

Análisis de alternativas para la gestión de los Drenajes Ácidos de Mina (DAM) en la industria de la minería de carbón en Boyacá

Maria Juliana Vanegas Rojas¹ Elisa María Avellaneda Díaz²

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una identificación y análisis de las alternativas más sostenibles en el ámbito ambiental y económico para el tratamiento de los drenajes ácidos de mina (DAM) generados por la minería de carbón en el departamento de Boyacá. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica en la base de datos Scopus, donde se seleccionaron 30 artículos publicados entre 2015 y 2025, con el fin de estructurar una matriz de análisis y posteriormente evaluarla mediante un análisis multicriterio que consideró la eficiencia de remoción de metales y sulfatos, la sostenibilidad ambiental, los costos de implementación y la aplicabilidad de las tecnologías.

Como resultado del proceso de revisión y evaluación, se identificaron tendencias claras en las tecnologías de tratamiento, diferenciadas entre métodos activos, evidenciando altos niveles de remoción de metales y una neutralización inmediata de la acidez, aunque, por otro lado, presentan limitaciones relacionadas con el uso continuo de reactivos, la generación de lodos y los elevados costos operativos. En contraste, las tecnologías pasivas y biológicas, especialmente aquellas que emplean humedales anaerobios, materiales locales de bajo costo y bacterias sulfato-reductoras, demostraron mayor sostenibilidad, menor dependencia de insumos externos y una eficiencia adecuada para condiciones similares a las de Boyacá.

El análisis permitió concluir que los sistemas pasivos basados en humedales anaerobios de flujo ascendente, complementados con materiales como caliza y ganga de carbón enriquecida con bacterias sulfato-reductoras, representan la alternativa más viable para el tratamiento del DAM en la región, ofreciendo un equilibrio entre eficiencia, bajo costo, aprovechamiento de recursos locales y operación sostenible, constituyendo una opción adecuada para apoyar la gestión ambiental en contextos mineros regionales.

¹ Estudiante Facultad de Ingeniería Ambiental – Universidad Santo Tomas Seccional Tunja.

² Docente Facultad de Ingeniería Ambiental - Universidad Santo Tomas Seccional Tunja / Grupo de Investigación GICAN.

ABSTRACT

In this study, an identification and analysis of the most environmentally and economically sustainable alternatives for the treatment of acid mine drainage (AMD) generated by coal mining in the department of Boyacá was carried out. A bibliographic review was conducted in the Scopus database, where 30 articles published between 2015 and 2025 were selected in order to structure an analysis matrix and subsequently evaluate it through a multicriteria analysis that considered the efficiency of metal and sulfate removal, environmental sustainability, implementation costs, and the applicability of the technologies.

As a result of the review and evaluation process, clear trends were identified in the treatment technologies, distinguishing active methods, which showed high levels of metal removal and immediate acid neutralization but, on the other hand, presented limitations related to the continuous use of reagents, sludge generation, and high operational costs. In contrast, passive and biological technologies, especially those that use anaerobic wetlands, low-cost local materials, and sulfate-reducing bacteria, demonstrated greater sustainability, lower dependence on external inputs, and adequate efficiency for conditions similar to those of Boyacá.

The analysis allowed concluding that passive systems based on upward-flow anaerobic wetlands, complemented with materials such as limestone and coal gangue enriched with sulfate-reducing bacteria, represent the most viable alternative for AMD treatment in the region, offering a balance between efficiency, low cost, use of local resources, and sustainable operation, constituting an appropriate option to support environmental management in regional mining contexts.

PALABRAS CLAVE

Minería de carbón; Drenaje ácido de mina; Mitigación; Tratamientos pasivos; Tratamientos activos

KEYWORDS

Coal mining; Acid mine drainage; Mitigation; Passive treatments; Active treatments

INTRODUCCIÓN

La minería de carbón representa una de las principales alternativas para el desarrollo económico a nivel mundial; sin embargo, esta actividad genera serios impactos ambientales y ecológicos, siendo uno de los más críticos la afectación de los recursos hídricos ocasionada por la contaminación derivada de los drenajes ácidos de mina (AMD) (Guo, Hu, Dong, et al., 2022). El AMD, también conocido como drenaje ácido de roca (ARD), se caracteriza por su bajo pH, altas concentraciones de sulfatos (SO_4^{2-}) y una elevada presencia de metales pesados como hierro, manganeso, cobre y zinc (Khan et al., 2022). Este fenómeno es resultado de la exposición y oxidación de minerales sulfurados, especialmente pirita, durante las actividades mineras (Mahanta et al., 2024). Los impactos del drenaje ácido de mina comprenden la destrucción de la vida acuática, la bioacumulación de elementos tóxicos en organismos y plantas, la pérdida de biodiversidad y, por último, representa graves riesgos para la salud de las poblaciones locales (Pondja et al., 2017).

En Colombia, la minería se ha establecido como una actividad fundamental para el desarrollo económico debido a la riqueza mineral del territorio (Vergara Buitrago & Rodríguez Aparicio, 2021). Específicamente, el departamento de Boyacá concentra el 18.5% de las unidades de producción minera del país, siendo la minería del carbón una de sus principales actividades económicas, sin embargo, los drenajes ácidos de mina (DAM) generados en esta región tienen un gran impacto ambiental debido a la presencia de iones sulfato (SO_4^{2-}), metales pesados y un pH bajo (Blanco-Zuñiga et al., 2022). Las fuentes hídricas de Boyacá están siendo afectadas por esta actividad, generando lixiviados y vertimientos con metales pesados que alteran las condiciones fisicoquímicas del agua, comprometiendo no solo las fuentes de agua potable, sino que también impide el reúso del agua para otras actividades productivas (Vergara Buitrago & Rodríguez Aparicio, 2021).

La problemática se ha consolidado como uno de los principales retos ambientales asociados a la minería del carbón, debido a su capacidad para alterar de manera significativa la calidad de los recursos hídricos y edáficos. En el caso de Boyacá, se han realizado estudios donde se identificaron altas concentraciones de metales peligrosos y metaloides como arsénico, manganeso, zinc, plomo y titanio en muestras cercanas a las minas. Además, el auge de la minería del carbón ha provocado cambios evidentes en los paisajes locales,

incluso en ecosistemas estratégicos como el páramo de Rabanal (Vergara Buitrago & Rodríguez Aparicio, 2021).

Ante la contaminación generada por el drenaje ácido de mina (AMD) en la minería de carbón de Boyacá, es necesario identificar estrategias sostenibles que mitiguen sus impactos y protejan tanto los ecosistemas como la salud humana, mediante la aplicación de técnicas y herramientas biológicas permiten evaluar la eficacia de los tratamientos, mientras que el desarrollo de soluciones de bajo costo brinda bases sólidas para implementar metodologías factibles, aplicables y transferibles a contextos reales. De este modo, el proyecto contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6 y el ODS 12, al impulsar acciones que garantizan la calidad del agua y fomentan una minería más responsable y sostenible fortaleciendo la gestión ambiental regional.

METODOLOGÍA

Fase 1: Revisión bibliográfica

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica orientada a recopilar y analizar información secundaria relevante sobre los drenajes ácidos de mina (DAM) generados por la minería de carbón. Para ello, se empleó la plataforma CRAI de la Universidad Santo Tomás, accediendo a la base de datos de acceso abierto SCOPUS, donde se realizaron búsquedas sistemáticas por medio de palabras clave de artículos científicos relacionados con el DAM en contextos departamentales, nacionales e internacionales, con el objetivo de identificar tendencias, impactos y avances en las estrategias de mitigación.

La selección de documentos se delimitó a publicaciones comprendidas entre los años 2015 a 2025, lo que permitió priorizar investigaciones actualizadas y con enfoques metodológicos más avanzados. Asimismo, se aplicaron filtros de acceso abierto con el fin de garantizar la disponibilidad de la información para consulta y análisis.

Figura 1. Revisión bibliográfica



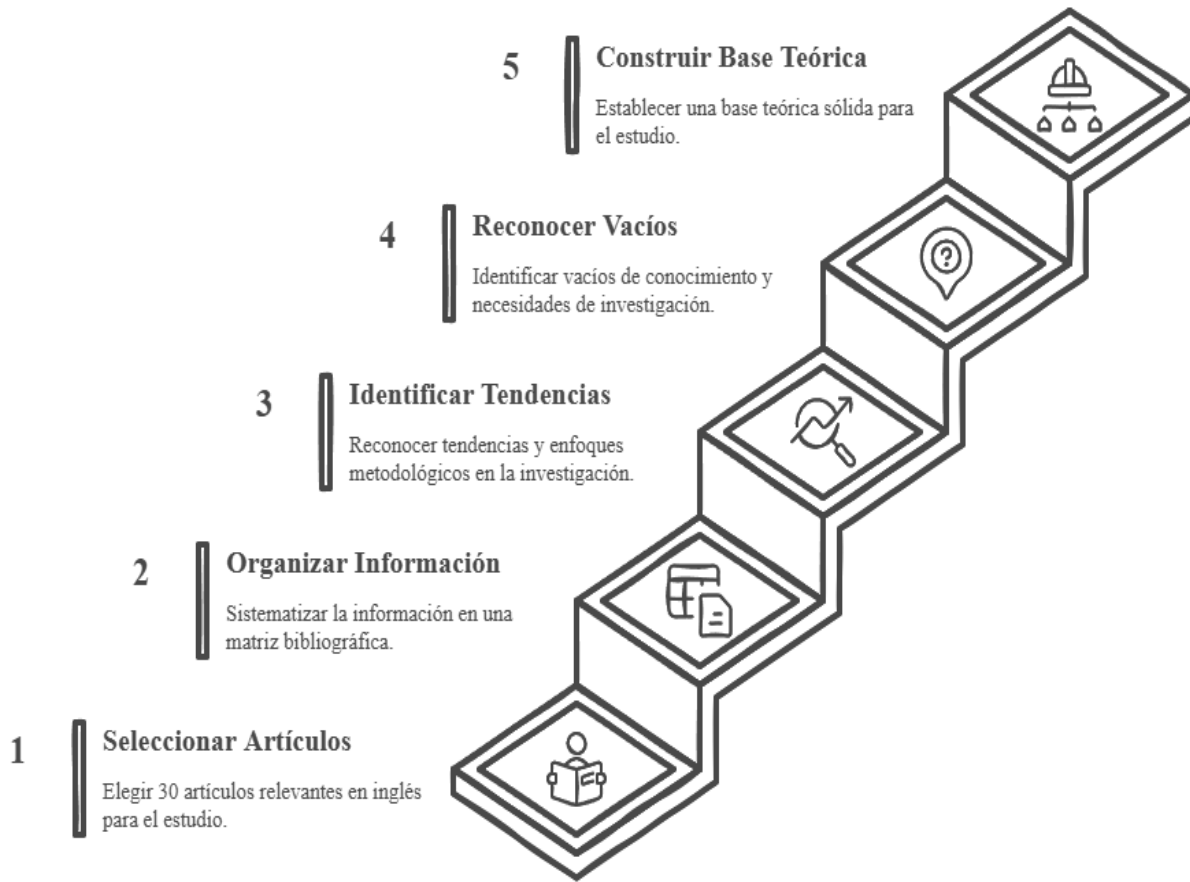
Fuente. Autor

Fase 2: Construcción del estado del arte

En la segunda fase se seleccionaron 30 artículos en inglés que cumplieran con los criterios de pertinencia y relevancia para el estudio. Posteriormente, la información fue organizada y sistematizada en una matriz de análisis bibliográfico, en la cual se caracterizó cada documento a partir de variables como el título del artículo, autores, resumen, palabras clave, año de publicación y un aporte crítico realizado por el investigador.

