



Revista Politécnica

ISSN: 1900-2351

ISSN: 2256-5353

rpolitecnica@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Colombia

Pardavé Livia, Walter; Serrano Uribe, Brayan Steven; Castillo Martínez, Camilo Hernando

TRATAMIENTO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM)
MEDIANTE FILTROS ELABORADOS CON RELAVE MINERO

Revista Politécnica, vol. 18, núm. 36, 2022, Julio-Septiembre, pp. 115-125

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Medellín, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a2>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=607872732009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

[redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

TRATAMIENTO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (DAM) MEDIANTE FILTROS ELABORADOS CON RELAVE MINERO.

Walter Pardavé Livia ¹, Brayan Steven Serrano Uribe ², Camilo Hernando Castillo Martínez ³

¹ Magister en ingeniería, docente, Grupo Ambiental de Investigación Aplicada GAIA, programa de ingeniería ambiental, Universidad de Santander UDES, wal.pardave@mail.udes.edu.co.

² Ingeniero ambiental, joven investigador, Minciencias, brayanserrano1999@hotmail.com.

³ Ingeniero ambiental, joven investigador, castillocamilo99@gmail.com.

RESUMEN

Los Drenajes Ácidos de Mina representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente cuando no se gestionan adecuadamente; con el fin de promover una estrategia innovadora y económica para su adecuado tratamiento enfocado en la neutralización del pH, se elaboraron cinco filtros con relave minero y otros materiales siguiendo la metodología de *Design Thinking*. Los principales resultados permitieron neutralizar los DAM con pH de 2,5 procedentes de una mina en California, Santander y dejar su efluente con valores de pH en un rango de 6,0 a 8,1. La conclusión es que la composición arcillosa con presencia de calcio y carbonatos en el relave minero permite que los filtros elaborados con este material puedan neutralizar los DAM a tal punto que desarrollar un proyecto a gran escala en donde se incluyan estos filtros, permitirá tratar los DAM y mitigar los pasivos ambientales relacionados con la acumulación de residuos.

Palabras clave: Drenajes ácidos de mina; neutralización de pH ácido; relave minero; pasivos ambientales; minería

Recibido: 26 de Julio de 2022. Aceptado: 05 de Septiembre de 2022

Received: July 28, 2022. Accepted: September 05, 2022

TREATMENT OF ACID MINE DRAINAGE (AMD) THROUGH FILTERS MADE WITH MINING TAILINGS

ABSTRACT

Acid Mine Drainage represents a huge risk to people's health and the environment when is not managed properly. Therefore, in order to promote an innovative and economic strategy that involves an adequate treatment focused on pH neutralization, five filters were made with mining tailings and other materials following the Design Thinking methodology. One of the main results show that it's possible to neutralize AMD with a pH of 2.5, this, from a mine in the town of California, Santander, Colombia, leaving its effluent with pH values in a range of 6.0 to 8.1. The conclusion was that the clayey composition having the presence of calcium and carbonates, made with the mentioned material in the mining, allows filters to neutralize AMD to such an extent that it is feasible to develop a large-scale project where these are included, which in the future will allow treating AMD and mitigating environmental liabilities related to the accumulation of solid waste.

Keywords: Acid mine drainage; acid pH neutralization; mining tailings; Environmental liability; mining

Cómo citar este artículo: W, Pardavé., B, Serrano., & C, Castillo. "Tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) mediante filtros elaborados con relave minero", *Revista Politécnica*, vol.18, no.36 pp.115-125, 2022. DOI:10.33571/rpolitec.v18n36a9

1. INTRODUCCIÓN

El agua permite la subsistencia de los ecosistemas en el planeta tierra y su uso le ha permitido al ser humano satisfacer sus principales necesidades en campos como la salud, recreación e industria. A pesar de ser un recurso tan importante, los trabajos en pro de su conservación son pocos, según la UNESCO el 80% de las aguas residuales provenientes de actividades antrópicas retornan a las fuentes hídricas sin recibir un tratamiento previo [1,2], esto desencadena una problemática ambiental que genera preocupación a nivel mundial debido a que más de 2.000 millones de personas viven en territorios con escasez de agua y se estima que cerca de 829.000 personas fallecen anualmente a causa de la insalubridad del agua [3].

Al hablar sobre la composición del planeta, se podría pensar que en él hay abundancia de agua ya que está compuesto en un 70% por ella, sin embargo, el 97.5% de esta se encuentra en los océanos y corresponde al agua salada, el 2.5% restante corresponde al agua dulce, de la cual tan solo el 0.025% es de fácil acceso y está en la superficie [4].

