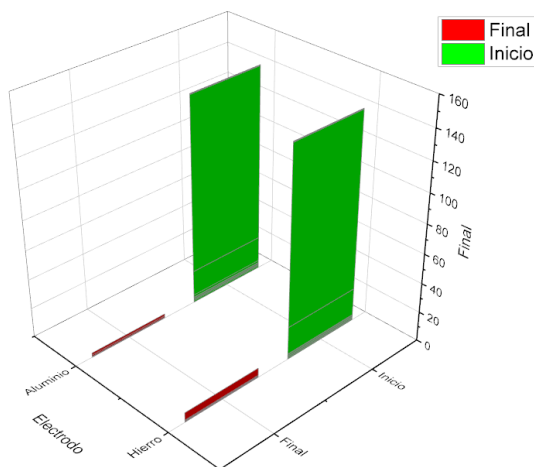


Fig. 5 Comparación valores iniciales y finales por tipo de electrodo

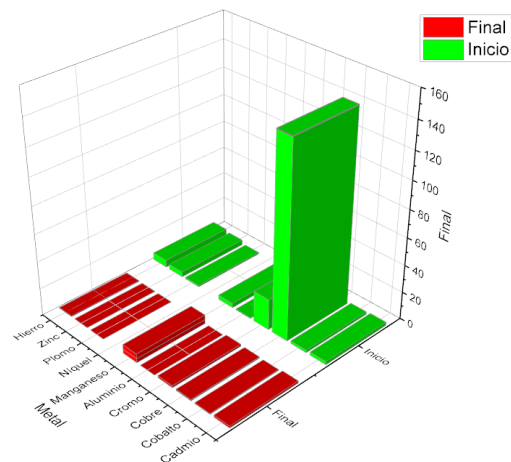


Fig. 6 Comparación valores iniciales y finales por tipo de metal

Luego del proceso de electrocoagulación como el ejemplo mostrado en la Figura 7, se realizó el cálculo del porcentaje de remoción usando los valores del tiempo de 30 minutos de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{(DAM - Fe\ 30)}{DAM} \times 100$$

$$x = \frac{(DAM - Al\ 30)}{DAM} \times 100$$

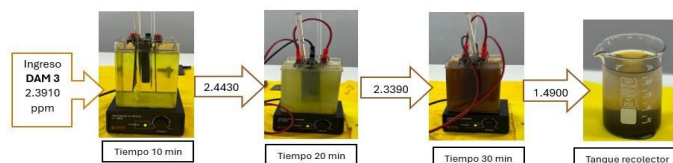


Fig. 7 Ejemplo del procedimiento de electrocoagulación

Así mismo, la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación sobre la remoción de Cd, Co, Cu, Cr, Al, Ni, Pb y Zn con electrodos de Hierro, obteniéndose mayores porcentajes de remoción conforme se incrementaba el tiempo de electrocoagulación, por lo cual en un tiempo de electrocoagulación de 30 minutos se logró un 37.68298 % de remoción de cadmio, 68.99895 % de remoción de cobalto, 99.33451 % de remoción de Cobre, 99.54758 % de remoción de Cromo, 99.54407 % de remoción de Aluminio, 56.64550 % de remoción de níquel, 99.94313 % de remoción de Plomo y 97.01813 % de remoción de zinc. Los metales, Cobre, Cromo, Aluminio y Plomo alcanzaron mayor porcentaje de remoción, estos resultados indican que el tiempo óptimo fue de 30 minutos.

Se determinó la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación sobre la remoción de Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en electrodos de aluminio, por lo cual en un tiempo de electrocoagulación de 30 minutos se logró un

98.07612 % de remoción de Cd, 99.21384 % de remoción de cobalto, 99.70128 % de remoción de Cobre, 93.14910 % de remoción de Cromo, 90.16098 % de remoción de Hierro, 83.44209 % de remoción de manganeso, 99.31781 % de remoción de níquel, 99.71564 % de remoción de Plomo y 99.83882 % de remoción de zinc. Los metales, cobalto, níquel, Plomo y Zinc alcanzaron mayor porcentaje de remoción, estos resultados indican que el tiempo óptimo fue de 30 minutos.