Esta sistematización permitió construir un estado del arte que facilitó la identificación de tendencias investigativas, enfoques metodológicos y hallazgos relacionados con la problemática de los DAM y sus estrategias de mitigación de artículos presentados en diferentes países, permitiendo reconocer vacíos de conocimiento y necesidades de investigación, con el fin de proporcionar una base teórica sólida para orientar el desarrollo del presente estudio.

Figura 2. Construcción del estado del arte

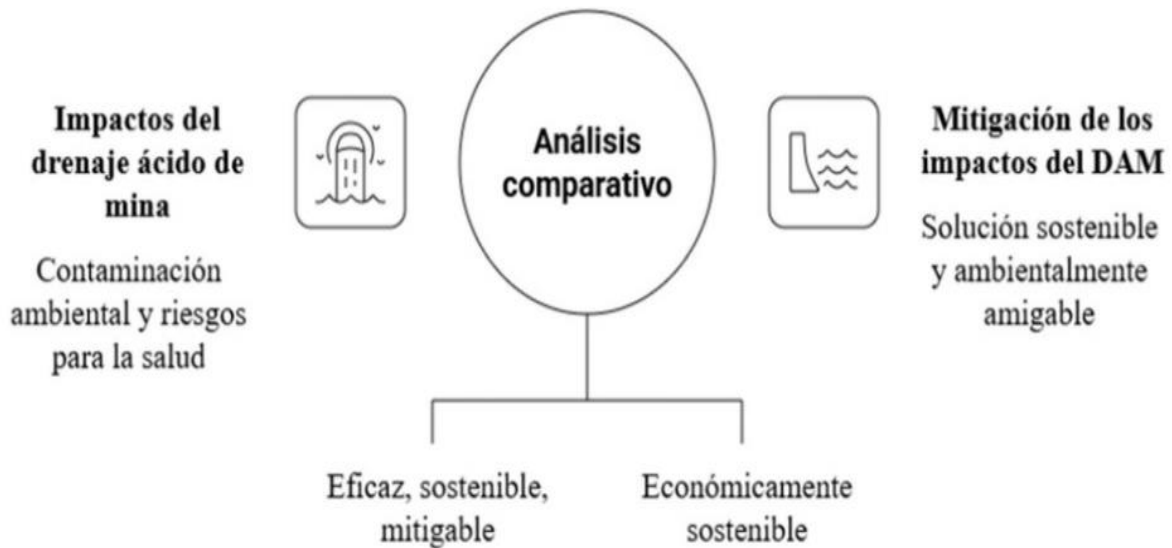


Fuente. Autor

Fase 3: Análisis multicriterio

En la tercera fase se realizó un análisis detallado de los artículos seleccionados, con el fin de evaluar las diferentes tecnologías y estrategias reportadas para el tratamiento de drenajes ácidos de mina. Este análisis comparativo se enfocó en criterios como eficiencia en la remoción de metales pesados y sulfatos, sostenibilidad ambiental, costos de implementación, escalabilidad y aplicabilidad en contextos similares al de la región de Boyacá. A partir de esta evaluación se buscó identificar la alternativa más adecuada y sostenible para mitigar los impactos del DAM, considerando tanto los avances científicos reportados como las condiciones socioambientales específicas del área de estudio.

Figura 3. Análisis multicriterio



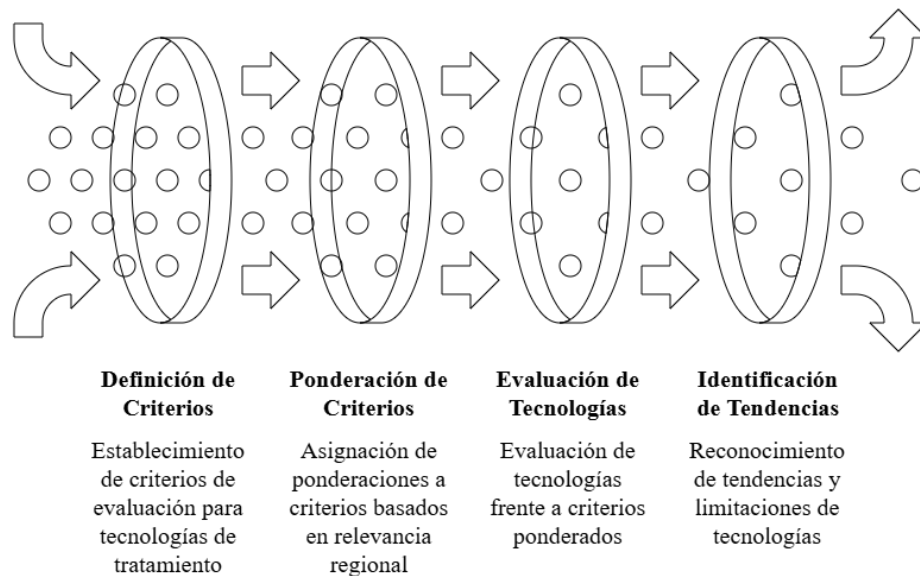
Fuente. Autor

Fase 4: Alternativa

En esta fase se estableció el proceso metodológico para identificar la alternativa más viable de tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) asociados a la minería de carbón en Boyacá. La selección se realizó a partir de la información recopilada en la revisión bibliográfica y organizada en la matriz de análisis, sobre la cual se aplicó un análisis multicriterio comparativo, donde se definieron criterios relacionados con la eficiencia en la remoción de metales pesados y sulfatos, la sostenibilidad ambiental de los procesos y por último, la viabilidad económica de implementación y mantenimiento.

A cada criterio se le asignó una ponderación relativa de acuerdo con su relevancia en el contexto regional, priorizando aquellos que aseguran factibilidad técnica y económica, permitiendo identificar tendencias, ventajas y limitaciones de cada alternativa, con el fin de orientar la propuesta hacia aquellas opciones con mayor potencial de ser implementadas en el contexto minero de Boyacá.

Figura 4. Proceso de selección de alternativas de tratamiento DAM



Fuente. Autor

ANÁLISIS DE RESULTADOS

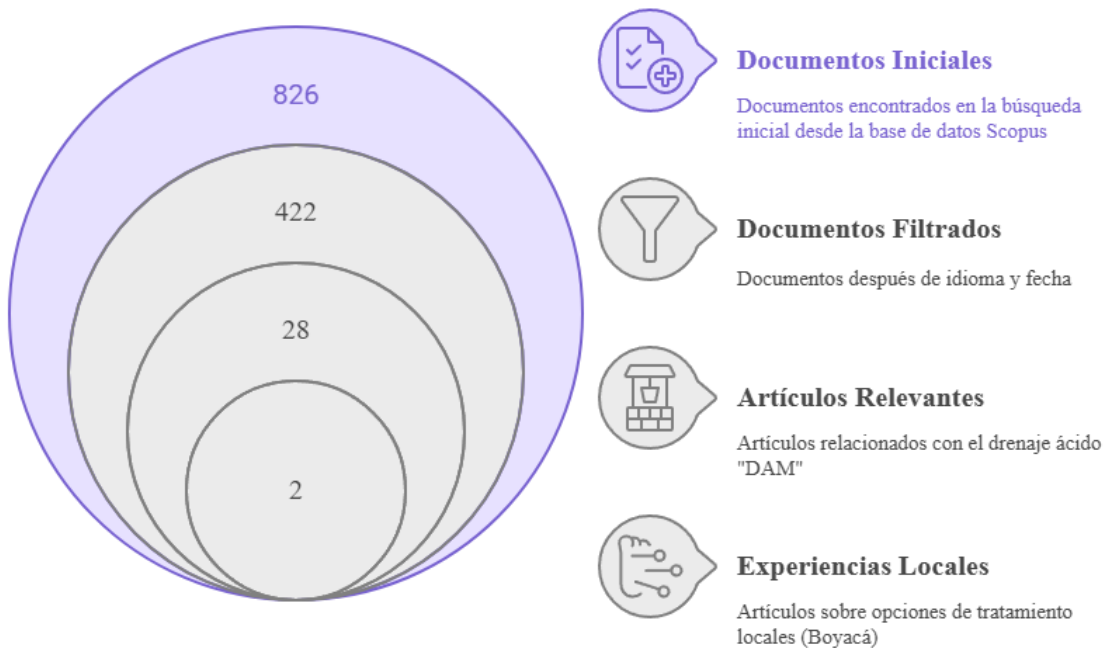
Fase 1: Revisión bibliográfica

La primera fase del proyecto consistió en la revisión bibliográfica mediante la base de datos SCOPUS, que se accedió a través de la plataforma CRAI de la Universidad Santo Tomás. Para optimizar la búsqueda se diseñó la ecuación: ("*acid mine drainage*" OR "*acid rock drainage*") AND ("*coal mining*" OR "*coal mine*"), la cual permitió recuperar inicialmente 826 documentos, los cuales se les aplicaron filtros de idioma (inglés) y periodo de publicación (2015–2025), lo que redujo la muestra a 422 registros. A partir de este conjunto se realizó un proceso de selección con base en la pertinencia temática y metodológica, obteniéndose 28 artículos directamente relacionados con el drenaje ácido de minas (DAM) derivado de la explotación de carbón y las tecnologías de tratamiento disponibles.

