




Innovation in Acid Mine Drainage Remediation using Coffee Waste Biochar in Michiquillay, 2025

Renzo Brandon Joel Gomez Gonzales¹; Maria Jesus Camino Romero²; Gladys Sandi Licapa-Redolfo³


^{1,2} Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú, N00206442@upn.pe, N00242927@upn.pe

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, gladys.licapa@upn.edu.pe

Abstract– *This study evaluated the efficiency of coffee biochar activated with caustic potash (KOH) in removing metals present in acid mine drainage (AMD) from Michiquillay, Cajamarca. The tests were carried out using 250 mL of AMD, with three doses of biochar (0.5, 1.0, and 1.5 g) and sampling every 15 minutes until completing 60 minutes of treatment. The experiments were carried out in triplicate and included a control without biochar, in order to guarantee the validity of the results and rule out processes unrelated to removal. The analyses showed that biochar increased the pH of the DAM from 4.77 to 7.14, favoring the neutralization of acidity. In terms of metal removal, percentages of 90.91% for copper, 96.03% for iron, and 87.44% for zinc were achieved. These findings prove the high efficiency of this activated agro-industrial waste, capable of significantly reducing the concentration of contaminants and complying with the Environmental Quality Standards (ECA) established in Peru.*

Keywords– *Acid Drainage, Removal, Biochar, Coffee.*

Innovación en la Remediación de Drenaje Ácido de Mina mediante Biochar de Residuos de Café en Michiquillay, 2025

Renzo Brandon Joel Gomez Gonzales¹; Maria Jesus Camino Romero²; Gladys Sandi Licapa-Redolfo³

^{1,2} Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú, N00206442@upn.pe, N00242927@upn.pe

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú, gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen— Este estudio evaluó la eficiencia de un biochar de café activado con potasa cáustica (KOH) en la remoción de metales presentes en el drenaje ácido de mina (DAM) de Michiquillay, Cajamarca. Los ensayos se realizaron utilizando 250 mL de DAM, con tres dosis de biochar (0.5, 1.0 y 1.5 g) y muestreos cada 15 minutos hasta completar 60 minutos de tratamiento. Los experimentos se efectuaron por triplicado e incluyeron un control sin biochar, con el fin de garantizar la validez de los resultados y descartar procesos ajenos a la remoción. Los análisis demostraron que el biochar incrementó el pH del DAM de 4.77 a 7.14, favoreciendo la neutralización de la acidez. En cuanto a la remoción metálica, se alcanzaron porcentajes de 99.91% para el cobre, 96.03% para el hierro y 87.44% para el zinc. Estos hallazgos comprueban la alta eficiencia de este residuo agroindustrial activado, capaz de reducir significativamente la concentración de contaminantes y cumplir con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el Perú.

Palabras Clave—Drenaje Ácido, Remoción, Biochar, Café.

I. INTRODUCCIÓN

La minería ha traído diversos desafíos ambientales de gran magnitud a través de los años; todo esto se debe a que no existían normativas tanto para un adecuado cierre de mina, así como la falta del estudio de impacto ambiental (EIA). En México existe una creciente problemática con los drenajes ácidos de mina (DAM) en los estados de Zacatecas, Querétaro, Hidalgo y San Luis Potosí; donde han encontrado altas concentraciones de mercurio, arsénico, plomo y cromo [1]. El agua es un recurso que permite la subsistencia de los ecosistemas en nuestro planeta tierra y también es utilizada para consumo humano [2]; este mismo recurso utilizado en el sector extractivo representa una proporción pequeña a nivel nacional pero el impacto social y ambiental en zonas de cabecera de cuenca puede ser un inconveniente significativo. [3].

El Perú es un país minero, destacando en la producción de metales como oro, cobre y polimetálicos. Cajamarca lidera como una de las principales regiones mineras, seguido de Apurímac y Arequipa [4]. Estas actividades mineras han provocado problemas ambientales generando 6026 pasivos ambientales mineros (PAM); entre los cuales se encuentran los DAM, los relaves, los botaderos y bocaminas [5].

De acuerdo con las cifras mencionadas, en Cajamarca hay un total de 893 PAM registrados en todas las provincias y distritos de la región. Uno de los casos emblemáticos es el de

la comunidad de Michiquillay, que queda en La Encañada, y tiene 15 PAM que incluyen DAM [5].

A pesar de estas evidencias, no se han desarrollado investigaciones en el Perú que apliquen biochar de café específicamente en DAM. Este vacío de conocimiento, sumado a la urgencia de atender los PAM en Michiquillay, motiva el presente estudio, cuyo objetivo es remover los metales en los DAM de la zona de Michiquillay mediante la elaboración de biochar a partir de los residuos de café. Se busca así poder encontrar una propuesta de solución que sea tanto económica como ecoamigable a la problemática que atraviesa esta comunidad, aprovechando dichos residuos para retener metales y ofrecer una solución ambiental y accesible a zonas afectadas por la minería, contribuyendo al desarrollo sostenible y al bienestar de las poblaciones vulnerables.

