

# APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

Estado Del Arte Y Análisis De Posibilidades De Aplicación En Colombia De Sistemas De Pasivación Para Disminuir La Contaminación Del Agua En Procesos De Minería.

Jaider Alexis Bautista Sanabria y Evis De Jesus Corrales Julio

Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Ingeniero Metalúrgico

Director

Phd. Pedro Luis Delvasto Angarita

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Los Materiales

Bucaramanga

2025

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

**Agradecimientos**

*“Primero, agradezco infinitamente a mis padres en especial a mi madre Mary Janed que ha sido un pilar fundamental para lo persona que soy hoy en día, cada gesto de apoyo, de amor y de sabiduría, fueron la motivación para no desistir frente a las adversidades en este proceso, a mi padre Leonel por todo el apoyo y amor incondicional, a mi hermana, mis tíos y primos por estar presente en esta etapa de mi vida, a mi nona Ana lucia porque desde el lugar que se encuentre me guía y me cuida”*

*“A mis amigos del colegio y de la vida por esta amistad de muchos años que atesoro y que ha aportado a mi formación como persona”*

*“A cada uno de los profesores con quienes tuve la oportunidad de estar en sus clases y en especial al profesor y mi director Pedro Luis Delvasto por compartir sus conocimientos y generar amor a este arte de la metalurgia y los materiales”*

*“A mis amigos y futuros colegas, por todas las experiencias vividas, este proceso no fuera sido extraordinario sin la presencia de alguno de ellos”*

*“Finalmente a mi compañero Evis, con quien forjamos esta amistad desde hace cuatros años y hemos compartido muchos procesos a lo largo de la vida, me siento orgulloso y agradecido de haber realizado este proyecto con el”*

*Att. Jaider Alexis Bautista Sanabria*

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

*“En estas palabras quiero expresar mi infinita gratitud a mis padres, Thaydith Julio y Evis Corrales, a mis hermanas, Fayde María y María Belen, quienes me han inculcado los grandes valores que hoy me representan, por su amor y apoyo incondicional en todo momento a lo largo de mi carrera, por ser mi pilar y soporte en medio de las adversidades a pesar de la distancia, por todos y cada una de los consejos y las palabras de mi madre que me guiaron y me permitieron salir adelante y no rendirme nunca. Nada de esto habría sido posible sin ustedes.”*

*“A todos los profesores que fueron parte de este proceso de formación, en especial al profesor Pedro Delvasto por su tiempo y dedicación, su valioso conocimiento que nos ha compartido, siendo un guía fundamental para poder culminar esta importante etapa. A las profesoras Ana María Pérez y Elcy María Córdoba quienes en algún momento de mi carrera me brindaron su apoyo y me aconsejaron en mi camino formativo.”*

*“A mis compañeros de estudio, que hoy en día más que amigos se volvieron mis hermanos, gracias por hacerme sentir acompañado y brindarme su amistad en mi vida de foráneo, que, aunque no estemos siempre juntos los llevare presentes en mi corazón y siempre estaré agradecido con la vida por haberlos conocido: Jose, Darwin, Jaider, Luis, Kevin, Saín, Karoll, Steffany”*

*"A mi segunda familia en Bucaramanga: Panchis, Natalia, Paula, Alexandra y Salomé. Gracias por hacerme sentir como en casa durante todos mis años universitarios. Siempre estaré profundamente agradecido por su compañía y apoyo."*

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

*“Finalmente a Jaider, mi compañero de tesis, con quien formé una gran hermandad y con quien viví muchas experiencias estos años, sin duda la persona idónea y un gran colega para llevar a cabo este proyecto, orgullosamente por fin logramos llegar a la meta después de tanto esfuerzo, lo hicimos realidad.”*

*Att. Evis De Jesus Corrales Julio*

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	13
1.1. Objetivo General .....	13
1.2. Objetivos Específicos .....	13
2. Justificación .....	14
3. Metodología .....	15
3.1. Definición Del Tema De Estudio .....	15
3.2. Investigación Y Recopilación De Documentación Trascendente .....	15
3.3. Clasificación Y Evaluación De Información Obtenida .....	15
3.4. Estudio Bibliométrico De La Literatura Científica .....	15
3.5. Análisis Puntualizado De La Información Recopilada .....	16
3.6. Apreciación Del Avance Alcanzado Y Desafíos Hallados .....	16
3.7. Presentación Informe Final .....	16
4. Marco Conceptual .....	17
4.1. Drenaje Ácido De Mina .....	17
4.2. Proceso De Formación Del Drenaje Ácido De Mina .....	17
4.3. Minerales Formadores De Dam .....	19
4.4. Impactos Ambientales .....	20
4.5. Reacciones Químicas Involucradas En La Generación De Dam .....	20

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

5.	Análisis Bibliométrico .....	23
5.1.	Métodos De Pasivación .....	25
5.2.	Prevención Primaria .....	25
5.2.1.	Sellado De Cuerpos Mineralizados Sulfurosos .....	25
5.3.	Barreras Físicas Y Químicas .....	26
5.3.1.	Coberturas Secas .....	26
5.3.2.	Coberturas Húmedas .....	27
5.3.3.	Microencapsulación Y Pasivación De Minerales.....	28
5.3.4.	Neutralización Por Aplicación De Elementos Alcalinos .....	29
5.4.	Control Biológico.....	30
5.4.1.	Inhibición De Microorganismos Con Biocidas.....	30
5.4.2.	Uso De Compuestos Orgánicos Para Limitar Oxidación.....	31
6.	Mineralogía De Los Pasivos Ambientales En Colombia.....	32
6.1.	Minería De Oro .....	32
6.2.	Minería De Carbón.....	33
6.3.	Minería De Ferroníquel .....	34
6.4.	Minería De Piedras Preciosas.....	34
7.	Aplicabilidad En Colombia.....	35
8.	Conclusiones .....	38
9.	Recomendaciones .....	39
	Referencias Bibliográficas .....	40
	Apéndices.....	47

**Lista de figuras**

Figura 1. Fuentes productoras de DAM.....	18
Figura 2. Etapas del proceso de formación de los DAM .....	21
Figura 3. Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc.) publicados por año desde 1973 hasta la actualidad.....	23
Figura 4. Tipos de Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc.) capítulos de libros etc.) .....	23
Figura 5. Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc.) publicados por países por países. ....	24

**Lista de tablas**

Tabla 1. Minerales de sulfuro formadores de drenajes ácidos.....	19
--	----

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### Lista de Apéndices

Apéndice A. Análisis de retención de agua de cinco capas de sellado de arcilla y subproductos alcalinos (GLD). .....	47
Apéndice B. Diagrama tridimensional del proyecto de reducción de iones de contaminación por AMD mediante inyección de lechada para áreas A, B, C Y D. ....	47
Apéndice C. Comportamiento del pH de los residuos mineros estériles con coberturas en seco: C1 residuo minero sin cobertura; C2 residuo minero con cal; C3 residuo minero con calcáreo; C4 residuo minero con lama roja. ....	48
Apéndice D. a) Comportamiento del pH en roca estéril y relaves cubiertos por lodos-suelo; b) Comportamiento del flujo de oxígeno en roca estéril y relaves cubiertos por lodos-suelo .....	48
Apéndice E. Esquema básico de los principales reactivos y productos de una variedad de vías de oxidación de azufre presentes en bacterias oxidantes de azufre .....	49
Apéndice F. Composición mineralógica de los depósitos de oro: Qz = cuarzo; Fsp = feldespato; Ms = moscovita; Ab = albita; Bt = biotita; Pl = plagioclasa; Kln = caolinita; Amp = anfibolita; Cal = calcita; Gth = goetita; Chl = clorita; Grt = granate; Gy = pirita; Po = pirrotina; Gn = galena; Sp = esfalerita; Rt = rutilo; Oth = otros. ....	49
Apéndice G. Perfiles de meteorización en Cerro Matoso y planeta rica que muestran el patrón de distribución de elementos mayores y menores relevantes. ....	50
Apéndice H. Fotomicrografías de vetas de esmeralda de la mina Cunas, zona esmeraldera Boyacá, Colombia. ....	51

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

**Resumen**

**Título:** estado del arte y análisis de posibilidades de aplicación en Colombia de sistemas de pasivación para disminuir la contaminación del agua en procesos de minería \*

**Autor:** Jaider Alexis Bautista Sanabria, Evis de Jesús Corrales Julio\*\*

**Palabras clave:** Drenaje ácido de mina, Tecnología de Prevención, Métodos pasivos, Procesos mineros

**Descripción:**

En este documento de investigación se analiza la aplicabilidad de sistemas de pasivación minera en Colombia para mitigar el impacto ambiental del drenaje ácido de mina (DAM), un problema causado por la oxidación de minerales sulfurados que contamina el agua con metales pesados y sulfatos. Se realiza un estudio bibliométrico para clasificar métodos de prevención como sellado, barreras químicas y biológicas, microencapsulación y neutralización alcalina. También se examinan técnicas aplicadas en minería de oro, carbón, ferroníquel y piedras preciosas, considerando las características mineralógicas de los residuos en distintas regiones del país. Las conclusiones destacan la necesidad de adaptar estas estrategias a las condiciones locales, promover tecnologías sostenibles y adoptar enfoques integrales que involucren actores gubernamentales y comunitarios. El documento subraya la importancia de la investigación continua y la cooperación intersectorial para lograr una minería más responsable y respetuosa con el medio ambiente.

-----

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Predo Luis Delvasto Angarita

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

**Abstract**

**Title:** state of the art and analysis of possibilities of application in Colombia of passivation systems to reduce water pollution in mining processes\*

**Author (s):** Jaider Alexis Bautista Sanabria, Evis de Jesús Corrales Julio\*\*

**Keywords:** Acid mine drainage, Prevention Technology, Passive methods, Mining process

**Description:**

The document examines the applicability of mine passivation systems in Colombia to mitigate the environmental impact of acid mine drainage (AMD), a problem caused by the oxidation of sulfide minerals that contaminates water with heavy metals and sulfates. A bibliometric study is conducted to classify prevention methods such as sealing, chemical and biological barriers, microencapsulation, and alkaline neutralization. Techniques applied in gold, coal, ferronickel, and gemstone mining are also analyzed, considering the mineralogical characteristics of the waste in different regions of the country. The conclusions highlight the need to adapt these strategies to local conditions, promote sustainable technologies, and adopt comprehensive approaches involving governmental and community actors. The document underscores the importance of ongoing research and cross-sector collaboration to achieve more responsible and environmentally respectful mining practice.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Predo Luis Delvasto Angarita

## **Introducción**

El suministro y calidad de agua dependen del sano equilibrio del medio ambiente, el cual es perjudicado en gran parte por la acción de empresas extractivas que además desfavorecen la salud pública y amenaza con aumentar junto con la transición energética al demandar mayor cantidad de minerales para sus sistemas.

