



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Aprovechamiento de residuos provenientes de otras industrias  
para el tratamiento de los drenajes ácidos de mina, 2024**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Ambiental**

**AUTORES:**

Ccaicuri Oscco, Jhon Ronel (orcid.org/0009-0000-7121-2340)  
Sime Risco, Angie Emperatriz (orcid.org/0000-0003-4810-3415)

**ASESOR:**

Msc. Ugarte Alvan, Carlos Alfredo (orcid.org/0000-0001-6017-1192)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA - PERÚ

2024



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, UGARTE ALVAN CARLOS ALFREDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "Aprovechamiento de Residuos Provenientes de otras Industrias para el Tratamiento de los Drenajes Ácidos de Mina", cuyos autores son SIME RISCO ANGIE EMPERATRIZ, CCAICURI OSCCO JHON RONEL, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 17%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 04 de Setiembre del 2024

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
UGARTE ALVAN CARLOS ALFREDO <b>DNI:</b> 10473562 <b>ORCID:</b> 0000-0001-6017-1192	Firmado electrónicamente por: CUGARTEA el 15-09- 2024 23:38:52

Código documento Trilce: TRI - 0865654





**Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, SIME RISCO ANGIE EMPERATRIZ, CCAICURI OSCCO JHON RONEL estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Aprovechamiento de Residuos Provenientes de otras Industrias para el Tratamiento de los Drenajes Ácidos de Mina", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
ANGIE EMPERATRIZ SIME RISCO <b>DNI:</b> 70547575 <b>ORCID:</b> 0000-0003-4810-3415	Firmado electrónicamente por: ASIMER el 02-09-2024 14:33:31
JHON RONEL CCAICURI OSCCO <b>DNI:</b> 77808999 <b>ORCID:</b> 0009-0000-7121-2340	Firmado electrónicamente por: JHCCAICURIOS el 02-09-2024 14:37:28

Código documento Trilce: TRI - 0865237

## Dedicatoria

A nuestros amados padres, Hugo Sime Inoquio y Adelma Risco Ramírez, y a nuestro querido hijo Benedictt Ignacio Sime, quienes han sido nuestra fuente de inspiración y fortaleza durante todo este proceso. A nuestros estimados docentes y compañeros de clase, cuya orientación, apoyo y colaboración han sido fundamentales en nuestra formación académica y en la culminación de esta tesis. Vuestra sabiduría y aliento nos han impulsado a alcanzar nuestras metas.

ANGIE EMPERATRIZ SIME RISCO

Y a nuestros adorados padres Emerson y Delia, hermanas Eveliz e Isabel, abuelo Vitor y Antonia, tía Zulma como una segunda madre, y David como un segundo padre, cuyo amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido el pilar sobre el cual hemos construido nuestros sueños. Este logro es también vuestro, pues cada uno de ustedes ha sido parte esencial de nuestro viaje. Con profundo amor y gratitud, dedicamos esta tesis a todas las personas que han estado a nuestro lado en este emocionante y desafiante camino.

JHON RONEL CCAICURI OSCCO

## Agradecimiento

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad César Vallejo por brindarnos la oportunidad de crecer académicamente y por proporcionarnos un ambiente propicio para el aprendizaje y el desarrollo personal. A la plana docente de nuestra carrera, les agradecemos por su dedicación, conocimiento y compromiso con nuestra formación, guiándonos con sabiduría y apoyándonos en cada paso del camino.

A nuestra querida familia, les agradecemos por su amor incondicional, comprensión y constante apoyo, siendo nuestro soporte emocional en los momentos de dificultad y nuestra alegría en los logros alcanzados. A nuestros amigos, les agradecemos por compartir risas, experiencias y por ser nuestro pilar en los momentos de adversidad; su amistad ha sido invaluable.

Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en nuestro corazón y en nuestra formación como personas y profesionales. Este logro no habría sido posible sin su presencia y apoyo constante. Con profunda gratitud, les dedicamos este logro a ustedes, nuestros pilares fundamentales en este emocionante viaje llamado vida.

