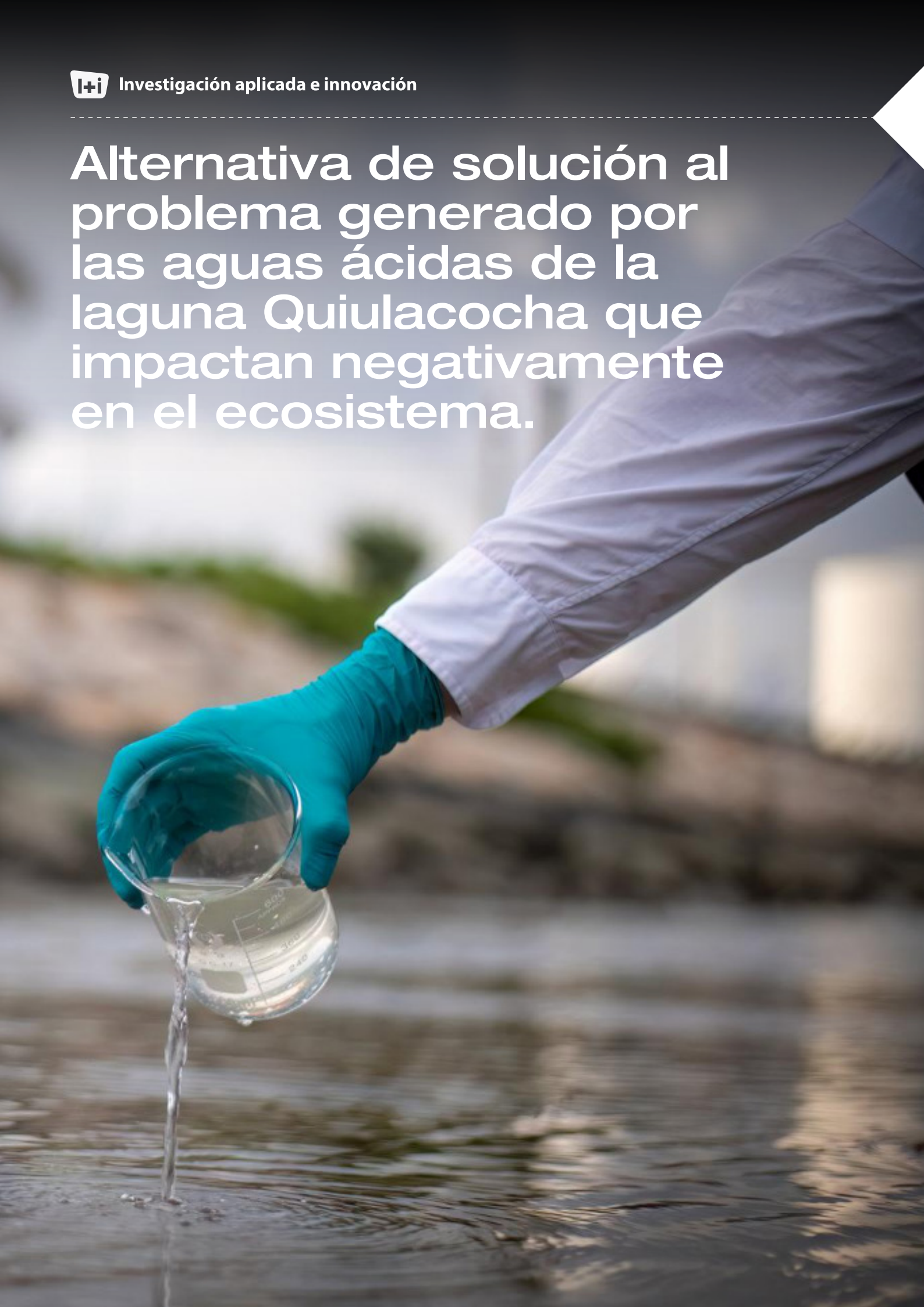


Alternativa de solución al problema generado por las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha que impactan negativamente en el ecosistema.



Neutralización y sulfuración del drenaje ácido de mina procedente de una unidad minera de Cerro de Pasco

Neutralization and Sulfidation of Acid Mine Drainage from a Mining Unit in Cerro de Pasco

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo proponer una alternativa de solución al problema generado por las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, que desembocan en el río San Juan e impactan negativamente en el ecosistema, principalmente en la población del distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco. La metodología aplicada tuvo un enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y experimental; consistió en la toma de muestras compuestas de drenaje ácido de mina en un punto de la laguna Quiulacocha para su caracterización. Se encontró que los valores de los parámetros fisicoquímicos estaban por encima de los LMP, de acuerdo con el D. S. 010-2010-MINAM, y de los ECA, categoría 3, según el D. S. 004-2017-MINAM. Para el tratamiento se utilizó el método de alcalinización con una solución de cal al 10 % m/v, seguido de una etapa de sulfuración con una solución de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v, con la finalidad de incrementar el porcentaje de remoción de los metales hierro, cobre, plomo y zinc. Los resultados del tratamiento en la etapa de alcalinización superaron ligeramente las normas ambientales para el hierro, el cobre y el zinc, pero no para el plomo. Con la etapa adicional de sulfuración, la remoción de los metales superó ampliamente lo exigido por las normas ambientales: para el hierro fue del 98,30 %, para el cobre del 99,83 %, para el plomo del 99,48 % y para el zinc del 66,59 %. En conclusión, las aguas de la laguna Quiulacocha tienen una alta carga de metales pesados, altamente contaminantes y muy peligrosos para la salud de la población. Asimismo, el método de alcalinización con cal al 10 % m/v, con una etapa adicional de sulfuración con NaSH al 10 % m/v, constituye una buena alternativa para neutralizar las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha y prevenir la contaminación de las aguas del río San Juan, en el distrito de Simón Bolívar, Pasco.