La fuerte dependencia de América Latina en la extracción de minerales para el crecimiento económico ha atraído inversiones extranjeras, pero también ha generado importantes desafíos ambientales, particularmente en la gestión del consumo de agua, la contaminación y los desechos peligrosos. La industria minera en países latinoamericanos como Colombia enfrenta problemas relacionados con la explotación de metales pesados como el oro, así como la minería del carbón, que traen tanto oportunidades económicas como complejidades ambientales, legales y sociales (Aguilar-Pesantes et al., 2021). La expansión de la minería a gran escala en la región ha generado preocupación sobre las implicaciones territoriales, los conflictos ambientales y las violaciones de derechos humanos asociados con esta actividad extractiva (Muñoz-Duque, 2020).

La implementación de sistemas de pasivación adaptados a las condiciones mineralógicas específicas de los residuos mineros en Colombia es crucial para mejorar la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad general del sector minero-energético. El estado actual de la gestión de residuos mineros en Colombia, particularmente los relaves, resalta la necesidad de tecnologías modernas para minimizar los impactos ambientales (Pereira Bolaños & Ariza Ruiz, 2023). Además, los estudios sobre los impactos ambientales de diferentes técnicas mineras en Colombia enfatizan la importancia de comprender y mitigar estos impactos a través de soluciones personalizadas.

## **1. Objetivos**

### **1.1.Objetivo general**

Establecer las posibilidades de aplicación en Colombia de sistemas de pasivado para evitar la contaminación del agua debida a la generación de drenajes ácidos en minería.

### **1.2.Objetivos específicos**

Realizar un análisis bibliométrico acerca del estado actual de las técnicas de pasivación para evitar la generación de drenajes ácidos de mina.

Clasificar los procesos de pasivación reportados en la literatura de acuerdo con sus características, reactivos necesarios, condiciones de aplicación y minerales sobre los cuales pueden aplicarse.

Definir cuáles de dichos procesos son aplicables en Colombia, de acuerdo con las características mineralógicas de los residuos de minería que se generan actualmente en el país.

## 2. Justificación

La industria minera desempeña un rol fundamental en la economía global, con importantes contribuciones al desarrollo económico nacional en varios países, entre ellos Colombia, donde la minería es una actividad prioritaria con miles de concesiones para su explotación. La inversión extranjera directa en minería ha aumentado constantemente y ha mostrado un crecimiento sustancial a lo largo de los años (Ericsson & Löf, 2019). La industria minera enfrenta desafíos ambientales, especialmente en la gestión de residuos y la escasez de agua en regiones mineras. Para mitigar estos problemas, se están implementando soluciones como intercambio de agua, tecnologías de desalinización y estrategias de reutilización (Utomo, Sarjono, Putro, 2023).

Las operaciones mineras, los procesos de concentración de minerales, las presas de desechos y los escombros de minas contribuyen significativamente a la generación de drenajes ácidos de mina (DAM), un problema ambiental importante a nivel mundial (Ojonimi et al., 2021). El ADM resulta de la exposición de materiales que contienen sulfuro a condiciones oxidantes, lo que provoca la salida de agua ácida que contiene altas concentraciones de metales pesados y sulfatos, lo que representa una grave amenaza para la calidad del agua y la cubierta vegetal (Masulli et al., 2022).

La oxidación de sulfuros como la pirita y la pirrotita libera iones  $H^+$ , lo que reduce el pH del ambiente circundante y lixivía iones metálicos adicionales en los cuerpos de agua. Las medidas preventivas, como las pruebas del potencial de AMD antes de grandes excavaciones mineras y la implementación de tecnologías de tratamiento apropiadas como adsorción, separación de membranas y procesos biológicos, son cruciales para mitigar el impacto de AMD en el medio ambiente y la salud humana (Spitz, K., & Trudinger, J., 2019).

### **3. Metodología**

#### **3.1. Definición del tema de estudio**

El proyecto inicia con la identificación de documentos que contienen la fundamentación teórica útil para entender y establecer un conocimiento previo del tema que se va a desarrollar en la revisión bibliográfica.

#### **3.2. Investigación y recopilación de documentación trascendente**

Esta fase del proyecto comienza a partir de la investigación bibliográfica aportada de la biblioteca de la Universidad en su base de datos, en donde se analiza la información disponible para determinar las variables y la trascendencia del tema a través del tiempo. Los documentos por recopilar incluyen artículos científicos, revisiones globales bibliográficas y tesis de pregrado y posgrado de otros autores.

#### **3.3. Clasificación y Evaluación de información obtenida**

Con la información recopilada de las bases de datos usada, se inicia el proceso de clasificación de dicha información, la cual se filtra por relevancia de conocimiento y antigüedad; esto con el fin de cumplir a cabalidad con los objetivos planteados, además de abarcar de forma correcta el tema de estudio, adicional se hace uso de la herramienta Scopus, que es de suma importancia para el desarrollo del estado del arte del desarrollo del proyecto.

#### **3.4. Estudio bibliométrico de la literatura científica**

La información filtrada pasa por un proceso de estudio mediante la herramienta Scopus, esta información se clasifica según año de publicación, países que han publicado sobre el tema a nivel internacional y si es el caso, investigación nacional realizada.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### **3.5. Análisis puntualizado de la información recopilada**

Para esta fase, se analizan los artículos seleccionados, filtrados y acordes al propósito de la investigación, así mismo se tiene en cuenta que la información sea correcta para el cumplimiento de los objetivos.

### **3.6. Apreciación del avance alcanzado y desafíos hallados**

Se realiza la retroalimentación y apreciación de los métodos de pasivación en minería hasta la fecha, destacando los avances tecnológicos y los resultados positivos logrados. Además, se identifican las limitaciones encontradas para el objetivo de la investigación y se señalan oportunidades de mejora en el ámbito de la investigación.

### **3.7. Presentación informe final**

La etapa final del proyecto finaliza con la entrega del documento final para la revisión y posterior aprobación para ser calificado y sustentado ante los evaluadores y personas interesadas.

#### **4. Marco Conceptual**

##### **4.1. Drenaje ácido de mina**

El drenaje ácido de mina se origina por la oxidación natural de minerales sulfurados, como la pirita, al entrar en contacto con la humedad y condiciones oxidantes. Este proceso químico desencadena una disminución del pH y la liberación de metales al medio ambiente, generando un impacto significativo en los ecosistemas (Ohene, 2023). Este fenómeno es común en minas de carbón y de metales. Sin embargo, en las minas de metales, el problema es más grave, ya que los contaminantes prioritarios como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cobre (Cu) y zinc (Zn) pueden alcanzar concentraciones peligrosas (Wildeman y Laudon, 1989).

El drenaje ácido de roca (AMD) es un proceso natural supergénico causado por aguas descendentes que movilizan minerales sulfurados. En la superficie, se manifiesta como manchas rojizas de óxido férrico en ambientes de bajo pH. El hierro liberado en la zona lixiviada asciende y forma depósitos ferruginosos (*gozzan*), mientras que otros metales descienden hacia la zona enriquecida. Los principales generadores de AMD incluyen obras subterráneas, explotaciones a cielo abierto, residuos mineros, minas de carbón con alto contenido de azufre, presas de jales y la exposición natural de rocas con sulfuros (Balderas et al., 2010).

##### **4.2. Proceso de formación del drenaje ácido de mina**

El drenaje ácido de mina (DAM) ocurre naturalmente, pero las actividades mineras lo aceleran al exponer minerales sulfurados y superficies ricas en hierro a la oxidación (Ríos, Williams y Roberts, 2008).

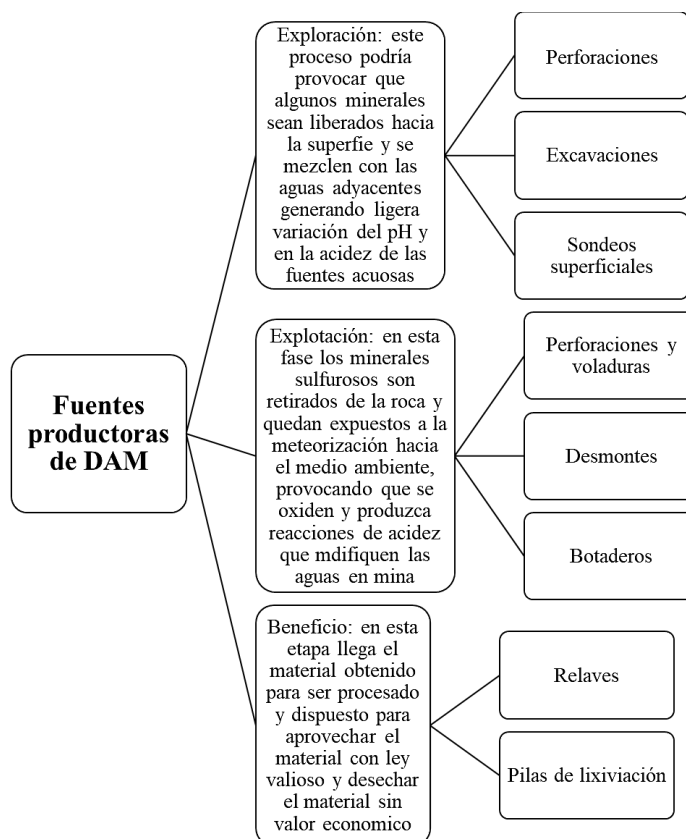
Las operaciones mineras son las principales responsables de la formación de drenajes ácidos de mina, ya que implican la remoción de grandes volúmenes de tierra, los cuales, ya sea como estériles o residuos del procesamiento de minerales, se almacenan por largos periodos.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

Durante este proceso, los minerales sulfurados quedan expuestos a la atmósfera y al agua, especialmente en actividades como la minería a cielo abierto, la apertura de túneles en minería subterránea, y el almacenamiento de estériles, relaves y acopios temporales (Chaparro, s. f.).