Por otra parte, con el fin de contextualizar la investigación en el ámbito territorial se incluyeron los términos “Colombia” y “Boyacá” en la ecuación de búsqueda, lo que permitió identificar dos artículos específicos que documentan experiencias locales de tratamiento de DAM en minas de carbón de esta región. Esta información constituyó la

base documental para identificar tendencias internacionales en remediación y contrastarlas con la realidad local de Boyacá.

Figura 5. Resultados de búsqueda en la base de datos SCOPUS



Fuente. Autor

Fase 2: Construcción del estado del arte

En la fase 2 del proyecto se llevó a cabo la revisión de 30 artículos científicos para la construcción del estado del arte, relacionados con el drenaje ácido de mina (DAM) en contextos de la producción de la minería de carbón. Para sistematizar la información se elaboró una matriz bibliográfica en la que se registraron variables como año de publicación, país de estudio, palabras clave y el aporte central de cada artículo, esto se realizó con el fin de organizar la literatura e identificar las principales tendencias investigativas en torno al tema.

En términos generales, los estudios revisados hacen referencia a tecnologías tanto pasivas como activas de tratamiento, destacándose enfoques como el uso de bacterias reductoras de sulfato (SRB), la aplicación de materiales minerales como la piedra Maifan o la caliza (limestone) para neutralizar la acidez, el diseño de filtros geoquímicos y la implementación de humedales construidos como alternativas sostenibles. Estos aportes muestran que la

investigación científica ha buscado, en los últimos años, equilibrar la eficiencia en la remoción de metales y sulfatos con soluciones de bajo costo y fácil implementación.

Para comprender la evolución de las investigaciones relacionadas con el drenaje ácido de mina, se analizaron los años de publicación de los artículos recopilados en la matriz. Este análisis se permite observar en la gráfica 1, identificando la variación de interés científico en torno a este tema.

Gráfica 1. Cantidad de artículos por año



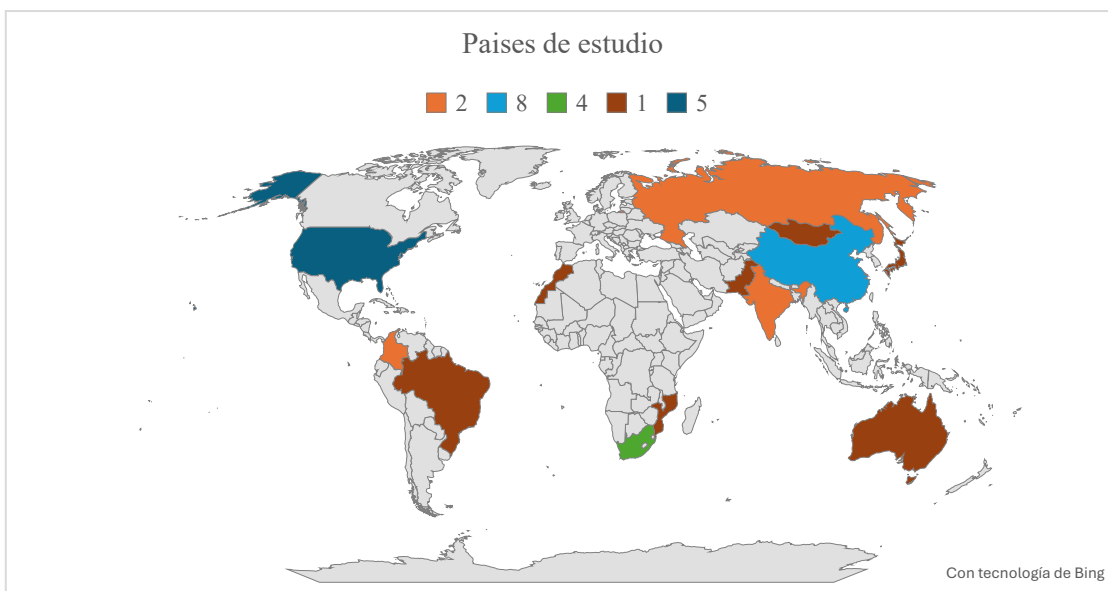
Fuente. Autor

La tendencia temporal muestra que entre el año 2017 y 2020 el estudio de los drenajes ácidos de mina por minería de carbón fue bajos y constantes, con un promedio de 2 artículos por año. A partir de 2021 se observa un incremento significativo, alcanzando su punto máximo en 2022 con 9 artículos publicados, lo que refleja un aumento notable del interés científico en este campo. Posteriormente, en 2023 la producción disminuye a 5 artículos y en 2024–2025 se mantiene con 2 publicaciones anuales. En conjunto, la gráfica evidencia que los últimos años han sido clave en el fortalecimiento de la literatura sobre drenaje ácido de mina y sus alternativas de tratamiento.

Además del análisis temporal, se examinó el lugar de origen de los estudios recopilados que se evidencia la gráfica 2, donde se identificaron los países en los que se han realizado investigaciones sobre drenaje ácido de mina, lo cual es fundamental para el contexto

geográfico y minero y cómo esto influye en la selección de tecnologías y en la aplicabilidad de las soluciones.

Grafica 2. Países de estudio

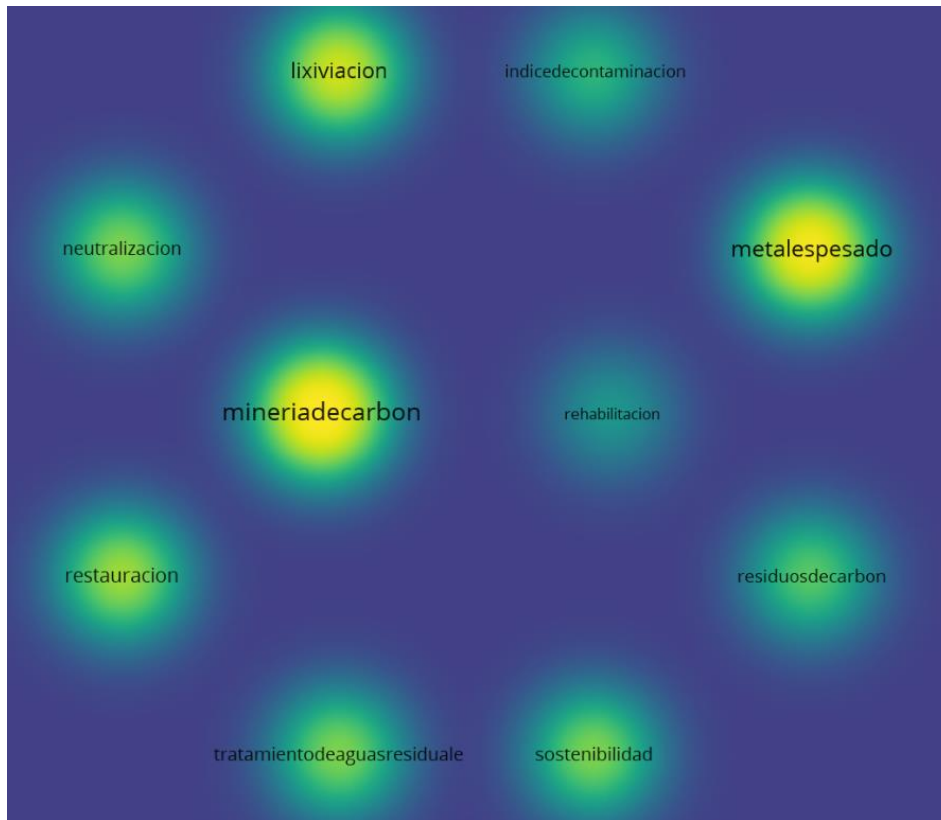


Fuente. Autor

La gráfica 2, evidencia una fuerte concentración de publicaciones en China, con 8 artículos, seguida por Estados Unidos con 5 y Sudáfrica con 4. Por otro lado, países como Rusia, India, Colombia y Japón cuentan con 2 investigaciones cada uno, mientras que en regiones como Brasil, Pakistán, Marruecos o Mozambique solo se reporta un estudio. Este panorama muestra que los países con mayor desarrollo minero y con mayores impactos ambientales asociados al carbón han liderado la producción científica en el tema. En el caso de Colombia, particularmente en la región de Boyacá, la búsqueda en la base de datos Scopus evidenció un número reducido de investigaciones, a pesar de que la minería de carbón a cielo abierto es predominante y los efectos del drenaje ácido de mina resultan notorios. Esta situación justifica el creciente interés académico por proponer soluciones ajustadas a las condiciones específicas del contexto local.

Con el fin de identificar las nociones más representativas y los enfoques que con mayor frecuencia orientan las investigaciones, se hizo un análisis de las palabras clave más utilizadas, lo que permitió visualizar no solo los conceptos recurrentes, sino también las prioridades temáticas que la comunidad científica ha establecido alrededor del estudio y tratamiento del drenaje ácido de mina.

Grafica 3. Palabras clave



Fuente. VosViewer

La grafica 3, muestra que los términos más destacados son “minería de carbón”, “metales pesados” y “lixiviación”, lo que refleja la preocupación central de la literatura por los impactos generados por la explotación carbonífera y la liberación de elementos contaminantes al medio ambiente. También aparecen con alta frecuencia conceptos como “neutralización”, “tratamiento de aguas residuales”, “sostenibilidad” y “restauración”, que forman parte de las estrategias y enfoques planteados para mitigar dichos efectos. El predominio del color amarillo en ciertos nodos indica las palabras más repetidas, lo que confirma que la investigación científica se orienta principalmente hacia la comprensión de los procesos de contaminación y el diseño de alternativas sostenibles de manejo y rehabilitación.

Fase 3: Análisis multicriterio

La Tabla 1 presenta los principales aportes identificados en las 30 investigaciones científicas que se estudiaron y que están relacionadas directamente con el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) generado por la minería de carbón.