Los PAM son aquellos depósitos, relaves, efluentes que albergan residuos negativos para el ecosistema y a la salud de los pobladores de las comunidades circundantes a la actividad extractiva, provienen de las minas que no tuvieron un cierre adecuado, fueron abandonados por sus propietarios o se encuentran en estado de inactividad [5]. Estos pasivos ambientales están reglamentados por la Ley N.º 28271, la cual se encarga de regular como se identifican los pasivos ambientales en la industria de la minería y la subvención para la remediación de estos en el territorio peruano para reducir su impacto en el medio ambiente efectuado por su órgano técnico competente que es el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), este estatuto fue promulgado por el Congreso de la República del Perú y publicado en el Diario Oficial El Peruano el 02 de julio del 2004 [6].

La presencia de contaminantes sulfurados en contacto con oxígeno genera reacciones de oxidación que producen DAM. En los DAM se puede encontrar metales, metaloides y hierro, este último logra darles una coloración rojiza o anaranjada a estas aguas contaminadas. Esta problemática tiene impactos perjudiciales tanto a corto como a largo plazo, poniendo en riesgo a la economía y calidad de vida de las personas [7].

Estudiar los PAM es un tema importante en el Perú ya que no todas las empresas mineras siguen las leyes y los procedimientos específicos para el cierre de mina adecuado, además no está siendo debidamente regulado por las entidades apropiadas, por lo cual es importante realizar una investigación de los PAM negativos, por esta razón la presente investigación se realizará en la zona de Michiquillay, distrito de La Encañada, región de Cajamarca por su actividad minera

histórica, teniendo 15 PAM (Fig. 1) de los cuales 6 son residuos mineros, 7 de infraestructura, 1 de labor minera y 1 de producto químico [5].

El café es el segundo producto más comercializado a nivel internacional, generando 40 millones de toneladas de residuos de café al año [8]; además en el Perú, la región de Cajamarca es la primera productora y exportadora de café a nivel nacional. Este al ser convertido en biocarbón (biochar), tiene la capacidad de remover metales por su característica porosa, convirtiéndolo en una solución eficaz para el tratamiento de DAM [9]; favoreciendo a la reducción de la acidez y esto lo convierte en una alternativa sostenible de bajo costo.

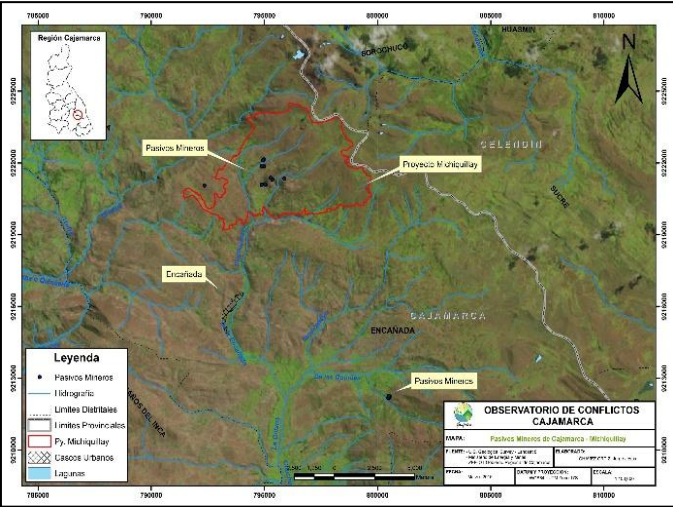


Fig. 1 Pasivos mineros de Cajamarca – Michiquillay
Fuente: Grufides, (2015).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación y recolección de las muestras

Se tomaron muestras en la “Mina Antigua” la cual se encuentra en la comunidad de Michiquillay, en el distrito de La Encañada, región y departamento de Cajamarca. Actualmente está concesionado por el Proyecto Michiquillay de la empresa Southern Cooper Corporation (Fig. 2); siendo este un proyecto de cobre cuyo yacimiento es tipo pórfido [10]. Las aguas ácidas se encuentran en 3491.359 m s.n.m. Aquí se encuentra la bocamina con el drenaje ácido fluyendo, teniendo una coloración anaranjada a primera vista; hemos recolectado 22 litros de DAM, almacenado en un contenedor estéril para el análisis de laboratorio (Fig. 3). Se procedió a la toma de datos referenciados que se observan en la Tabla 1.

| Tabla 1 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LA UBICACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO MINERO | | | |
|---|----------|-----------|-------------------|
| Punto | Este | Norte | Cota |
| Estación (P1) | 795633 E | 9220972 N | 3491.359 m s.n.m. |

B. Caracterización de la muestra

Se realizó el muestreo de 2 litros de DAM en el Laboratorio de Mecánica de Rocas en la Universidad Privada del Norte mediante el equipo multiparámetro portátil (Hach HQ2200), donde se han medido parámetros como pH, conductividad eléctrica (µm/cm) y temperatura (°C). El equipo fue calibrado previamente siguiendo los estándares del fabricante, garantizando la precisión en la medición de los parámetros fisicoquímicos analizados. En la Tabla 2 se observan los valores obtenidos de la primera muestra.