Angie Emperatriz Sime Risco-Jhon Ronel Ccaicuri Oscco

## Índice de Contenidos

Carátula.....	i
Declaratorio de autenticidad del asesor .....	ii
Declaratoria de originalidad de los autores .....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento .....	v
Índice de Contenidos.....	vi
Índice de Tablas.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Resumen .....	ix
Abstract.....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. METODOLOGÍA .....	10
III. RESULTADOS .....	12
IV. DISCUSIONES.....	19
V. CONCLUSIONES .....	23
VI. RECOMENDACIONES .....	24
REFERENCIAS .....	26
ANEXOS.....	35

## Índice de tablas

Tabla 1 Minerales de sulfuro responsables del DAM .....	3
Tabla 2 Principales normas legales relacionadas a DAM .....	6
Tabla 3 Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM 2010) .....	7
Tabla 4 Normativas para la concentración de Sulfatos en el Agua .....	8
Tabla 5 Parámetros Químicos Principales en el Drenaje Ácido de Mina (DAM) Según la Literatura Revisada .....	15
Tabla 6 Parámetros Químicos Principales en el Drenaje Ácido de Mina (DAM) después de tratamiento según la literatura revisada .....	16
Tabla 7 Tabla de operacionalización de variables.....	36
Tabla 8 Resumen de los principales estudios para neutralización del Drenaje Ácido de Minas (DAM) .....	37
Tabla 9 Frecuencia de Medición de Parámetros por Autores en Estudios de DAM antes de Tratamiento .....	40
Tabla 10 Frecuencia de Medición de Parámetros por Autores en Estudios de DAM después de Tratamiento.....	42

## Índice de figuras

Figura 1: Enfoques para revisiones de la literatura .....	10
Figura 2 Procedimiento de selección de las fuentes. ....	13
Figura 3 Distribución de las fuentes .....	14
Figura 4 Remoción de contaminantes de los DAM por agentes neutralizantes. (a) Variación de pH por agente neutralizante (b) Variación de concentración de Sulfatos (mg/l) por agente neutralizante (c) Variación de concentración de Hierro (mg/l) por agente neutralizante.....	18



## Resumen

El presente estudio investiga la efectividad de los subproductos industriales como agentes neutralizantes en el tratamiento del drenaje ácido de minas (DAM). En un contexto donde la sostenibilidad y la mitigación ambiental son cruciales, se evalúa la capacidad de los subproductos industriales para ajustar el pH y reducir la presencia de sulfatos y metales pesados en aguas contaminadas por actividades mineras. Los resultados experimentales destacan que estos materiales no solo son capaces de elevar significativamente el pH del DAM, sino que también remueven eficazmente metales como el hierro (Fe), con porcentajes de eliminación cercanos a la totalidad. Además, la reducción de sulfatos se observó que alcanza valores por debajo de lo recomendado por la normatividad peruana e internacional, sugiriendo la necesidad de explorar combinaciones de tratamientos para una remoción más completa. Este enfoque no solo cumple con los estándares normativos locales e internacionales, sino que también promueve el uso de residuos industriales, alineándose con las estrategias de economía circular y reducción de la huella ambiental en la industria minera.

Palabras clave: Drenaje ácido de minas, DAM, neutralización y concreto.

## Abstract

This study investigates the effectiveness of industrial by-products as neutralizing agents in the treatment of acid mine drainage (AMD). In a context where sustainability and environmental mitigation are crucial, the ability of industrial by-products to adjust pH and reduce the presence of sulfates and heavy metals in waters contaminated by mining activities is evaluated. Experimental results emphasize that these materials are not only capable of significantly raising the pH of AMD but also effectively remove metals such as iron (Fe), with removal rates approaching totality. Additionally, sulfate reduction was observed to reach levels below those recommended by Peruvian and international regulations, suggesting the need to explore combinations of treatments for more complete removal. This approach not only meets local and international regulatory standards but also promotes the use of industrial waste, aligning with circular economy strategies and reducing the environmental footprint in the mining industry.

Keywords: Acid mine drainage, AMD, neutralization and concrete.

## I. INTRODUCCIÓN

Se han explorado diversas estrategias innovadoras y sostenibles para abordar el drenaje ácido de minas (DAM) que se caracteriza por su bajo pH y la presencia de concentraciones significativas de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y metales pesados, como el cobre (Cu), el manganeso (Mn), entre otros elementos (Akciil y Koldas 2006; Park et al. 2019; Simate y Ndlovu 2014; Tabelin et al. 2018). Este problema ambiental se encuentra ligado a la industria especialmente vinculada a la actividad minera (Johnson y Hallberg 2005), y ha motivado la búsqueda de soluciones innovadoras que sean tanto efectivas como respetuosas con la sostenibilidad ambiental.