ABSTRACT

This study proposes an alternative solution to the environmental problems caused by the acidic waters of the Quiulacocha Lagoon, which discharge into the San Juan River and negatively affect the ecosystem, particularly the population of the Simón Bolívar district in the province of Pasco. A quantitative, explanatory, and experimental methodology was applied, consisting of collecting composite samples of acid mine drainage from a point in the Quiulacocha Lagoon for characterization. The physicochemical parameters were found to exceed the Maximum Permissible Limits (LMP) established in D.S. 010-2010-MINAM and the Environmental Quality Standards (ECA), Category 3, defined in D.S. 004-2017-MINAM.

For the treatment, an alkalization method using a 10% m/v lime solution was applied, followed by a sulfidation stage using a 10% m/v sodium hydrosulfide (NaSH) solution to increase the removal efficiency of iron, copper, lead, and zinc. In the alkalization stage, the results slightly exceeded environmental standards for iron, copper, and zinc, but not for lead. With the additional sulfidation stage, metal removal levels far surpassed regulatory requirements: 98.30% for iron, 99.83% for copper, 99.48% for lead, and 66.59% for zinc.

In conclusion, the waters of the Quiulacocha Lagoon contain high concentrations of heavy metals that pose serious risks to environmental and public health. The alkalization method with 10% m/v lime, combined with an additional sulfidation stage using 10% m/v NaSH, represents a viable alternative for neutralizing the acidic waters of the lagoon and preventing contamination of the San Juan River in the Simón Bolívar district, Pasco.



Palabras Claves

Drenaje ácido de mina, alcalinización, sulfuración.

Key words

Acid mine drainage, alkalization, sulfidation.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes de nuestro país y también a nivel mundial. Sin embargo, esta actividad genera una gran cantidad de residuos denominados pasivos ambientales, los cuales comprometen la calidad de vida de las futuras generaciones. Estos pasivos pueden ser botaderos, relaves, escorias o rípios, entre otros, que constituyen potenciales generadores de drenaje ácido de mina (DAM). Si no son tratados oportunamente, producen daños irreparables en el ecosistema.

Las actividades mineras generan DAM debido a la percolación del agua en los minerales estériles sulfurados que quedan después de la extracción de los metales y que son acumulados cerca de las minas. Estos, al combinarse con el oxígeno del aire, producen sulfatos y ácido sulfúrico. Como resultado, el DAM, por su acidez, lixivia los metales pesados presentes en las rocas. En consecuencia, el agua, además de su acidez, presenta contaminantes constituidos por metales pesados disueltos cuyas concentraciones se encuentran por encima de los límites exigidos por las normas ambientales.

La presente investigación tuvo el propósito de abordar el problema generado por el DAM, principalmente en las aguas del río San Juan, en el distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco, que actúan como receptoras de las aguas ácidas provenientes de la laguna Quiulacocha. Las aguas ácidas fueron neutralizadas con cal y, posteriormente, tratadas con sulfhidrato de sodio (NaSH), lo cual permitió una mayor eficiencia en la remoción de los metales pesados presentes. De esta forma se logró reducir la acidez y la cantidad de metales pesados contenidos en el drenaje ácido de mina y cumplir con las normativas vigentes: D. S. 010-2010-MINAM y D. S. 004-2017-MINAM, para su disposición final en el río San Juan.

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

Objetivo general

- Evaluar el tratamiento mediante neutralización con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina procedente de la unidad minera de Cerro de Pasco.

Objetivos específicos

- Determinar la dosis óptima de cal en la etapa de alcalinización para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina procedente de la unidad minera de Cerro de Pasco.
- Determinar la dosis óptima de sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera de Cerro de Pasco.
- Determinar el gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera de Cerro de Pasco.

FUNDAMENTOS

Antecedentes

Las aguas ácidas de mina están estrechamente ligadas a la actividad minera, que data de miles de años atrás. El fenómeno natural de las aguas ácidas de mina puede ocurrir sin intervención humana, aunque su impacto ambiental significativo se inicia con

la minería a gran escala. Hace cientos de años se descubrieron numerosos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, que indicaba la existencia de minerales sulfurados; sin embargo, hace solo alrededor de veinte años se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos. A estas aguas se les conoce como «drenaje ácido de mina» o DAM [2].

La importancia del estudio de sus impactos sobre el medio ambiente radica en que los drenajes ácidos son efluentes de trabajos mineros que contaminan fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos, pues presentan valores de pH entre 1,5 y 6, aportan una gran cantidad de acidez debida a la formación de ácido sulfúrico y elevadas concentraciones de metales pesados como cobre, plomo o arsénico, entre otros, que son solubles a valores de pH bajos. Además, los DAM generan sedimentos de color rojo anaranjado debido a precipitados de hierro y sulfatos que ocupan los espacios destinados al desove de los peces, se introducen entre sus branquias y cubren los detritos que sirven de alimento. Por otra parte, la vegetación terrestre que entra en contacto con los DAM también se ve ampliamente afectada, ya que la acidez y la alta concentración de iones como sulfatos y cloruros impiden su crecimiento normal [5].

De lo expuesto líneas arriba, se desprende la importancia de tratar el drenaje ácido de mina antes de su disposición final en un cuerpo de agua, con el fin de prevenir el impacto negativo en el ambiente y en la salud de las personas.