**Figura 1**

### *Fuentes productoras de DAM*



*Nota.* Tomado de: Arismendy, S. A. (2020). Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia [Trabajo de Grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

### 4.3. Minerales formadores de DAM

El agua ácida de mina es un tipo de agua que contiene hierro y sulfatos, y se genera cuando los estratos geológicos con pirita se exponen a un entorno oxidante. Este fenómeno ocurre de manera natural, pero las actividades mineras aceleran su formación. Un impacto significativo de la minería, especialmente en áreas de mineralización de oro, es el potencial de generación de drenaje ácido de mina. Los minerales sulfurados que contribuyen a este proceso incluyen la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), cuarcita ( $\text{FeS}_2$ ), picolitros ( $\text{FexSx}$ ), calcocitos ( $\text{CuS}$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), molibdenita ( $\text{MoS}$ ), mulenita ( $\text{NiS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ).

**Tabla 1**

*Minerales de sulfuro formadores de drenajes ácidos*

Mineral	Composición
Pirita	$\text{FeS}_2$
Pirrotina	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}$
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$
Galena	$\text{PbS}$
Esfalerita	$\text{ZnS}$
Arsenopirita	$\text{FeAsS}$
Marcasita	$\text{FeS}_2$
Calcosina	$\text{CuS}_2$
Millerita	$\text{NiS}$
Cinabrio	$\text{HgS}$

*Nota.* Tomado de: Acharya, B. S., & Kharel, G. (2020). Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. *Journal of Hydrology*, 588, 125061.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

La pirita es el principal mineral responsable de la formación de drenaje ácido de mina. La calidad del agua, ácida o alcalina, depende de los minerales sulfurados y materiales alcalinos presentes en los estratos geológicos. La formación de agua ácida es más intensa en áreas mineras, pero puede prevenirse al evitar la exposición de materiales sulfurados al aire libre (Nasrudin, 2019).

### **4.4. Impactos ambientales**

La formación de drenajes ácidos en las diversas operaciones de las empresas mineras se ha reconocido como uno de los problemas más significativos y costosos que deben abordar debido a sus efectos ambientales.

Los DAM son una preocupación global debido a su impacto negativo en el medio ambiente y su inevitabilidad en las actividades mineras. Pueden representar riesgos para la salud humana al contaminar el agua, las plantas y los animales, introduciendo metales pesados en la cadena alimentaria (Otunola & Mhangara, 2024). Otra fuente de riesgo es el contacto físico con suelo y agua contaminados o la inhalación de aire contaminado. indican que el gas de sulfuro de hidrógeno producido por la DAM a menudo causa irritación de la piel, problemas respiratorios e irritación ocular (Jiao et al., 2023).

La combinación de todos estos factores puede llevar a la alteración o destrucción de ecosistemas enteros. El balance ecológico se ve afectado al perderse especies clave, tanto terrestres como acuáticas, lo que puede causar un efecto en cascada en la biodiversidad local (Albert, 2024).

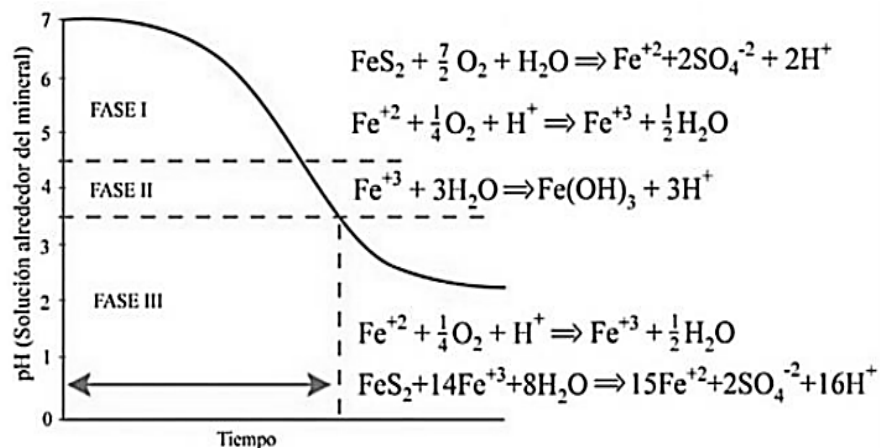
### **4.5. Reacciones químicas involucradas en la generación de DAM**

Por medio de la siguiente ilustración, (véase figura 2), (Senese Leiva et al., 2022) se explica el proceso de formación de aguas ácidas en tres fases.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

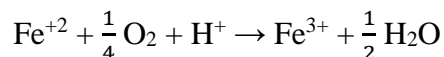
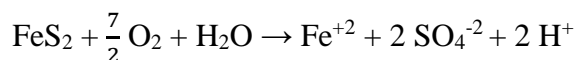
**Figura 2**

*Etapas del proceso de formación de los DAM*



*Nota.* Tomada de: Senese Leiva, A. A., Negrelli, M. M., & Hidalgo, N. (2022). Predicción y estudio de drenaje ácido de mina sobre mineral de escombrera. *Revista Colombiana de Materiales* (18), 18. <https://doi.org/10.17533/RCM/udea.rcm.n18a01>.

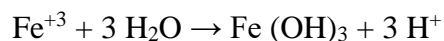
**Fase I.** La oxidación de minerales sulfurosos libera hierro ferroso que, bajo condiciones neutras, se oxida químicamente y se transforma a hierro férrico que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al aire y a las bacterias (fundamentalmente *Thiobacillus ferrooxidans*) se producen a un ritmo semejante. Por lo general, la alcalinidad disponible en el medio es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente.



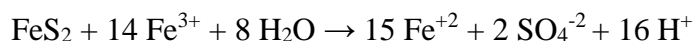
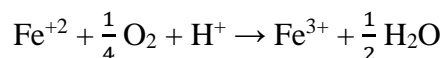
**Fase II.** La acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH desciende y predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En la reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico y éste a su vez en

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

contacto con el agua da lugar a ácido sulfúrico y al hidróxido férrico que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficacia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto (oxidación bacteriana).



**Fase III.** Cuando el pH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (en cuyo caso el pH del agua disminuye hasta aproximadamente 4,5), el ion férrico se ve afectado por las reacciones de oxidación-reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. En resumen, la *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido.



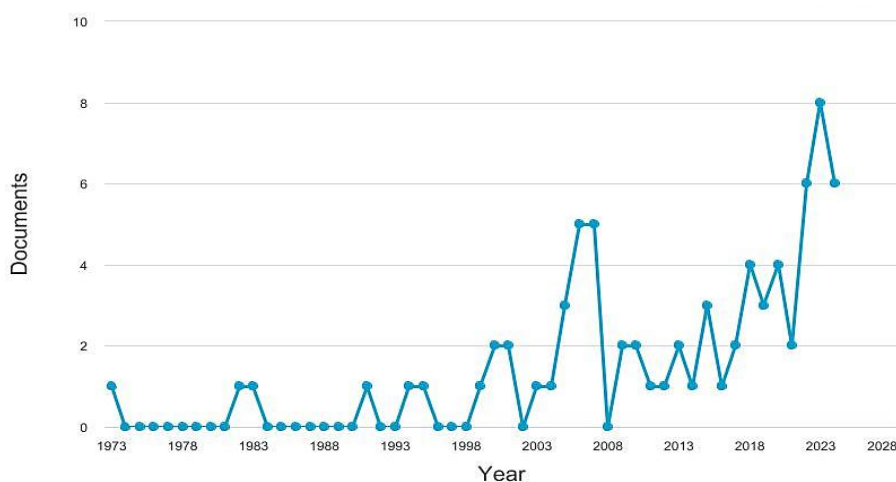
## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### 5. Análisis bibliométrico

A lo largo de los años, múltiples investigaciones han estudiado la eficacia de diversos métodos para prevenir y mitigar la generación de drenajes ácidos de mina (DAM) (véase figura 3).

#### Figura 3

*Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) publicados por año desde 1973 hasta la actualidad.*



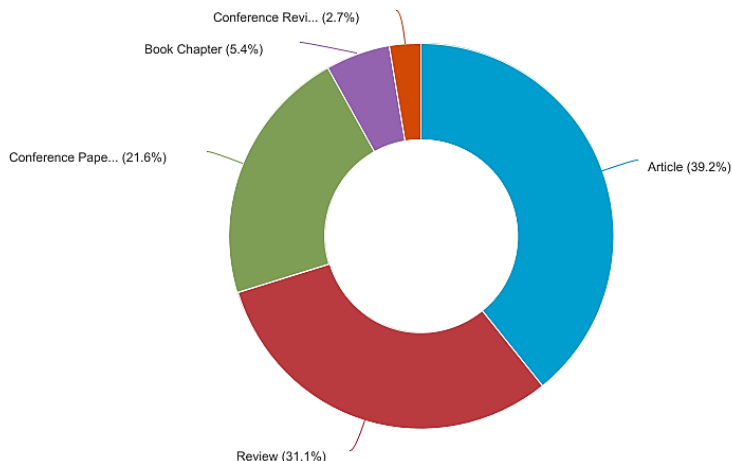
*Nota.* Tomado de: Spocus (sciencedirect)

Estos estudios que se componen principalmente de artículos, revistas, capítulos de libros etc (véase figura 4). Exponen el uso de agentes de protección, tanto físicos como químicos, diseñados para limitar la interacción de los residuos mineros con los factores que promueven la formación de DAM, como el oxígeno, el agua y las bacterias oxidantes de sulfuros.

