

Jonathan Cahuapaza Pinto

Pinto_Puma.docx



Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:475822507

Fecha de entrega

23 jul 2025, 6:25 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

23 jul 2025, 7:02 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

Pinto_Puma.docx

Tamaño de archivo

1.0 MB

28 Páginas

6351 Palabras

34.373 Caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 5% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	dspace.espol.edu.ec	<1%
2	Internet	proceedings.lacpei.org	<1%
3	Internet	api-depositonce.tu-berlin.de	<1%
4	Internet	visorsig.oefa.gob.pe	<1%
5	Internet	repository.usta.edu.co	<1%
6	Internet	www.researchgate.net	<1%
7	Trabajos entregados	CONACYT on 2018-05-22	<1%
8	Trabajos entregados	CONACYT on 2018-06-27	<1%
9	Trabajos entregados	Universidad Tecnologica del Peru on 2024-07-18	<1%
10	Internet	issuu.com	<1%
11	Internet	www.unesco-ihe.org	<1%

12	Trabajos entregados	Universidad Nacional del Centro del Peru on 2025-04-07	<1%
13	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
14	Internet	ddd-test.uab.cat	<1%
15	Internet	patents.google.com	<1%
16	Internet	repositorio.uptc.edu.co	<1%
17	Internet	www.acnur.org	<1%
18	Internet	www.mgpa.uchile.cl	<1%
19	Publicación	Serra Delgado, Mariona. "Efecto de la administración posnatal de Epigallocatequi...	<1%
20	Trabajos entregados	Universidad Europea de Madrid on 2023-09-27	<1%
21	Internet	biblus.us.es	<1%
22	Trabajos entregados	consultoriadeserviciosformativos on 2025-01-07	<1%
23	Internet	depositonce.tu-berlin.de	<1%
24	Internet	repositorio.unac.edu.pe	<1%
25	Trabajos entregados	uncedu on 2024-02-27	<1%

26

Internet

www.coursehero.com

<1%

27

Internet

www.jove.com

<1%

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Aplicación de lecho filtrante de oxidación y aireación con
dolomita para el tratamiento de drenaje ácidos de mina
polimetálica**

Tesis para obtener el Título Profesional de ingeniero ambiental

Autor:

Jonathan Cahuapaza Pinto
Alicia Puma Machacca

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, febrero del 2025

Aplicación de lecho filtrante de oxidación y aireación con dolomita para el tratamiento de drenaje ácidos de mina polimetálica

Application of oxidation and aeration filter bed with dolomite for the treatment of acid drainage of polymetallic mine

Resumen

La contaminación del agua por Drenaje Ácido de Mina (DAM) ha recibido gran atención debido a su impacto ambiental. Sin embargo, los métodos de tratamiento activo previos presentan limitaciones como altos costos operativos y de mantenimiento. La presente investigación tiene como objetivo determinar la eficiencia de remoción de hierro, sulfato y la neutralización del pH mediante un proceso de filtración, oxidación y aireación en un lecho filtrante con dolomita orientado a tratar agua ácida proveniente del DAM en una mina polimetálica. Inicialmente, se caracterizó el agua ácida, detectando concentraciones de hierro total (105 mg/L), sulfato (445 mg/L) y un pH de 3.26. Luego, se diseñaron e implementaron tres lechos filtrantes con características uniformes para evaluar los efectos de factores operativos (tamaño de partícula de dolomita, caudal de agua y tiempo de contacto). Los resultados muestran que, en condiciones óptimas (tamaño de partícula de 0.5-1 cm, caudal de 100 ml/min y tiempo de contacto de 30 minutos), se lograron eficiencias de remoción de hierro de hasta 97%, de sulfato de 58%, y una neutralización del pH a un valor final de 6.71, cumpliendo con los límites establecidos por el ECA para agua de categoría 3. Este desempeño evidencia que el uso de dolomita actúa como un neutralizador del agua ácida. Además, se observó que el tamaño de las partículas y el caudal influyen significativamente en la eficiencia del proceso, siendo las partículas de 0.5-1 cm y un caudal de 100 ml/min las más efectivas. Estos resultados indican que el proceso de lecho filtrante con dolomita representa una alternativa viable y de menor costo

a los métodos activos tradicionales, con buen rendimiento en la aplicación para el tratamiento de aguas ácidas

Palabras clave: drenaje ácido de mina, tratamiento, dolomita, agua ácida

Abstract

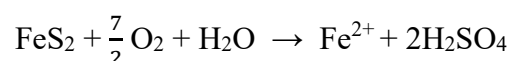
Water pollution from Acid Mine Drainage (AMD) has received great attention due to its environmental impact. However, previous active treatment methods have limitations such as high operating and maintenance costs. The present investigation aims to determine the removal efficiency of iron, sulfate and pH neutralization through a filtration, oxidation and aeration process in a dolomite filter bed aimed at treating acidic water from AMD in a polymetallic mine. Initially, the acidic water was characterized, detecting concentrations of iron (105 mg/L), sulfate (445 mg/L) and a pH of 3.26. Then, three filter beds with uniform characteristics were designed and implemented to evaluate the effects of operational factors (dolomite particle size, water flow rate and contact time). The results show that, under optimal conditions (particle size of 0.5-1 cm, flow rate of 100 ml/min and contact time of 30 minutes), iron removal efficiencies of up to 97%, sulphate removal of 58%, and pH neutralization to a final value of 6.71 were achieved, complying with the limits established by the ECA for category 3 water. This performance shows that the use of dolomite acts as a neutralizer of acidic water. In addition, it was observed that particle size and flow rate significantly influence the efficiency of the process, with particles of 0.5-1 cm and a flow rate of 100 ml/min being the most effective. These results indicate that the dolomite filter bed process represents a viable and lower-cost alternative to traditional active methods, with good performance in the application for the treatment of acidic water.

Keywords: acid Mine Drainage, Treatment, Dolomite, Acid Water

Introducción

Los procesos de extracción y molienda de minerales han resultado en un desequilibrio del ecosistema ambiental, estos minerales que están expuestos al medio ambiente son erosionados y se combinan fácilmente con el oxígeno y los cuerpos de agua (Jamieson et al., 2015; Liñán Pérez & Sánchez Chilón, 2023). Causando impactos ambientales como la generación del agua ácida con altas concentración de metales pesados en los componentes ambientales, perjudicando así a los organismos vivos (Park et al., 2015; Pudi et al., 2022). Estos lixiviados de minas activas y abandonadas liberan continuamente metales pesados al medio ambiente durante décadas y milenios (Ferreira et al., 2021; Luís et al., 2022; Sampaio et al., 2020)

Ighalo et al., (2022) y Ojonimi et al., (2021) mencionan que el drenaje ácido de mina, AMD (por sus siglas en ingles Acid Mine Drainage), es una contaminación compleja de múltiples factores formada a partir interacciones químicas, físicas y biológicas que tiene lugar en condiciones ambientales de minas abandonadas y activas, donde se tiene un pH muy bajo, inferior a 4, el cual contiene altas concentraciones de iones de sulfato y metales como Hierro, Zinc, Cobre, Aluminio Manganeseo, etc. Como principal reacción química que contribuye al DAM es la oxidación de la pirita. La siguiente ecuación representa la oxidación de la pirita (FeS_2) en presencia de oxígeno y agua, proceso que genera ion ferroso (Fe^{2+}) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), los principales responsables de la acidez en el drenaje ácido de mina (Costello, 2003).