Una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas son los Drenajes Ácidos de Mina DAM [5], estos se caracterizan por sus bajos niveles de pH con alto contenido de sulfatos y metales como hierro (Fe), zinc (Zn), aluminio (Al), mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros [6]. Los DAM se generan mediante la oxidación de rocas que contienen minerales sulfurosos; aunque este proceso ocurre de forma natural, las industrias mineras lo aceleran, pues en el desarrollo de sus actividades, los minerales de sulfuro quedan expuestos al agua, aire y microorganismos de una manera más rápida [7].

Un concepto importante para comprender el origen de los DAM es el de Pasivos Ambientales Mineros PAM, estos son aquellos elementos, estructuras físicas, maquinarias y residuos que se encuentran en minas abandonadas o suspendidas y que constituyen un riesgo potencial para la salud humana y conservación del medio ambiente [8].

Dentro de los elementos que componen los PAM se destacan los relaves mineros, los cuales se caracterizan por ser un material fino de fácil erosión que no tiene valor alguno y se obtiene de los procesos de concentración de minerales mediante el método de flotación [9]. Al no disponer correctamente los relaves mineros se provoca una afectación al ecosistema en la zona de influencia, especialmente sobre los cuerpos hídricos y el suelo.

Es fundamental mencionar que dependiendo de la composición fisicoquímica de los relaves mineros se pueden generar dos tipos de drenajes, por ejemplo: si los materiales finos tienen altas concentraciones de sulfuros, se producirá un DAM, mientras que, si los materiales finos presentan altos niveles en carbonatos, se generará un drenaje con pH alcalino [10].

En general, cuando se habla de PAM y DAM es válido pensar en un lugar donde surge la necesidad de mitigar o compensar un impacto ambiental no gestionado producto de las actividades mineras en cualquiera de sus etapas de operación [11].

Al no realizar una minería responsable, esta industria trae consigo una serie de impactos ambientales negativos sobre el ecosistema, entre ellos se puede mencionar la deforestación, problemas en la salud humana y la contaminación del agua, suelo y aire [12]. El sector minero es considerado el mayor contaminante de los cuerpos hídricos, cargándolos con metales pesados potencialmente tóxicos [13]. Sin embargo, la solución a estos problemas no puede ser el cierre o prohibición de la actividad minera, pues esta les ha permitido a los gobiernos un crecimiento económico y la obtención de materias primas para la elaboración de diversos productos. El desafío está en generar un equilibrio entre el sector ambiental, económico y social, en donde por medio de las diferentes ramas de la ingeniería se diseñen métodos que permitan mitigar los impactos ambientales negativos que genera el sector minero.

Actualmente existen diferentes métodos de tratamiento de los DAM, estos se dividen en dos grupos: tratamientos activos y pasivos, el primero consiste en un proceso químico en donde se adicionan sustancias alcalinas, requiere elementos mecánicos y atención específica durante el tratamiento, generalmente este método es implementado durante la operación de la mina y tiene un costo elevado, el cual los gobiernos no pueden suplir una vez terminada la operación minera. El segundo combina procesos naturales como: humedales artificiales aeróbicos y anaeróbicos, drenajes anóxicos con calcáreos, productores continuos de alcalinidad, canales de caliza, reactores biológicos pasivos, entre otros. Sus costos son manejables, y no requiere el aporte de sustancias químicas ni atención específica durante el tratamiento [14].

A pesar de la existencia de diferentes métodos para el tratamiento de los DAM, estos presentan desventajas en cuanto a los costos de operación y cantidad de área requerida para su construcción, por ello se hace necesario impulsar métodos optimizados e innovadores en el tratamiento de los DAM. Debido a lo anterior, esta investigación tiene como objetivo el diseño de un filtro con relave minero y otros materiales que permita tratar los DAM llevando sus niveles de pH a un rango entre 6 a 9 como lo establece la resolución 0631 de 2015 [15].

El presente artículo está conformado por las siguientes secciones: materiales y métodos, en donde se expone la metodología implementada para el desarrollo de la investigación; resultados y discusión, en donde se presentan tablas y graficas de los resultados obtenidos así como su respectivo análisis; conclusiones, en donde se describen las deducciones generadas a partir del desarrollo y análisis de la investigación; agradecimientos, en donde se hace reconocimiento a las entidades y personas involucradas directa e indirectamente en el proyecto; finalmente se detallan las referencias bibliográficas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación tiene como entorno de estudio e impacto los drenajes ácidos procedentes de minas auríferas localizadas en el municipio de California, Santander, Colombia. Para el desarrollo del trabajo se tomó como referencia la metodología de *Design Thinking*, esta se centra en la recopilación de la información correspondiente al problema a solucionar y su comprensión desde la creatividad por medio de métodos iterativos, adicional, se procura tener una aproximación a los materiales y procesos de producción con los que se ejecutan las soluciones obtenidas.