#### Figura 4

*Tipos de Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc.).*

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

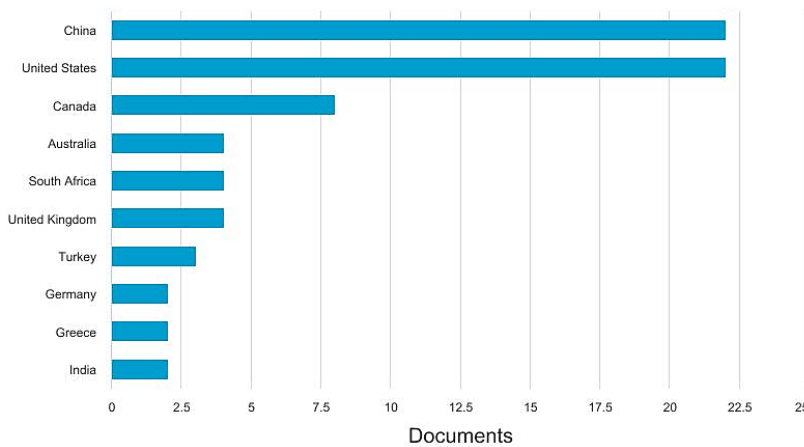


*Nota.* Tomado de: Spocus (sciencedirect).

Siendo China, Estados Unidos y Canadá los principales países investigadores del tema (véase figura 5).

**Figura 5**

*Documentos de investigación (artículos, revistas, capítulos de libros etc) publicados por países.*



*Nota.* Tomado de: Spocus (sciencedirect.)

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### **5.1.Métodos de pasivación**

Los métodos de pasivación desarrollados se componen principalmente de procesos de prevención primaria por sellado, barreras físicas y químicas como cubiertas secas y húmedas, microencapsulación, neutralización con productos alcalinos y el factor biológico que incluye el uso de biácidos y material orgánico.

### **5.2.Prevenición primaria**

#### **5.2.1. Sellado de cuerpos mineralizados sulfurados**

La prevención primaria en la gestión de drenajes ácidos de mina (DAM) se enfoca principalmente en el uso de técnicas que eviten la difusión de oxígeno y la percolación de agua aplicando cubiertas secas con capas protectoras y de sellado. En Suecia, evaluaron una técnica de sellado compuesta por una capa de ceniza volante (FA) de 0,6 m de espesor, combinada con lodos de depuradora (SS), que resultó eficaz para mitigar la difusión de oxígeno y retener metales pesados (Nason et al., 2014). Asimismo, materiales alcalinos como GLD (subproducto de la industria de pulpa y papel), cal y cenizas volantes (FA) han sido empleados exitosamente en la remediación de residuos mineros reactivos. En particular, el GLD, compuesto por calcita, cal y cal hidratada, presenta propiedades alcalinas, baja conductividad hidráulica y alta estabilidad química, lo que reduce la infiltración de oxígeno y agua (véase Apéndice A), además de inmovilizar eficientemente metales pesados en relaves ricos en sulfuros. Estas características lo convierten en un material idóneo para su uso en capas de sellado y en estrategias sostenibles de prevención primaria del DAM (Mäkitalo et al., 2014) .

Por otro lado, las técnicas de sellado también han demostrado ser efectivas en la adecuación de áreas previamente afectadas por actividades mineras. En las minas del suroeste de China, propusieron un enfoque preventivo basado en la inyección de lechada de cemento portland para

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

sellar fisuras y túneles en fuentes principales y conductos de migración antes de la emisión de AMD. Este enfoque incluye la creación de un "anillo cortina" en acuíferos kársticos, transformándolos en capas impermeables, así como la solidificación in situ de minerales sulfurosos para aislarlos del agua y oxígeno (véase Apéndice B). Los resultados de esta metodología evidenciaron una mitigación significativa en la formación de drenajes ácidos, aunque su implementación requiere un análisis geohidrológico y estructural detallado de la zona minera (Li et al., 2023).

### **5.3. Barreras Físicas y Químicas**

#### **5.3.1. Coberturas secas**

Las coberturas secas conformadas por materiales de baja permeabilidad, como subproductos alcalinos industriales o minerales inorgánicos, son eficientes reductores de tránsito de oxígeno y agua actuando como barreras capilares. Estudios realizados en Brasil, Evaluaron la efectividad de materiales como cal, calcáreo y lama roja sobre una pila de residuos mineros cuya composición mineralógica incluye ortoclasa (61,43 %), caolinita (29,41 %), goetita (6,51 %), gibbsita (1,56 %) y moscovita (1,09 %). Los resultados destacaron que la cal y la lama roja fueron las coberturas más eficientes, logrando neutralizar la acidez de los estériles y mantener un pH básico estable durante un periodo de 100 días (véase Apéndice C), evidenciando su potencial para aplicaciones sostenibles en la gestión de residuos mineros (Abreu et al., 2012). Por otra parte, IAMGOLD en Canadá, desarrollaron experimentos para evaluar el uso de estas mezclas con relaves y roca estéril. Los resultados evidenciaron que estas coberturas actúan como barreras eficaces contra el transporte de oxígeno, manteniendo condiciones geoquímicas estables y niveles de pH neutros durante el ensayo. Sin embargo, se observó que, en entornos altamente ácidos, las cubiertas pueden sufrir disoluciones que generan grietas y permiten el incremento del flujo de

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

oxígeno (véase Apéndice D). Para mitigar este riesgo, se recomienda la incorporación de una capa protectora de arena y grava que asegure la durabilidad y funcionalidad de la cubierta, superando las limitaciones observadas y cumpliendo con los criterios de diseño establecidos para una gestión eficaz y sostenible de los residuos mineros (Demers et al., 2017) .

### **5.3.2. Coberturas húmedas**

El uso de cubiertas húmedas como depósitos de relaves en medios acuosos han sido estudiado en varias zonas mineras de Norte América. En el caso de la presa de relaves antigua (OTD) en Savage River, una cobertura de agua de más de 2.5 metros de profundidad ha sido particularmente eficiente, limitando la oxidación de la pirita y minimizando los riesgos de AMD a largo plazo. La efectividad de estas cubiertas radica en su capacidad para reducir la concentración de oxígeno disuelto en comparación con el aire, retardando significativamente las reacciones de oxidación. Sin embargo, profundidades menores a 1 metro han mostrado ser insuficientes para un control prolongado, debido a la resuspensión de relaves y la difusión de oxígeno. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la profundidad mínima necesaria de la cubierta acuosa en el diseño y la gestión de instalaciones de almacenamiento de relaves, con el objetivo de garantizar una mitigación ambiental efectiva (Jackson & Parbhakar-Fox, 2016). Otro ejemplo involucra el depósito de relaves en el Lago Fox, Canadá, en donde los relaves subacuáticos mostraron una zona de oxidación limitada a menos de 6 cm por debajo de la interfaz agua-relave, a diferencia de los relaves subaéreos, donde la oxidación se extendió hasta 40 cm de profundidad. Los análisis de agua intersticial revelaron que los relaves subacuáticos mantenían un pH circun neutro, bajas concentraciones de sulfato ( $\text{SO}_4$ ) y metales disueltos, y una elevada actividad de bacterias reductoras de sulfato (SRB). Este ambiente redujo significativamente la movilidad de metales pesados y promovió la formación de minerales secundarios como marcasita y covelina. Estos

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

resultados destacan la capacidad de las cubiertas húmedas para establecer condiciones reductoras sostenidas, protegiendo eficazmente el medio ambiente de los impactos asociados al DAM durante largos períodos (Moncur et al., 2015).

### ***5.3.3. Microencapsulación y pasivación de minerales***

Estos procesos son particularmente adecuados para modificar la química superficial de los residuos mineros, ya que implican el empleo de agentes de pasivación diseñados para facilitar una serie de reacciones químicas en las superficies de los minerales de sulfuro metálico, formando así una capa densa de película de óxido inerte sobre la superficie de los minerales, contribuye a reducir su reactividad química. por lo anterior, se han descubierto avances significativos en la gestión del impacto ambiental de las rocas residuales (WR) generadoras de ácido en la minería de cobre tipo pórfido. La propuesta con la desulfurización efectiva de las WR utilizando tecnologías de flotación, como celdas Denver para partículas finas y HydroFloat® para partículas gruesas, sin necesidad de molienda. Este enfoque no solo redujo el contenido de azufre en las fracciones de WR, sino que también minimizó el potencial de generación de drenaje ácido de minas (AMD), como lo demuestran los niveles de pH neutro y el comportamiento geoquímico estable durante las pruebas cinéticas. Además, los concentrados ricos en azufre obtenidos presentan oportunidades para una disposición segura o valorización, incluyendo usos potenciales en la producción de ácido sulfúrico y otras aplicaciones industriales. Estos hallazgos subrayan la viabilidad de incorporar tecnologías proactivas y en proceso en la gestión de WR, promoviendo la sostenibilidad y una producción más limpia en el sector minero (Botero et al., 2024). Del mismo modo, se identificó que el uso de agentes hidrofóbicos como el ácido esteárico es una solución viable para mitigar los efectos ambientales negativos de los residuos sulfurosos, además de facilitar su almacenamiento seguro en el subsuelo a largo plazo. En los estudios realizados este método permitió la

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

modificación efectiva de las propiedades químicas superficiales de los residuos, logrando la formación de una capa protectora de óxido inerte en la superficie de los minerales de sulfuro. Este recubrimiento no solo impidió la interacción del mineral con agua y oxígeno, reduciendo significativamente el potencial de generación de drenaje ácido de mina (AMD), sino que también mejoró la estabilidad química de los residuos (Çinku & Akkaya, 2024).

### *5.3.4. Neutralización por Aplicación de elementos alcalinos*

Los procesos de neutralización han demostrado ser altamente eficientes en los procesos de prevención, especialmente en ambientes donde la oxidación de minerales sulfurados, como la pirita, genera pH extremadamente bajos y una elevada concentración de metales pesados. Una opción desarrollada involucra el uso de agentes neutralizantes como el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxidos de calcio, estos elementos han permitido incrementar el pH de las soluciones ácidas a valores cercanos a la neutralidad, facilitando la precipitación de iones metálicos en forma de hidróxidos insolubles. Estos hidróxidos reducen significativamente la movilidad de metales tóxicos como el hierro, el cobre y el zinc, disminuyendo su impacto ambiental. Adicionalmente, la implementación de métodos que combinan la neutralización con la formación de recubrimientos pasivos en la superficie de los minerales ha demostrado un control más prolongado de la generación de AMD, maximizando la estabilidad química de los residuos y contribuyendo a la sostenibilidad de las operaciones mineras a largo plazo. Estos resultados subrayan la importancia de adoptar tecnologías basadas en alcalinos para el manejo efectivo de residuos mineros ricos en sulfuros (Bessho et al., 2011).