Los Impactos ambientales del AMD se puede dividir en cuatro categorías como químicos, físicos, biológicos y ecológicos (Ighalo et al., 2022; Ojonimi et al., 2021).

Uno de los principales impactos ambientales se basa en la abundancia de metales que contiene el AMD, ya que se incorporan fácilmente en los suelos circundantes (Liñán Pérez & Sánchez Chilón, 2023; Nariyan et al., 2017), teniendo como efectos toxicológicos la inhibición de las enzimas y microorganismos en el suelo (Kumar et al., 2021; Nariyan et al., 2018), a su vez provocan una reducción en las propiedades bioquímicas y la calidad del suelo (Anekwe & Isa, 2023; Pudi et al., 2022). El AMD puede generar la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, afectando su calidad y volviéndolas inadecuadas para usos agrícolas y otros fines productivos. La presencia de AMD disminuye el pH del agua y altera de manera significativa las condiciones fisicoquímicas de los ecosistemas acuáticos, provocando la mortalidad de peces y otros organismos, y deteriorando la biodiversidad en los cuerpos hídricos cercanos (Ferreira et al., 2021; Luís et al., 2022; Masindi et al., 2022).

Frente a ello, en las últimas décadas, los investigadores han elaborado métodos y técnicas para el tratamiento de las aguas contaminadas del AMD (Anekwe & Isa, 2023; Na et al., 2024; Wang et al., 2021). Estos métodos se pueden clasificar en dos, métodos pasivos y métodos activos (du Plessis et al., 2021; Othman et al., 2023; Zhao et al., 2024). Investigaciones relacionadas muestran que la concentración de los iones metálicos en los AMD son decenas de veces mayor que el estándar de descarga prescrito (Foudhaili et al., 2020; Li et al., 2019; Masindi et al., 2022). Entre ellos, la concentración de hierro (Fe) y Sulfato (SO₄) suele ser mucho mayor que la concentración de otros iones metálicos (Luís et al., 2022; Stylianou et al., 2022). Las elevadas concentraciones de Fe impactan de forma negativa la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, así como perjudicar el desarrollo de los cultivos. (Mamelkina et al., 2019; Pérez Falcón et al., 2020; Xu et al., 2022).

En la mayoría de los países, a menudo priorizan el ahorro en costos de operación para el tratamiento de las aguas provenientes del AMD, ya que el proceso es duradero (Othman et al., 2023). Además, encontrar personal calificado para operar una planta de tratamiento, eleva el costo operaciones, por lo que se requiere que el proceso sea simple de operar y fácil de mantener (Costello, 2003). Los tratamientos más comunes se realizan mediante la adición de muchos materiales neutralizantes o aireación continua (León et al., 2023; Wang et al., 2021). La dolomita es una roca de carbonato calcio y magnesio, con la composición química $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Basado en principios químicos fundamentales cuando la dolomita entra en contacto con una solución ácida, reacciona y tiene la capacidad de regular el nivel de pH y disminuir la cantidad de precipitados que es sólo la mitad o menos que otros tratamientos activos e incluso pasivos con un costo operaciones mínimo (Acharya & Kharel, 2020; Chai et al., 2020; Jamieson et al., 2015).

Durante el tratamiento del drenaje ácido de mina, el ion ferroso (Fe^{2+}) y el ion sulfato (SO_4^{2-}), ambos generados a partir de la oxidación de la piritita, se encuentran disueltos en el agua. Al incorporar dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ como agente neutralizante, esta reacciona con el ácido presente en el medio, liberando calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), dióxido de carbono (CO_2) y agua. A medida que el pH del sistema se eleva por efecto de esta neutralización, se favorece la precipitación del hierro como hidróxidos y/o como sales insolubles, como el sulfato ferroso hidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Teniendo como reacción química principal:



Esta reacción evidencia cómo la dolomita no solo neutraliza la acidez, sino que además promueve la precipitación de metales y aniones contaminantes, lo cual mejora significativamente la calidad del agua tratada. (Othman et al., 2023)

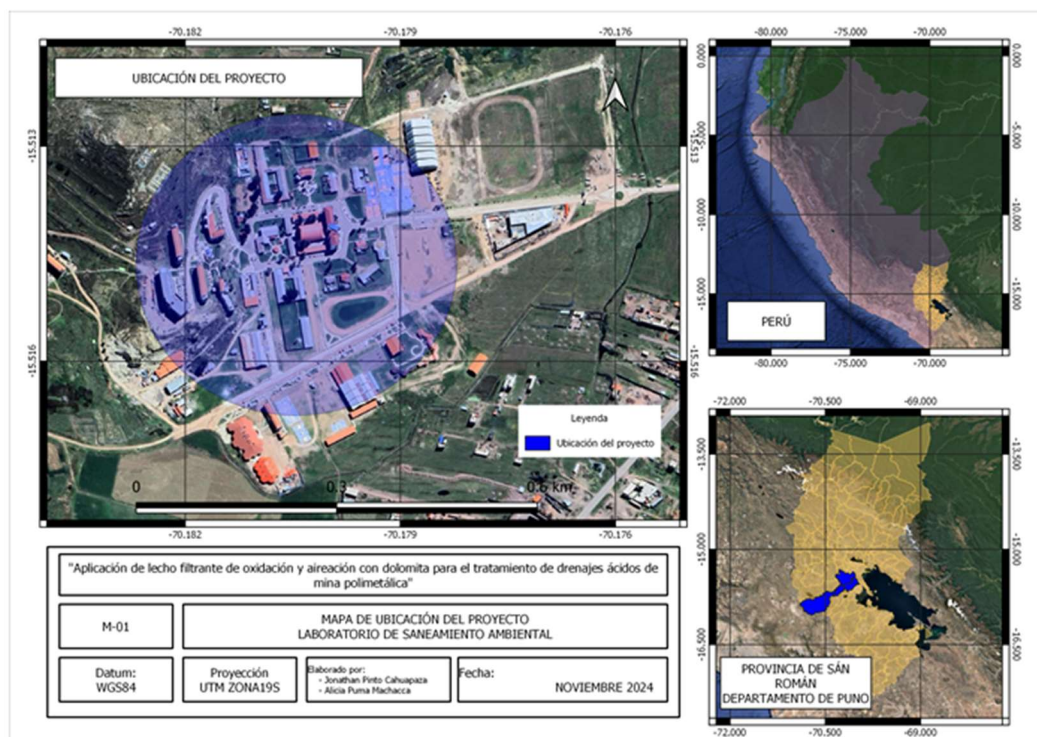
Frente a esta problemática, la presente investigación tiene como objetivo determinar la eficiencia de remoción de hierro, sulfato y la neutralización del pH mediante un proceso de oxidación y aireación en un lecho filtrante con dolomita. Para ello, se realizó una caracterización inicial del agua ácida proveniente de un drenaje ácido de mina polimetálica, seguida del diseño e implementación del lecho filtrante de oxidación y aireación con dolomita. Además, se llevó a cabo un estudio sistemático de la eficiencia de remoción de FeTotal , SO_4^{2-} y la neutralización del pH.

Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en el laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión filial Juliaca (Figura 1). El agua ácida utilizado en la investigación procedió de un drenaje ácido de mina polimetálica (Puno, Perú). El contenido de Fe Total y SO_4^{2-} fue de 105 mg/L y 445 mg/L, respectivamente, y el nivel de pH registrado fue de 3.26 estos valores no cumplen con la normativa establecido en el ECA del agua (DS. N° 004-2017-MINAM). El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) fija los niveles máximos permisibles de concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, con el fin de proteger la salud de las personas y preservar los ecosistemas. El material filtrante (Dolomita) se obtuvo de una cantera del Distrito de Samán, departamento de Puno.

Figura 1

Mapa de ubicación del proyecto



Configuración experimental

Las columnas para el lecho filtrante fueron hechas de acrílico transparente (Figura 2), con diámetros de 4 cm y longitudes de 50 cm. Fue necesario aperturar un orificio con un diámetro de 1 cm como puerto lateral a una distancia de 5 cm de las bases superior e inferior, así mismo se realizó otro orificio en la parte superior e inferior de las bases, el orificio del extremo inferior se conectó a la bomba de aire, el agua ácida de inyectó desde la parte inferior hasta la parte superior de la columna con una bomba sumergible con un caudal constante. El orificio de la parte superior de la columna se utilizó para impulsar el agua ácida tratada. Las rocas de dolomita se apilaron a 5cm por debajo del puerto superior. Antes de apilar las rocas en los reactores, se utilizó 1,5 L de agua destilada para lavar las rocas de dolomita varias veces hasta obtener un agua de salida clara, y luego se secaron a temperatura ambiente.

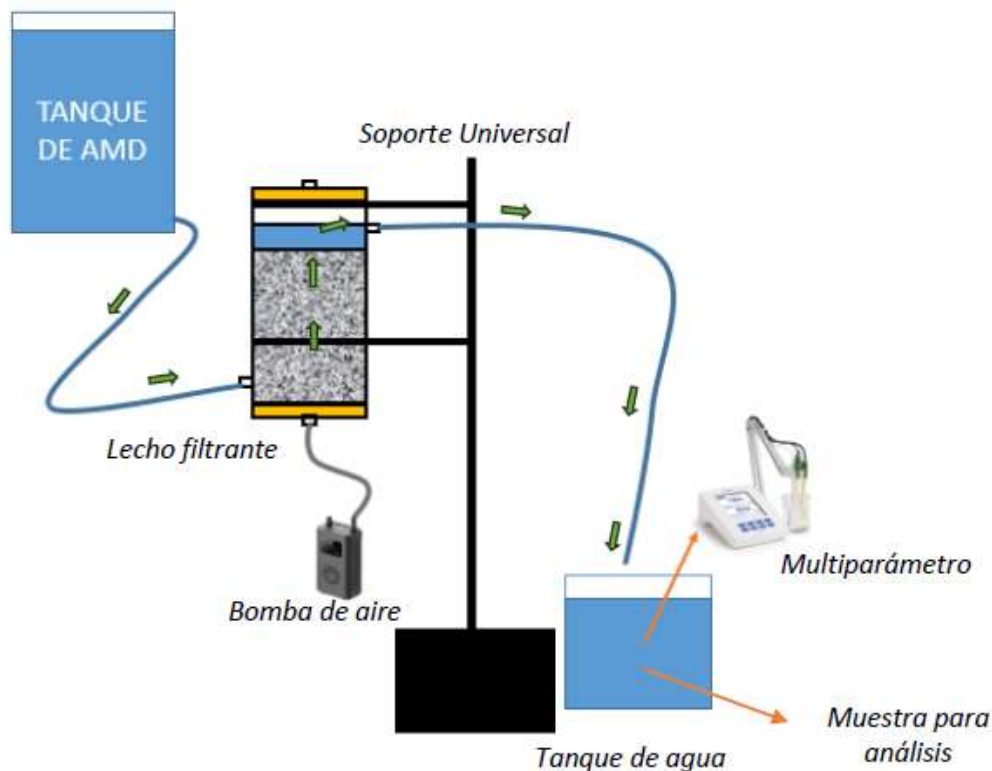
Procedimientos experimentales

Se seleccionaron dos caudales de entrada para el agua ácida (100 ml/min y 200 ml/min). Cada caudal fue combinado con tres tamaños de partículas de dolomita (0.5–1 cm, 1–1.5 cm y 1.5-2 cm), generando un total de seis combinaciones de condiciones experimentales. El agua ácida se introdujo en los reactores mediante una bomba sumergible, manteniendo el caudal designado para cada experimento. Simultáneamente, se aplicó aireación en el lecho filtrante mediante una bomba de aire, suministrando un flujo constante de 10 L/min para facilitar la oxidación del hierro total (FeTotal) presente en el agua ácida. Durante el proceso de tratamiento, se recolectaron muestras de efluente a intervalos de tiempo específicos (0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos). En cada intervalo, se tomaron muestras de 50 ml del efluente tratado y se transfirieron a tubos de muestreo para el análisis del hierro total (FeTotal), definido como la

concentración de hierro disuelto y particulado; los sulfatos (SO_4^{2-}), que corresponden a la cantidad de iones sulfato disueltos, y el pH, que indica el grado de acidez del agua. Los datos obtenidos permitieron determinar la eficiencia de remoción en función del tiempo y de las condiciones experimentales establecidas. Se establecieron tres réplicas paralelas para cada combinación de condiciones (caudal, diámetro de dolomita y tiempo), para garantizar la fiabilidad de los resultados.

Figura 2

Diagrama esquemático del equipo experimental.



Métodos analíticos

Las concentraciones de hierro total y sulfato en las muestras de drenaje ácido de minas (AMD) se analizaron mediante el método colorimétrico, utilizando el equipo Colorímetro portátil Hach DR900, una técnica que permite cuantificar estos elementos con precisión. Además, se midió el pH con un multiparámetro Hach HQ40D,

debidamente calibrados, para garantizar la exactitud de los resultados obtenidos. Para determinar la eficiencia en la remoción de hierro total y sulfato, se aplicó una fórmula específica que calcula el porcentaje de eliminación en función de las concentraciones iniciales y finales de estos compuestos, proporcionando así una medida clara de la efectividad del tratamiento empleado (Chai et al., 2020).

$$\text{Eficiencia de remoción de Fe} = \frac{C_{Fe,0} - C_{Fe,t}}{C_{Fe,0}} \times 100\%$$

Donde:

- $C_{Fe,0}$ es la concentración inicial de hierro
- $C_{Fe,t}$ es la concentración final de hierro

$$\text{Eficiencia de remoción de SO}_4 = \frac{C_{SO_4,0} - C_{SO_4,t}}{C_{SO_4,0}} \times 100\%$$

Donde:

- $SO_4,0$ es la concentración inicial de sulfato
- SO_4,t es la concentración final de sulfato

Ambas fórmulas permitieron evaluar la eficiencia del proceso de remoción para estos contaminantes en función del tiempo.

Análisis estadístico

Para analizar los efectos de los tratamientos en este diseño de bloques completos al azar, primero se verificó el cumplimiento de los supuestos estadísticos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov, la homogeneidad de varianzas se comprobó con la prueba de Levene, asegurando que los datos cumplan con los requisitos necesarios para realizar el análisis de varianza (ANOVA) adecuado.