Tabla 1. Análisis de los artículos estudiados

N° Artículo	Aporte
1	El estudio desarrollado por Wenhao Liu, Xiao Li y su equipo, plantea una estrategia de ingeniería dual que combina el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) con el aprovechamiento de sus subproductos, esto se realiza mediante un sistema de electrodiálisis (ED), donde los autores logran una eficiente eliminación de iones metálicos, principalmente Fe^{3+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} y Ni^{2+} , manteniendo un pH cercano a 2 para evitar su precipitación (W. Liu et al., 2022). Los metales concentrados son posteriormente utilizados para elaborar un supresor de polvo de carbón, demostrando una aplicación sostenible y de valor agregado para los residuos mineros (W. Liu et al., 2022).
2	Los autores realizaron una evaluación ambiental integral del tratamiento activo del drenaje ácido de mina, teniendo en cuenta el nivel de sostenibilidad que tiene un proceso integrado de neutralización, empleando el enfoque de análisis del ciclo de vida (LCA) (Masindi et al., 2018). El sistema desarrollado a escala semiindustrial comprende cuatro etapas sucesivas, las cuales son la adición de magnesita, piedra caliza y carbonato de sodio, culminando con un burbujeo de CO_2 (Masindi et al., 2018). Esta metodología, presenta una alta eficiencia para neutralizar el DAM, no obstante, se evidenció un impacto ambiental negativo por un incremento en el consumo energético, lo que sugiere la necesidad de optimizar el uso de insumos y energía para lograr una gestión más sostenible (Masindi et al., 2018).
3	Mediante un enfoque geológico y geoquímico, los autores analizaron mediante una investigación, el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM) en los residuos de carbón del yacimiento de Moatize (Park et al., 2020). Para determinar la propensión ácida de las muestras, se aplicaron pruebas estáticas y cinéticas que permitieron calcular el potencial ácido (AP), el potencial neutralizante (NP) y el potencial de neutralización neto (NNP), demostrando que los carbonatos sirven

	<p>como agentes neutralizantes, y una vez este se agote la muestra de agua tiende a volverse más ácida (Park et al., 2020).</p>
4	<p>En su investigación, Abdul Jabbar Khan y otros autores, desarrollaron un diseño optimizado de filtros geoquímicos elaborados con piedra caliza Wargal, con el fin de lograr una neutralización activa de efluentes ácidos provenientes del drenaje ácido de mina (DAM) (Khan et al., 2022). A partir de lo anterior, se logró determinar que la caliza más adecuada debe contener al menos un 50% de CaCO_3 y un bajo contenido de sílice y dolomita, para alcanzar un 95% de eficiencias en la remoción de metales pesados (Khan et al., 2022).</p>
5	<p>El equipo de investigación propuso un sistema híbrido para reducir el contenido de azufre y pirita en el carbón para el tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) (Phengsaart et al., 2023). El sistema incorpora burbujas de aire estabilizadas con MIBC (metil isobutil carbinol), lo que mejora la eficiencia del proceso de separación, aplicando una fina capa de fosfato de hierro a las partículas de pirita, modificando su superficie de hidrofóbica a hidrofílica, obteniendo un carbón con bajo contenido de azufre (1%) en tan solo 0.5 minutos de procesamiento (Phengsaart et al., 2023).</p>
6	<p>El equipo de investigadores, plantearon la caracterización y evaluación del grado de contaminación en los sedimentos de la cuenca del río Kosva, en Rusia, afectados por el drenaje ácido de mina (DAM) procedente de explotaciones carboníferas abandonadas (Ushakova et al., 2022). La descarga continua de estos efluentes sin tratamiento ha llevado a la formación de hidróxidos de hierro y aluminio alterando la calidad de los ecosistemas acuáticos, esto se llevó a cabo mediante una prueba ecotoxicológica junto a ensayos con <i>Daphnia magna</i> y <i>Scenedesmus quadricauda</i>, registrando altos niveles de contaminación (Ushakova et al., 2022). Por otro lado, no se detectaron efectos de toxicidad aguda en los organismos analizados, lo que sugiere una posible atenuación natural o baja biodisponibilidad de los metales en los sedimentos (Ushakova et al., 2022).</p>
7	<p>La investigación se centró en el desarrollo de un material compuesto innovador que integra piedra Maifan con bacterias sulfato-reductoras (SRB) inmovilizadas, con el propósito de mejorar la remediación sinérgica del drenaje ácido de mina (DAM), combinando la capacidad adsorbente de la piedra Maifan, junto con la acción biológica reductora de las SRB (Guo, Hu, Fu, et al., 2022).</p> <p>Este sistema dinámico, demostró que la columna que contenía partículas</p>

	<p>inmovilizadas Maifan–SRB presentó el mejor rendimiento alcanzando eficiencias de remoción altas para hierro, manganeso y sulfato de sodio, con un incremento del pH en un tiempo de retención hidráulica de 12.21 horas (Guo, Hu, Fu, et al., 2022).</p>
8	<p>El trabajo desarrollado por Matome Mothetha se enfocó en analizar la eficacia de la metacaolinita en forma de nanopartículas como un adsorbente de bajo costo para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) proveniente de la minería de carbón, empleando un proceso por lotes para optimizar las condiciones de operación y evaluar los mecanismos de remoción de contaminantes (Mothetha et al., 2025).</p> <p>Esto se fundamentó, principalmente en la adsorción y el intercambio iónico, demostrando que la metacaolinita posee una capacidad significativa para retener metales pesados, pero presenta la necesidad de combinar este material con otras tecnologías, como la filtración o la neutralización (Mothetha et al., 2025).</p>
9	<p>El estudio desarrollado por Yuan Ding y su equipo de investigación, examinó el comportamiento geoquímico de los metales pesados en los sedimentos generados tras el tratamiento del drenaje ácido de mina mediante neutralización con piedra caliza (Ding et al., 2023). La investigación comparó diferentes concentraciones del reactivo con el fin de analizar la variación del pH y la evolución mineralógica de los óxidos de hierro formados durante el proceso (Ding et al., 2023).</p> <p>Los autores observaron que las dosis más bajas favorecen la formación de estructuras cristalinas estables, mientras que las mayores tienden a generar fases amorfas con menor durabilidad.</p>
10	<p>La investigación desarrollada por Lily Shylla y demás autores, exploraron el papel de bacterias autóctonas del género <i>Bacillus</i> en la mitigación de los efectos del drenaje ácido de mina (DAM) (Shylla et al., 2021). El estudio se centró en caracterizar la resistencia de estas cepas frente a distintos metales pesados presentes en ambientes mineros contaminados, demostrando que las bacterias aisladas presentan una notable capacidad de adaptación y supervivencia en condiciones de alta toxicidad, lo que las convierte en candidatas prometedoras para su aplicación en procesos de bioremediación (Shylla et al., 2021).</p>
11	<p>El estudio realizado por Andrew Middleton, Benjamin C. Hedin y Heileen Hsu-Kim determinó el uso de membranas líquidas soportadas (SLMs), analizando la posibilidad de recuperar elementos de tierras raras, que se encuentran contenidos en los efluentes del drenaje ácido de mina (Middleton et al., 2024). Esta tecnología se basa en un proceso de separación selectiva que permite extraer y concentrar los</p>

	metales valiosos presentes en el DAM a partir de un medio hidrofóbico impregnado con un agente extractante, demostrando que la eficiencia de recuperación depende en gran medida de la composición química del efluente y de la interacción entre los iones metálicos (Middleton et al., 2024).
12	Mediante una evaluación Geoquímica del Comportamiento de Lixiviación en Carbones Sulfurosos, los autores estudiaron la liberación progresiva de metales y su relación con las condiciones ambientales, enfatizando la relevancia de implementar medidas de remediación, ya que la prevención total del DAM resulta difícil de alcanzar (Mahanta et al., 2024). Entre las estrategias consideradas se incluyen los tratamientos activos mediante compuestos alcalinos y los enfoques pasivos basados en procesos biológicos (Mahanta et al., 2024).
13	Los autores presentaron una alternativa sostenible para el tratamiento del drenaje ácido de mina mediante el uso de una zeolita sintetizada a partir de residuos industriales de aluminio (Chostak et al., 2023). Este material, inmovilizado en un soporte de agarosa, fue diseñado para mantener su estabilidad en condiciones ácidas y facilitar su separación tras el proceso, lo que demostró una elevada capacidad de adsorción y un comportamiento dominado por el intercambio iónico (Chostak et al., 2023).
14	El estudio llevado a cabo por Cravotta y su grupo de investigación examinó los factores que determinan la composición química del agua subterránea en zonas mineras del norte de los Apalaches, identificando procesos naturales y actividades humanas mediante herramientas estadísticas multivariantes (Siegel et al., 2022). La investigación permitió diferenciar los tipos de contaminación asociados a la recarga superficial y al contacto con residuos mineros, evidenciando la presencia de metales disueltos señalando diferentes estrategias de monitoreo y mitigación en entornos mineros activos o abandonados (Siegel et al., 2022).
15	El análisis comparativo entre sistemas activos y pasivos de tratamiento de drenaje ácido de mina buscó determinar si estas tecnologías logran eliminar el potencial genotóxico del efluente (Iji et al., 2021). A lo largo del estudio, los investigadores Oluwafikemi T. Iji y su equipo examinaron el efecto de la neutralización química frente a los procesos naturales de depuración en humedales, mostrando que los tratamientos activos logran reducir de forma notable el daño genético en las células expuestas, ya que neutralizan la acidez y facilitan la precipitación de metales pesados; sin embargo, también se detectó la