Los drenajes ácidos de mina tratados pueden descargarse directamente en cuerpos de agua, como ríos o lagos; también pueden ser introducidos en los acuíferos de manera directa o indirecta con la finalidad de incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos [7]. El drenaje ácido de mina tratado debe cumplir ciertos requisitos antes de ser descargado en los cuerpos receptores. En el Perú, dichos requisitos se establecen en las normas ambientales, como los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, definidos en el D. S. 010-2010-MINAM, y el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para el agua, regulado por el D. S. 004-2017-MINAM. En algunos países, como México y Estados Unidos, las aguas tratadas se disponen mediante su reinyección al manto acuífero a través de lagunas de recarga superficial a cielo abierto [3]. Para garantizar el cumplimiento de las normas ambientales y prevenir los impactos negativos en el ambiente, se realiza un monitoreo y muestreo periódico.

Bases teóricas

Tratamiento de drenaje ácido de mina

Se basan en la neutralización del DAM con sustancias alcalinas, generalmente cal, aunque también se emplean cal hidratada, caliza hidratada, sosa cáustica o carbonato sódico. En condiciones adecuadas de pH, los metales precipitan como hidróxidos insolubles: el ion ferroso (Fe^{2+}) se oxida a ion férrico (Fe^{3+}), luego se convierte en hidróxido férrico y precipita a un pH mayor de 8,5. Junto con el hierro, otros metales como plomo, cobre y zinc, entre otros presentes en el DAM, también tienden a precipitar como hidróxidos u otros compuestos. En la alcalinización del DAM se suele trabajar con un pH promedio de 9, debido a que, en condiciones de mayor basicidad, aumenta la solubilidad de algunos metales como el plomo y el zinc [5].

En general, el tratamiento del DAM se basa en la precipitación de

los metales como hidróxidos y se realiza en tres pasos: oxidación (para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+}), adición de álcalis y sedimentación. A continuación, se describen las principales tecnologías activas para el tratamiento del DAM.

Alcalinización convencional del drenaje ácido de mina

También se le conoce como tratamiento convencional. Consiste en incrementar el pH del drenaje ácido de mina mediante la adición de sustancias alcalinas, acompañada de un proceso

de oxigenación a través de aireación. Las sustancias alcalinas más utilizadas para neutralizar el drenaje ácido de mina y lograr las condiciones apropiadas para la precipitación de los metales pesados son la cal, el carbonato de sodio y la sosa cáustica. La importancia del uso de la cal (CaO) radica en que, al combinarse con el agua, forma hidróxido de calcio, y este, al reaccionar con el drenaje ácido de mina, permite la precipitación de los sulfatos como sulfato de calcio (CaSO_4). Esto no ocurre con los hidróxidos aparentemente más limpios, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH), ya que estos forman sales solubles.

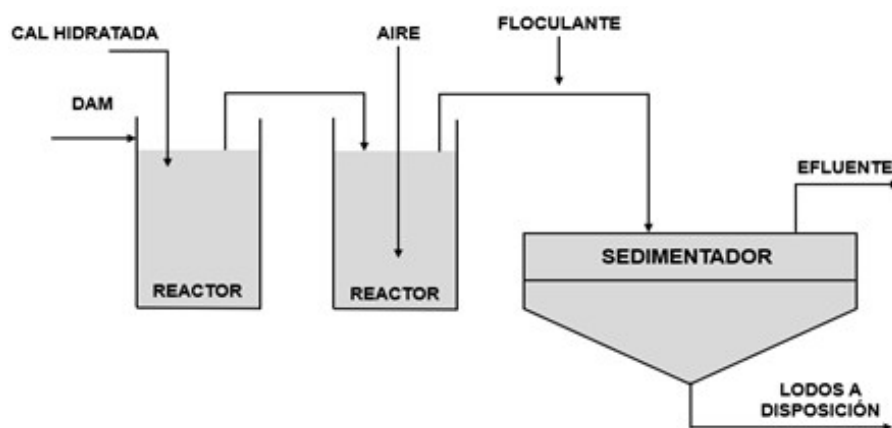


Figura 1. Esquema del tratamiento convencional de drenaje ácido de mina

Fuente: [8].

La oxigenación se realiza con la finalidad de oxidar los metales y obtener precipitados más estables. En la figura 2, se aprecia que el hierro, uno de los componentes del DAM, precipita como hidróxido insoluble en un rango de pH comprendido entre 8,5 y 10 [8].

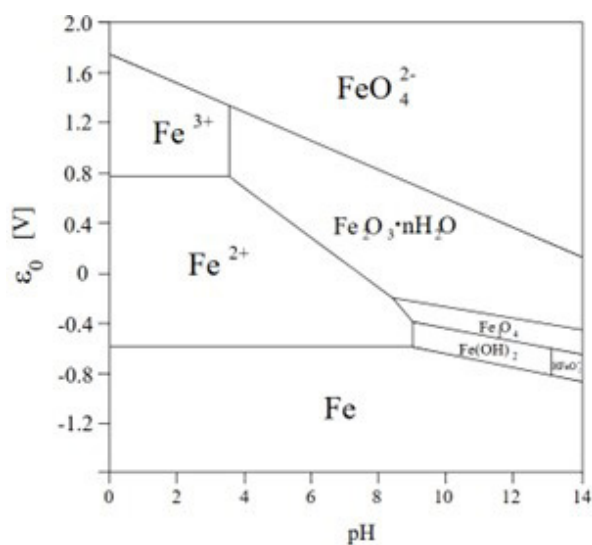
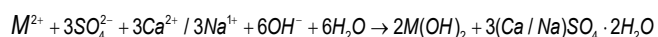
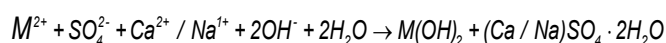


Figura 2. Diagrama de Pourbaix del hierro

Fuente: Elaboración propia.