Posteriormente, se aplicó un ANOVA de medidas repetidas para examinar las diferencias entre los tratamientos, considerando las mediciones realizadas bajo distintas condiciones experimentales. Así mismo, se realizó la prueba post hoc de Tukey para identificar específicamente cuáles tratamientos difieren entre sí, con la finalidad de tener un análisis detallado de los efectos principales y las interacciones de los factores experimentales, brindando una comprensión integral del impacto de los tratamientos en las variables dependientes.

Resultados

Caracterización del agua proveniente del drenaje ácido de mina polimetálica.

El agua utilizada en la presente investigación proviene de un drenaje ácido de mina polimetálica, los datos están detallados en la Tabla 1

La tabla 1 muestra que el nivel de pH fue de 3.26, un valor que está muy por debajo de lo establecido por el ECA (pH ácido). La concentración de Fe total fue de 105 mg/L, cuyo valor supera el límite permitido por la norma. La concentración de SO_4^{2-} alcanzó los 450 mg/L, cuyo valor está por debajo de la norma, pero presenta una concentración considerablemente elevada. Pero las concentraciones de estos parámetros analizados según Ighalo et al. (2022) son características de una agua ácida proveniente de un drenaje ácido de mina.

Tabla 1.

Caracterización de agua ácida

Parámetro	Unidad de medida	Calidad de agua ácida	ECA del			
			agua (DS. N° 004-2017-MINAM) Categoría 3, riego de vegetales	LMP Para descarga de efluentes líquidos en actividades metalúrgicas (DS. N 010-2010 MINAN)	LMP en vertimientos puntuales de ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería (Colombia) Resolución 631 de 2015	LMP Para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales (Chile) (DS. N 90/2000)

y bebidas						
de						
animales						
pH		3.26	6.5-8.5	6-9	6.00-9.00	6-8.5
Fe _{total}	mg/L	105	5	2	2	5
SO ₄ ⁻²	mg/L	450	1000	-	1200	1000

Resultados de los parámetros monitoreados

La tabla 2 muestra los resultados de los parámetros de seis tratamientos, los cuales son el promedio con diferentes combinaciones de caudales (200 ml/min y 100 ml/min) y tamaños de dolomita (diámetros de 0,5-1 cm, 1-1,5 cm, y 1,5-2 cm) a lo largo de intervalos de tiempo de 30 a 180 minutos. Para cada combinación de caudal de agua ácida, diámetro de dolomita y tiempo, se registraron los valores de concentración de hierro (FeTotal), concentración de sulfato (SO₄⁻²) y el nivel de pH. El valor más bajo de concentración de hierro es de 2,83 mg/L, encontrado en el tratamiento 4 a los 30 minutos. La concentración de hierro más alta es de 89,67 mg/L, registrada en el tratamiento 3 a los 180 minutos. En cuanto al sulfato (SO₄⁻²), la menor concentración observada es de 183,33 mg/L en el tratamiento 4 a los 30 minutos, y la concentración más alta es de 315,00 mg/L en el tratamiento 6 a los 180 minutos. El pH más alto en todos los tratamientos es de 6,71, registrado en el tratamiento 4 a los 30 minutos. Así mismo, se verificó con el cumplimiento de los supuestos estadísticos de normalidad (prueba de Shapiro – Wilk <50 y Kolmogorov – Smirnov >50) y homogeneidad de varianza (prueba de Levene).

Tabla 2
Resultado de los parámetros determinados en laboratorio

Tratamiento	Caudal (mL/min)	Diámetro (cm)	Tiempo (min)	Fe _{total} (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	pH
1	200	0.5 – 1.0	30	33.33	240.00	5.68
			60	42.67	268.33	5.54
			90	47.33	276.67	5.40
			120	52.33	276.67	5.36
			150	60.00	276.67	5.08
			180	67.67	283.33	5.09
2	200	1.0 - 1.5	30	56.67	266.67	5.37
			60	60.00	240.00	5.25
			90	65.33	250.00	5.16
			120	78.67	226.67	5.02
			150	73.33	233.33	4.95
			180	75.00	265.00	4.90
3	200	1.5 – 2.0	30	72.00	245.00	4.91
			60	64.67	258.33	4.85
			90	77.67	275.00	4.84
			120	89.33	275.00	4.83
			150	82.67	298.33	4.86
			180	89.67	310.00	4.80
4	100	0.5 – 1.0	30	2.83	183.33	6.71
			60	10.83	188.33	6.54
			90	20.33	203.33	6.53
			120	27.33	206.00	6.45
			150	38.67	218.33	6.32
			180	46.33	231.00	6.49
5	100	1.0 – 1.5	30	36.33	208.33	5.24
			60	35.83	225.00	5.19
			90	38.33	238.33	5.13
			120	62.83	246.67	5.12
			150	63.83	248.33	5.12
			180	78.00	263.33	5.10
6	100	1.5 – 2.0	30	57.67	225.00	5.61
			60	53.33	236.67	5.19
			90	61.00	258.33	5.04
			120	72.67	281.67	4.90
			150	75.33	293.33	4.89
			180	78.00	315.00	4.82

Como se observa en la figura 3, el tratamiento 4, a los 30 minutos, mostró la mayor eficiencia en la remoción de Fe, alcanzando un valor máximo de 97,30%. Las pruebas estadísticas de post hoc confirmaron que este tratamiento fue superior en

comparación con los demás. En cuanto a la remoción de sulfatos (SO_4^{2-}), el tratamiento 4 también presentó la mayor eficiencia, con una remoción máxima de 58,80% a los 30 minutos. Igualmente, las pruebas de post hoc demostraron que este tratamiento superó a los otros. En relación con el pH, el tratamiento 4 a los 30 minutos alcanzó un valor de 6,71 y se observó que, a los 60 y 90 minutos, los valores tienden a neutralizarse, cumpliendo con la normativa del ECA para agua de Categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales). Las pruebas estadísticas confirmaron que el tratamiento 4, en los tres tiempos evaluados (30, 60 y 90 minutos), presentó mejores resultados en comparación con los otros tratamientos.

Tabla 3
Pruebas de normalidad

Parámetro	Prueba	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)
Fe_{Total}	Shapiro-Wilk	0.95	107	0.13
	Kolmogorov-Smirnov	0.11	107	0.69
SO_4^{2-}	Shapiro-Wilk	0.98	107	0.92
	Kolmogorov-Smirnov	0.07	107	0.96
pH	Shapiro-Wilk	0.78	107	0.09
	Kolmogorov-Smirnov	0.23	107	0.15

Tabla 4
Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)

Parámetro	Estadístico de Levene	gl	Sig. (p-valor)
Fe_{Total}	0.53	107	0.75
SO_4^{2-}	0.26	107	0.92
pH	0.03	107	0.99

Las variables remoción de hierro (Fe_{Total}), remoción de sulfato (SO_4^{2-}) y el nivel pH, presentan una distribución normal según ambas pruebas de normalidad y cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$).