Diversas estrategias se han propuesto para abordar este desafío, entre las cuales se destacan el empleo de agentes neutralizantes derivados de lodos de concreto, finos de concreto, cemento Portland y peróxido de calcio (Ho et al. 2023; Iizuka et al. 2022; Sephton, Webb y McKnight 2019; Lu, Zhang y Xue 2017; García-Valero et al. 2020; Song et al. 2021; Cai et al. 2021). Es relevante señalar que todos estos agentes, destinados a generar alcalinidad, se obtienen a partir de residuos locales, evidenciando un enfoque sostenible en la búsqueda de soluciones para el tratamiento del drenaje ácido de minas.

Según el último inventario de Pasivos Ambientales Mineros (MINEM/DM 2022), se ha registrado un total de 6903 Pasivos Ambientales Mineros (PAM) en todo el país. Los PAM son las instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, abandonadas o inactivas, y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad (Congreso de la República 2004). Estos pasivos están vinculados geográficamente a 646 Ex Unidades Mineras (EUM). De este número total, 3132 PAM están siendo gestionados, lo que implica que han recibido alguna intervención para su remediación, mientras que 3771 PAM no cuentan con ningún tipo de gestión.

De los PAM que actualmente no están bajo gestión, 161 están principalmente compuestos por relaveras y bocaminas con drenaje ácido. Los 3610 PAM restantes incluyen infraestructuras como campamentos, oficinas, accesos, entre otros. Esta

información destaca la necesidad de abordar de manera prioritaria los PAM no gestionados, especialmente aquellos con características ambientales críticas como el drenaje ácido.

Para el tratamiento del DAM, se han concebido diversas tecnologías, clasificadas principalmente como activas o pasivas (Johnson y Hallberg 2005; MINEM/DGAAM 2006) . En el ámbito de las tecnologías activas, se destaca el empleo de agentes químicos neutralizantes, entre los cuales se encuentran el óxido de calcio (CaO), carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), hidróxido de sodio (NaOH), óxido de magnesio (MgO), y/o hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>) como los más ampliamente utilizados (Kefeni, Msagati y Mamba 2017; Johnson y Hallberg 2005). Sin embargo, es necesario tener en cuenta la existencia de otras sustancias con diferente porcentaje de impurezas que podrían tener la capacidad de servir para los tratamientos del DAM.

Por lo anteriormente expuesto, se decidió que la presente investigación se alinea con dos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fundamentales: el ODS 6, que promueve el acceso universal y equitativo al agua potable segura y asequible, así como la mejora de la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, y el ODS 12, que fomenta la producción y el consumo responsables.

El drenaje ácido de mina (DAM) se caracteriza por presentar un pH bajo y la presencia de elevadas concentraciones de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), así como la presencia de metales pesados, como el cobre (Cu), el manganeso (Mn) y otros elementos (Akcil y Koldas 2006; Park et al. 2019; Simate y Ndlovu 2014; Tabelin et al. 2018).

Los minerales de sulfuro, los que se muestran en la Tabla 1 , son los responsables de la formación del DAM. Estos minerales se pueden encontrar en sedimentos, yacimientos minerales, venas mineralizadas, suelos y rocas alteradas hidrotermalmente (Tabelin et al. 2020; Park et al. 2020).

Tabla 1 Minerales de sulfuro responsables del DAM

Sulfuros metálicos	Formulas
Pirita	FeS <sub>2</sub>
Marcasita	FeS <sub>2</sub>
Pirrotita o pirrotina	FeS
Calcocita	Cu <sub>2</sub> S
Covelita	CuS
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>
Millerita	NiS
Galena	PbS
Esfalerita	ZnS
Arsenopirita	FeAsS <sub>2</sub>
Bornita	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>
Estibinita	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
Cobaltoíta	CoAsS
Pentlandita	(Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
Tetraedrita	(Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>

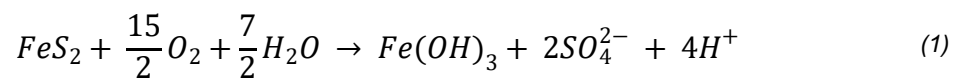
Fuentes: (Tabelin et al. 2020; Park et al. 2020; Simate y Ndlovu 2014; Ríos-Guerrero y Ballesteros-Camaro 2021)

Generalmente, el DAM no es un problema en las minas activas debido a que la interacción entre el material estéril y el agua es demasiado breve. Esto se debe al continuo bombeo del agua fuera de la mina para prevenir inundaciones (Turingan et al. 2022). Sin embargo, debido a que las actividades mineras exponen la pirita y otras menas portadoras de sulfuros al oxígeno y al agua, la producción de DAM se acelera (Turingan et al. 2020).