	<p>presencia de compuestos que continúan afectando la integridad del ADN, resaltando la importancia de combinar estos métodos con estrategias complementarias que garanticen una eliminación más completa de los agentes genotóxicos residuales (Iji et al., 2021).</p>
16	<p>Con el propósito de optimizar la descontaminación de drenajes ácidos, los autores desarrollaron una estrategia que integra el uso de piedra Maifan como soporte mineral y bacterias sulfato-reductoras como agente biológico (Guo, Hu, Dong, et al., 2022). Esta al liberar iones alcalinos, contribuye a estabilizar el pH y a crear un entorno favorable para la actividad microbiana para la remediación del DAM (Guo, Hu, Dong, et al., 2022).</p>
17	<p>El estudio hidrogeoquímico de diversos lagos ubicados en una región minera permitió comprender los procesos que determinan su composición y calidad del agua (F. Liu et al., 2025).</p> <p>En esta investigación, Xin y su equipo evaluaron la influencia de las actividades extractivas y de los procesos naturales de mineralización en la concentración de iones y el comportamiento del pH, reflejando que algunos cuerpos de agua presentan condiciones más alcalinas debido a la neutralización natural o al contacto con materiales carbonatados, mientras que otros muestran características asociadas al drenaje ácido de mina (F. Liu et al., 2025).</p>
18	<p>En una investigación enfocada en la evaluación del riesgo ecológico en suelos cercanos a fuentes de drenaje ácido de mina, se analizó la presencia de elementos tóxicos como arsénico, plomo, cromo y hierro, evidenciando que el cadmio constituye el principal factor de riesgo ambiental, aunque el nivel general fue clasificado entre bajo y moderado (Pan et al., 2021). Este tipo de estudios resulta esencial para el manejo del DAM, ya que permite identificar las áreas críticas donde los contaminantes del agua ácida migran hacia el suelo, facilitando la implementación de estrategias de control y restauración ambiental (Pan et al., 2021).</p>
19	<p>Esta línea de investigación se orientó hacia la recuperación de elementos de tierras raras a partir de los subproductos generados en el tratamiento del DAM. En este caso, los autores observaron que los precipitados formados durante la neutralización química del efluente concentran cantidades apreciables de estos elementos, especialmente itrio y escandio (Vass et al., 2019). El hallazgo demuestra que los lodos provenientes del tratamiento del DAM no deben considerarse un desecho,</p>

	sino un recurso potencialmente aprovechable dentro de esquemas de economía circular (Vass et al., 2019).
20	Un estudio centrado en la neutralización y oxidación química como estrategias activas para el tratamiento del DAM comparó el uso de sosa cáustica, ozono e hipoclorito de sodio para la remoción de hierro y manganeso de efluentes mineros. Se encontró que la oxidación del hierro ocurre con gran eficiencia, mientras que el manganeso requiere mayores dosis de oxidante para su eliminación completa (Boyden et al., 2017).
21	El estudio desarrollado por César René Blanco-Zúñiga y otros autores, evaluaron un humedal artificial de flujo ascendente con sustrato orgánico, diseñado como biorreactor para mitigar los efectos del DAM en una zona minera de Boyacá (Blanco-Zuñiga et al., 2022). Los resultados mostraron reducciones significativas de hierro (88.3%) y sulfatos (34.3%), alcanzando un máximo de 92% de remoción de Fe a las 120 horas de retención, favoreciendo la actividad de bacterias sulfato-reductoras y la formación de minerales como piritita y siderita, que inmovilizan metales (Blanco-Zuñiga et al., 2022).
22	La investigación liderada por Yanrong Dong y su equipo exploró un enfoque combinado de bioremediación y adsorción mediante bacterias sulfato-reductoras (SRB) y distintos tipos de escombreras de carbón (Dong et al., 2020). La columna con material de Haizhou fue la más eficaz, alcanzando una remoción de Fe ²⁺ superior al 99% y de Mn ²⁺ cercana al 80%, manteniendo un pH alcalino entre 9.09 y 9.49 (Dong et al., 2020).
23	En una revisión realizada por J. A. Rodríguez-Aparicio y P. A. Vergara-Buitrago, estudiaron el efecto de la minería de carbón sobre los ecosistemas de páramo en Boyacá, destacando la contaminación del agua y del suelo por los drenajes ácidos, enfatizando la importancia de la restauración ecológica como estrategia de mitigación mediante un crecimiento vegetal y la inmovilización de metales (Vergara Buitrago & Rodríguez Aparicio, 2021).
24	En la investigación de L. W. L. Lira y colaboradores, se analizó la dinámica de lixiviación de contaminantes desde el esquisto de carbón, uno de los principales generadores de DAM, donde determinaron que elementos como arsénico y selenio se liberan rápidamente, mientras que hierro, manganeso y zinc presentan una liberación prolongada en el tiempo (Singer et al., 2020).

25	El trabajo de Maropeng V. Raletsena y su grupo de investigación evaluaron los efectos del uso de agua de DAM tratada con cenizas volantes (FA) en cultivos de patata, demostrando que esta logra neutralizar la acidez y disminuir la concentración de metales pesados, permitiendo una irrigación más segura (Raletsena et al., 2022).
26	El estudio analizó la forma en que los metales pesados se distribuyen y se movilizan en suelos afectados por la actividad minera, revelando que elementos como Cu, Ni, Co y Zn presentan alta movilidad en presencia de DAM (Semenkov et al., 2022). A partir de estos resultados, Solovey y otros autores destacaron la importancia de esta información para orientar procesos de fitorremediación, ya que permite identificar especies vegetales adecuadas para inmovilizar metales y reducir su impacto ambiental (Semenkov et al., 2022).
27	Esta investigación abordó la composición microbiana presente en efluentes mineros con contaminación extrema de uranio, donde solo unas pocas bacterias acidófilas logran sobrevivir (Wei et al., 2024). Xiao Wei y sus colegas demostraron que especies como <i>Ferrovum</i> y <i>Acidiphilium</i> participan en la movilización del uranio mediante la producción de ácidos para remediar el comportamiento químico del DAM (Wei et al., 2024).
28	A partir del análisis de residuos de roca de carbón (CMWR), se evaluó su potencial de reutilización en la construcción civil con el fin de reducir la formación de drenaje ácido, mostrando que las partículas de piritita se encuentran parcialmente oxidadas, lo que disminuye su reactividad que mitiga la producción futura de DAM y promueve la gestión sostenible de los desechos mineros (Amrani et al., 2020).
29	Los autores exploraron el potencial de bacterias aisladas de entornos contaminados con drenaje ácido para producir metallophores, compuestos capaces de unirse selectivamente a elementos de tierras raras (Skeba et al., 2023). En el estudio, Skeba y su grupo de investigación evidenciaron que las cepas de <i>Pseudomonas</i> mostraron gran afinidad para la biorrecuperación de metales, convirtiendo un residuo contaminante en una fuente aprovechable (Skeba et al., 2023).
30	En ambientes mineros caracterizados por alta acidez y contenido metálico, ciertas especies bacterianas demuestran una notable capacidad de adaptación (Shylla et al., 2021). En este contexto, Shylla y sus colaboradores identificaron cepas de <i>Bacillus</i> con resistencia a Mn, Fe, Pb y Cr, lo que sugiere su potencial uso en la

Análisis de Tecnologías para el Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina

1. Tratamientos activos para el DAM

Los tratamientos activos necesitan de la adición continua de reactivos para poder neutralizar la acidez de los DAM y a la vez precipitar los metales para que sea efectivo, por otro lado el costo operativo de este tratamiento es muy alto (Akcil y Koldas, 2006; Johnson y Hallberg, 2005; Kefeni et al., 2017).

Tratamientos activos para el DAM



La neutralización con caliza (CaCO_3) es uno de los métodos más utilizados, ya que es un material abundante y económico que libera alcalinidad y permite aumentar el pH del DAM desde valores de 2.5 hasta cerca de 7.5, logrando remociones del 95% de aluminio y entre 50% y 90% de hierro, además de reducir sulfatos hasta aproximadamente 2,000 mg/L, no obstante, su baja solubilidad y la formación de recubrimientos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ pueden

disminuir su eficiencia (Ayora et al., 2016; Hedin et al., 1994; Boyden et al., 2017; Khan et al., 2022).

Otro método común es la neutralización con agentes alcalinos como $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 o NaOH , los cuales incrementan el pH rápidamente y favorecen la precipitación de metales, destacándose la cal por su eficiencia y bajo costo (USEPA, 1983; Kefeni et al., 2017; Daraz et al., 2022). En sistemas integrados con magnesita y caliza, se han logrado aumentos de pH de 2 a 7.5 y reducciones de sulfatos de 30,000 mg/L a 50 mg/L (Masindi et al., 2018). También se emplean procesos de oxidación química con O_3 , NaOCl o KMnO_4 para remover $\text{Mn}(\text{II})$, logrando reducciones desde 11.6 mg/L hasta 0.2 mg/L tras pretratamientos con caliza, con costos entre 0.16 y 0.27 USD/kL (Tewalt et al., 2005; Boyden et al., 2017).

Finalmente, la electrodiálisis (ED) permite separar iones metálicos con altas eficiencias (>99% para Mg^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} y Mn^{2+}) y recuperar metales de valor, aunque su elevado consumo energético y la generación de salmueras representan limitaciones importantes (Agboola, 2019).

2. Tratamientos pasivos para el DAM

Los tratamientos pasivos se basan en procesos naturales que requieren menos insumos externos y ofrecen alta sostenibilidad operativa (Gazea et al., 1996; Kefeni et al., 2017; Younger et al., 2002).

Factores que influyen en la eficiencia de los tratamientos pasivos para el DAM



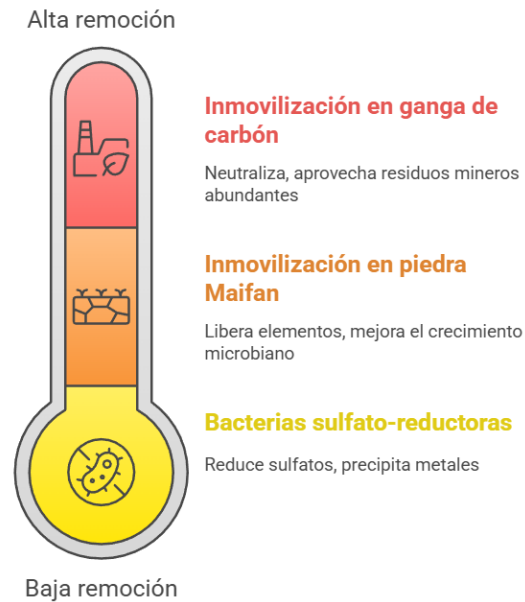
Los humedales anaerobios y los sistemas de flujo ascendente funcionan gracias a la actividad de bacterias reductoras de sulfato (BSR), que transforman los sulfatos en sulfuros insolubles, generan alcalinidad y favorecen la precipitación de metales (Neculita et al., 2007; Stein et al., 2007).

Un sistema de este tipo puede elevar el pH de 3.09 a 6.5, reducir el hierro total en un 91.63% y disminuir los sulfatos en un 52.32% en 120 horas, demostrando su eficiencia y potencial de aplicación local (Blanco-Zúñiga et al., 2022). Además, estos sistemas destacan por su bajo costo de operación y por el uso de materiales disponibles en la región, como arcilla y materia orgánica, lo que los convierte en alternativas adecuadas para zonas mineras con recursos limitados (Blanco-Zúñiga et al., 2022).