Tabla 5

Cuadro resumen del ANOVA de medidas repetidas

Parámetro	Suma de cuadrados entre grupos	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Remoción de Fe _{Total}	26169.11	107	5233.82	39.25	0.000
Remoción de SO ₄ ²⁻	2586.72	107	517.34	20.85	0.000
Nivel de pH	31.74	107	6.34	123.40	0.000

Los análisis ANOVA realizados para evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento con dolomita sobre tres parámetros clave (remoción de Hierro Total, remoción de sulfato y neutralización del pH) muestran diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados.

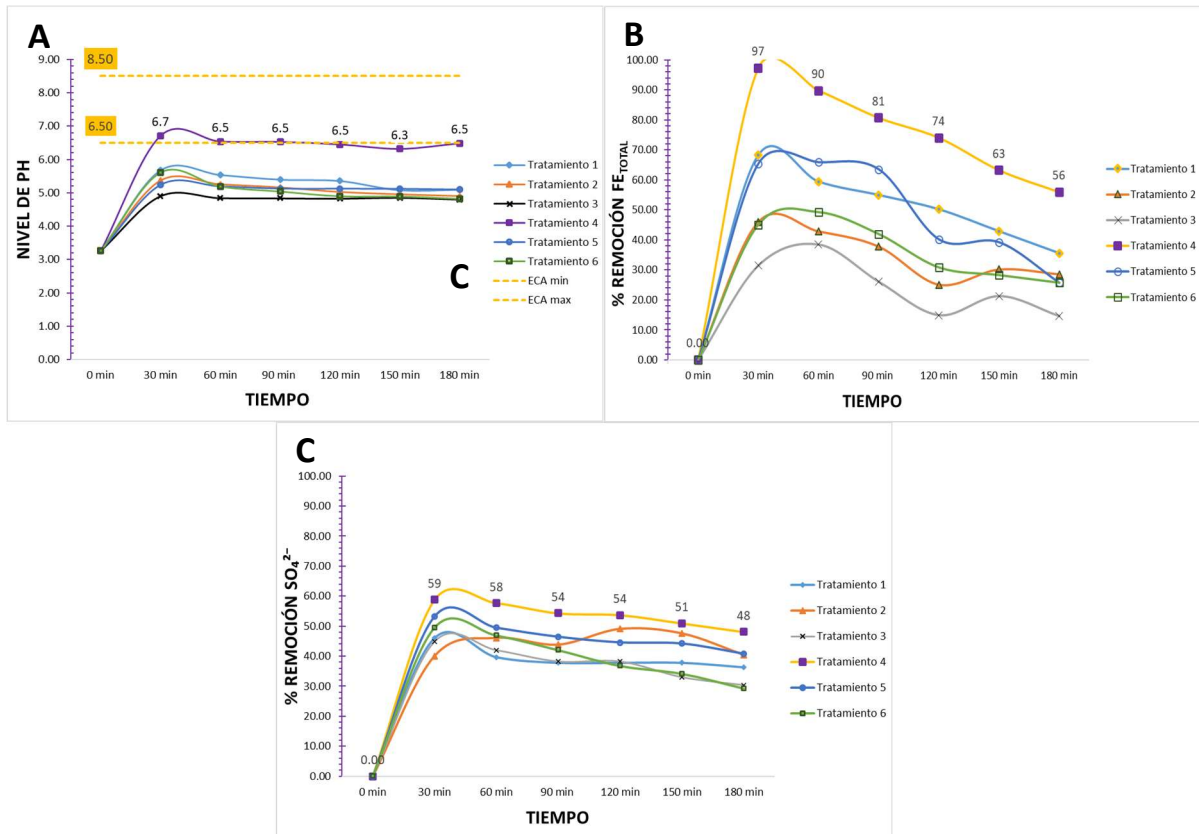
Para la Remoción de Hierro Total (Fe_{Total}), se obtuvo un valor F de 39.251 con una significancia de 0.000, lo cual indica que al menos uno de los tratamientos genera un efecto distinto sobre la remoción de este metal. Esto se alinea con los resultados experimentales, donde se alcanzó hasta un 97% de remoción bajo condiciones óptimas.

En el caso de la Remoción de Sulfato (SO₄²⁻), también se encontró una diferencia significativa entre tratamientos (F = 20.85; Sig. = 0.000). Aunque la eficiencia de remoción fue menor (hasta 58%), el ANOVA confirma que los factores operativos analizados (como tamaño de partícula y caudal) tienen un impacto real sobre este parámetro.

Finalmente, para el nivel de pH, el valor F fue 123.40 (Sig. = 0.000), mostrando la diferencia más marcada entre tratamientos. Esto refleja que el sistema no solo remueve contaminantes, sino que mejora notablemente la calidad del agua en términos de acidez, elevando el pH hasta valores cercanos a la neutralidad (6.71).

Figura 3

Influencia de los tratamientos respecto al tiempo



Nota. a) Cambio de nivel de pH; b) Cambio en la eficiencia de remoción de FeTotal; C) Cambio en la eficiencia de remoción de SO₄²⁻:

Respecto a la prueba de Tukey reveló diferencias significativas entre varios pares de tratamientos, indicando efectos distintos en la variable de respuesta. Los resultados mostraron que el Tratamiento 1 difiere significativamente del Tratamiento 2 ($p=0.001$), Tratamiento 3 ($p=0.000$) y Tratamiento 6 ($p=0.005$), mientras que el Tratamiento 2 y Tratamiento 5 también presentaron diferencias significativas ($p=0.006$) al igual que el Tratamiento 5 y Tratamiento 6 ($p=0.000$). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre el Tratamiento 1 y Tratamiento 5 ($p=0.997$) ni entre el Tratamiento 2 y Tratamiento 6 ($p=0.998$), sugiriendo efectos similares entre

estos tratamientos. Estos hallazgos permiten identificar combinaciones efectivas de factores experimentales para la remoción de contaminantes.

Tabla 6

Comparación de medias entre tratamientos mediante prueba de Tukey.

Tratamientos		Sig.
Tratamiento 1	Tratamiento 2	0.001
Tratamiento 1	Tratamiento 3	0.000
Tratamiento 1	Tratamiento 4	0.000
Tratamiento 1	Tratamiento 5	0.997
Tratamiento 1	Tratamiento 6	0.005
Tratamiento 2	Tratamiento 3	0.107
Tratamiento 2	Tratamiento 4	0.000
Tratamiento 2	Tratamiento 5	0.006
Tratamiento 2	Tratamiento 6	0.998
Tratamiento 3	Tratamiento 4	0.000
Tratamiento 3	Tratamiento 5	0.000
Tratamiento 3	Tratamiento 6	0.036
Tratamiento 4	Tratamiento 5	0.000
Tratamiento 4	Tratamiento 6	0.000
Tratamiento 5	Tratamiento 6	0.000