Fig. 2 Mapa satelital y de ubicación del drenaje ácido de mina

| Tabla 2 VALORES INICIALES DE PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y TEMPERATURA MEDIDOS CON EL EQUIPO MULTIPARÁMETRO | | | |
|--|------|---------------------------------|------------------|
| Punto | pH | Conductividad Eléctrica (µm/cm) | Temperatura (°C) |
| P1 | 4.77 | 186.69 | 17.28 |

Posteriormente se ha realizado la identificación de los metales presentes en el DAM mediante el uso del equipo de espectrofotometría de absorción atómica (Agilent Technologies 240FS AA). En la Tabla 3 se observan los metales encontrados.

| Tabla 3 VALORES INICIALES DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL EQUIPO DE ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA | |
|---|----------------------|
| Metales | Concentración (mg/L) |
| Cobre (Cu) | 3.9185 |
| Hierro (Fe) | 18.2 |
| Zinc (Zn) | 0.215 |

La información sirve como base para elegir y evaluar alternativas de tratamiento, ya que la concentración de cada metal influye en la eficiencia de la remediación.



Fig. 3 Drenaje ácido de “Mina Antigua” de la comunidad de Michiquillay, La Encañada

C. Elaboración de biochar de café

Se recolectaron desperdicio de café, donde se han colocado un total de 500 gramos en una estufa a 120° C para el secado por un tiempo de 4 horas. Luego del secado se procedió a pesar y se obtuvieron 400 gramos de café seco. Posteriormente, se ha dejado enfriar para ser llevado a la mufla a una temperatura de 700° C por un tiempo de 3 horas. Después se ha pasado a realizar la impregnación química con una solución concentrada de hidróxido de potasio (KOH) en relación 3:1; (Fig. 4) para luego ser llevado a la estufa nuevamente a una temperatura de 120° C por el tiempo de 4 horas. Posteriormente fue a la mufla para la activación térmica a 900° C por el tiempo de 5 horas. Por último, se ha procedido a realizar 20 lavados con agua destilada caliente y ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N, diluido hasta alcanzar pH neutro (≈ 7).

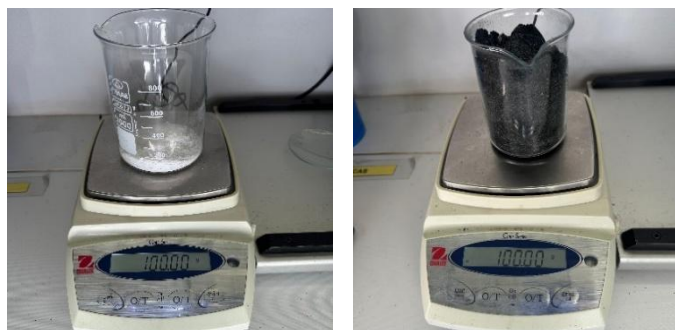


Fig. 4 Proceso de elaboración de biochar de café

D. Procedimiento del tratamiento a escala de laboratorio

Para el desarrollo del experimento, se procedió a medir en tres vasos de precipitado la cantidad de 250 mL de DAM, seguidamente se pesaron 0.5, 1 y 1.5 gramos de biochar de café con asistencia de una balanza analítica (OHAUS Pioneer™ Analytical PX224) para ser incorporados en los vasos precipitados. En la Tabla 4 se observa el diseño empírico que se ha aplicado para el tratamiento, con el fin de analizar el comportamiento de cada dosificación en las condiciones establecidas.

Tabla 4
DISEÑO EXPERIMENTAL PROPUESTO PARA LA REMEDIACIÓN DEL DAM

| Muestras | Mezcla | Tiempo |
|----------|----------------------------|------------|
| M1 | 250 mL DAM + 0.5 g Biochar | 0 – 60 min |
| M2 | 250 mL DAM + 1 g Biochar | 0 – 60 min |
| M3 | 250 mL DAM + 1.5 g Biochar | 0 – 60 min |

Los tres tratamientos fueron cuantificados en los tiempos establecidos, en intervalos de 15 minutos, durante un total de 1 hora respectivamente. En cada intervalo se tomaron 30 mL de muestra, que posteriormente fueron llevados al espectrofotómetro. En total, se obtuvieron nueve muestras, debidamente rotuladas (Fig. 6).