Por otra parte, hay estudios desarrollados que evalúan los procesos de neutralización mediante el uso de la piedra caliza, que han demostrado una significativa eficacia en el control a largo plazo del drenaje ácido de mina (AMD). Las pruebas en columnas de lixiviación y las

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

pruebas de campo han evidenciado una reducción de más del 90% en las tasas de generación de ácido sulfúrico cuando el pH se mantiene por encima de 6. Logrando que la piedra caliza no solo neutraliza el ácido generado, sino que también facilite la formación in situ de minerales secundarios como calcita y yeso, los cuales estabilizan químicamente los residuos mineros y actúan como barreras pasivas en la superficie de minerales reactivos como la pirita. Además, el uso de soluciones saturadas de piedra caliza ha permitido recuperar y mantener el pH del efluente en valores neutros, demostrando ser una estrategia viable para reducir significativamente las tasas de oxidación de sulfuros y minimizar el impacto ambiental de los residuos mineros a largo plazo. Estos hallazgos subrayan el potencial de los elementos alcalinos no solo para la neutralización inmediata, sino también para la pasivación sostenida de residuos ácidos en entornos mineros (Smart et al., 2010).

### **5.4. Control Biológico**

#### **5.4.1. *Inhibición de microorganismos con biocidas***

el uso de biocidas para la inhibición de microorganismos son una buena opción en la reducción de actividades metabólicas críticas en bacterias oxidantes de azufre, como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*. Estas especies, clave en la aceleración de la oxidación de sulfuros y la liberación de metales pesados, son sensibles a ciertos biocidas que interrumpen su capacidad catalítica en reacciones redox del ciclo del azufre. Ensayos en laboratorio y a escala de campo han mostrado que la aplicación controlada de biocidas no solo reduce significativamente la generación de ácido, sino que también limita la proliferación de biofilms bacterianos en los desechos mineros. Estos hallazgos resaltan el potencial de los biocidas como una herramienta complementaria en estrategias integradas para el manejo de DAM (véase

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

Apéndice E), al minimizar tanto los impactos ambientales como los costos de tratamiento asociados (Bhandari & Choudhary, 2022).

### *5.4.2. Uso de compuestos orgánicos para limitar oxidación*

Los recubrimientos orgánicos hidrofóbicos sobre minerales sulfurados representan una estrategia prometedora para reducir la oxidación de estos minerales. Productos como el oleato de sodio han demostrado su capacidad para formar recubrimientos hidrofóbicos sobre la superficie de la pirita, evitando su oxidación por un periodo de hasta 30 días, con una efectividad mejorada cuando la solución es reaplicada cada 5 días (Jiang et al., 2000). Asimismo, la materia orgánica natural (NOM), incluyendo ácidos húmicos, oxálicos y lignina, ha mostrado capacidad pasivadora al limitar la oxidación de la pirita mediante la formación de compuestos como sulfato férrico hidratado e hidróxidos férricos que crean una capa hidrofóbica en la superficie del mineral (Açai et al., 2009).

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### 6. Mineralogía de los pasivos ambientales en Colombia

#### 6.1. Minería de oro

El oro actualmente se posiciona como uno de los principales metales extraídos en Colombia. Ubicándose principalmente las cuencas auríferas en las regiones Andina y Pacífica. Destacándose en la región andina minas en la zona norte de Antioquia, cuya composición mineralógica se caracteriza por presentar alto contenido de cuarzo, seguido por moscovita (11%), pirita (7%) y feldespato potásico (4.5%) y como minerales minoritarios biotita (1%), albita y calcita (0.7%), así como esfalerita y rutilo (0.2%) (Rojas-Reyes & Echeverry-Vargas, 2021) (véase Apéndice F). por otra parte en las minas de Santander, específicamente en Vetas, se forma una paragénesis compleja compuesta por cuarzo, sulfuros como pirrotina, pirita, tenantita, galena, esfalerita y trazas de molibdenita, además de óxidos como magnetita-ilmenita, y minerales en menor proporción como sericita, adularia, caolinita y turmalina (Sonia Rojas et al., 2020).

Para la zona pacífica en las minas de Nariño, revela una significativa mineralización aurífera conformada por electrum, un oro en aleación con plata con un contenido de Ag superior al 20 % en peso. Este electrum está estrechamente asociado con sulfuros, especialmente arsenopirita y pirita arseniosa, y se deposita en un ambiente controlado por condiciones reductoras y débilmente ácidas (pH 3.2-4.2). El patrón de alteración hidrotermal incluye zonas argílicas, dominadas por caolinita y esmectita, y zonas propilíticas, ricas en carbonatos y epidota. Las venas del depósito, principalmente de cuarzo, contienen minerales de mena como pirita, arsenopirita, calcopirita y galena. (Molano & Shimazaki, 2003).

Asimismo, en el valle del Cauca en las minas El Retiro y Cueva loca los depósitos de relaves de las minas revelaron una composición dominada por minerales primarios como cuarzo, anfíbol y clorita, junto a cantidades menores de pirita, calcopirita y galena. En donde en El Retiro,

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

los depósitos presentan mayor proporción de óxidos de hierro, como hematita y goethita, mientras que en Cueva Loca predominan los carbonatos debido a la alteración propilítica (Cervera Acosta et al., 2008).

### **6.2. Minería de carbón**

las principales zonas carboníferas de Colombia presentan una variación significativamente en sus composiciones mineralógicas que depende principalmente de las interacciones entre fuente hídricas y las litologías regionales. Las fuentes hídricas anexas a las zonas de actividad minera reflejan procesos geoquímicos que están expuestas a la disolución de minerales evaporíticos (halita, yeso), carbonatos (calcita, dolomita) y silicatos (plagioclasa), así como la presencia de pirita y la reducción de sulfatos que pueden oxidarse. En áreas como La Guajira, predomina una influencia marina, caracterizada por altos contenidos de cloruros, sodio y sulfatos que generan facies hidro químicas  $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ . En Córdoba, las facies principales son  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , influenciadas por rocas calcáreas y yacimientos de ferro-níquel. Y finalmente, en Norte de Santander, Boyacá y Cundinamarca, alta presencia de pirita y altos niveles de sulfatos y bicarbonatos, lo que provoca procesos de oxidación que disminuyen el pH y la disolución de yeso y carbonatos (Cortes et al., 2022). En la zona minera de Zipaquirá carbón extraído de este distrito se caracteriza por un bajo contenido de azufre total (0,84%); no obstante, en ciertas franjas se encuentra asociado con elevados porcentajes de pirita (24-61%), lo que incrementa significativamente el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM). Además, se ha observado una correlación entre los contenidos de metales como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  con las concentraciones de sulfato. Este fenómeno se explica por la composición química del DAM, donde el bajo pH, causado por la formación de ácido sulfúrico, intensifica la disolución de minerales presentes en el entorno geológico (Ochoa, 2020).

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### **6.3. Minería de ferroníquel**

En el norte del país se concentra el principal desarrollo minero de extracción de ferro-níquel, siendo la zona de Cerro matoso y Planeta rica en el departamento de Córdoba la que revelan altas concentración de óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), junto a otros elementos como  $\text{SiO}_2$  y  $\text{MgO}$ ., Además de óxidos de níquel ( $\text{NiO}$ ) acompañado de otros minerales como  $\text{MnO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . siendo esta zona minera abundante en óxidos y otros elementos del grupo platino (PGE), en donde la concentración de cada uno va variando dependiendo de la zona del perfil de meteorización (Tobón et al., 2020) ( véase Apéndice G).

### **6.4. Minería de piedras preciosas**

La explotación de piedras preciosas en Colombia, se amalgama principalmente en el departamento de Boyaca, donde la zona esmeraldera de esta región del país presenta una composición mineralógica que está asociada principalmente con la albitización y carbonatización intensivas, observándose minerales como albita, calcita, dolomita y cuarzo como minerales predominantes, acompañados por cantidades menores de fluorapatita, xenotima, turmalina, rutilo, esfalerita y pirita. En las zonas productivas, los cristales de esmeralda están íntimamente relacionados con dolomita, calcita de "piel de durazno", cuarzo, parisita-(Ce) y fluorita (Romero Ordóñez et al., 2021) (véase Apéndice H).

## 7. Aplicabilidad en Colombia

La composición mineralógica de los residuos mineros en Colombia abarca una diversidad geoquímica y geológica inmensa, que incluye minerales sulfurados como la pirita, calcopirita y arsenopirita, siendo estos un factor determinante en la formación de DAM. Por ende, esto enfatiza la necesidad de implementar estrategias de prevención adaptadas a las características específicas de cada tipo de explotación minera.

Los métodos de pasivación revisados abarcan estrategias químicas, físicas y biológicas. Por ejemplo, En zonas como Antioquia, donde la minería de oro es predominante, los residuos presentan altos contenidos de cuarzo, pirrotina, pirita y sulfuros arseniosos, lo que incrementa el potencial de generación de DAM. Este contexto subraya la relevancia de implementar cubiertas secas y sellados para prevenir la exposición al oxígeno y al agua, estrategias que han mostrado resultados favorables en otras regiones del mundo con características similares.

En contraste, las zonas carboníferas de Cundinamarca y Boyacá presentan residuos ricos en pirita, donde las tasas de oxidación generan altos niveles de acidez y lixiviación de metales pesados como hierro y zinc. Los datos recolectados indican que el uso de neutralizantes como la piedra caliza y el carbonato de calcio podría estabilizar estos residuos al incrementar el pH y promover la formación de compuestos insolubles. Además, las pruebas realizadas en otros países demuestran que estos materiales pueden actuar como barreras pasivas, lo que justifica su aplicación adaptada a las condiciones locales. En cuanto a los métodos de neutralización, se observó que la aplicación de carbonatos y óxidos de calcio no solo incrementa el pH de las soluciones ácidas, sino que también promueve la formación de compuestos insolubles que estabilizan químicamente los residuos. Sin embargo, estos procesos pueden generar subproductos

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

secundarios, como la formación de sulfuros insolubles, que deben ser gestionados adecuadamente para evitar impactos ambientales adicionales.