La recolección de la información se realizó mediante las bases de datos de ScienceDirect, SCOPUS, Google académico y SciELO, entre los parámetros de selección se tuvo en cuenta la confiabilidad de la información, el idioma español o inglés, la actualidad de publicación y el tipo de investigación realizada.

2.1. Metodología *Design Thinking*

El *Design Thinking* es una metodología de trabajo para generar ideas innovadoras, a través de una aproximación grupal interdisciplinaria, donde se aplican técnicas desarrolladas por diversas áreas creativas. Es decir, que busca la solución a problemas en proyectos, productos, servicios y demás áreas de desempeño donde puedan ser útiles estrategias de observación, empatía y creatividad.

En la metodología utilizada se describen cuatro etapas fundamentales para el desarrollo de la investigación:

- a) **Definir:** se trata de comprender las necesidades y el entorno de las personas implicadas en la solución.
- b) **Idear:** consiste en generar ideas para construir posibles soluciones al problema. Tiene como objetivo la generación de un sinnúmero de opciones, para no quedarse con las ideas incrementales y preferir las disruptivas.
- c) **Prototipar:** es la etapa en la que se convierten las ideas en realidad, aprendiendo mientras se construye.
- d) **Probar:** se trata de definir los mecanismos relevantes para cuantificar los resultados de la innovación que se pretenden implementar.

De esta manera, Christopher Jones considera: “El diseñador elabora una cadena de especificaciones y predicciones interrelacionadas para formular propuestas que respondan a los requerimientos dados. El método es el medio para resolver el conflicto entre el análisis racional y el pensamiento creativo” [16]. En la Figura 1 se describe detalladamente la metodología implementada para el desarrollo de este trabajo investigativo.

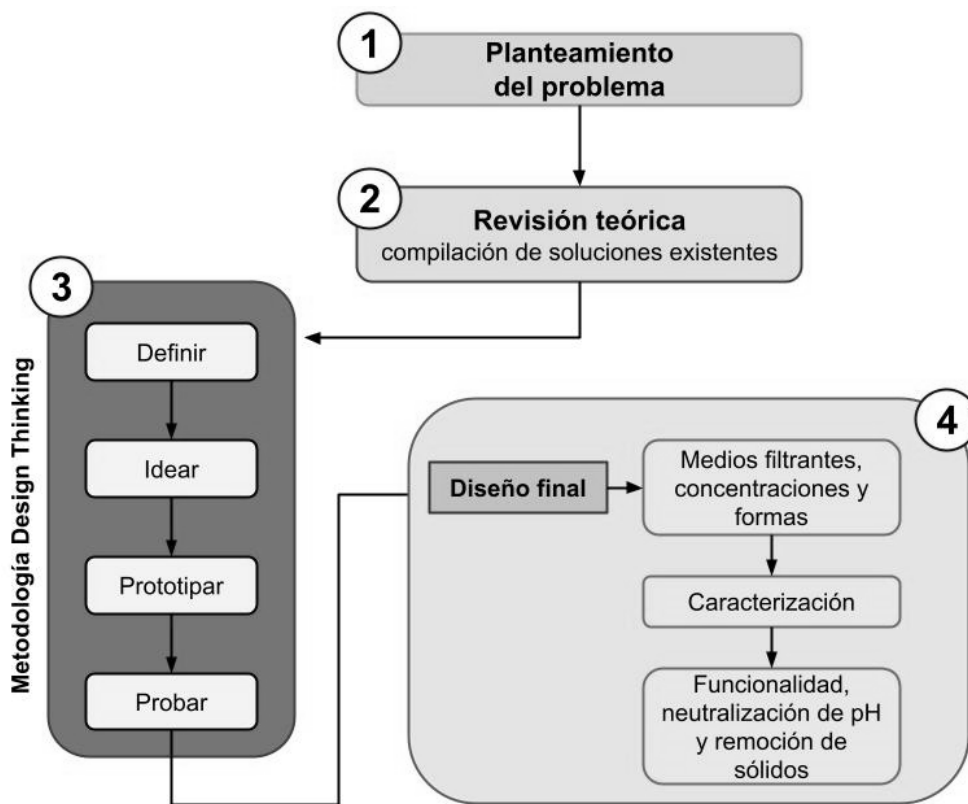


Figura 1. Metodología de trabajo implementada

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta el diseño de cinco filtros elaborados con diferentes materiales filtrantes tales como: relave minero, zeolita, arena de rio fina, carbón activado, pellets de relave minero, cal y grava de diferentes granulometrías. La variación de sus componentes se realizó con la finalidad de observar la velocidad de filtrado, neutralización del pH y remoción de sólidos al momento de realizar las pruebas. En la figura 2 se observan los cinco filtros y su composición porcentual con relación al peso de los lechos filtrantes que conforman cada uno de los filtros.