Tal como se observa en la figura 8, se realizó una comparación estadística en base al modelo de Tukey, tal como se observa que el tipo de metal de cada electrodo esta relacionado al metal que puede remover de la fase acuosa.

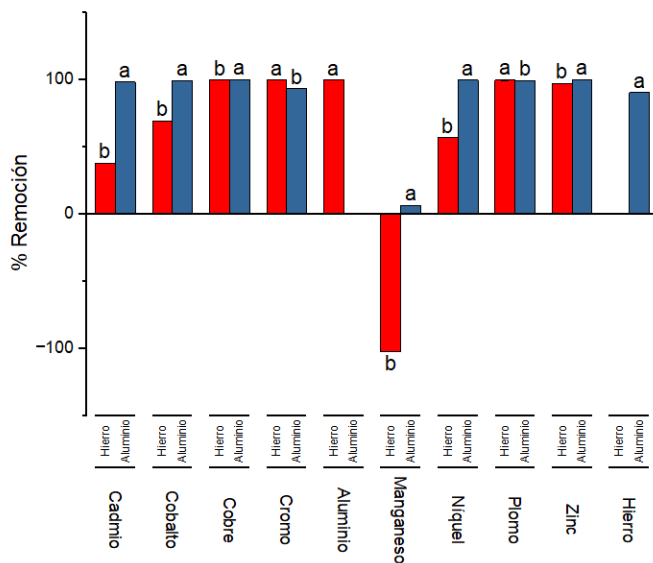


Fig. 8 Análisis de Tukey para la comparación de electrodos por tipo de metal extraído

Al evaluar la eficacia de la electrocoagulación para la remoción de metales pesados en DAM, haciendo uso de electrodos de aluminio durante 30 minutos, se observó que la capacidad de remoción oscila entre el 83 y 99.5% de los metales como: Mn, Fe, Cr, Cd, Cu, Co, Ni, Pb y Zn, existentes en el DAM. Según, Luna y Velázquez [13], afirma que en los estudios evaluados demostraron que la electrocoagulación es un procedimiento que ha logrado en promedio, entre 85.1% y 100% de eficiencia en el proceso de remoción de metales pesados tales como As, Cr, Ni y Cd, además de una considerable reducción respecto a los valores de los distintos parámetros en consideración antes y después del tratamiento.

La investigación también nos permitió determinar, que al hacer uso de los electrodos de hierro algunos metales como (cobre, cromo, aluminio y plomo) lograron una remoción del 99.33%, 99.55%, 99.54% y 99.94% respectivamente.

Así también Mayta y Mayta [14] lograron una eficiencia de remoción de cromo de 98% y 99.7%, en estas investigaciones el electrodo usado fue hierro y su objetivo

principal era la eliminación de contaminantes metálicos, particularmente, cromo.

En esa misma línea, Ferniza [15] empleó un tratamiento acoplado de Electrocoagulación- fitorremediación donde obtuvo como resultado la remoción eficiente de metales pesados tales como el Cu, Cd y Pb en un 99,2 %, 81,3% y 99,4% respectivamente indicando la eficiencia de la técnica, asimismo Perales (2019) determinó la influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de Cr+6 logrando remover 5,233 ppm de Cr+6 en un 100% con un tiempo de 40 minutos probando así la eficiencia de la electrocoagulación.

A nivel de laboratorio está comprobando que la electrocoagulación es un método eficaz para la remoción de metales pesados, en ese sentido, es recomendable utilizar materiales adecuados para los electrodos, como hierro o aluminio, ya que influyen en la eficiencia del proceso. Así mismo, es indispensable asegurarse de que los electrodos estén bien dispuestos dentro de la celda para maximizar la superficie de contacto y mejorar la eficiencia de la coagulación.

IV. CONCLUSIONES

La electrocoagulación es efectiva para reducir la concentración de metales pesados en el drenaje ácido de mina, con el tiempo y la densidad de corriente como variables críticas. Los mejores electrodos de trabajo son los de aluminio a comparación con los electrodos de hierro ya que con su empleo se logra mayor porcentaje remoción de metales pesados como (Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Hierro, Manganeso, Níquel, Plomo y Zinc). Para optimizar el proceso, se sugiere realizar ajustes en la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento según la composición del agua residual.