Mediante el uso del equipo multiparámetro portátil se han medido los cambios de pH en cada intervalo respectivamente. Finalmente, se evaluaron los valores finales de remoción de metales mediante espectrofotometría de absorción atómica, lo que permitió determinar con precisión la eficiencia del proceso aplicado, confirmando su potencial como alternativa tecnológica de bajo costo para el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) en agua. Estos hallazgos evidencian que el control de pH y la remoción efectiva de metales.



Fig. 5 Etapa inicial del experimento en laboratorio



Fig. 6 Muestras rotuladas posteriormente al tratamiento

E. Porcentaje de remoción de metales

La eficiencia del biochar en la remoción de metales se determinó mediante la aplicación de la ecuación de remoción basada en la diferencia de concentraciones iniciales y finales de cada metal, según la ecuación (1) propuesta por Tejada et al. (2021) [11]. Además, esta fórmula matemática permite establecer un parámetro comparativo confiable para evaluar la capacidad adsorbente del biochar frente a diferentes condiciones experimentales, contribuyendo al desarrollo de un análisis más integral del proceso.

$$PR = \frac{V_{iDAM} - V_{fDAM}}{V_{iDAM}} \times 100 \% (1)$$

PR: Porcentaje de remoción (%)

V_{iDAM} : Valor inicial del DAM (mg/L)

V_{fDAM} : Valor final del DAM (mg/L)

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Resultados de pH

En los resultados de pH se demuestra que hay una mejora en el cambio de pH, pasando de 4.77, detallado en la Tabla 2, a un pH neutro, demostrando que el biochar elaborado es efectivo para remoción de metales del Drenaje Ácido de Mina (DAM) en la zona de Michiquillay; siendo los 0.5 gramos la medida indicada para 250 mL de DAM y que 1 hora constituye el tiempo óptimo para la atracción de los metales. Esto indica que se recomienda utilizar el diseño experimental de la Muestra 1 en el tiempo de 60 minutos (Tabla 4). La remoción de los metales presentes en el DAM se atribuye principalmente a la activación de la estructura porosa del biochar derivado de café, la cual incrementa significativamente su área superficial específica y, en consecuencia, su capacidad de remoción de metales en el cuerpo acuoso. Este mecanismo favorece la interacción entre los sitios activos del material y los iones metálicos, optimizando el proceso de captura y retención. En la Tabla 5 se observa la diferencia del pH después del tratamiento.

Tabla 5
VALORES FINALES DE PH DEL TRATAMIENTO DEL DAM

| Tiempo | pH | | |
|--------|-------------|-----------|-------------|
| | M1 0.5 g | M2 1 g | M3 1.5 g |
| 0 min | 5.84 | 6.36 | 6.60 |
| 15 min | 6.28 | 6.60 | 6.71 |
| 30 min | 6.75 | 7.40 | 7.87 |
| 45 min | 6.97 | 7.83 | 8.14 |
| 60 min | 7.14 | 7.81 | 8.07 |

B. Resultados de remoción de metales

En el territorio peruano se establece el D.S. N° 004-2017-MINAM en el que se establecen los Límites Máximos Permisibles (LMP) de contaminantes en cuerpos de agua, aire y suelo [12]. Asimismo, el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) constituye un criterio fundamental que orienta la selección del tratamiento más adecuado para las aguas contaminadas, en función de su clasificación y de los parámetros fisicoquímicos establecidos en la normativa vigente [13]. En este contexto se evaluaron los resultados obtenidos en el tratamiento, los cuales se presentan en la Tabla 6, con el fin de verificar si este se encuentra dentro de la normativa vigente para la protección de la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Asimismo, la comparación con la normativa vigente constituye un criterio fundamental para validar la aplicabilidad del tratamiento en escenarios reales de gestión ambiental minera. De manera complementaria, la validación de los valores obtenidos frente a los ECA y LMP no solo permite garantizar la seguridad del recurso hídrico, sino también aporta evidencia científica para la incorporación del biochar como alternativa tecnológica en planes de remediación ambiental, fortaleciendo así la sostenibilidad de la gestión de drenajes ácidos de mina en el contexto peruano, asegurando su aplicabilidad práctica.

Tabla 6
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE METALES CON LOS ECA

| Metales | Concentración Inicial (mg/L) | Tratamiento | | | ECA (mg/L) |
|-------------|------------------------------------|-------------|----------|-------------|---------------|
| | | M1 0.5 g | M2 1g | M3 1.5 g | |
| Cobre (Cu) | 3.9185 | 0.2433 | 0.1603 | 0.1115 | 2 |
| Hierro (Fe) | 18.2 | 1.7953 | 1.769 | 1.3121 | 5 |
| Zinc (Zn) | 0.215 | 0.0333 | 0.2983 | 0.0296 | 5 |

B.1) Cobre (Cu)