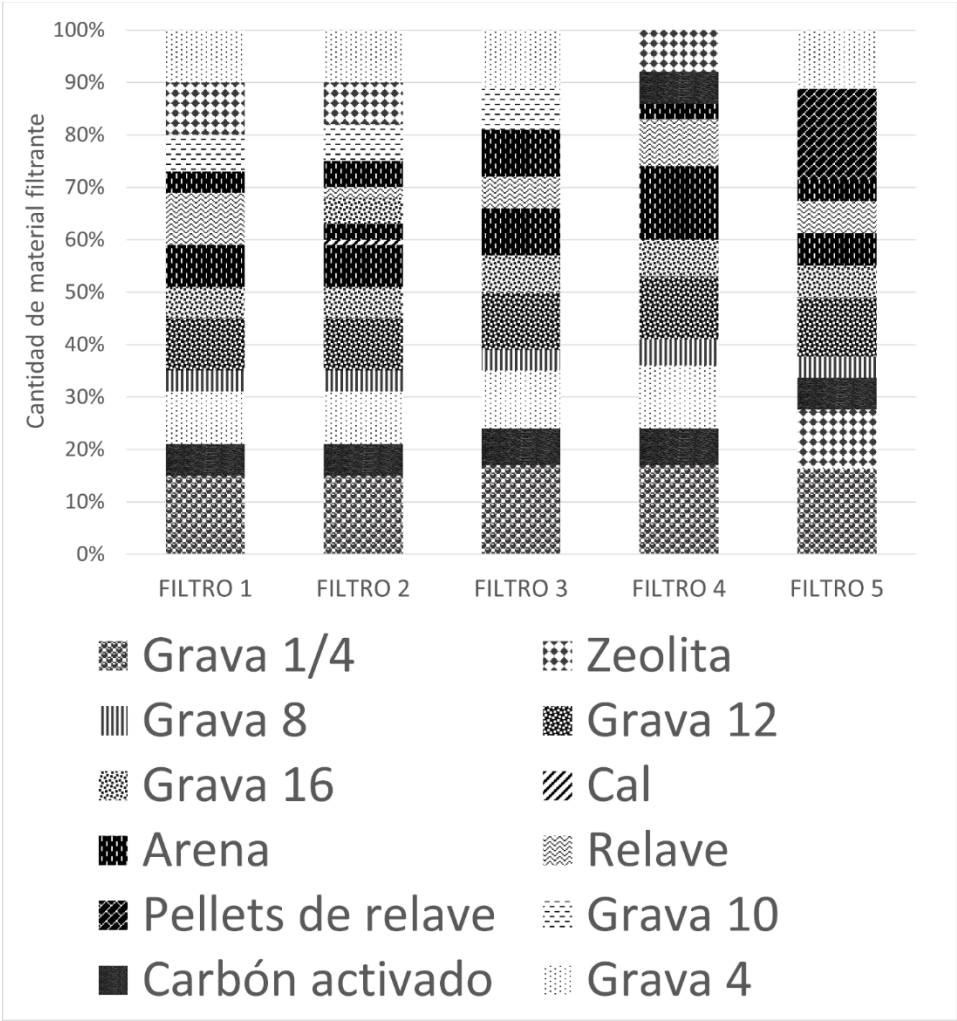


Figura 2. Composición porcentual del material de los filtros diseñados

Es importante mencionar que el relave minero utilizado como medio filtrante en la fabricación de los filtros proviene de minas auríferas en el municipio de California, Santander, Colombia. A este material se le realizó un análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de Rayos X (Na-U) Muestra de minerales. En la Tabla 1 se detallan los porcentajes de los elementos y compuestos presentes en el relave minero.

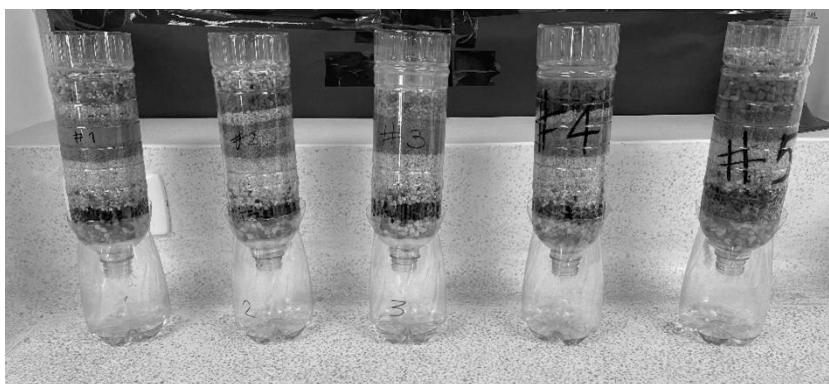
Tabla 1. Porcentaje cuantitativo en óxidos del relave minero (FRX)