La minería de ferroníquel en Cerro Matoso y Planeta Rica, caracterizada por residuos ricos en óxidos de hierro y níquel, requiere estrategias complementarias como la microencapsulación de minerales mediante agentes pasivadores. Estudios recientes destacan la efectividad del ácido esteárico y otras soluciones químicas para formar capas protectoras que minimizan la reactividad de los residuos. Estos enfoques son esenciales para garantizar la sostenibilidad de las operaciones mineras en estas áreas.

En las zonas esmeralderas de Boyacá, los residuos presentan una composición mineralógica dominada por calcita, dolomita y fluorapatita, lo que ofrece oportunidades para aplicar cubiertas húmedas. Las experiencias internacionales en Canadá y Australia sugieren que estas cubiertas pueden mantener condiciones reductoras estables, limitando la oxidación de los sulfuros. Sin embargo, es determinante considerar las variaciones locales en profundidad y disponibilidad de agua para maximizar su efectividad.

El control biológico, mediante la inhibición de microorganismos oxidantes de sulfuros, también muestra potencial en zonas como La Guajira, donde la influencia marina incrementa la salinidad de los residuos. La aplicación de biocidas debe ser evaluada cuidadosamente para evitar impactos adversos en los ecosistemas circundantes, aunque su eficacia en la reducción de biofilms bacterianos ha sido demostrada en laboratorio.

Finalmente, la implementación de estrategias de mitigación debe considerar las particularidades de cada región y además la necesidad de aplicar un enfoque integral que combine múltiples estrategias de mitigación y la participación de diferentes actores, incluyendo

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

comunidades locales, entidades gubernamentales y la industria minera. Esto es particularmente relevante en el contexto colombiano, donde las condiciones geográficas, sociales y políticas afectan la viabilidad de las soluciones propuestas.

## 8. Conclusiones

Evitar la generación de drenajes ácidos de mina (DAM) constituye un desafío ambiental significativo en la minería colombiana, esto derivado de la composición mineralógica de los residuos mineros y su impacto adverso en la calidad del agua. Por ende, esta investigación logró proponer métodos de pasivación que presentan un alto potencial de adaptación al contexto colombiano, como las cubiertas secas y húmedas, la neutralización química y el control biológico. Lo que permitió ofrecer estrategias y soluciones viables para mitigar la generación de DAM, pero que requieren adaptaciones específicas para su implementación debido a la diversidad de condiciones ambientales en las zonas mineras del país. Factores como la composición de los materiales empleados, las condiciones climáticas y las características geográficas desempeñan un papel importante en la efectividad de estas tecnologías, Además de investigaciones complementarias que evalúen la viabilidad económica y ambiental de los métodos propuestos, así como su impacto a largo plazo en los ecosistemas locales.

La solución a esta problemática demanda un enfoque integral que combine las tecnologías analizadas con nuevas soluciones innovadoras, respaldadas por un monitoreo constante y la cooperación activa de comunidades locales, empresarios y autoridades gubernamentales. Logrando así que este enfoque colaborativo garantice la sostenibilidad ambiental, la responsabilidad social y minimización de los impactos adversos asociados a la actividad minera, que contribuyen a un desarrollo minero más responsable y respetuoso hacia el medio ambiente en el país.

## **9. Recomendaciones**

Para implementar medidas en Colombia es fundamental impulsar nuevas investigaciones que permitan desarrollar e implementar tecnologías específicas para la gestión del drenaje ácido de mina (DAM) en Colombia. La diversidad geológica y mineralógica del país requiere soluciones personalizadas que tengan en cuenta las características locales de cada región minera. Invertir en estudios científicos permitirá identificar estrategias más efectivas y sostenibles, y métodos adaptados a los ecosistemas colombianos.

Además, las investigaciones deben enfocarse en evaluar el impacto a largo plazo de estas tecnologías, asegurando que sean viables tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Promover la colaboración entre universidades, centros de investigación, el sector minero y las comunidades locales garantizará no solo la transferencia de conocimiento, sino también la creación de soluciones prácticas que protejan los recursos hídricos y la biodiversidad del país. Sin investigación continua, es imposible avanzar hacia una minería más responsable y adaptada a los retos únicos de Colombia.

**Referencias bibliográficas**

- Abfertiawan, M.S., Palinggi, Y., Handajani, M., Pranoto, K., Atmaja, A., 2020. Evaluation of Non-Acid-Forming material layering for the prevention of acid mine drainage of pyrite and jarosite. *J. Heliyon.*, 6, e05590. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020. e05590>.
- Abreu, A. T. d., Faria, E. M. d., Guimarães, J. A. C., Leite, A. d. L., & Lena, J. C. d. (2012). Avaliação em laboratório do uso de sistemas de coberturas alcalinas para prevenção da drenagem ácida de mina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36.
- Ačai, P., Sorrenti, E., Gorner, T., Polakovič, M., Kongolo, M., & de Donato, P. (2009). Pyrite passivation by humic acid investigated by inverse liquid chromatography. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 337(1), 39-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.11.052>
- Aguilar-Pesantes, A., Peña Carpio, E., Vitvar, T., Koepke, R., & Menéndez-Aguado, J. M. (2021). A Comparative Study of Mining Control in Latin America. *Mining*, 1(1), 6-18.
- Albert, Teixeira, Cardoso., Fernando, Mainardi, Fan. (2024). 2. Mining's legacy: Unraveling the impacts of acid mine drainage on the rivers and streams of the Santa Catarina coal region, Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, doi: 10.21715/gb2358-2812.202438002
- Arismendy, S. A. (2020). Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia [Trabajo de Grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- Baker-Austin, C., Dopson, M., 2007. Life in acid: pH homeostasis in acidophiles. *J. Trends Microbiol.* 15, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.02.005>.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

- Bessho, M., Wajima, T., Ida, T., & Nishiyama, T. (2011). Experimental study on prevention of acid mine drainage by silica coating of pyrite waste rocks with amorphous silica solution. *Environmental Earth Sciences*, 64(2), 311-318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-010-0848-0>
- Bhandari, P., & Choudhary, S. (2022). Insights on the Role of Sulfur Oxidizing Bacteria in Acid Mine Drainage Biogeochemistry. *Geomicrobiology Journal*, 39(3-5), 270-281. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1985190>
- Botero, Y. L., Demers, I., Cisternas, L. A., Ávila, A., & Benzaazoua, M. (2024). A cleaner production strategy for acid mine drainage prevention of waste rock: A porphyry copper case. *International Journal of Mining Science and Technology*, 34(8), 1163-1177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2024.07.012>
- Caraballo, M.A., Rotting, T.S., Macías, F., Nieto, J.M., Ayora, C., 2009. Field multi-step limestone and MgO passive system to treat acid mine drainage with high metal concentrations. *J. Appl. Geochem.* 24, 2301–2311. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.007>.
- Cervera Acosta, J. M., Molano Mendoza, J. C., Gloria Prieto, R., & Neira León, G. A. (2008). Caracterización Mineralógica y Química de los depósitos de relaves (Colas de Proceso) en los sectores Auríferos de Cueva Loca (Buga) y El Retiro (Ginebra - Guacarí), Departamento del Valle del Cauca. *Geologica colombiana*, 33, 47.
- Chaparro, L. C. (s. f.). Descripción del manejo integral de drenajes ácidos de mina a nivel internacional [Especialización en preservación y conservación de los recursos naturales]. universidad pontificia bolivariana.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

- Çinku, K., & Akkaya, U. G. (2024). Study of hydrophobic cemented paste backfill (H-CPB) to prevent sulphate attack. *Heliyon*, 10(22), e39588. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39588>
- Cortes, J., Castro, A., Arboleda, G., Sepulveda, V., Piragauta, N., & Higuera, O. (2022). Hydrogeological and hydrogeochemical evaluation of groundwaters and surface waters in potential coalbed methane areas in Colombia. *International Journal of Coal Geology*, 253, 103937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103937>
- Demers, I., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Bouda, M., Awoh, S., Lortie, S., & Gagnon, M. (2017). Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: Laboratory column tests and intermediate scale field tests. *Minerals Engineering*, 107, 43-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.017>
- Dudi, Nasrudin, Usman., Sri, Widayati., Sriyanti, Sriyanti., Era, Setiawan. (2019). Rock Formation Acid Mine Drainage in Epithermal Gold Mineralization, Pandeglang, Banten Province. 4(4):271-276. doi: 10.25299/JGEET.2019.4.4.3903
- Ericsson, M., & Löf, O. (2019). Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, 32(2), 223-250. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>
- Jiang, C. L., Wang, X. H., & Parekh, B. K. (2000). Effect of sodium oleate on inhibiting pyrite oxidation. *International Journal of Mineral Processing*, 58(1), 305-318. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00045-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00045-9)

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

- Johnson, DB, Hallberg, KB, 2005. Opciones de remediación del drenaje ácido de minas: una revisión. *J. Sci. Total. Environ.* 338, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>.
- Lessard, F., Bussi`ere, B., Cot ^ `e, J., Benzaazoua, M., Boulanger-Martel, V., Marcoux, L., 2018. Integrated environmental management of pyrrhotite tailings at Raglan Mine: Part 2 desulphurized tailings as cover material. *J. Clean. Prod.* 186, 883–893. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.132>.
- Li Lin, S. (2013). *Medición del Potencial de Generación de Agua Ácida para un Relave en la Zona Central del Perú y sus Necesidades de Neutralización* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Li, X., Ren, H., Xu, Z., Chen, G., Zhang, S., Zhang, L., & Sun, Y. (2023). Practical application for legacy acid mine drainage (AMD) prevention and treatment technologies in karst-dominated regions: A case study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 258, 104238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104238>
- Lu, Y., Yang, J., Wu, Y., Lu, R., Li, Y., Zhang, L., & Guo, J. (2024). Study on the Properties of All-Solid Waste Fluidized Filling Materials Applied to Mine Void Area Filling Engineering. *Materials*, 17(21).
- Mäkitalo, M., Maurice, C., Jia, Y., & Öhlander, B. (2014). Characterization of Green Liquor Dregs, Potentially Useful for Prevention of the Formation of Acid Rock Drainage. *Minerals*, 4(2), 330-344.
- Mancarella, D., Simeone, V., 2012. Capillary barrier effects in unsaturated layered soils, with special reference to the pyroclastic veneer of the Pizzo d'Alvano, Campania, Italy. *J. Eng. Geol. Environ.* 71, 791–801. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0419-6>.