Al ser el DAM un cuerpo de agua contaminada por metales producto de la minería se opta por realizar un tratamiento tipo A3, donde se establece que el agua debe pasar por un tratamiento avanzando para lograr ser potabilizado. Según la normativa de los ECA para el Cu se establece un LMP de 2 mg/L para el consumo humano, en la Tabla 3 se observa que el DAM contiene 3.9185 mg/L de este metal, superando el límite permitido. Posteriormente, al terminar el tratamiento se concluye que se tiene una remoción máxima de 99.91%, llegando a 0.0035 mg/L, lo que demuestra que el tratamiento presentado en esta investigación es efectivo y lograr entrar a los LMP. De acuerdo con la investigación la muestra 1 se muestra como mejor opción debido a la relación remoción – pH, siendo 92.26% de extracción del metal bajando la concentración de 3.9185 mg/L a 0.3030 mg/L de

Cu presentes en el cuerpo acuoso. En la Tabla 7 se presenta el porcentaje de remoción del Cu.

| Tabla 7 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COBRE EN EL DAM | | | | | | |
|--|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| Dosis (g) x Tiempo (min) | Cobre (Cu) | | | | | |
| | 0.5 g | | 1.0 g | | 1.5 g | |
| | [Cu]; mg/L | %Cu | [Cu]; mg/L | %Cu | [Cu]; mg/L | %Cu |
| 15 | 0.3675 | 90.62 | 0.2190 | 94.41 | 0.3030 | 92.26 |
| 30 | 0.2140 | 94.53 | 0.2030 | 94.81 | 0.0280 | 99.28 |
| 45 | 0.1965 | 94.98 | 0.1270 | 96.75 | 0.0185 | 99.52 |
| 60 | 0.1485 | 96.21 | 0.0590 | 98.49 | 0.0035 | 99.91 |

B.2) Hierro (Fe)

Se identificaron concentraciones significativas de Fe en el DAM. Según la normativa de los ECA, este metal presenta un LMP de 5 mg/L para consumo humano. En la Tabla 3 se observa que el DAM contiene 18.2 mg/L, valor que excede ampliamente el límite establecido, al igual que ocurre con el Cu. Posteriormente, en la Tabla 8 se evidencia que el biochar alcanzó una remoción máxima del 96.03%, reduciendo la concentración de 18.2 mg/L a 0.7220 mg/L logrando entrar a los LMP.

| Tabla 8 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE HIERRO EN EL DAM | | | | | | |
|---|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| Dosis (g) x Tiempo (min) | Hierro (Fe) | | | | | |
| | 0.5 g | | 1.0 g | | 1.5 g | |
| | [Fe]; mg/L | %Fe | [Fe]; mg/L | %Fe | [Fe]; mg/L | %Fe |
| 15 | 4.0660 | 77.65 | 0.2315 | 98.72 | 0.9075 | 95.01 |
| 30 | 0.0950 | 99.47 | 2.6440 | 85.47 | 2.3070 | 87.32 |
| 45 | 1.6625 | 90.86 | 1.6150 | 91.12 | 1.5215 | 91.64 |
| 60 | 1.2250 | 93.26 | 0.9315 | 94.88 | 0.7220 | 96.03 |

B.3) Zinc (Zn)

El Zn es un metal que puede afectar la eficiencia de un tratamiento propuesto si este mismo se encuentra con la presencia de otros metales, como lo es el caso del DAM; según la normativa de los ECA, el LMP en cuerpos de agua contaminada es de 5 mg/. En este estudio, el DAM presenta una concentración de 0.215 mg/ L (Tabla 3), es decir que no demuestra ser un contaminante con altas concentraciones, pero

de igual forma puede ser perjudicial para la salud por encontrarse junto a metales como el Cu y el Fe. En la Tabla 9 se observan los valores y su porcentaje de remoción.

| Tabla 9 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE ZINC EN EL DAM | | | | | | |
|---|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| Dosis (g) x Tiempo (min) | Zinc (Zn) | | | | | |
| | 0.5 g | | 1.0 g | | 1.5 g | |
| | [Zn]; mg/L | %Zn | [Zn]; mg/L | %Zn | [Zn]; mg/L | %Zn |
| 15 | 0.0440 | 79.53 | 0.0420 | 80.46 | 0.0345 | 83.95 |
| 30 | 0.0350 | 83.72 | 0.0245 | 88.60 | 0.0275 | 87.20 |
| 45 | 0.0225 | 89.53 | 0.0255 | 88.13 | 0.0250 | 88.37 |
| 60 | 0.0210 | 90.23 | 0.0230 | 89.30 | 0.0270 | 87.44 |