En general, las reacciones de este método, considerando M como metal pesado son los siguientes:



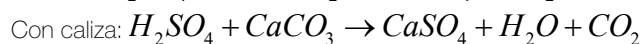
El proceso de alcalinización concluye con la coagulación-floculación y la separación sólido-líquido en un clarificador. Las fases del proceso de alcalinización convencional son las siguientes [8]:

• Homogenización

Se recolecta el DAM en grandes depósitos, donde se mantiene de 12 a 24 horas para su homogenización; después de este tiempo de retención, pasa a la planta de tratamiento.

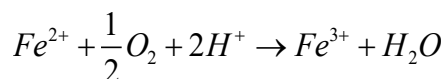
• Neutralización

Se utiliza cal viva, lechada de cal u otro agente neutralizante, según su disponibilidad o costo. Algunas de las reacciones en esta etapa pueden ser a continuación:



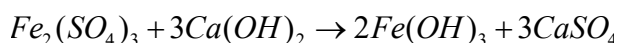
• Aireación

Se realiza con la finalidad de oxidar el Fe^{2+} a Fe^{3+} , que tiene poca solubilidad. El ion ferroso presenta una solubilidad mínima en el intervalo de pH de 9,3 a 12,0, mientras que el ion férrico es poco soluble y precipita como hidróxido a un pH aproximado de 4.

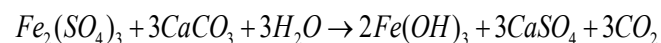


Los hidróxidos que se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes neutralizantes son:

Con cal:



Con caliza:



Una regla práctica para predecir la rapidez con que los metales disueltos precipitan en función del pH se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Velocidad de precipitación de los sólidos disueltos

Rango de pH	Velocidad de precipitación
Menor a 6	Muy lenta; salvo presencia de bacterias
6 a 8	Moderada
Mayor a 8	Muy rápida

Fuente: [8].

• Sedimentación

Una vez que el DAM se neutraliza y el ion ferroso se ha oxidado a ion férrico, prosigue la sedimentación, mediante la cual se remueven los lodos que contienen los hidróxidos formados. El pH del medio en el que se realiza la precipitación depende del tipo de metal presente en el DAM; así, por ejemplo, el pH mínimo para el Pb^{2+} es 6,3, para el Fe^{2+} es 9,5 y para el Mn^{2+} es 10,6. Si el DAM contiene metales anfóteros como el zinc y el aluminio, estos aumentan su solubilidad a pH elevados, por lo que se debe tener especial cuidado con ellos al momento de tratar el drenaje ácido de mina.

• Disposición de lodos

Es una parte esencial del proceso; una vez culminado el tratamiento, se debe realizar una adecuada disposición de los lodos producidos con el fin de reducir los impactos ambientales.

High Density Sludge (HDS)

Esta tecnología, conocida en español como lodos de alta densidad, consiste en la recirculación de los lodos producidos durante la alcalinización, de modo que, al mezclarse nuevamente con la cal, se formen lodos más compactos y densos que permitan una mayor eficiencia en la separación sólido-líquido [6].

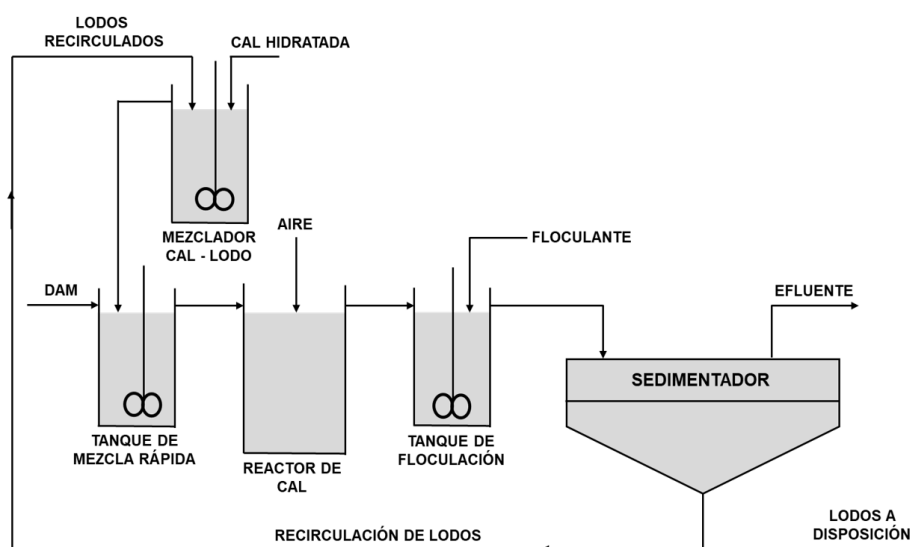


Figura 3. Esquema del tratamiento del DAM por HDS

Fuente: [6].

Neutralización y coagulación dinámica (NCD)

Patentada en 2004 por su inventor Villachica C. (SMALLVILL S. A. C.), esta tecnología para la neutralización del DAM consiste en la precipitación de los metales disueltos y la sedimentación de los precipitados obtenidos mediante el uso de relaves mineros, lo que incrementa la densidad de los lodos y los hace más compactos. Algunas ventajas de la tecnología NCD con respecto al HDS son las siguientes [6]:

- Menor tiempo de retención, de 5 a 6 minutos en comparación con los 50 minutos del HDS.
- Mayor velocidad de sedimentación.
- El precipitado adsorbido no ocupa un espacio adicional al requerido por el colector.