Concentración	Compuesto	Concentración
30,54%	SiO ₂	65,34%
8,83%	Al ₂ O ₃	16,68%
3,32%	K ₂ O	3,99%
1,61%	Fe ₂ O ₃	2,31%
0,93%	CaO	1,31%
0,43%	SO ₃	1,08%
0,41%	MgO	0,68%
0,30%	TiO ₂	0,50%
0,24%	P ₂ O ₅	0,54%
0,17%	Na ₂ O	0,23%
0,15%	PbO	0,17%
0,09%	BaO	0,10%
0,05%	SrO	0,06%
0,03%	MnO	0,03%
0,02%	CuO	0,03%
0,02%	ZrO ₂	0,03%
0,02%	WO ₃	0,02%
0,01%	Rb ₂ O	0,01%

A los cinco filtros elaborados se les realizaron pruebas durante treinta días para evaluar su capacidad de neutralización de pH, para ello, se filtró al vacío y por gravedad un fluido ácido en cada filtro y luego se midió el valor del pH en los efluentes. En la Figura 3 se observan los métodos de filtrado: al vacío (a), el cual consiste en la realización de un montaje en donde se ubica el filtro sobre un Erlenmeyer que se encuentra adaptado a una bomba de vacío para que cuando esta sea encendida se realice una succión del fluido depositado sobre el filtro; y por gravedad (b), el cual consiste en depositar el drenaje ácido de mina sobre el filtro y esperar a que por acción de la gravedad haga el recorrido por todo el filtro.



(a) Filtrado al vacío



(b) Filtrado por gravedad

Figura 3. Métodos de filtrado

Como fluidos para las pruebas se utilizó una solución de ácido clorhídrico HCL y un drenaje ácido proveniente de una faena minera localizada en el municipio de California, Santander en las coordenadas 7,37331° N, 72,90617° O. En la Figura 4 se visualiza: la bocamina (a), en donde se encuentra la entrada a la mina aurífera y sus instalaciones; la escorrentía del DAM (b), en donde se observa el recorrido del fluido en el medio a las

afueras de la mina; y la medición del pH del drenaje (c), en donde por medio de un pHmetro se determinó su acidez con un valor de 2,58.

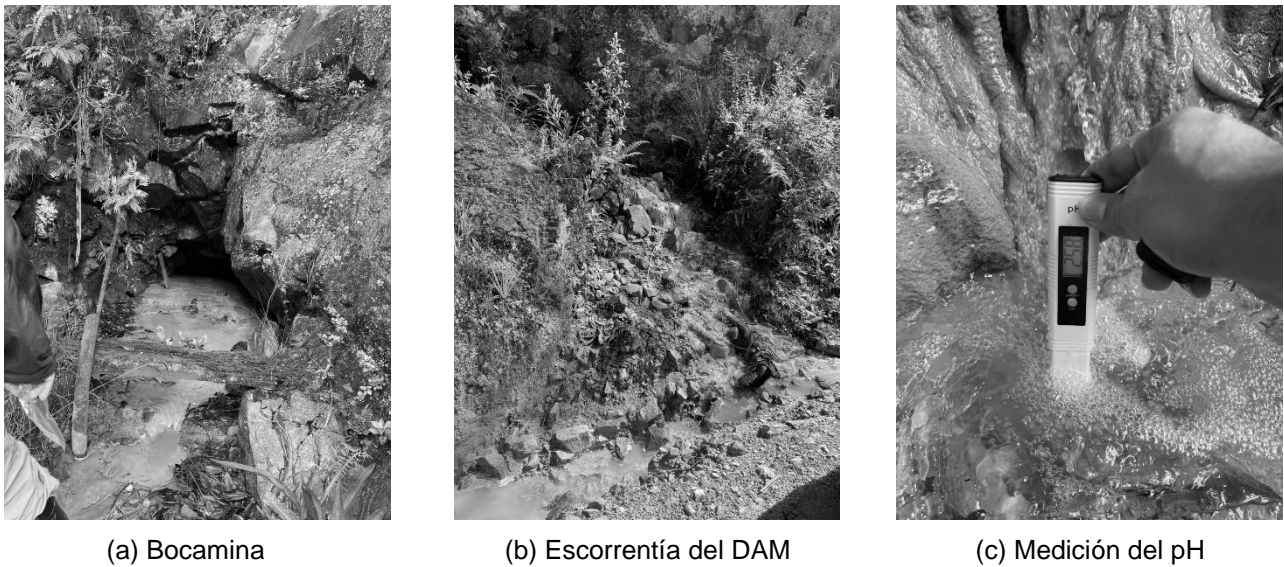


Figura 4. Mina aurífera de donde se tomó el DAM

Adicional a la prueba de neutralización de pH, cada día se realizó una inspección visual sobre la velocidad de filtración y remoción de sólidos en cada filtrado. En la tabla 2 se registra el resumen de los resultados de dichas observaciones.