El biochar de café ha demostrado tener una alta capacidad de remoción de metales, alcanzando valores máximos de 99.91% para cobre, 96.03% para hierro y 87.44% para zinc. Finalmente, se puede comprobar la alta eficiencia del biochar elaborado a partir de los residuos de café, reportados en la literatura por otros autores, como (Kim et al.,2024) [14], quienes obtuvieron una remoción del 88% para cobre y 99 % para zinc, así como Mosley et al. (2015) [14], quienes alcanzaron una remoción del 94% para hierro, esto evidencia la notable efectividad del biochar elaborado a partir de los residuos de café para la remoción de metales en el DAM. Asimismo, se resalta su potencial como una alternativa eficaz para el tratamiento de pasivos ambientales en la zona de Michiquillay, el cual puede llegar a valores inofensivos en los cuerpos acuosos contaminados; según la normativa de los ECA estos contaminantes deben estar dentro de los límites máximos permisibles ya sea para ser consumido por humanos, animales o utilizarse para la agricultura por lo que el tratamiento propuesto ha resultado ser efectivo y lograr estar dentro de estos estándares. Actualmente ninguna unidad minera en el territorio peruano utiliza el biochar como parte de la mitigación de metales, por lo que este proyecto puede ser presentado para formar parte de una alternativa sostenible y siendo parte de los lineamientos ambientales en la normativa peruana; además de demostrar tener un menor tiempo de remoción en comparación a otras investigaciones.

C. Evaluación estadística de resultados

C.1) Cobre

En la figura 7, se muestra una relación clara entre la dosis de biochar (0.50, 1.0 y 1.50 g) y la eficiencia de remoción de cobre desde 92.26% a los 15 minutos, para una dosis de 0.5 g de carbón activado de residuos de café en el tratamiento de drenaje ácido de mina en Michiquillay.

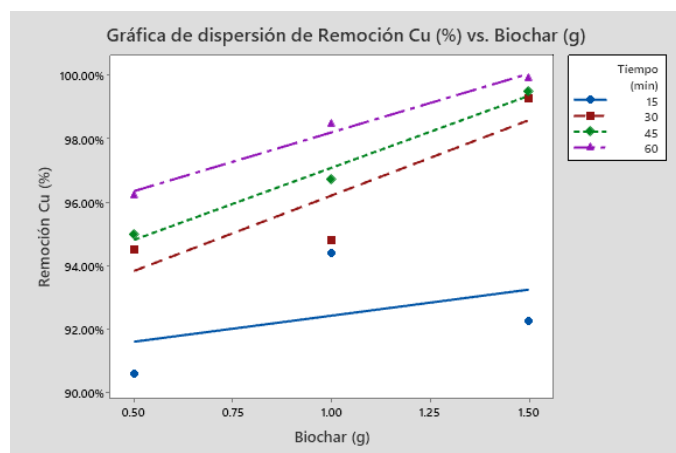


Fig. 7 Porcentaje de remoción de Cu (%) Vs dosis de biochar (g)

Además, se observa una variación de la remoción desde 90.62% hasta 99.91%, indicando la alta eficiencia del tratamiento aplicado, los cuales son coherentes con estudios previos que demuestran la efectividad del biochar en la remoción de metales. En ese sentido Ahmad et al. (2014) [15], reportaron que el carbón activado derivados de residuos orgánicos presenta grupos funcionales oxigenados que facilitan la quelación y adsorción de cationes metálicos como Cu^{2+} . La estructura porosa del biochar de café, rica en lignina y celulosa pirolizada, proporciona sitios de intercambio catiónico efectivos.

C.2) Hierro

En la figura 8, se muestra una relación clara entre la dosis de biochar (0.50, 1.0 y 1.50 g) y la eficiencia de remoción de hierro desde 95.01% a los 15 minutos, para una dosis de 0.5 g de carbón activado de residuos de café en el tratamiento de drenaje ácido de mina en Michiquillay.

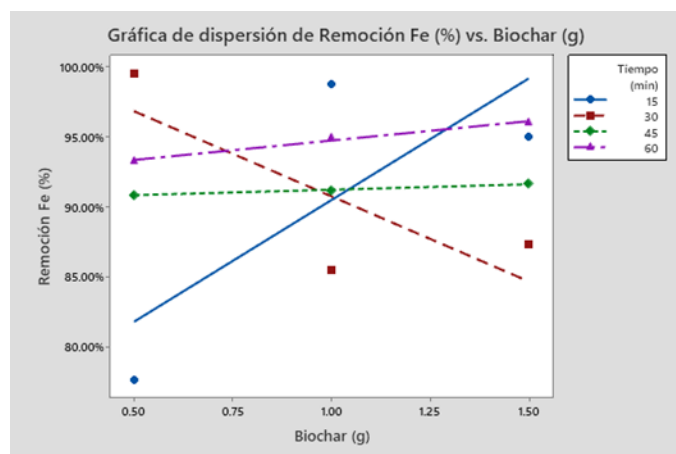


Fig. 8 Porcentaje de remoción de hierro (%) Vs dosis de biochar (g)

Además, se observa una variación de la remoción desde 77.65% hasta 96.03%, indicando la alta eficiencia del

tratamiento aplicado, los cuales son coherentes con estudios previos que demuestran la efectividad del biochar en la remoción de metales. La eficiencia del 96.03% alcanzada supera significativamente a los sistemas convencionales de precipitación química, que típicamente alcanzan 85-95% de remoción (Skousen et al., 2017) [16]. Además, el carbón activado de origen de biomasa ofrece ventajas adicionales como la estabilización del pH y la reducción de la movilidad de otros contaminantes.