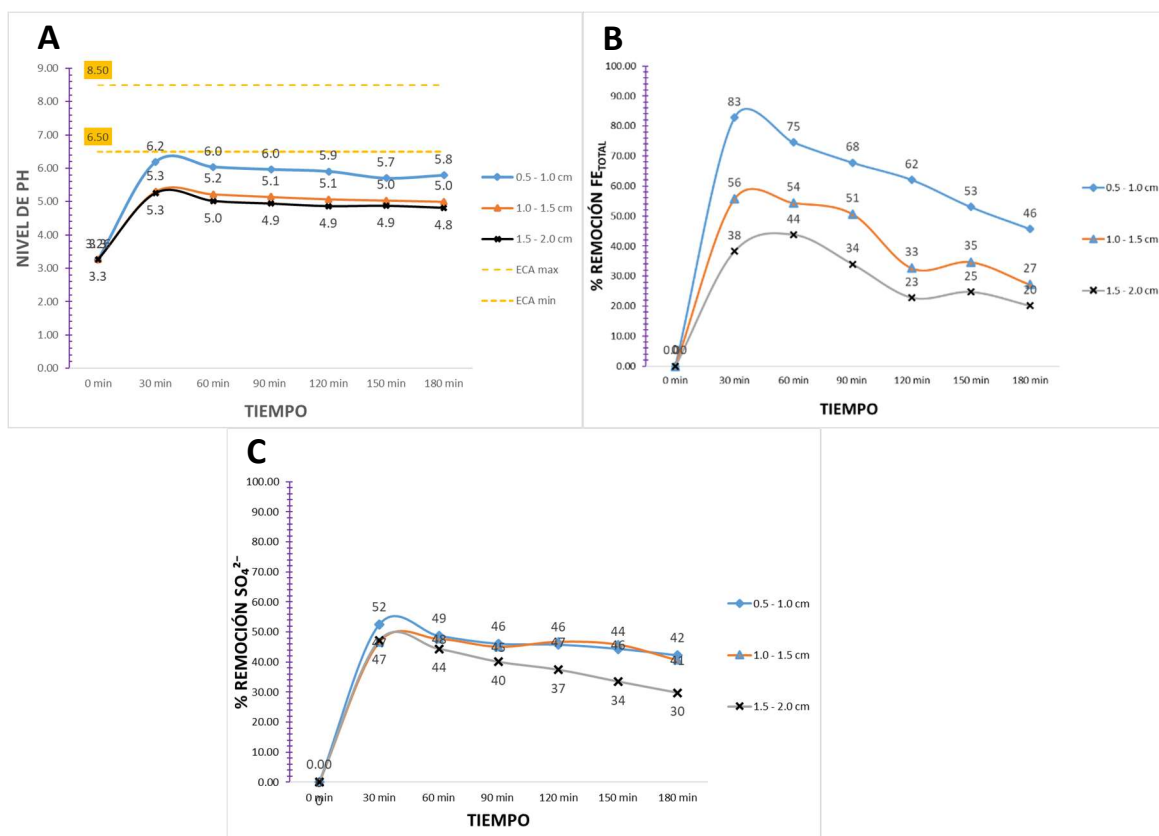
Influencia de diámetro de dolomita

Como se observa en la figura 4 y sub figura A, el diámetro de dolomita entre 0.5 y 1.0 cm mostró la mayor eficiencia en la remoción de hierro (Fe_{Total}), alcanzando un valor máximo cercano al 90% a los 30 minutos, seguido de una disminución gradual en los minutos posteriores. En comparación, los diámetros de 1.0 a 1.5 cm y de 1.5 a 2.0 cm presentaron menores eficiencias, alcanzando máximos de aproximadamente 60% y 30%, respectivamente, a los 30 minutos. En la sub figura B, se observa un comportamiento similar para la remoción de sulfato (SO_4^{2-}), donde el diámetro de dolomita entre 0.5 y 1.0 cm también alcanzó la mayor eficiencia con valores cercanos al 60% a los 30 minutos, mientras que los diámetros de 1.0 a 1.5 cm y de 1.5 a 2.0 cm presentaron eficiencias menores, rondando el 40% y 20%, respectivamente. En relación

con el pH, como se muestra en la sub figura C, el diámetro de dolomita entre 0.5 y 1.0 cm logró estabilizarse cerca de un valor de 6.2 a partir de los 30 minutos, aproximándose al valor límite del ECA para agua de Categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), representado por la línea amarilla. Los diámetros de 1.0 a 1.5 cm y de 1.5 a 2.0 cm mantuvieron valores de pH por debajo de 6.0 durante todo el tiempo de la prueba.

Figura 4.

Influencia del diámetro de dolomita



Nota. Influencia del diámetro de dolomita: a) Cambio de nivel de pH; b) Cambio en la eficiencia de remoción de FeTotal; C) Cambio en la eficiencia de remoción de SO_4^{2-}

Según la tabla 3 la prueba de Tukey realizada para comparar los diferentes diámetros de dolomita muestra diferencias significativas en la remoción de los

contaminantes entre los tres rangos de tamaño evaluados. En particular, se observan diferencias significativas entre los diámetros de 0.5 - 1.0 cm y 1.0 - 1.5 cm ($p = 0.000$), así como entre 0.5 - 1.0 cm y 1.5 - 2.0 cm ($p = 0.000$). Además, el rango de diámetros de 1.0 - 1.5 cm también mostró una diferencia significativa en comparación con el de 1.5 - 2.0 cm ($p = 0.004$). Estos resultados sugieren que el tamaño de la dolomita tiene un efecto significativo en la eficiencia de remoción, siendo los diámetros menores (0.5 - 1.0 cm) los que logran una mayor eficacia en comparación con los tamaños más grandes.

Tabla 6.

Comparación de medias entre los diámetros de dolomita mediante prueba de Tukey.

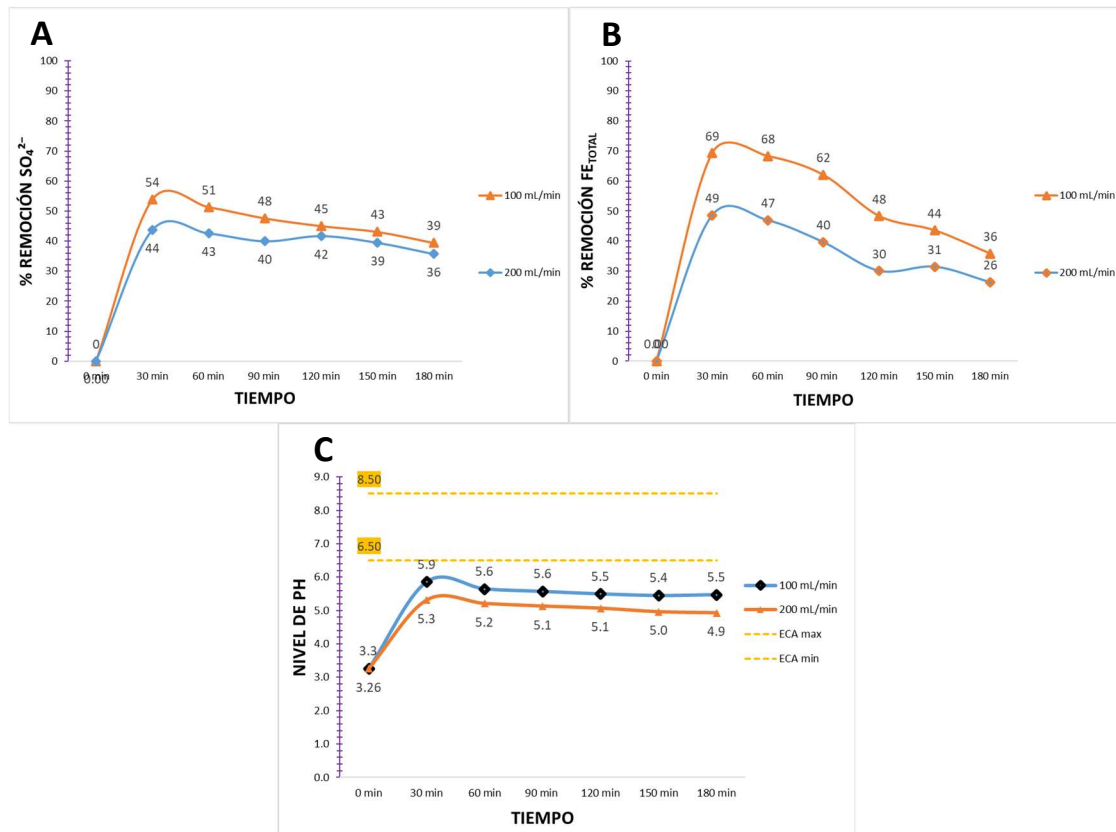
Diámetros		Sig.
0.5 - 1.0 cm	1.0 - 1.5 cm	0.000
0.5 - 1.0 cm	1.5 - 2.0 cm	0.000
1.0 - 1.5 cm	1.5 - 2.0 cm	0.004