REFERENCES

- [1] Z. Nie *et al.*, «Pollution sources, characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in surface water and sediments of typical pyrite mine in Southwest China», *Journal of Environmental Sciences*, ene. 2025, doi: 10.1016/j.jes.2025.01.008.
- [2] I. Tyagi, V. Kumar, y K. Tyagi, «Chapter 2 - Water pollution—sources and health implications of the environmental contaminants on the aquatic ecosystem and humans: approach toward sustainable development goals», en *Water, The Environment, and the Sustainable Development Goals*, M. H. Dehghani, R. R. Karri, I. Tyagi, y M. Scholz, Eds., Elsevier, 2024, pp. 35-66. doi: 10.1016/B978-0-443-15354-9.00008-6.
- [3] G. Jareda, S. P. Mahapatra, y P. Y. Dhekne, «Water quality index, heavy metal pollution index and seasonal variation correlation of groundwater of Bailadila iron ore mine area and its peripherals: Dantewada district, Chhattisgarh, India», *Desalination and Water Treatment*, vol. 101, pp. 1-10, ene. 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.21632.
- [4] D. Sanchez *et al.*, «Establishment of vegetation in mine tailings using A. tumefaciens and organic matter», ago. 2020, Accedido: 31 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/meta/FP175.html>
- [5] «MINERÍA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, UN ENFOQUE SOCIOAMBIENTAL». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262018000200617

- [6] C. A. V. Ugaz, N. León-Roque, J. L. Nuñez-León, D. W. Hidalgo-Chávez, y J. Oblitas, «Geochemical and environmental assessment of potential effects of trace elements in soils, water, and sediments around abandoned mining sites in the northern Iberian Peninsula (NW Spain)», *Heliyon*, vol. 9, n.º 3, mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14659.
- [7] L. Castillo Torrealva, *Pasivos Ambientales Mineros en el Perú: Resultados de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAM*. 2021.
- [8] P. J. C. Favas, S. K. Sarkar, y M. N. V. Prasad, «Chapter 17 - Acid mine drainage: Environmental impact, resource recovery, and prevention, mitigation, and treatment», en *Environmental Materials and Waste (Second Edition)*, M. N. Vara Prasad, Ed., Elsevier, 2024, pp. 571-609. doi: 10.1016/B978-0-443-22069-2.00024-3.
- [9] Z. Rahman, P. Sanderson, y R. Naidu, «Chapter 4 - Chromium: A pervasive environmental contaminant and its removal through different remediation techniques», en *Inorganic Contaminants and Radionuclides*, R. Naidu, Ed., Elsevier, 2024, pp. 69-94. doi: 10.1016/B978-0-323-90400-1.00015-X.
- [10] M. G. Harahap, M. S. Abfertiawan, M. Syafila, M. Handajani, y T. H. Gultom, «Electrocoagulation for nickel, chromium, and iron removal from mine water using aluminum electrodes», *Heliyon*, vol. 10, n.º 23, p. e40784, dic. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40784.
- [11] P. P. Das, T. N. Baite, y M. K. Purkait, «Chapter 4 - Industrial wastewater treatment by electrocoagulation process», en *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*, M. P. Shah y N. Shah, Eds., Elsevier, 2024, pp. 55-73. doi: 10.1016/B978-0-443-13884-3.00019-6.
- [12] «Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM — Aprueba Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. | FAOLEX». Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC171691/>
- [13] K. E. Luna Victoria Acevedo, «Propuesta para la reducción de metales pesados mediante electrocoagulación en aguas contaminadas por efluentes mineros en el río Llaucano, considerando la percepción social, Cajamarca, 2023».
- [14] R. Mayta y J. Mayta, «Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación», *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 83, n.º 3, pp. 331-340, jul. 2017.
- [15] F. Ferniza Garcia, «Eficiencia de un sistema acoplado Electrocoagulación-Fitoremediación para la remoción de Pb, Cu, Cb y Zn presentes en efluentes mineros», ene. 2017, Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/65059>