3. Tecnologías biológicas y bioquímicas

Las tecnologías biológicas utilizan la actividad de microorganismos como las bacterias sulfato-reductoras (BSR), que reducen sulfatos (SO_4^{2-}) a sulfuros (H_2S , HS^-), los cuales precipitan metales y generan aumentos en la alcalinidad y el pH del agua tratada (Neculita et al., 2007; Liu et al., 2022).

Espectro de tecnologías biológicas y bioquímicas para la remoción de metales

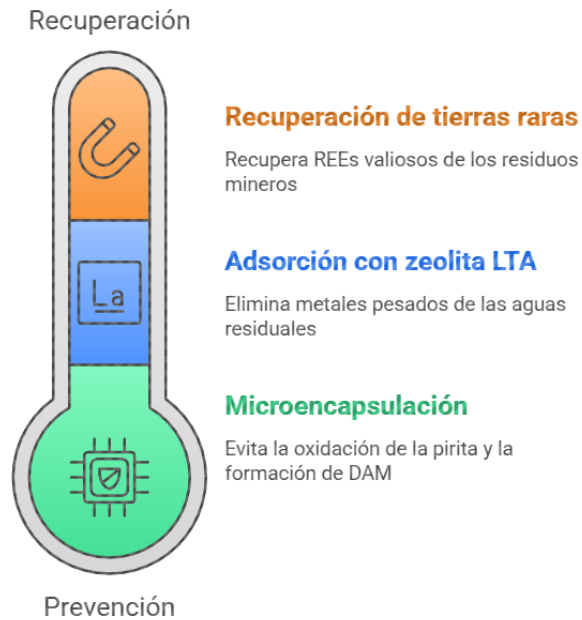


Este enfoque es de bajo costo y presenta buen rendimiento en condiciones típicas de ambientes mineros (Liu et al., 2022). Para mejorar su eficiencia, se han desarrollado técnicas de inmovilización en soportes minerales como la piedra Maifan, la cual libera elementos (K, Na, Ca, Mg) que favorecen el crecimiento microbiano y permiten alcanzar remociones del 90.51% para Fe^{2+} , 85.75% para Mn^{2+} y 93.61% para SO_4^{2-} , elevando el pH de 4.08 a 7.64 (Guo et al., 2022; Di et al., 2015). Asimismo, la inmovilización en ganga de carbón aprovecha un residuo minero abundante con capacidad neutralizante, logrando remociones del 98.70% para Fe^{2+} , 79.97% para Mn^{2+} y 72.73% para SO_4^{2-} , lo que demuestra su potencial como alternativa sostenible y de bajo costo (Dong et al., 2020).

4. Tecnologías avanzadas o complementarias

Las tecnologías avanzadas exploran enfoques innovadores que complementan o potencian los métodos tradicionales. Entre ellas se encuentra la adsorción con zeolita LTA inmovilizada en agarosa, sintetizada a partir de residuos industriales de aluminio, lo que la vincula directamente con principios de economía circular (Chostak et al., 2023).

Tecnologías avanzadas para la mitigación de drenaje ácido de minas, desde la prevención hasta la recuperación.



Este material presenta altas eficiencias de remoción, logrando 93.45% para Fe^{2+} , 91.62% para Mn^{2+} y 96.56% para Al^{3+} , además de mantener estabilidad en condiciones ácidas (Chostak et al., 2023). Por otro lado, la recuperación de tierras raras (REEs) aprovecha que el DAM puede contener elementos como Y, Nd, Eu, Tb y Dy, los cuales pueden ser extraídos mediante membranas líquidas soportadas con eficiencias del 60% al 82% o mediante biominería utilizando microorganismos que producen metalóforos con afinidad por estos metales (Hsu-Kim et al., 2024; Vass et al., 2019; Skeba et al., 2023). Finalmente, la microencapsulación preventiva busca recubrir la pirita para impedir su oxidación y la posterior formación de DAM, siendo una tecnología de aplicación temprana con potencial para reducir la generación del problema en su origen (Phengsaart et al., 2023; Evangelou, 2001).

Tratamientos activos y pasivos para el Drenaje Ácido de Mina (DAM)

El presente análisis integra los resultados de 30 estudios científicos publicados entre 2015 y 2025, enfocados en las tecnologías de tratamiento aplicadas a los drenajes ácidos de mina (DAM) generados por la minería de carbón, donde se analizaron las diferentes tecnologías

centrándose en la eficiencia, sostenibilidad ambiental, costos de implementación y escalabilidad.

El Drenaje Ácido de Mina (DAM) constituye uno de los principales pasivos ambientales derivados de la actividad minera, debido a la generación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y la liberación de metales pesados cuando los minerales sulfurados, como la pirita (FeS_2), reaccionan con el oxígeno y el agua (Masindi et al., 2018). Este fenómeno no solo altera el pH de las fuentes hídricas, sino que también afecta la biota acuática y los suelos circundantes. Por esta razón, se han desarrollado diferentes alternativas tecnológicas, tanto activas como pasivas, orientadas a neutralizar la acidez, eliminar los metales disueltos y reducir los impactos ambientales del DAM (Masindi et al., 2018).

En primer lugar, entre las tecnologías activas, el tratamiento con caliza (CaCO_3) se destaca por ser el método más común debido a su alta eficiencia y bajo costo operativo. Este proceso permite aumentar el pH del DAM desde valores cercanos a 2.5 hasta niveles neutros de aproximadamente 7.5, alcanzando altas eficiencias en la remoción de metales como hierro (Fe), cobre (Cu) y plomo (Pb), con porcentajes de eliminación de hasta el 99%, sin embargo, la remoción de manganeso (Mn) suele ser más moderada, alcanzando cerca del 60% (Dong et al., 2020; Khan et al., 2022).

Además, la adición de otros agentes alcalinos, como hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o carbonato de sodio (Na_2CO_3), puede potenciar la neutralización del DAM, favoreciendo la precipitación de los metales en forma de hidróxidos metálicos o carbonatos (Masindi et al., 2018). A pesar de su efectividad, estas tecnologías presentan limitaciones ambientales y económicas, como la generación de grandes volúmenes de lodos tóxicos y los altos costos de operación asociados al consumo constante de reactivos químicos (Ding et al., 2023).

Por otra parte, el ion sulfato (SO_4^{2-}) continúa siendo un desafío en el tratamiento del DAM, ya que su eliminación es más compleja. No obstante, es posible recuperar ácido sulfúrico (H_2SO_4) a partir de este compuesto, lo cual abre oportunidades para la valorización de subproductos y la recuperación de recursos dentro de un enfoque de economía circular (Masindi et al., 2018).

En segundo lugar, las tecnologías pasivas representan una alternativa complementaria o de bajo mantenimiento. Estas se basan en procesos naturales de neutralización, adsorción y precipitación que no requieren la adición constante de reactivos. Entre ellas, destacan los humedales anaerobios con sustrato orgánico, los cuales han demostrado elevar el pH y remover eficazmente los sulfatos (SO_4^{2-}) y el hierro total (Fe) presentes en muestras de DAM (Blanco-Zuñiga et al., 2022). Dichos sistemas funcionan gracias a la actividad de bacterias sulfato-reductoras (BSR), que transforman los sulfatos en sulfuros (S^{2-}), permitiendo la formación de compuestos insolubles como pirita (FeS_2) y siderita (FeCO_3), además de generar alcalinidad en el medio (Guo, Hu, Fu, et al., 2022).

Por ejemplo, un humedal anaerobio de flujo vertical con sustrato orgánico desarrollado en Boyacá logró remover hasta el 92% del hierro total y el 52.32% de los sulfatos, demostrando la efectividad de estos sistemas pasivos bajo condiciones controladas. Asimismo, cuando las BSR son inmovilizadas sobre materiales minerales como Maifan Stone o ganga de carbón, su eficiencia aumenta notablemente, alcanzando remociones de Fe^{2+} de hasta el 99% y de Mn^{2+} superiores al 80% (Guo, Hu, Fu, et al., 2022).

En síntesis, los tratamientos con caliza son altamente efectivos y económicos para la neutralización rápida del DAM y la remoción de metales pesados, mientras que los humedales anaerobios y sistemas biológicos ofrecen soluciones sostenibles a largo plazo al reducir sulfatos y estabilizar el pH mediante procesos naturales. Sin embargo, el sulfato (SO_4^{2-}) continúa siendo uno de los principales retos tecnológicos, por lo que la combinación de métodos activos, pasivos y biológicos surge como una alternativa integral para el tratamiento sostenible del DAM (Blanco-Zuñiga et al., 2022).

Comparación de tecnologías y selección de alternativas sostenibles

La tabla 2, muestra las principales tecnologías y estrategias evaluadas en diferentes estudios, destacando su desempeño, sostenibilidad y escalabilidad.

Tabla 2. Comparación de tecnologías para el tratamiento de drenajes ácidos de mina

Tecnología / Estrategia	Eficiencia típica (metales / sulfatos)	Sostenibilidad / Costos	Escalabilidad / Consideraciones
Neutralización activa (tratamiento químico)	Alta eficiencia en la remoción de metales (más del 90%) y	Elevado costo operativo y baja sostenibilidad debido	Escalable a gran escala, pero requiere grandes cantidades de reactivos

	eficiencia variable en la eliminación de sulfatos (SO_4^{2-} , ion sulfato) (Masindi et al., 2018).	al manejo y disposición de lodos generados (Ding et al., 2023).	químicos(Masindi et al., 2018).
Biorreactores sulfato reductores (BSR) con adsorbente (Maifan / ganga)	Muy alta eficiencia: más del 90% en la remoción de hierro (Fe), más del 85% en manganeso (Mn) y más del 90% en sulfatos (SO_4^{2-}) (Dong et al., 2020).	Bajo costo por el uso de materiales locales y alta sostenibilidad al emplear procesos biológicos naturales (Guo, Hu, Dong, et al., 2022).	Alta escalabilidad y buena resistencia frente a cargas elevadas de contaminación debido a la inmovilización bacteriana (Guo, Hu, Dong, et al., 2022).
Adsorción (zeolita LTA inmovilizada)	Muy alta eficiencia en la eliminación de iones metálicos: hierro ferroso (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}) y aluminio (Al^{3+}), con remociones superiores al 90% (Chostak et al., 2023).	Costos moderados y alta sostenibilidad por el aprovechamiento de residuos de aluminio en su fabricación (Chostak et al., 2023).	Excelente estabilidad en condiciones de bajo pH y fácil recuperación del material adsorbente (Chostak et al., 2023).
Electrodialisis (ED)	Muy alta eficiencia, superior al 97%, en la remoción de metales disueltos (W. Liu et al., 2022).	Elevado costo energético, pero alta sostenibilidad al permitir la recuperación de recursos como metales o ácido sulfúrico (W. Liu et al., 2022).	Requiere optimización de los parámetros operativos para maximizar la eficiencia del proceso (W. Liu et al., 2022).
Prevención (microencapsulación)	No aplica (tecnología preventiva que evita la formación del drenaje ácido de mina) (Phengsaart et al., 2023).	Muy alta sostenibilidad al reducir la necesidad de tratamientos posteriores y los costos a largo plazo (Phengsaart et al., 2023).	Aplicable principalmente en la preparación del carbón o en el manejo de relaves mineros (Phengsaart et al., 2023).