Nota. Influencia del diámetro de dolomita: a) Cambio de nivel de pH; b) Cambio en la eficiencia de remoción de FeTotal; C) Cambio en la eficiencia de remoción de SO_4^{2-}

Como se observa en la figura 5 y sub figura A, el tratamiento con un caudal de 100 ml/min, a los 30 minutos, mostró la mayor eficiencia en la remoción de hierro (Fe_{Total}), alcanzando un valor máximo aproximado de 65%. A partir de ese punto, la remoción de Fe total disminuye gradualmente, pero el caudal de 100 ml/min sigue mostrando una mayor eficiencia en comparación con el de 200 ml/min. En este caso, los valores del tratamiento de 100 ml/min son superiores a los de 200 ml/min durante todo el tiempo de evaluación. En cuanto a la remoción de sulfatos (SO_4^{2-}), representada en la sub figura B, ambos caudales (100 y 200 ml/min) alcanzan una remoción máxima cercana al 40% a los 30 minutos. A partir de este tiempo, los valores de remoción se mantienen relativamente constantes para ambos tratamientos, sin diferencias significativas en la eficiencia de remoción entre ellos. En relación con el pH, la sub figura C muestra que los valores se estabilizan alrededor de 6.5 a 7.0 tanto para el caudal de 100 ml/min como para el de 200 ml/min, cumpliendo con los límites establecidos en la normativa del ECA para agua de Categoría 3. A los 30 minutos, ambos tratamientos logran alcanzar y mantener un pH dentro del rango adecuado, manteniéndose cercanos a los valores de referencia del ECA en los tiempos evaluados. Esta interpretación sugiere que, aunque ambos caudales presentan buenos resultados en cuanto al pH, el caudal de 100 ml/min es más eficiente en la remoción de Fe en comparación con el de 200 ml/min.

Figura 5

Influencia del caudal de agua acida



Nota. a) Cambio de nivel de pH; b) Cambio en la eficiencia de remoción de Fe_{Total} ; C) Cambio en la eficiencia de remoción de SO_4^{2-}

Discusión

La investigación se centró en evaluar la eficacia de un lecho filtrante con dolomita para la remoción de hierro (Fe_{Total}) y sulfato (SO_4^{2-}) en el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM), caracterizado inicialmente por sus altos niveles de acidez (pH 3.26) y concentraciones elevadas de contaminantes. La caracterización del agua demostró que el AMD contiene una acidez y concentración de metales que exceden las normativas ambientales nacionales e internacionales, resaltando la necesidad de un tratamiento efectivo. La dolomita se propuso como material alternativo debido a su

capacidad para neutralizar el pH y remover metales, propiedades que se maximizaron al ser combinada con la aireación, que facilitó la oxidación de metales pesados.

El diseño experimental incluyó columnas de acrílico que permitieron la inyección de aire y el contacto constante del agua ácida con partículas de dolomita en diferentes tamaños (0.5-1 cm, 1-1.5 cm y 1.5-2 cm) y caudales de agua (100 ml/min y 200 ml/min). En el laboratorio, se monitorearon parámetros como la concentración de hierro, sulfato y pH en distintos tiempos, revelando que las condiciones óptimas (0.5-1 cm de dolomita y caudal de 100 ml/min) resultaron en la remoción más eficiente de FeTotal (97.3%) y SO_4^{2-} (58.8%), mientras el pH alcanzaba niveles más neutrales. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que tanto el tamaño de la dolomita como el flujo y el tiempo son críticos para maximizar la eficiencia de remoción de contaminantes y estabilización del pH.

La relación de estos resultados con el diagrama de Pourbaix es clave, ya que indica cómo el hierro transita a especies menos solubles a medida que el pH se eleva. En este proceso, la aireación aumenta el potencial redox (Eh), promoviendo la oxidación de Fe(II) a Fe(III), que precipita como hidróxido de hierro en condiciones de pH cercanas a la neutralidad. Esto explica la alta eficiencia en la remoción de Fe bajo las condiciones de dolomita y aireación óptimas observadas, destacando que el control de pH y Eh mediante el uso de dolomita es una estrategia eficaz para reducir la toxicidad y mejorar la calidad del agua ácida de minas.

Conclusiones

En conclusión, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el proceso de filtración, oxidación y aireación utilizando dolomita en un lecho filtrante es eficaz para la remoción de hierro (Fe_{Total}) y sulfatos (SO_4^{2-}) en aguas ácidas provenientes de un drenaje ácido de mina polimetálica. El Tratamiento 4, con un tiempo de 30 minutos, mostró la mayor eficiencia en la remoción de Fe y sulfatos, alcanzando valores máximos de 97,30% y 58,80%, respectivamente. Estos resultados indican que el proceso propuesto es prometedor para la mejora de la calidad del agua contaminada por metales pesados y compuestos inorgánicos, lo que podría tener aplicaciones relevantes en la recuperación de cuerpos de agua afectados por este tipo de contaminación.

En cuanto a la neutralización del pH, se observó que el Tratamiento 4 también fue el más efectivo, logrando estabilizar el pH a un valor de 6,71, dentro de los límites establecidos por el ECA para agua de categoría 3, lo que sugiere que este proceso no solo es eficiente en la remoción de contaminantes, sino también en la mejora de las condiciones químicas del agua. La capacidad de la dolomita para actuar como un neutralizador de acidez, combinado con su función como adsorbente, se destacó como un factor clave para el éxito del proceso de tratamiento en este estudio. Estos hallazgos resaltan el potencial de la dolomita como un material accesible y efectivo para tratar aguas ácidas.

Finalmente, los resultados de este estudio también evidencian que el tamaño de las partículas de dolomita y el caudal de filtración influyen significativamente en la eficiencia del proceso. Las partículas de dolomita de 0.5 a 1.0 cm demostraron ser las más eficaces tanto en la remoción de Fe y sulfatos como en la estabilización del pH, mientras que un caudal de 100 ml/min fue más eficiente en la remoción de hierro. Estos

14 hallazgos proporcionan información valiosa para la optimización del diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas contaminadas por drenajes ácidos de minas, y

10 ofrecen una base sólida para futuras investigaciones sobre el uso de la dolomita en la restauración de ambientes acuáticos contaminados.