Tabla 2. Resultados inspección visual sobre remoción de sólidos y velocidad de filtrado

# Filtro	Observaciones	
	Filtrado al vacío	Filtrado por gravedad
Filtro 1	Realiza un proceso de filtración lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido	Realiza un proceso de filtración muy lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido
Filtro 2	Realiza un proceso de filtración rápido y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido, sin embargo, hacia el día 9 comienza a presentar un poco de turbiedad en el efluente	Realiza un proceso de filtración lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido
Filtro 3	Realiza un proceso de filtración lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido	Realiza un proceso de filtración muy lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido
Filtro 4	Realiza un proceso de filtración lento hasta el día 9 en donde su dinámica cambia y comienza a filtrar rápidamente. Es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido, sin embargo, hacia el día 9 comienza a presentar un poco de turbiedad en el efluente	Realiza un proceso de filtración muy lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido.
Filtro 5	Realiza un proceso de filtración lento hasta el día 9 en donde su dinámica cambia y comienza a filtrar rápidamente. Es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido, sin embargo, hacia el día 9 comienza a presentar un poco de turbiedad en el efluente	Realiza un proceso de filtración muy lento y es efectivo al momento de remover sólidos de un fluido.

Según la tabla anterior, en los filtros 2, 4 y 5 se presenta un cambio en las características físicas del efluente en el día nueve, esto se debe a la colmatación de los lechos filtrantes en un proceso de traslado de partículas finas del relave minero a las capas descendentes de grava. Sin embargo, este suceso solo se da cuando se realiza el filtrado al vacío, pues cuando se realiza por gravedad, la fuerza de filtrado es menor y no causa el desplazamiento de partículas finas. A pesar de ello, según las pruebas realizadas se puede decir que los filtros diseñados son muy buenos en la remoción de sólidos y color de los DAM.

En la Tabla 3 se encuentran los resultados de las pruebas de neutralización del pH en cada uno de los filtros, estos datos son comparados respecto a la resolución 0631 de 2015 en la cual se establecen los Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería [15].

Tabla 3. Resultados de medición en la neutralización del pH en los filtros 1, 2, 3, 4 y 5

Día	Fluido	PH afluente	Tipo filtrado	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4	Filtro 5
				pH efluente	pH efluente	pH efluente	pH efluente	pH efluente
1	DAM	2,5	al vacío	6,4	6,2	6,4	6,7	6,7
2	HCl	2,4	al vacío	6,9	6,3	7,2	7,1	7,1
3	HCl	2,5	al vacío	6,9	6,6	7,1	6,9	6,9
4	DAM	2,5	al vacío	7,1	6,5	7,0	7,0	6,9
5	HCl	2,5	al vacío	7,1	6,7	7,3	7,0	7,1
6	HCl	2,3	gravedad	7,8	7,8	7,8	7,6	7,9
7	HCl	2,3	al vacío	7,2	6,9	7,2	6,7	7,1
8	HCl	2,0	al vacío	7,1	6,6	7,1	6,7	6,9
9	HCl	2,1	al vacío	6,9	6,7	7,3	6,1	6,5
10	HCl	2,0	al vacío	6,9	6,5	7,1	6,0	6,1
11	HCl	2,0	al vacío	6,9	6,4	7,2	6,0	6,0
12	HCl	2,0	al vacío	6,9	6,9	7,1	6,1	6,2
13	HCl	2,7	al vacío	7,1	6,7	7,3	6,5	6,5
14	HCl	2,4	gravedad	8,1	7,9	7,9	7,5	8,0
15	HCl	2,5	al vacío	7,1	6,7	7,1	6,2	6,7
16	DAM	2,5	al vacío	7,0	7,1	7,2	6,5	7,0
17	HCl	2,8	al vacío	7,1	6,9	7,3	6,6	7,1
18	HCl	2,8	gravedad	8,0	7,8	7,9	7,7	7,9
19	HCl	3,0	al vacío	7,0	6,6	7,1	6,7	6,7
20	HCl	2,9	al vacío	7,1	6,9	7,0	6,5	6,5
21	DAM	3,0	al vacío	6,9	6,8	7,1	6,3	6,6
22	HCl	2,9	al vacío	6,9	6,7	7,2	6,6	7,0
23	HCl	2,7	gravedad	7,9	7,8	8,0	7,6	7,9
24	DAM	3,0	al vacío	7,1	6,5	7,2	6,7	6,4
25	HCl	2,9	al vacío	7,1	6,6	6,9	6,5	6,6
26	HCl	2,9	al vacío	7,1	6,7	7,0	7,0	6,5
27	DAM	2,6	gravedad	7,8	7,9	7,9	7,7	8,0
28	HCl	2,3	al vacío	6,9	6,6	6,9	6,9	6,3
29	HCl	2,9	al vacío	6,9	6,9	6,8	6,6	6,4
30	HCl	2,7	gravedad	8,1	7,9	8,0	7,6	8,0