Fuente. Autor

La neutralización activa o tratamiento químico se caracteriza por su alta eficiencia en la eliminación de metales pesados (superior al 90%), aunque su desempeño frente a los

sulfatos es más variable. Sin embargo, este método presenta bajos niveles de sostenibilidad debido a la generación de grandes volúmenes de lodos y su alto costo operativo, derivados del uso intensivo de reactivos químicos. A pesar de estas limitaciones, su escalabilidad industrial es elevada, lo que la hace adecuada para operaciones mineras de gran tamaño.

Por otro lado, los biorreactores con bacterias sulfato reductoras (BSR) acoplados con adsorbentes como la piedra Maifan o la ganga mineral destacan por su muy alta eficiencia (superior al 90%) tanto en metales como en sulfatos, su bajo costo de operación y su alta sostenibilidad, ya que emplean procesos biológicos naturales. Esta tecnología combina reacciones bioquímicas con mecanismos de adsorción, logrando mayor estabilidad y resistencia ante cargas elevadas de contaminación, lo que favorece su implementación a mediana y gran escala.

La adsorción con zeolita LTA inmovilizada muestra también eficiencias superiores al 90% en la eliminación de hierro, manganeso y aluminio. Esta técnica resalta por su aprovechamiento de residuos industriales en la fabricación del material adsorbente, lo que la convierte en una alternativa económica y ambientalmente sostenible. Además, presenta alta estabilidad en condiciones de acidez y permite la recuperación y reutilización del material, aspectos que aumentan su viabilidad técnica y económica.

En cuanto a la electrodiálisis (ED), esta tecnología logra eficiencias de remoción superiores al 97% para metales disueltos, destacándose por su capacidad de recuperar recursos valiosos, como metales o ácido sulfúrico, lo que mejora su perfil de sostenibilidad. Sin embargo, su principal limitante es el alto costo energético, por lo que requiere una optimización operativa cuidadosa para ser económicamente viable en aplicaciones de gran escala.

Finalmente, la prevención mediante microencapsulación representa una estrategia innovadora que no busca tratar el DAM una vez generado, sino evitar su formación desde el origen. Este enfoque preventivo tiene muy alta sostenibilidad, ya que disminuye la necesidad de tratamientos posteriores y reduce costos a largo plazo. Su aplicación se orienta principalmente a la preparación del carbón y el manejo de relaves mineros, resultando ideal para operaciones que buscan mitigar el impacto ambiental antes de que se produzca la oxidación de los sulfuros.

Fase 4: Alternativa

Alternativas con mayor potencial de sostenibilidad

En este sentido, las estrategias que integran procesos biológicos pasivos y el aprovechamiento de materiales locales surgen como las opciones más viables técnica y económicamente. En particular, destacan dos enfoques complementarios:

- 1. Biorremediación asistida por bacterias sulfato-reductoras (BSR)** combinada con materiales de bajo costo, como piedra Maifan o gangas de carbón. Estos sistemas muestran una alta eficiencia de remoción, superior al 90% tanto en metales pesados como hierro (Fe) y manganeso (Mn), como en sulfatos (SO_4^{2-}). Además, permiten una regulación natural del pH, estabilizando el efluente. Su bajo costo operativo y la posibilidad de emplear residuos mineros locales los hacen ideales para el contexto socioambiental de Boyacá, donde predomina la minería a pequeña escala (Dong et al., 2020; Guo, Hu, Fu, et al., 2022).
- 2. Adsorción mediante zeolitas inmovilizadas (AG-LTA)**, una tecnología avanzada derivada de residuos industriales de aluminio. Esta alternativa combina alta eficiencia (remociones superiores al 90% de Fe^{2+} , Mn^{2+} y Al^{3+}) con un enfoque de economía circular, ya que convierte un residuo peligroso en un material útil para la descontaminación, resolviendo además los problemas de solubilidad de las zeolitas tradicionales en medios ácidos (Chostak et al., 2023).

Alternativa más adecuada y sostenible

De acuerdo con el análisis multicriterio, la alternativa más adecuada y sostenible para Boyacá es la implementación de sistemas pasivos basados en humedales anaerobios de flujo ascendente, combinados con materiales neutralizantes locales, como caliza y ganga de carbón enriquecida con BSR, integrando además estrategias de prevención en la fuente para la mitigación a largo plazo.

1. Tratamiento pasivo con humedales anaerobios y materiales locales: Estos sistemas han demostrado ser altamente eficientes en el tratamiento del DAM de Boyacá, incrementando el pH y reduciendo la concentración de sulfatos e hierro

total. Su mantenimiento es bajo y su operación sencilla, lo que los hace económicamente viables y ambientalmente sostenibles (Blanco-Zuñiga et al., 2022).

2. Prevención en la fuente mediante microencapsulación-separación híbrida: Esta técnica innovadora de “carbón limpio” previene la formación de DAM desde el origen, al separar la pirita del carbón antes del proceso de beneficio, reduciendo significativamente la generación de contaminantes. A largo plazo, puede disminuir los costos de tratamiento y fortalecer la sostenibilidad del sector minero (Phengsaart et al., 2023).

La elección de los sistemas pasivos basados en humedales anaerobios de flujo ascendente, complementados con materiales locales como la caliza y la ganga de carbón enriquecida con bacterias sulfato reductoras (BSR), se fundamenta en su alta eficiencia, bajo costo operativo y adaptabilidad al contexto minero de Boyacá. Esta alternativa no solo demuestra una capacidad comprobada para neutralizar la acidez y remover metales pesados y sulfatos, sino que también aprovecha recursos locales disponibles, reduciendo los costos de transporte y mantenimiento. Además, su integración con estrategias preventivas como la microencapsulación contribuye a una gestión integral del drenaje ácido de mina, enfocada tanto en la mitigación como en la prevención.

Los hallazgos permiten identificar que, aunque existe una amplia variedad de tecnologías para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM), no todas presentan el mismo nivel de sostenibilidad, eficiencia o aplicabilidad para contextos como el de Boyacá.

Mediante el análisis multicriterio, se logró determinar que los tratamientos activos muestran altos porcentajes de remoción de metales y una respuesta inmediata frente a la acidez de los drenajes ácidos de mina, sin embargo, también evidencian limitaciones significativas relacionadas con los elevados costos operativos, el consumo continuo de reactivos químicos y la generación de lodos que requieren una gestión posterior. Por el contrario, las estrategias pasivas basadas en procesos biológicos y el uso de materiales locales como los humedales anaerobios, la ganga de carbón y soportes minerales combinados con bacterias sulfato-reductoras, muestran una mayor sostenibilidad ambiental, menor dependencia de insumos externos y una alta capacidad para poder tratar el DAM de manera adecuada a mediano y largo plazo.

En conjunto, a través del análisis bibliográfico, se puede evidenciar que las tecnologías pasivas y biológicas no solo se ajustan mejor a las condiciones socioambientales de Boyacá, sino que representan una alternativa viable para promover una gestión integral del drenaje ácido de mina, basada en principios de economía circular y aprovechamiento de recursos locales, puesto que estas tecnologías permiten incorporar enfoques de reutilización de materiales, lo cual fortalece su sostenibilidad ambiental.

CONCLUSIONES

El análisis comparativo de las diferentes tecnologías de tratamiento para los drenajes ácidos de mina (DAM) generados por la minería de carbón en Boyacá evidencia que las estrategias sostenibles basadas en procesos biológicos ofrecen mayores beneficios a largo plazo que los tratamientos químicos convencionales. Aunque los métodos activos, como la neutralización con caliza, presentan alta eficiencia inicial en la remoción de metales pesados, su bajo desempeño frente a los sulfatos y la generación de lodos tóxicos los hacen ambiental y económicamente menos viables para el contexto regional.

Por el contrario, la biorremediación asistida por bacterias sulfato reductoras (BSR), combinada con materiales locales de bajo costo como la piedra Maifan o la ganga de carbón, se consolida como la alternativa más adecuada y sostenible para Boyacá. Esta tecnología logra eficiencias superiores al 90% en la remoción de metales y sulfatos, promueve la recuperación natural del pH y presenta costos de operación bajos, adaptándose a las condiciones socioeconómicas y ambientales de la minería a pequeña y mediana escala predominante en la región.

Además, su implementación favorece la restauración de los ecosistemas hídricos afectados, fomenta el uso de materiales residuales locales y contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente los ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y 12 (producción y consumo responsables).

Del análisis detallado de los treinta artículos sintetizados en la Tabla 1, se concluye adicionalmente que las estrategias de biorremediación y tratamiento pasivo muestran el mayor potencial para la gestión sostenible del DAM, especialmente cuando se combinan con materiales naturales de bajo costo como la piedra Maifan, la caliza o la ganga de

carbón. Estas alternativas reducen los costos operativos y promueven procesos ecológicos autorregulados que disminuyen la generación de residuos secundarios.

Por otra parte, las tecnologías fisicoquímicas continúan siendo eficaces en escenarios industriales de gran escala, aunque requieren optimización para minimizar su huella ambiental. En síntesis, la integración de enfoques biológicos con técnicas preventivas y de aprovechamiento de residuos constituye la vía más prometedora hacia una minería más limpia, resiliente y circular, coherente con las políticas de sostenibilidad ambiental del país.

RECOMENDACIONES

Es primordial desarrollar experiencias a escala piloto que permitan validar la eficiencia de los sistemas pasivos de flujo ascendente con materiales locales, como caliza y ganga de carbón, antes de su aplicación a gran escala, para facilitar el ajuste de parámetros operativos y el fortalecimiento de la capacidad técnica de las comunidades mineras locales.