Referencias bibliográficas

- Acharya, B. S., & Kharel, G. (2020). Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. In *Journal of Hydrology* (Vol. 588). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>
- Anekwe, I. M. S., & Isa, Y. M. (2023). Bioremediation of acid mine drainage – Review. *Alexandria Engineering Journal*, 65, 1047–1075. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.053>
- Chai, Y., Qin, P., Zhang, J., Wu, Z., Li, T., Xu, W., & Sun, H. (2020). Experimental study and application of dolomite aeration oxidation filter bed for the treatment of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106560>
- Costello, C. (2003). *Acid Mine Drainage : Innovative Treatment Technologies Prepared by Technology Innovation Office. October.*
- du Plessis, C. A., Lambert, H., Gärtner, R. S., Ingram, K., Slabbert, W., & Eksteen, J. J. (2021). Lime use in gold processing – A review. *Minerals Engineering*, 174(September). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107231>
- Ferreira, R. A., Pereira, M. F., Magalhães, J. P., Maurício, A. M., Caçador, I., & Martins-Dias, S. (2021). Assessing local acid mine drainage impacts on natural regeneration-revegetation of São Domingos mine (Portugal) using a mineralogical, biochemical and textural approach. *Science of the Total Environment*, 755(October). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142825>
- Foudhaili, T., Lefebvre, O., Coudert, L., & Neculita, C. M. (2020). Sulfate removal from mine drainage by electrocoagulation as a stand-alone treatment or polishing step. *Minerals Engineering*, 152(August 2019), 106337. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106337>
- Ighalo, J. O., Kurniawan, S. B., Iwuzor, K. O., Aniagor, C. O., Ajala, O. J., Oba, S. N., Iwuchukwu, F. U., Ahmadi, S., & Igwegbe, C. A. (2022). A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD). *Process Safety and Environmental Protection*, 157, 37–58. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.008>
- Jamieson, H. E., Walker, S. R., & Parsons, M. B. (2015). Mineralogical characterization of mine waste. *Applied Geochemistry*, 57, 85–105. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.014>
- Kumar, M., Seth, A., Singh, A. K., Rajput, M. S., & Sikandar, M. (2021). Remediation strategies for heavy metals contaminated ecosystem: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12(December 2020), 100155. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100155>
- León, R., Macías, F., R. Cánovas, C., Millán-Becerro, R., Pérez-López, R., Ayora, C.,

- & Nieto, J. M. (2023). Evidence of rare earth elements origin in acid mine drainage from the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Ore Geology Reviews*, 154(February). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105336>
- Li, Y., Xu, Z., Ma, H., & Hursthouse, A. S. (2019). Removal of Manganese(II) from acid mine wastewater: A review of the challenges and opportunities with special emphasis on mn-oxidizing bacteria and microalgae. *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/w11122493>
- Liñán Pérez, R. J., & Sánchez Chilón, K. L. (2023). Eficacia Del Hidróxido De Sodio E Hidróxido De Calcio En La Remoción De Cobre Y Hierro En Las Aguas Del Drenaje Ácido De Mina, Algamarca 2023. *Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo*. <http://65.111.187.205/handle/UPAGU/2980>
- Luís, A. T., Córdoba, F., Antunes, C., Loayza-Muro, R., Grande, J. A., Silva, B., Diaz-Curiel, J., & Da Silva, E. F. (2022). Extremely acidic eukaryotic (Micro) organisms: Life in acid mine drainage polluted environments—mini-review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010376>
- Mamelkina, M. A., Tuunila, R., Sillanpää, M., & Häkkinen, A. (2019). Systematic study on sulfate removal from mining waters by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 216(January), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.056>
- Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P., Ndiritu, J., Maree, J. P., Tekere, M., & Chatzisyneon, E. (2022). Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. *Ecological Engineering*, 183(May), 106740. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106740>
- Na, H., Eom, Y., Yoo, K., & Diaz Alorro, R. (2024). A review on the reprocessing of sulfide tailings for resource recovery and AMD prevention using mineral processing methods. *Minerals Engineering*, 218(September), 109025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109025>
- Nariyan, E., Sillanpää, M., & Wolkersdorfer, C. (2017). Electrocoagulation treatment of mine water from the deepest working European metal mine – Performance, isotherm and kinetic studies. *Separation and Purification Technology*, 177, 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.042>
- Nariyan, E., Wolkersdorfer, C., & Sillanpää, M. (2018). Sulfate removal from acid mine water from the deepest active European mine by precipitation and various electrocoagulation configurations. *Journal of Environmental Management*, 227, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.095>
- Ojonimi, T. I., Okeme, I. C., Phiri-Chanda, T., & Ameh, E. G. (2021). Acid mine drainage (AMD) contamination in coal mines and the need for extensive prediction and remediation: a review. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*,

9(1), 3129–3136. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.091.3129>

- Othman, A., Mamat, C. R., Ibrahim, I., & Mohd Rozi, M. S. (2023). The Mixture of Limes in Acid Mine Drainage Treatment. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 19(4), 668–678. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v19n4.2759>
- Park, S. M., Shin, S. Y., Yang, J. S., Ji, S. W., & Baek, K. (2015). Selective Recovery of Dissolved Metals from Mine Drainage Using Electrochemical Reactions. *Electrochimica Acta*, 181, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.03.085>
- Pérez Falcón, J., Alejandro Ruiz Castro, A., & Sixto Aramburú Rojas, V. (2020). Reducción de contaminantes del Relave ácido de Mina en Planta Concentradora de Jangas, Perú. *Avances*, 22(2), 1–10.
- Pudi, A., Rezaei, M., Signorini, V., Andersson, M. P., Baschetti, M. G., & Mansouri, S. S. (2022). Hydrogen sulfide capture and removal technologies: A comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Separation and Purification Technology*, 298(April), 121448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121448>
- Sampaio, S. L., Petropoulos, S. A., Alexopoulos, A., Heleno, S. A., Santos-Buelga, C., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2020). Potato peels as sources of functional compounds for the food industry: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 103(July), 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.015>
- Stylianou, M., Montel, E., Zissimos, A., Christoforou, I., Dermentzis, K., & Agapiou, A. (2022). Removal of toxic metals and anions from acid mine drainage (AMD) by electrocoagulation: The case of North Mathiatis open cast mine. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29(February), 100737. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100737>
- Wang, Z., Xu, Y., Zhang, Z., & Zhang, Y. (2021). Review: Acid mine drainage (AMD) in abandoned coal mines of Shanxi, China. *Water (Switzerland)*, 13(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w13010008>
- Xu, Q., Yang, C., Wang, J., Wang, X. Q., Wang, S., Gao, Y., Chuai, X., Liu, B., & Yue, Z. (2022). Evolution of mineral phase in the chemical neutralization process of Mn dominated acid mine drainage under different aeration conditions. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100090. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100090>
- Zhao, P., Zhang, R., & Hu, M. (2024). Alkaline Chemical Neutralization to Treat Acid Mine Drainage with High Concentrations of Iron and Manganese. *Water*, 16(6), 821. <https://doi.org/10.3390/w16060821>