C.3) Zinc

En la figura 9, se muestra una relación clara entre la dosis de biochar (0.50, 1.0 y 1.50 g) y la eficiencia de remoción de zinc desde 83.95% a los 15 minutos, para una dosis de 0.5 g de carbón activado de residuos de café en el tratamiento de drenaje ácido de mina en Michiquillay. Además, se observa una variación de la remoción desde 79.53% hasta 87.44%, indicando la alta eficiencia del tratamiento aplicado, los cuales son coherentes con estudios previos que demuestran la efectividad del biochar en la remoción de metales. A diferencia del cobre y el hierro, que presentan mecanismos de adsorción dominantes, el zinc puede verse afectado por fenómenos de competencia entre diferentes sitios de adsorción. En ese sentido Ahmed et al. (2014) [15] manifiestan que, en sistemas con múltiples sitios activos, el zinc puede experimentar transiciones entre adsorción física y química dependiendo de la carga superficial del adsorbente.

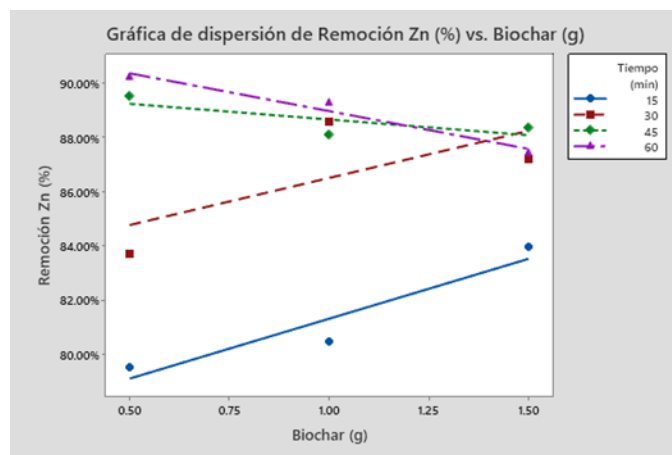


Fig. 9 Porcentaje de remoción de Zn Vs dosis de biochar (g)

Los resultados revelan la siguiente secuencia de afinidad, $\text{Cu} > \text{Fe} > \text{Zn}$, consistente con la estabilidad de complejos metálicos y la teoría de ácidos-bases. Esta selectividad debe considerarse en el diseño de sistemas de tratamiento para efluentes con composición metálica mixta.

El contexto de aplicación en un pasivo ambiental minero ubicado en Michiquillay es particularmente relevante, dado que el drenaje ácido de mina representa uno de los principales desafíos ambientales en la minería peruana. Según Akcil & Koldas (2006) [17], las tecnologías de biorremediación usando

materiales orgánicos pirolizados han mostrado ventajas económicas y ambientales sobre métodos convencionales como la precipitación química. La utilización de residuos de café para producir carbón activado representa una solución de economía circular, convirtiendo un desecho agroindustrial como restos de café pasado en Perú en un material de alto valor agregado para remediación ambiental. Esta aproximación es consistente con los principios de desarrollo sostenible propuestos por la Agenda 2030 para la gestión de residuos y protección del agua. Asimismo, se resalta su potencial como una alternativa eficaz para el tratamiento de pasivos ambientales en la zona de Michiquillay, el cual puede llegar a valores inofensivos en los cuerpos acuosos contaminados; según la normativa de los ECA estos contaminantes deben estar dentro de los límites máximos permisibles ya sea para ser consumido por humanos, animales o utilizarse para la agricultura por lo que el tratamiento propuesto ha resultado ser efectivo y lograr estar dentro de estos estándares. Actualmente ninguna unidad minera en el Estado peruano utiliza en biochar como parte de la mitigación de metales, por lo que este proyecto puede ser presentado para formar parte de una alternativa sostenible y siendo parte de los lineamientos ambientales en la normativa peruana; además de demostrar tener un menor tiempo de remoción en comparación a otras investigaciones.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que el uso de biochar de café constituye una alternativa tecnológica sostenible y de bajo costo para el tratamiento de drenaje ácido de mina (DAM), reduciendo de manera significativa la concentración de metales y regulando el pH hasta valores cercanos a la neutralidad (de 4.77 a 7.14). Los resultados evidencian una eficiencia destacada en la remoción de metales, alcanzando 99.91% para el cobre, 96.03% para el hierro y 87.44% para el zinc, lo que garantiza que las concentraciones se mantengan dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua en el Perú.