El proceso consiste en aprovechar la característica coloidal de los precipitados obtenidos al neutralizar los DAM y la energía generada durante su transporte a través de un canal o tubería. El agente neutralizante se añade durante su transporte, aguas

arriba de su punto de descarga, a una distancia suficiente que permita disponer del tiempo necesario para completar las reacciones de neutralización y precipitación de los sólidos disueltos. La separación sólido-líquido del efluente neutralizado se logra al mezclarlo con relaves, cuarzo, magnetita, escoria u otro

material sólido de carácter granular, que coagula los precipitados coloidales sobre su superficie, reduce su volumen y sedimenta rápidamente debido a su mayor densidad en comparación con los que se obtienen por métodos convencionalmente [8].

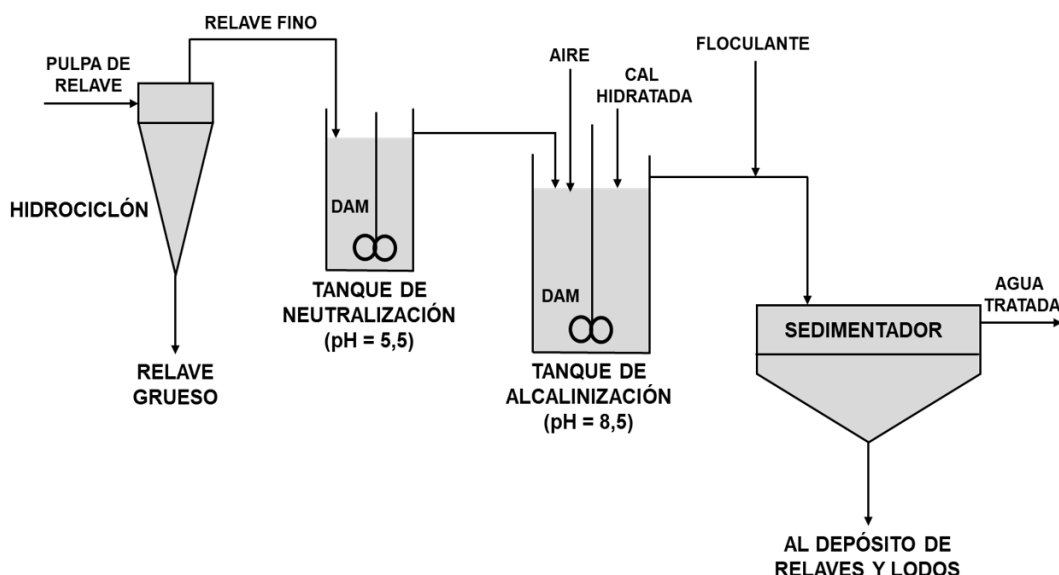


Figura 4. Esquema del tratamiento del DAM por NCD

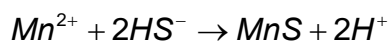
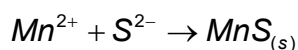
Fuente: [8].

Etapas adicionales al tratamiento de alcalinización convencional

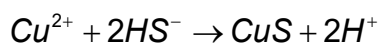
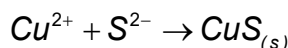
Las diferentes tecnologías que se aplican en el tratamiento del DAM no logran cumplir con los límites exigidos por las normativas vigentes, como el D. S. 010-2010-MINAM y los ECA, categoría 3, para riego de vegetales, establecidos en el D. S. 004-2017-MINAM. Esto obliga a complementar el proceso con un tratamiento terciario que, por lo general, puede consistir en ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa. Todas estas son tecnologías de membrana que implican altos costos de inversión y operación, además de generar pasivos ambientales.

La presente investigación modifica el tratamiento convencional del drenaje ácido de mina mediante una etapa adicional de sulfuración (adición de una solución de sulfhidrato de sodio, NaSH, al 10 % m/v). La sulfuración forma lodos más densos que permiten una mejor separación sólido-líquido, generando aguas más claras y con menor carga contaminante. Esto se debe a que la acción de los coagulantes y floculantes sobre los sulfuros insolubles es más eficiente que sobre los hidróxidos, lo que asegura una mayor eficacia en la remoción de los metales pesados. Las reacciones más importantes son las mostradas a continuación [1]:

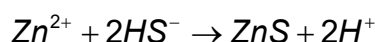
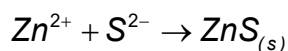
Para el manganeso



Para el cobre



Para el zinc



El tratamiento del DAM culmina con una coagulación-floculación. Para tal fin se emplean sulfato de aluminio, cloruro férrico, policloruro de aluminio, entre otros. Por otro lado, la floculación consiste en la aglomeración de partículas ya neutralizadas. Las sustancias que permiten este proceso son polímeros de tipo catiónico o aniónico que, al ser macromoléculas, resultan más eficientes en la aglomeración de las partículas neutralizadas. En el caso del tratamiento del drenaje ácido de mina, los iones de hierro actúan como coagulantes, por lo que únicamente se utilizan floculantes.

METODOLOGÍA

La investigación consistió en el tratamiento del DAM que fluye desde la laguna Quiulacocha hacia el río San Juan. Se neutralizó con cal en la etapa de alcalinización y con sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración, con el propósito de aumentar

la remoción de los metales. El trabajo experimental y de gabinete se desarrolló en cuatro etapas.