Es fundamental promover el uso de tecnologías preventivas como la microencapsulación o separación híbrida, que evitan la generación de drenajes ácidos desde el proceso de extracción y beneficio del carbón para reducirían significativamente los costos de tratamiento a largo plazo y los riesgos ambientales asociados.

Asimismo, se recomienda impulsar investigaciones aplicadas a nivel local que valoren experimentalmente los sistemas híbridos biológico-químicos, priorizando el uso de materiales autóctonos y la adaptación a las condiciones hidrológicas y geológicas de Boyacá, con el fin de fortalecer las políticas públicas y los incentivos institucionales que fomenten la implementación de tecnologías sostenibles de tratamiento del DAM, articulando el conocimiento científico con la gestión ambiental minera.

Finalmente, se sugiere establecer programas de capacitación y cooperación interinstitucional entre universidades, entidades ambientales y empresas mineras, orientados a la transferencia de conocimientos sobre técnicas biológicas sostenibles y al manejo responsable de residuos mineros y así garantizar una gestión ambiental integral, eficiente y sostenible en el departamento de Boyacá.

REFERENCIAS

- Amrani, M., Taha, Y., Haloui, Y. El, Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Sustainable reuse of coal mine waste: Experimental and economic assessments for embankments and pavement layer applications in morocco. *Minerals*, *10*(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/min10100851>
- Blanco-Zuñiga, C. R., Chacón-Rojas, Z. X., Villarraga-Castillo, J. S., Guevara-Suarez, H. E., Casteblanco-Castro, Y. N., & Rojas-Arias, N. (2022). Treatment of Acid Drainage from Coal Mines Produced in the Boyacá Region, Colombia, using an Anaerobic Wetland with an Upward Flow. *Ingenieria y Universidad*, *26*. <https://doi.org/10.11144/javeriana.iued26.tadc>
- Boyden, B. H., Nador, L., Addleman, S., & Jeston, L. (2017). The economic pre-treatment of coal mine drainage water with caustic and ozone. *Water Science and Technology*, *76*(5), 1022–1034. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.263>
- Chostak, C. L., López-Delgado, A., Padilla, I., Lapolli, F. R., & Lobo-Recio, M. Á. (2023). Use of a Waste-Derived Linde Type-A Immobilized in Agarose for the Remediation of Water Impacted by Coal Acid Mine Drainage at Pilot Scale. *Materials*, *16*(11). <https://doi.org/10.3390/ma16114038>
- Ding, Y., Long, Y., Wang, W., Wei, Z., & Cai, S. (2023). Iron (oxyhydr)oxides are responsible for the stabilization of Cu and Zn in AMD after treatment with limestone. *PeerJ*, *1*. <https://doi.org/10.7717/peerj.14663>
- Dong, Y., Di, J., Yang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Guo, X., Li, Z., & Jiang, G. (2020). Study on the effectiveness of sulfate-reducing bacteria combined with coal gangue in repairing acid mine drainage containing Fe and Mn. *Energies*, *13*(4). <https://doi.org/10.3390/en13040995>
- Guo, X., Hu, Z., Dong, Y., Fu, S., & Li, Y. (2022). Study of the preparation of Maifan stone and SRB immobilized particles and their effect on treatment of acid mine drainage. *RSC Advances*, *12*(8), 4595–4604. <https://doi.org/10.1039/d1ra08709f>
- Guo, X., Hu, Z., Fu, S., Dong, Y., Jiang, G., & Li, Y. (2022). Experimental study of the remediation of acid mine drainage by Maifan stones combined with SRB. *PLoS ONE*, *17*(1 January). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261823>
- Iji, O. T., Njoya, E. M., Madikizela, B., Myburgh, J. G., & McGaw, L. J. (2021). Evaluation of the genotoxic potential of water impacted by acid mine drainage from a coal mine in mpumalanga, south africa, using the ames test and comet assay. *Water SA*, *47*(4), 456–465. <https://doi.org/10.17159/WSA/2021.V47.I4.3796>
- Khan, A. J., Akhter, G., Ge, Y., Shahid, M., & Rahman, K. U. (2022). Development of Artificial Geochemical Filter to Treat Acid Mine Drainage for Safe Disposal of Mine Water in Salt Range Portion of Indus Basin—A Lab to Pilot Scale Study. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(13). <https://doi.org/10.3390/su14137693>

- Liu, F., Wang, G., Liao, F., Shi, Z., Cravotta, C., Zhou, P., & Liang, X. (2025). Origin of Water and Hydrochemical Components of Lakes: Example From the Mu Us Desert, Northwest China. *Water Resources Research*, *61*(2). <https://doi.org/10.1029/2024WR038856>
- Liu, W., Zhao, Y., Hu, X., Li, X., Zhang, M., Geng, Z., Wang, Q., Cheng, W., & Dong, Y. (2022). A combined electrodialysis and coal dust suppression system for acid mine drainage treatment and high mechanical hydrogel dust suppressant generation. *Water Cycle*, *3*, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.09.001>
- Mahanta, A., Sarmah, D., Bhuyan, N., Saikia, M., Phukan, S., Subramanyam, K. S. V., Singh, A., Saikia, P., & Saikia, B. K. (2024). Geochemical and petrological studies of high sulfur coal and overburden from Makum coalfield (Northeast India) towards understanding and mitigation of acid mine drainage. *International Journal of Coal Science and Technology*, *11*(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-023-00658-6>
- Masindi, V., Chatzisymeon, E., Kortidis, I., & Foteinis, S. (2018). Assessing the sustainability of acid mine drainage (AMD) treatment in South Africa. *Science of the Total Environment*, *635*, 793–802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.108>
- Middleton, A., Hedin, B. C., & Hsu-Kim, H. (2024). Recovery of Rare Earth Elements from Acid Mine Drainage with Supported Liquid Membranes: Impacts of Feedstock Composition for Extraction Performance. *Environmental Science and Technology*, *58*(6), 2998–3006. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06445>
- Mothetha, M., Msagati, T., Masindi, V., & Kebede, K. (2025). Feasibility of using metakaolinite for the treatment of coal-mining acid mine drainage: insights into the interaction behaviour and partitioning of inorganic contaminants. *Water SA*, *51*(1), 18–28. <https://doi.org/10.17159/wsa/2025.v51.i1.4081>
- Pan, L., Guan, X., Liu, B., Chen, Y., Pei, Y., Pan, J., Zhang, Y., & Hao, Z. (2021). Pollution characteristics, distribution and ecological risk of potentially toxic elements in soils from an abandoned coal mine area in Southwestern China. *Minerals*, *11*(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/min11030330>
- Park, J., Kwon, E., Chung, E., Kim, H., Battogtokh, B., & Woo, N. C. (2020). Environmental sustainability of open-pit coal mining practices at Baganuur, Mongolia. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(1). <https://doi.org/10.3390/su12010248>
- Phengsaart, T., Park, I., Pasithbhattarabhorn, J., Srichonphaisarn, P., Kertbundit, C., Phumkokrux, N., Juntarasakul, O., Tabelin, C. B., Hiroyoshi, N., & Ito, M. (2023). Development of Microencapsulation-Hybrid Jig Separation Technique as a Clean Coal Technology. *Energies*, *16*(5). <https://doi.org/10.3390/en16052432>
- Pondja, E. A., Persson, K. M., & Matsinhe, N. P. (2017). Assessment of coal mine water in Moatize by static and leaching tests. *Sustainable Water Resources Management*, *3*(4), 403–412. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0106-7>

- Raletsen, M. V., Mdlalose, S., Bodede, O. S., Assres, H. A., Woldesemayat, A. A., & Modise, D. M. (2022). H-NMR and LC-MS Based Metabolomics Analysis of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivars Irrigated with Fly Ash Treated Acid Mine Drainage. *Molecules*, 27(4). <https://doi.org/10.3390/molecules27041187>
- Semenkov, I., Sharapova, A., Lednev, S., Yudina, N., Karpachevskiy, A., Klink, G., & Koroleva, T. (2022). Geochemical Partitioning of Heavy Metals and Metalloids in the Ecosystems of Abandoned Mine Sites: A Case Study within the Moscow Brown Coal Basin. *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010113>
- Shylla, L., Barik, S. K., Behera, M. D., Singh, H., Adhikari, D., Upadhyay, A., Thapa, N., Sarma, K., & Joshi, S. R. (2021). Impact of heavy metals on water quality and indigenous *Bacillus* spp. prevalent in rat-hole coal mines. *3 Biotech*, 11(5). <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02808-6>
- Siegel, H. G., Soriano, M. A., Clark, C. J., Johnson, N. P., Wulsin, H. G., Deziel, N. C., Plata, D. L., Darrah, T. H., & Saiers, J. E. (2022). Natural and Anthropogenic Processes Affecting Domestic Groundwater Quality within the Northwestern Appalachian Basin. *Environmental Science and Technology*, 56(19), 13761–13773. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04011>
- Singer, D. M., Herndon, E., Cole, K., Burkey, M., Morisson, S., Cahill, M., & Bartucci, M. A. (2020). Micron-scale distribution controls metal(loid) release during simulated weathering of a Pennsylvanian coal shale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269, 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.034>
- Skeba, S., Snyder, M., & Maltman, C. (2023). Metallophore Activity toward the Rare Earth Elements by Bacteria Isolated from Acid Mine Drainage Due to Coal Mining. *Microorganisms*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112672>
- Ushakova, E., Menshikova, E., Blinov, S., Osovetsky, B., & Belkin, P. (2022). Environmental Assessment Impact of Acid Mine Drainage from Kizel Coal Basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia). *Water (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/w14050727>
- Vass, C. R., Noble, A., & Ziemkiewicz, P. F. (2019). The occurrence and concentration of rare earth elements in acid mine drainage and treatment byproducts: Part 1 - Initial survey of the northern Appalachian Coal Basin. *Mining Engineering*, 71(11), 49–50. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0097-z>
- Vergara Buitrago, P. A., & Rodríguez Aparicio, Jairo Alonso. (2021). Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia). *Scientia et Technica*, 26(03), 398–405. <https://doi.org/10.22517/23447214.24519>
- Wei, X., Chen, H., Zhu, F., & Li, J. (2024). Microbial community structure in an uranium-rich acid mine drainage site: implication for the biogeochemical release of uranium. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1412599>