[15] define un rango entre 6 a 9 como valores permisibles para el pH de vertimientos en la industria de la minería aurífera. Según la tabla anterior el valor del pH en los efluentes de los cinco filtros está entre 6,0 y 8,1, cumpliendo con lo descrito en [15], por esta razón se puede decir que los cinco filtros diseñados son funcionales en cuanto a la neutralización del pH de los DAM en el periodo evaluado. Con la finalidad de comparar el rendimiento de los filtros, y comprender de una forma ilustrada los datos obtenidos, en la figura 5 se observan las cinco tendencias de pH en el efluente de los filtros.

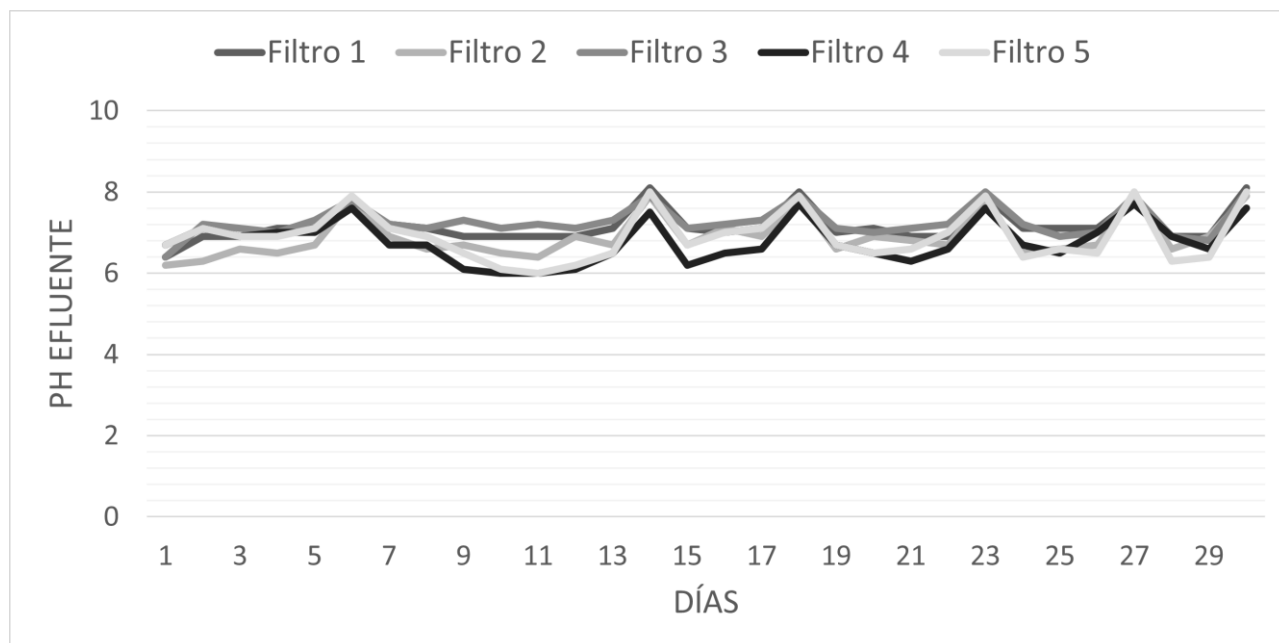


Figura 5. Comparación de Tendencias de pH en el efluente de todos los filtros

En la figura anterior se observa que los filtros 4 y 5 presentan tendencias similares al igual que los filtros 1 y 3, siendo la primera la que refleja descensos significativos en la neutralización del pH en comparación con las demás tendencias. Sin embargo, los valores se encuentran en el rango establecido por [15].

Las variaciones en los valores del pH observadas en la figura 5 son generadas por variables como: pH inicial del afluente, tipo de fluido y sus características fisicoquímicas, método de filtrado y velocidad de filtración; siendo las dos últimas las más representativas. Por ejemplo, en todas las líneas se visualizan picos sobresalientes en los días 6, 14, 18, 23, 27 y 30, es importante mencionar que estos fueron los días en donde el filtrado se realizó por gravedad, lo cual indica que la velocidad de filtración fue menor en relación con los demás días en donde el filtrado se ejecutó con la bomba de vacío. Lo anterior permite deducir que, a mayor tiempo de filtración, mayor será el valor del pH en el efluente.

4. CONCLUSIONES

La composición arcillosa con presencia de calcio y carbonatos en el relave minero permite que los filtros elaborados con este material puedan neutralizar los Drenajes Ácidos de Mina DAM, cumpliendo con los valores de pH en vertimientos estipulados para el sector minero en la resolución 0631 de 2015.