Etapa 1: Muestreo de campo del drenaje ácido de mina

Se tomaron muestras de drenaje ácido de mina a la salida de la laguna Quiulacocha, que discurren hacia el río San Juan. Se obtuvieron muestras puntuales, recolectando 20 litros por cada hora durante cinco horas; de las muestras acumuladas en un depósito de 100 litros, se obtuvo una muestra compuesta de 40 litros para su caracterización y posterior tratamiento.

Etapa 2: Caracterización y tratamiento de las muestras de drenaje ácido de mina

La caracterización fisicoquímica del drenaje ácido de mina se realizó en el punto de muestreo y en el laboratorio de Tecsup Lima.

Los parámetros medidos fueron pH, temperatura, conductividad, ORP, sólidos suspendidos totales y sólidos totales.

Etapa 3: Procesamiento de los resultados obtenidos

Los datos recopilados del tratamiento del DAM se procesaron mediante el *software* estadístico SPSS.

Etapa 4: determinación de las dosis adecuadas de cal y NaSH

De acuerdo con el diseño experimental aplicado, se realizaron tratamientos del drenaje ácido de mina con diferentes combinaciones de soluciones de cal, NaSH y RPM, con los cuales se determinaron las dosis y RPM adecuadas para el tratamiento del drenaje.

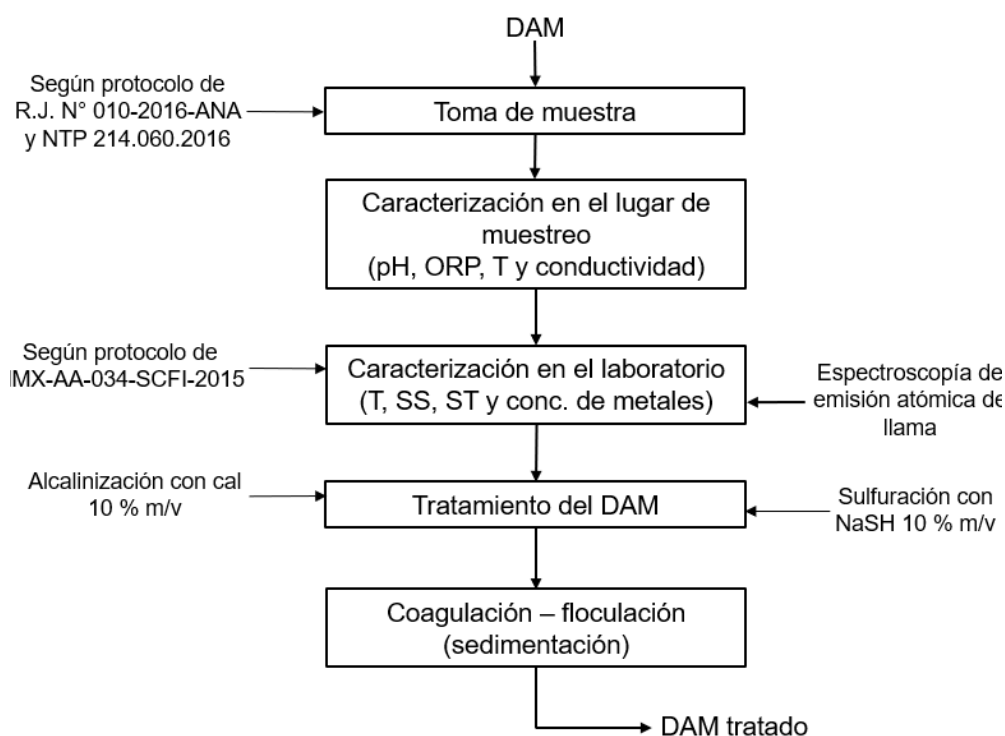


Figura 5. Secuencia de muestreo, caracterización y tratamiento del DAM

Fuente: Elaboración propia.

Técnicas e instrumentos para la recolección de información

Para la presente investigación, la toma de muestras del DAM se realizó conforme al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (R. J. 010-2016-ANA y NTP 214.060-2016). La medición de sólidos suspendidos y sólidos totales se efectuó según la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, y la medición de la concentración de metales se realizó de acuerdo con los Standard Methods de la APHA y la AWWA.

Se emplearon equipos para el monitoreo de aguas residuales, tales como un turbidímetro HACH, un multiparámetro HANNA y un espectrómetro de absorción atómica PERKINELMER PinAAcle 500. Una vez caracterizado el DAM, se trató mediante

alcalinización con una etapa adicional de sulfuración, con el objetivo de aumentar la remoción de los metales presentes en el agua.

Análisis y procesamiento de datos

Parámetros fisicoquímicos del drenaje ácido de mina

Se realizó en el punto de muestreo y en el laboratorio de Tecsup Lima, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.
Parámetros fisicoquímicos iniciales de DAM proveniente de la laguna Quiulacocha

Parámetros medidos en campo		Parámetros medidos en el laboratorio	
Temperatura (°C)	4	Temperatura (°C)	17
pH	2,32	pH	2,32
Conductividad (mS/cm)	10680	SST (mg/L)	64
ORP (mV)	656	ST (mg/L)	20016

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Drenaje ácido de mina antes de su tratamiento

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. pH y conductividad inicial del DAM

Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental del tratamiento de drenaje ácido de mina

El diseño de experimentos consiste en determinar qué pruebas se deben realizar y de qué manera, con el fin de obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas y, de esta forma, clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras [4].