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

- Masulli, M., Liu, Z.-L., Guo, F.-Z., Li, X., Sudhölter, E. J. R., & Kumar, N. (2022). Temperature effect on the dynamic adsorption of anionic surfactants and alkalis to silica surfaces. *Petroleum Science*, 19(4), 1866-1876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.008>
- Molano, J. C., & Shimazaki, H. (2003). Mineralogía, geoquímica y algunos aspectos genéticos de la mina El Diamante- Nariño (Colombia). *Boletín de Geología*, 25(40), 105-116.
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Lindsay, M. B. J., Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (2015). Long-term mineralogical and geochemical evolution of sulfide mine tailings under a shallow water cover. *Applied Geochemistry*, 57, 178-193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.012>
- Ochoa, O. y. V. (2020). Evaluación de un biorreactor pasivo durante la remediación de drenajes ácidos de mina del distrito minero de Zipaquirá (Colombia). <https://doi.org/10.11144/javeriana.10554.19645>
- Ohene Karikari-Yeboah. Acid Rock Drainage in Pyrite-rich Rock Formation at the Subsurface, 07 February 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2524413/v1>]
- Ojonimi, T. I., Okeme, I. C., Chanda, T. P., & 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>
- Pereira Bolaños, C. A., & Ariza Ruiz, E. D. (2023). Characterization of environmental liabilities: the Colombian case. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review*

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

- / Revista Internacional de Humanidades, 19(3), 1-12.  
<https://doi.org/10.37467/revhuman.v19.4923>
- Ríos, C.A., Williams, C.D., & Roberts, C.L. (2008). Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites. *Journal of Hazardous Materials* 156, 23–35
- Rojas-Reyes, N. R., & Echeverry-Vargas, L. (2021). Characterization of high-grade gold deposits in northeastern Antioquia-Colombia. *Dyna*, 88(217), 68-74. (IN FILE)
- Romero Ordóñez, F. H., González-Durán, A. F., García-Toloza, J., Rotlewicz Cohen, J., Cedeño Ochoa, C. J., Alvarado González, H. R., & Angarita Sarmiento, L. G. (2021). Mineralogy and Fluid Inclusions of the Cunas Emerald Mine, Maripí, Boyacá, Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 25(2), 139-156.  
<https://doi.org/10.15446/esrj.v25n2.90210>
- Schmitz, D., Anlauf, R., Rehrmann, P., 2013. Effect of air content on the oxygen diffusion coefficient of growing media. *J. Am. Plant Sci.* 4, 955–963. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.45118>.
- Senese Leiva, A. A., Negrelli, M. M., & Hidalgo, N. (2022). Predicción y estudio de drenaje ácido de mina sobre mineral de escombrera. *Revista Colombiana de Materiales*(18), 18. <https://doi.org/10.17533/RCM/udea.rcm.n18a01>
- Smart, R. S. C., Miller, S. D., Stewart, W. S., Rusdinar, Y., Schumann, R. E., Kawashima, N., & Li, J. (2010). In situ calcite formation in limestone-saturated water leaching of acid rock waste. *Science of The Total Environment*, 408(16), 3392-3402.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.028>

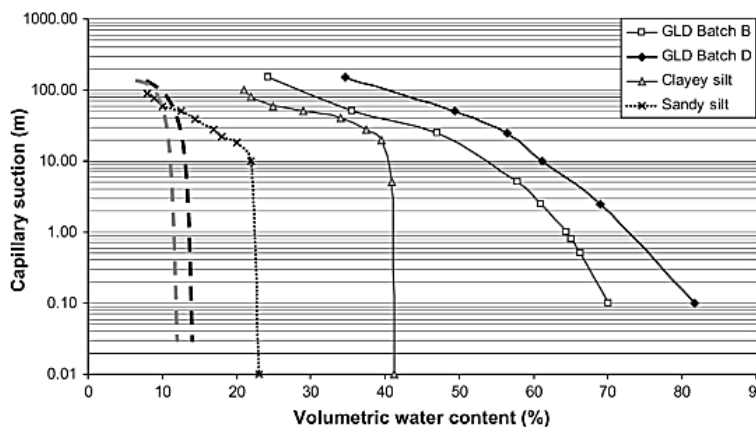
## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

- Sonia Rojas, B., Molano, J. C., & Cramer, T. (2020). Petrography, microthermometry, and isotopy of the gold veins from Vetás, Santander (Colombia) [Petrografía, microtermometría e isotopía de las vetas auríferas de Vetás, Santander (Colombia)]. *Earth Sciences Research Journal*, 24(1), 5-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/esrj.v24n1.63443>
- Tobón, M., Weber, M., Proenza, J. A., Aiglsperger, T., Betancur, S., Farré-de-Pablo, J.,...Pujol-Solà, N. (2020). Geochemistry of Platinum-Group Elements (PGE) in Cerro Matoso and Planeta Rica Ni-Laterite deposits, Northern Colombia - Geoquímica de los Elementos del Grupo del Platino (EGP) en los depósitos lateríticos de Ni de Cerro Matoso y Planeta Rica, Norte de Colombia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(3), 1-26.
- Tolonen, E.T., Sarpola, A., Hu, T., Ramo, J., Lassi, U., 2014. Acid mine drainage treatment using by-products from quicklime manufacturing as neutralization G. Chen et al.
- Tu, Z., Wu, Q., He, H., Zhou, S., Liu, J., He, H.,...Reinfelder, J. R. (2022). Reduction of acid mine drainage by passivation of pyrite surfaces: A review. *Science of The Total Environment*, 832, 155116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155116>
- You, G.-x., Yu, C.-c., Lu, Y., Dang, Z., 2013. Evaluation of the protective effect of polysiloxane coating on pyrite with electrochemical techniques. *J. Electrochim. Acta*. 93, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.01.098>.
- Zhang, M.L., Wang, H.X., 2017. Utilization of bactericide technology for pollution control of acidic coal mine waste. *J. Adv. Eng. Res.* 129, 667–670.

# APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

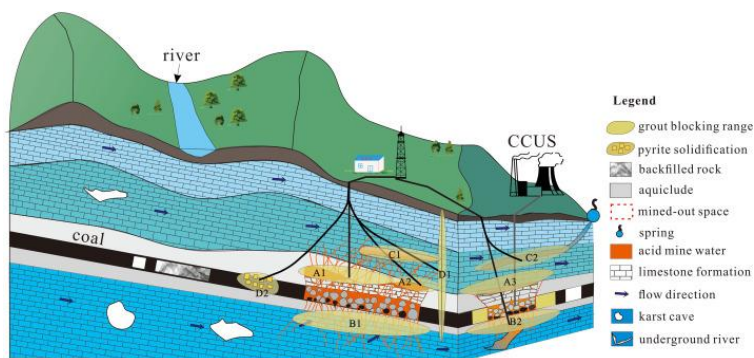
## Apéndices

**Apéndice A.** *Análisis de retención de agua de cinco capas de sellado de arcilla y subproductos alcalinos (GLD).*



*Nota.* Tomado de: Mäkitalo, M., Maurice, C., Jia, Y., & Öhlander, B. (2014). Characterization of Green Liquor Dregs, Potentially Useful for Prevention of the Formation of Acid Rock Drainage.

**Apéndice B.** *Diagrama tridimensional del proyecto de reducción de iones de contaminación por AMD mediante inyección de lechada para áreas A, B, C Y D.*

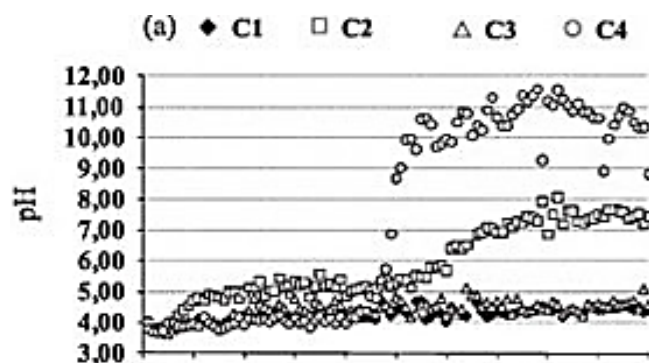


*Nota.* Tomado de: Li, X., Ren, H., Xu, Z., Chen, G., Zhang, S., Zhang, L., & Sun, Y. (2023). Practical application for legacy acid mine drainage (AMD) prevention and treatment technologies in karst-dominated regions: A case study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 258, 104238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104238>

## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

### Apéndice C. Comportamiento del pH de los residuos mineros estériles con coberturas en seco:

*C1 residuo minero sin cobertura; C2 residuo minero con cal; C3 residuo minero con calcáreo; C4 residuo minero con lama roja.*

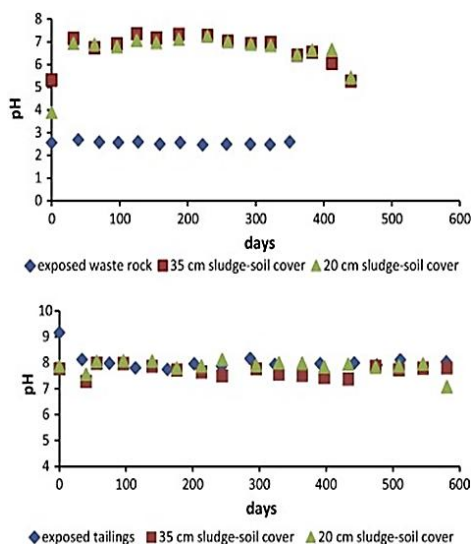


*Nota.* Tomado de: Abreu, A. T. d., Faria, E. M. d., Guimarães, J. A. C., Leite, A. d. L., & Lena, J. C. d. (2012). Avaliação em laboratório do uso de sistemas de coberturas alcalinas para prevenção da drenagem ácida de mina.