Los filtros elaborados con relave minero son una opción eficaz y económica para el tratamiento de los Drenajes ácidos de mina.

Los prototipos ideales para ejecutar un proyecto de tratamiento de DAM a gran escala son los filtros 1 y 3, pues estos demostraron mejor rendimiento en la remoción de sólidos y su tendencia en la neutralización de pH fue la más estable.

Es importante realizar pruebas piloto instalando los filtros en minas auríferas para poder observar su comportamiento con respecto a la neutralización del pH a través del tiempo y ver como las variables presentes en el medio ambiente influyen en los resultados.

Los parámetros de diseño para un filtro en una prueba piloto dependerán del caudal promedio del DAM y área disponible, su vida útil estará determinada por la cantidad de sólidos que ingresen al filtro y el tamaño de este.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia por brindarnos los recursos económicos para realizar este trabajo mediante la beca pasantía como jóvenes investigadores e innovadores. A la Universidad de Santander UDES por disponer de sus instalaciones y laboratorios para la ejecución de las pruebas realizadas. A la vicerrectoría de investigaciones y el equipo docente del programa de ingeniería ambiental de la UDES por su trabajo formativo frente a temáticas desconocidas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Organización de las Naciones Unidas, desafíos globales. Agua. <https://www.un.org/es/global-issues/water>

[2] National Geographic, 11 datos interesantes sobre el agua. (15 de marzo de 2019). ¿Sabes cuánta agua dulce hay en la Tierra? ¿Cuánta gastas para ducharte? ¿Y cuántos seres humanos apenas tienen acceso a acuíferos con un mínimo de salubridad? <https://www.nationalgeographic.es/photoaquae/2019/03/11-datos-interesantes-sobre-el-agua>

[3] Organización Mundial de la Salud. (21 de marzo de 2022). Agua para consumo humano. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

[4] Cirelli, A. F. (2012). El agua: un recurso esencial. Química viva, 11(3), 147-170. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>

[5] Cabrera, I. (2015). Influencia del pasivo minero sulfometales sobre el drenaje ácido y elementos potencialmente tóxicos en el manglar [Tesis de maestría, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saiz Montes de Oca]. Repositorio Institucional UPR.

[6] Gallardo, D., Bruguera, N.C., Díaz Duque, J.A., y Cabrera, I. (2016). Impacto provocado por la minería en la zona de Santa Lucía, evaluación físico-química. Revista Minería & Geología, 31(4), 100-120. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223543341007.pdf>

[7] Akcil A. y Koldas S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. Journal of cleaner production 12-13(14), 1139-1145. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652605000600>

[8] Guzmán, F., Arranz, J., Smoll, L., Collahuazo, L., Calderón, E., Otero, O., y Cabrilla, F. (2020). Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. https://www.researchgate.net/publication/341878675_MANUAL_PARA_EL_INVENTARIO_DE_MINAS_ABANDONADAS_O_PARALIZADAS

[9] Oblasser, A. (2016). Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras: Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia y el Perú. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40475-estudio-lineamientos-incentivos-regulacion-manejo-pasivos-ambientales-mineros>

[10] Sucapuca F., Diaz J., Mogrovejo M., y Pérez G. (2017). Medidas de remediación de las aguas del embalse pasto grande, Modequegua – Peru. Ciencia y tecnología para el desarrollo 3(5), 83-90. <https://core.ac.uk/reader/228843490>

-
- [11] Arango M. y Olaya Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Gestión y ambiente* 3(15), 125-133. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36286/37829>
- [12] Gallardo, D., Cabrera, I., Bruguera, N.C., Alonso, J.A., Pinto, A., y Milián, E. (2013). Chemical – physical evaluation of the superficial waters in areas with miner-metallurgic activity in Santa Lucia, Pinar del Rio. In: Farfán, H., Corvea, J.L., de Bustamente, I. y LaMoreaux, J.W. (Eds.), *Management of water resources in protected areas* (pp. 293-300). Springer.
- [13] Gallardo Martínez, D., Bruguera Amarán, N., Díaz Duque, J. A., y Cabrera Díaz, I. (2020). Drenaje ácido de minas y su influencia en ecosistemas asociados al yacimiento Santa Lucía, Cuba. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 3(2), 67-81. <https://doi.org/10.46380/rias.v3i2.79>
- [14] Sanchez Rial, Jose Enrique, y Ferreira Centeno, Juan Pablo. (2016). Drenajes ácidos de Mina Alternativas de tratamiento. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, (1), 20-33. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522016000100003&lang=es
- [15] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). Resolución 0631.
- [16] Jones, Christopher. (1982). *Métodos de diseño*. España. Editorial Gustavo Gili.