Para esta investigación, con la finalidad de obtener datos experimentales del tratamiento del drenaje ácido de mina para

su respectivo análisis, se aplicó un diseño factorial 2K con tres factores, cada uno con dos niveles y una réplica completa. Para el primer factor, cal al 10 % m/v, los niveles fueron 32 mL/L y 40 mL/L; para el segundo factor, sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v, los niveles fueron 0,5 mL/L y 1,0 mL/L; y para el tercer factor, gradiente de velocidad, los niveles fueron 160 RPM y 240 RPM.

$$N.^{\circ} \text{de experimentos} = 2^3 = 8$$

Cada experimento (tratamiento) tuvo su réplica, por lo que en total se realizó 16 experimentos, cada uno con un litro de DAM.

Tabla 3
Diseño de tres factores para el tratamiento de DAM

Corrida	Bloque	Cal (mL/L)	NaSH (mL/L)	Gradiente de velocidad (RPM)
M01	1	32	0,5	160
M02	1	32	0,5	240
M03	1	32	1,0	160
M04	1	32	1,0	240
M05	1	40	0,5	160
M06	1	40	0,5	240
M07	1	40	1,0	160
M08	1	40	1,0	240
RÉPLICA				
M09	2	32	0,5	160
M10	2	32	0,5	240
M11	2	32	1,0	160
M12	2	32	1,0	240
M13	2	40	0,5	160
M14	2	40	0,5	240
M15	2	40	1,0	160
M16	2	40	1,0	240

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de datos y análisis estadístico

El procesamiento de los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de mina se realizó mediante el uso del *software* estadístico SPSS. Asimismo, para el análisis de los datos obtenidos en la parte experimental se tomaron como referencia los LMP de efluentes minero-metalúrgicos establecidos en el D. S. 010-2010-MINAM y el ECA para el agua regulado por el D. S. 004-2017-MINAM.

Determinación de la eficiencia de la remoción de los metales pesados

Después del tratamiento del drenaje ácido de mina mediante alcalinización con una etapa adicional de sulfuración, se analizó una muestra del agua clarificada en un espectrómetro

de absorción atómica para determinar la cantidad de hierro, cobre, plomo y zinc removidos. Con los resultados obtenidos, se calculó el porcentaje de remoción correspondiente a cada uno de los metales.

RESULTADOS

Características fisicoquímicas iniciales del drenaje ácido de mina de la laguna de Quilacocha

Los resultados de la caracterización inicial de la muestra se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4
Cuadro comparativo de los parámetros iniciales de DAM con las normas ambientales LMP y ECA categoría 3

Parámetro	LPM D.S. 010-2010-MINAM		ECA – CATEGORÍA 3 D.S. 004-2017-MINAM		Valor inicial
	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual	Agua para riego	Bebida de animales	
pH	6 – 9	6 – 9	6,5 – 8,4	6,5 – 8,4	2,32
SST (mg/L)	50	25	-	-	64
Conductividad (μS/cm)	-	-	2500	5000	10680
Fe (mg/L)	2,00	1,60	5,00	**	16,030
Cu (mg/L)	0,50	0,40	0,20	0,50	2,998
Pb (mg/L)	0,20	0,16	0,05	0,05	1,157
Zn (mg/L)	1,50	1,20	2,00	24,0	2,571

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la concentración de los metales pesados supera ampliamente los límites establecidos por las normas ambientales

peruanas, LMP y ECA, categoría 3, correspondientes a agua para riego y bebida de animales.

Resultados del tratamiento del drenaje ácido de mina de la laguna Quiulacocha

Luego del tratamiento del DAM mediante alcalinización y

sulfuración, se obtuvieron resultados favorables: la concentración de los metales disueltos en el agua tratada quedó muy por debajo de los límites establecidos por las normas ambientales, LMP y ECA, categoría 3, correspondientes a agua para riego y bebida de animales.



Figura 8. DAM después de su tratamiento por alcalinización y sulfuración

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del tratamiento se observan en las 6 y 7.

Tabla 5

Promedio de las concentraciones de los metales luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración

Muestra	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	G.V (RPM)	[Fe] (mg/L)	[Cu] (mg/L)	[Pb] (mg/L)	[Zn] (mg/L)
M01 + M09	32	0,5	160	0,1645	0,0025	0,0035	1,2055
M02 + M10	32	0,5	240	0,1620	0,0030	0,0030	1,3875
M03 + M11	32	1,0	160	0,2550	0,0020	0,0015	1,4270
M04 + M12	32	1,0	240	0,1355	0,0030	0,0045	1,3570
M05 + M13	40	0,5	160	0,2825	0,0050	0,0075	1,0055
M06 + M14	40	0,5	240	0,2025	0,0060	0,0065	1,0905
M07 + M15	40	1,0	160	0,2715	0,0050	0,0065	0,8840
M08 + M16	40	1,0	240	0,2060	0,0015	0,0010	1,2630

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Porcentaje de remoción de los metales después de alcalinización y sulfuración del DAM

Muestra	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	G.V (RPM)	Fe (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
M01 + M09	32	0,5	160	98,97	99,92	99,69	53,11
M02 + M10	32	0,5	240	98,99	99,90	99,74	46,03
M03 + M11	32	1,0	160	98,41	99,93	99,87	44,50
M04 + M12	32	1,0	240	99,15	99,90	99,61	47,22
M05 + M13	40	0,5	160	98,24	99,83	99,35	60,89
M06 + M14	40	0,5	240	98,74	99,80	99,44	57,58
M07 + M15	40	1,0	160	98,31	99,83	99,44	65,61
M08 + M16	40	1,0	240	98,71	99,95	99,91	50,88

Fuente: Elaboración propia.