No obstante, el presente estudio presenta limitaciones relacionadas con la necesidad de analizar la regeneración y su capacidad de reutilización del biochar.

En términos prácticos, los hallazgos muestran la factibilidad de implementar el biochar de café como material adsorbente en zonas mineras como Michiquillay, donde la alta pluviosidad genera un flujo continuo de DAM. Su utilización podría contribuir a la mitigación de impactos ambientales y a la gestión sostenible de los recursos hídricos en entornos mineros de la región cajamarquina y expandirse a nivel nacional.

Finalmente, se recomienda realizar investigaciones futuras con ensayos piloto en campo, análisis de costos, evaluación de la durabilidad y regeneración del biochar en sistemas de flujo continuo, así como la exploración de biochars de otras biomásas regionales, con el fin de validar y optimizar su aplicación a gran escala en el tratamiento de DAM y promover una gestión ambiental sostenible.

V. REFERENCIAS

- [1] D. Monroy, I. González, O. Romero y L. Martínez, "Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 33, 2017. DOI: 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01 [En línea]. Disponible: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.esp01.01/46640>
- [2] W. Pardavé Livia, B. S. Serrano Uribe, y C. H. Castillo Martínez, "Tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) mediante filtros elaborados con relave minero," *Revista Politécnica*, vol. 18, no. 36, pp. 115–125, 2022. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a2>
- [3] D. Mercado-García, T. Block, J. T. Horna Cotrina, N. Deza Arroyo, M. A. E. Forio, G. Wyseure y P. Goethals, "Freshwater Management Discourses in the Northern Peruvian Andes: The Watershed-Scale Complexity for Integrating Mining, Rural, and Urban Stakeholders," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 6, p. 4682, 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20064682>
- [4] Congreso de la República del Perú, "CARTERA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN MINERA 2024," Lima, Perú, 2024. [En línea]. Disponible: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6150647/5325671-cpim-2024.pdf?v=1712348649>
- [5] Ministerio de Energía y Minas del Perú, "DM 056-2025-MINEM," Dic., 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/6496380-056-2025-minem-dm>
- [6] Congreso de la República del Perú, Ley N.º 28271: Ley que promueve el uso eficiente y la generación distribuida de energía eléctrica, Lima, Perú, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28271.pdf>
- [7] Congreso de la República del Perú, Ley N.º 28271: Ley que promueve el uso eficiente y la generación distribuida de energía eléctrica, Lima, Perú, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28271.pdf>
- [8] UNIDO, "Launch of global platform for coffee industry players to transform 40 million tons of biowaste into business," 14 May 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.unido.org/news/launch-global-platform-coffee-industry-players-transform-40-million-tons-biowaste-business>
- [9] Z. Phiri, N. T. Moja, T. T. I. Nkambule, y L.-A. de Kock, "Utilización de biocarbón para la remediación de metales pesados en ambientes acuosos: una revisión y análisis bibliométrico," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, e25785, 2024, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25785.
- [10] ProInversión, "Yacimientos cupríferos de Michiquillay: proyecto," Invertir en el Perú – ProInversión, Perú. [En línea]. Disponible: <https://www.investinperu.pe/es/app/procesos-concluidos/proyecto/8468>
- [11] C. Tejada-Tovar, Á. Villabona-Ortiz, y A. D. Gonzalez-Delgado, "The kinetics, thermodynamics and equilibrium study of nickel and lead uptake using corn residues as adsorbent," *Journal of Water and Land Development*, no. 49, pp. 197–204, 2021, doi: 10.24425/jwld.2021.136162.
- [12] Ministerio del Ambiente del Perú, D. S. N° 004-2017-MINAM, junio 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- [13] Instituto de la Calidad Ambiental, Estándar de Calidad Ambiental – Agua, 2020. [En línea]. Disponible: <https://institutoambiental.pe/eca-para-agua/>
- [14] E. Simamora, M. Nurcholis, A. Ardian, R. Ernawati, y E. Winarno, "The potential of biochar for heavy metal adsorption in acid mine drainage based on literature review," *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, vol. 5, no. 1, pp. 20–34, 2024, DOI: 10.31284/j.jemt.2024.v5i1.6772
- [15] M. Ahmad, A. U. Rajapaksha, J. E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S. S. Lee y Y. S. Ok, "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review," *Chemosphere*, vol. 99, pp. 19–33, 2014, doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- [16] J. Skousen, C. E. Zipper, A. Rose, P. F. Ziemkiewicz, R. Nairn, L. M. McDonald y R. L. Kleinmann, "Review of Passive Systems for Acid

- Mine Drainage Treatment,” *Mine Water and the Environment*, vol. 36, pp. 133–153, 2017. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1
- [17] A. Akcil y S. Koldas, “Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies,” *J. Cleaner Prod.*, vol. 14, pp. 1139–1145, 2006. DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.09.006