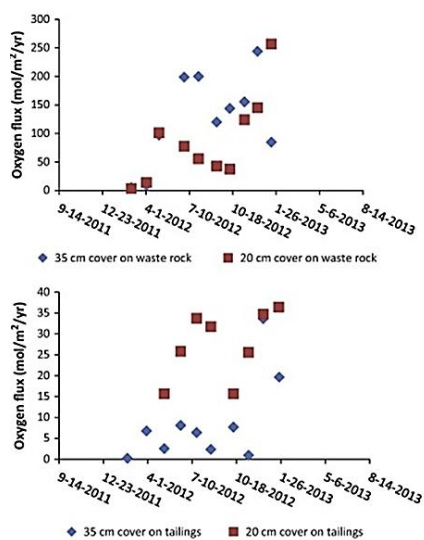
### Apéndice D. a) Comportamiento del pH en roca estéril y relaves cubiertos por lodos-suelo; b)

*Comportamiento del flujo de oxígeno en roca estéril y relaves cubiertos por lodos-suelo*

a)



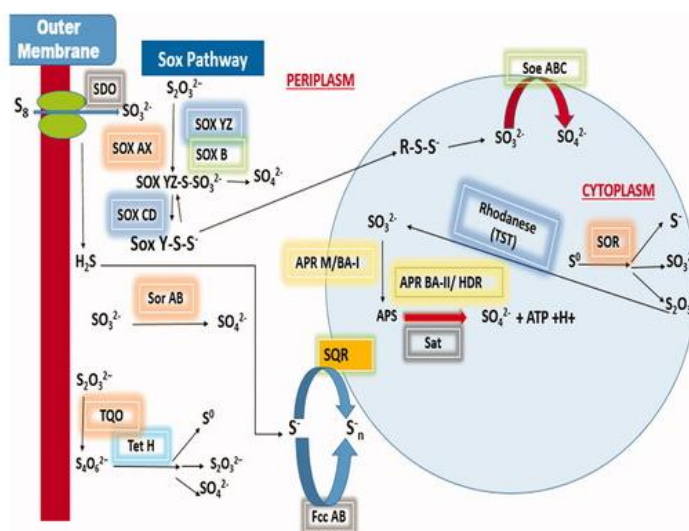
b)



## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

*Nota.* Tomado de: Demers, I., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Bouda, M., Awoh, S., Lortie, S., & Gagnon, M. (2017). Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: Laboratory column tests and intermediate scale field tests.

**Apéndice E.** *Esquema básico de los principales reactivos y productos de una variedad de vías de oxidación de azufre presentes en bacterias oxidantes de azufre*



*Nota.* Tomado de: Bhandari, P., & Choudhary, S. (2022). Insights on the Role of Sulfur Oxidizing Bacteria in Acid Mine Drainage Biogeochemistry.

**Apéndice F.** *Composición mineralógica de los depósitos de oro: Qz = cuarzo; Fsp = feldespato; Ms = moscovita; Ab = albita; Bt = biotita; Pl = plagioclasa; Kln = caolinita; Amp = anfíbolita; Cal = calcita; Gth = goetita; Chl = clorita; Grt = granate; Gy = pirita; Po = pirrotina; Gn = galena; Sp = esfalerita; Rt = rutilo; Oth = otros.*

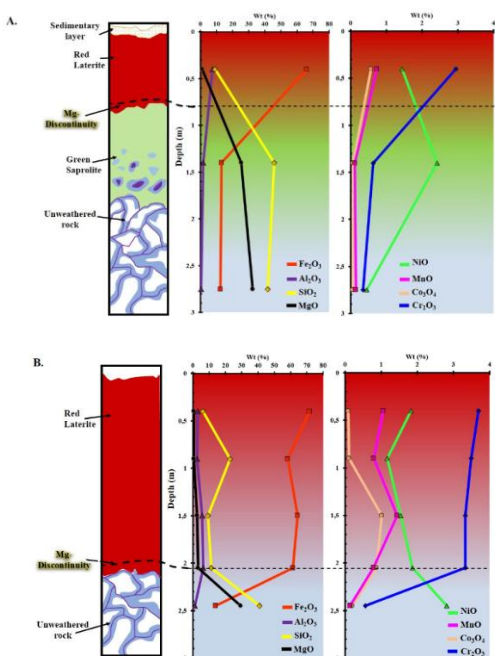
## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

Mineral	M1 [%]	M2 [%]	M3 [%]	M4 [%]	M5 [%]	M6 [%]	M7 [%]	M8 [%]	M9 [%]
Qz	77,9	47,9	32,9	59,3	68,4	46,8	51,2	56,7	57,1
Fsp	0,8	8,3	22,0	5,0	2,7	12,6	1,5	1,2	3,5
Ms	2,8	16,5	21,0	15,1	7,2	17,0	6,5	5,8	12,1
Ab	0,3	2,4	2,3	0,3	0,5	1,3	0,6	0,2	1,9
Bt	0,9	1,1	2,4	0,9	1,0	1,1	0,8	0,6	0,6
Pl	0,3	0,9	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3
Kln	0,9	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9	0,7	0,6	0,8
Amp	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,7	0,2	0,1	0,2
Cal	1,8	1,5	0,1	0,9	3,2	0,2	0,1	0,1	0,6
Gth	0,6	0,2	0,3	0,2	1,1	0,2	0,2	0,3	0,2
Chl	0,4	0,4	1,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Grt	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
Py	2,3	9,9	6,2	5,0	1,2	4,3	22,9	10,8	11,8
Po	0,2	0,6	0,2	0,3	0,1	0,2	0,8	0,4	0,6
Gn	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,8	4,1	0,9
Sp	0,1	0,0	0,1	0,6	0,0	0,2	2,8	2,2	3,3
Rt	0,1	0,4	0,6	0,2	0,1	6,4	0,1	5,7	0,1
Oth	9,6	8,0	8,3	9,8	12,1	7,3	10,2	10,8	5,8

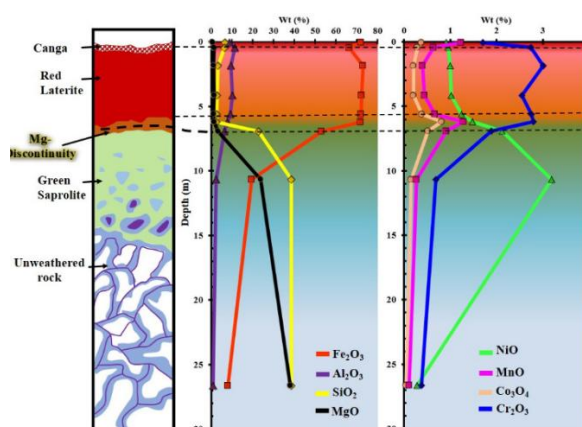
*Nota.* Tomado de: Rojas-Reyes, N. R., & Echeverry-Vargas, L. (2021). Characterization of high-grade gold deposits in northeastern Antioquia-Colombia.

### Apéndice G. Perfiles de meteorización en Cerro Matoso y planeta rica que muestran el patrón de distribución de elementos mayores y menores relevantes.

#### Cerro matoso



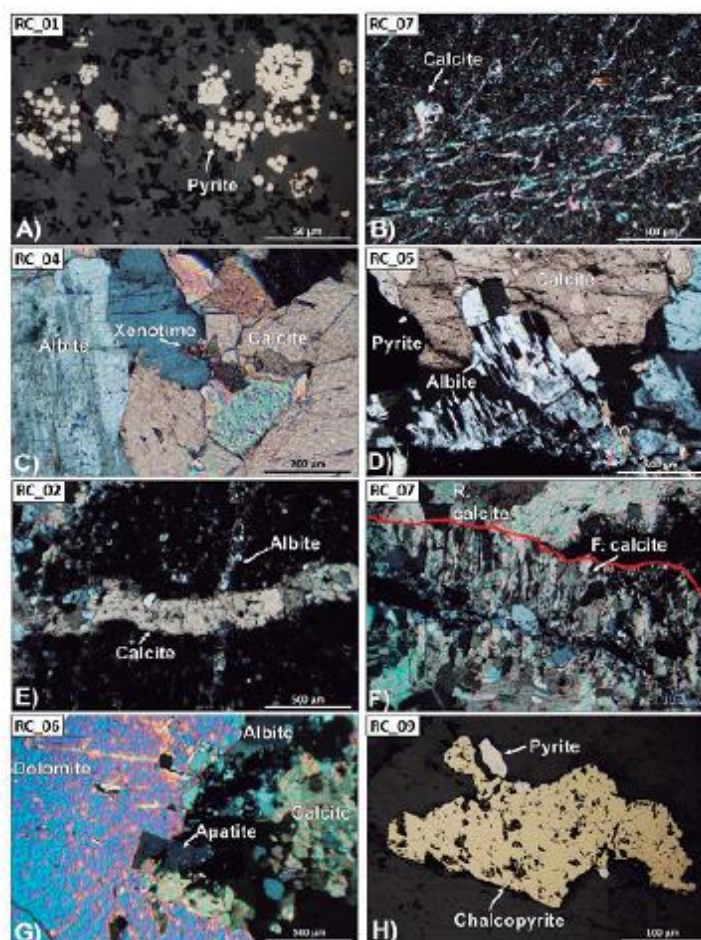
#### Planeta rica



## APLICACIÓN DE SISTEMAS DE PASIVACIÓN MINERA EN COLOMBIA

*Nota.* Tomado de: Tobón, M., Weber, M., Proenza, J. A., Aiglsperger, T., Betancur, S., Farré-de-Pablo, J.,...Pujol-Solà, N. (2020). Geochemistry of Platinum-Group Elements (PGE) in Cerro Matoso and Planeta Rica Ni-Laterite deposits, Northern Colombia

### Apéndice H. Fotomicrografías de vetas de esmeralda de la mina Cunas, zona esmeraldera Boyacá, Colombia.



*Nota.* Tomado de: Romero Ordóñez, F. H., González-Durán, A. F., García-Toloza, J., Rotlewicz Cohen, J., Cedeño Ochoa, C. J., Alvarado González, H. R., & Angarita Sarmiento, L. G. (2021). Mineralogy and Fluid Inclusions of the Cunas Emerald Mine, Maripí, Boyacá, Colombia.