La remoción óptima se obtiene con 40 mL de cal y 1,0 mL de NaSH, con un gradiente de velocidad de 160 RPM: 98,31 % para

el hierro, 99,83 % para el cobre, 99,44 % para el plomo y 65,61 % para el cinc.

Tabla 7

Parámetros físicoquímicos del DAM con las normas ambientales antes y después de su tratamiento

Parámetro	LPM D.S. 010-2010-MINAM		ECA – CATEGORÍA 3 D.S. 004-2017-MINAM		Valor Antes del tratamiento	Valor después del tratamiento
	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual	Agua para riego	Bebida de animales		
pH	6 – 9	6 – 9	6,6-8,5	6,5 – 8,4	2,32	6,7 – 8,8
SST (mg/L)	50	25	-	-	64	4.5
Conductividad (μS/cm)	-	-	2500	5000	10680	67
Fe (mg/L)	2,00	1,60	5,00	*	16,030	0,2715
Cu (mg/L)	0,50	0,40	0,2	0,50	2,998	0,0050
Pb (mg/L)	0,20	0,16	0,05	0,05	1,157	0,0065
Zn (mg/L)	1,50	1,20	2,00	24,00	2,571	0,8840

Fuente: Elaboración propia.

La remoción óptima se obtiene con 40 mL de cal y 1,0 mL de NaSH, con un gradiente de velocidad de 160 RPM: 98,31 % para el hierro, 99,83 % para el cobre, 99,44 % para el plomo y 65,61 % para el cinc.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el tratamiento convencional del drenaje ácido de mina con cal al 10 % m/v y su posterior sulfuración con sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v muestran una alta remoción de los metales hierro (98,31 %), cobre (99,83 %) y plomo (99,44 %). En el caso del zinc, se logró remover un 65,61 %. En todos los casos, las concentraciones de los metales residuales del DAM tratado se encuentran por debajo de lo exigido por las normas ambientales D. S. 010-2010-MINAM y D. S. 004-2017-MINAM, categoría 3, agua para riego y bebida de animales; por lo tanto, se concluye que el método aplicado en el tratamiento del DAM ha sido eficiente.

Se concluye que la dosis de cal al 10 % m/v adecuada en la etapa de alcalinización es de 40 mL/L, con la cual se obtiene el mayor porcentaje de remoción de los metales hierro, cobre, plomo y zinc, tal como se observa en las tablas 18 y 19. La reducción de la cantidad de metales pesados (Fe, Cu, Pb y Zn) del drenaje ácido de mina en la etapa de sulfuración se logró con una dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v igual a 1,0 mL/L (ver tablas 18 y 19).

Se concluye que el gradiente de velocidad influye en la remoción de los metales, debido a que una adecuada agitación de la mezcla permite una mejor distribución de los reactivos químicos durante el tratamiento del DAM. La remoción eficiente de los metales pesados se logró a 160 RPM.

REFERENCIAS

- [1] Aduviri, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- [2] Broughton, L. S., & Bonelli, J. (1995). *Guía ambiental para el manejo del drenaje ácido de mina*. Ministerio de Energía y Minas.
- [3] Comisión Nacional del Agua & Mekorot. (2014). *San Luis Río Colorado, Estado de Sonora: Tratamiento de efluentes con el suelo del acuífero. Recomendaciones de mejora*. Development and Enterprise Ltd.
- [4] Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill Interamericana.
- [5] Jennings, E. R., Neuman, D. R., & Blicher, P. S. (2008). *Acid mine drainage and effects on fish health and ecology: A review*. Reclamation Research Group, LLC.
- [6] Oré, S. (2015). *Recuperación de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina mediante la precipitación selectiva para su posterior utilización* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- [7] Tilley, E., et al. (2015). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática.
- [8] Villachica, C., Llamosas, J., & Villachica, J. (2005). Tecnología nacional comprobada para el tratamiento de efluentes ácidos mineros. En *IV Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería y Metalurgia*, 13–16 de julio de 2005. SMALLVILL SAC – Consulcont S.A.C.

ACERCA DE LOS AUTORES

Ing. Sergio Rojas Rimachi

Ingeniero químico, egresado de la Universidad Nacional del Callao. Maestro en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible por la universidad Nacional del Callao. Docente a tiempo completo en Tecsup - Lima en el área de Minería y Procesos Químicos Metalúrgicos. Asimismo, capacitador en Monitoreo Ambiental y en tratamiento de aguas industriales y residuales.

 srojas@tecsup.edu.pe

Ing. Yorsel Soledad Mayhua Soto

Ingeniera industrial egresada de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), perteneciente al Colegio de Ingenieros del Perú, licenciada en Educación de la Universidad Enrique Guzmán y Valle la Cantuta. Magister

en Gestión Ambiental para el desarrollo sostenible por la Universidad Nacional del Callao. Con estudios de diplomados en Derecho Ambiental y Fiscalización Ambiental en la Universidad Continental.

Desde 2013, hasta la actualidad se desempeña como docente en el área de Minería y Procesos Químico Metalúrgicos en Tecsup N.º 1 Lima, labor que le permite trabajar en conjunto con otros docentes en proyectos e investigaciones relacionados con el tratamiento de aguas residuales tanto de procedencia doméstica como industrial.

 ymayhua@tecsup.edu.pe

Recibido: 02-05-2025

Revisado: 08-09-2025

Aceptado: 26-09-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.