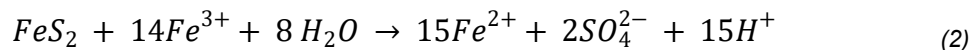
De los minerales antes mencionados la pirita se presenta en gran cantidad como parte de la ganga sulfúrea en los depósitos de pórfidos<sup>1</sup> y vetas mineralizadas (Turingan et al. 2020).

La oxidación de la pirita se facilita por varios mecanismos de reacción que ocurren en diferentes situaciones tales como se muestran en las siguientes ecuaciones:

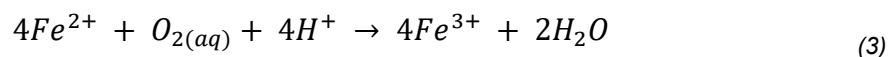
En la ecuación (1), se describe la oxidación de la pirita cuando se expone al oxígeno y al exceso del agua a un pH neutro (Evangelou 1998; Li et al. 2019; Kefeni, Msagati y Mamba 2017).



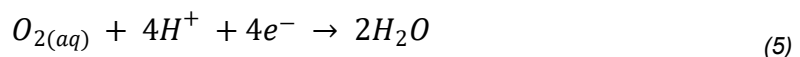
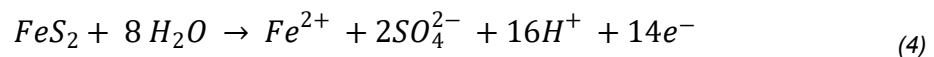
Mientras que en la ecuación (2), se utiliza al ion férrico ( $Fe^{+3}$ ) como agente oxidante en exceso de agua. El ion  $Fe^{+3}$  proveniente de la ecuación (3) se ha ido produciendo a medida que el pH disminuye, lo que ha favorecido la solubilidad del  $Fe^{+3}$ , especialmente a pH menores a 4. La ecuación (2) presente una velocidad de reacción mayor que la ecuación (1) (Li et al. 2019; Kefeni, Msagati y Mamba 2017).



El ion  $Fe^{+3}$  que actúa como agente oxidante en la ecuación (2) es el producto de la ecuación (3) o mediante la oxidación bacteriana del hierro (Li et al. 2019; Kefeni, Msagati y Mamba 2017).



En la ecuación (4) se muestra la reacción electroquímica que ocurre en sistemas acuoso (Li et al. 2019; Kefeni, Msagati y Mamba 2017).

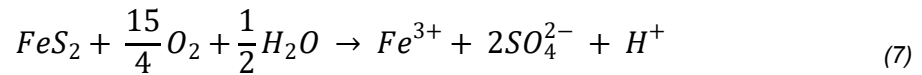



---

<sup>1</sup> m. Roca compacta y dura, formada por una sustancia amorfa, ordinariamente de color oscuro y con cristales de feldespato y cuarzo.



La ecuación (7) representa la oxidación completa de la pirita en condiciones de bajo contenido de agua. Esta reacción se acompaña de la formación de goethita ( $\alpha$ -FeOOH) o schwertmannite ( $Fe_8O_8(OH)_6 \cdot nH_2O$ ) (Holmes y Crundwell 2000).



A medida que avanza el proceso de oxidación, el agua ácida interactúa con las rocas que contienen varios minerales y disuelve metales tóxicos en su camino. El Fe, el Al, el  $SO_4^{2-}$  y el  $HCO_3^-$  son los iones más comunes disueltos en las DAM. Además, se sabe que la pirita sola puede contener As, Pb, Cu, Zn, Se y B, dependiendo de su origen (Chen et al. 2015).

Aunque el DAM se origina principalmente por la exposición de minerales de sulfuro (Tabla 1) al oxígeno y al agua, existen otros factores que también contribuyen a su formación. Entre los factores más importantes se encuentran:

- Contenido de humedad en la atmósfera.
- Presencia de agentes oxidantes:
  - Oxígeno ( $O_2$ ): Fundamental para las reacciones de oxidación de los minerales de sulfuro.
  - Actividad química del hierro férrico ( $Fe^{3+}$ ): El  $Fe^{3+}$  es crucial en las reacciones de oxidación, actuando como un agente oxidante adicional que perpetúa el ciclo de formación de DAM.
- Niveles de pH: Un pH bajo (ácido) favorece la solubilidad de ciertos minerales y metales, facilitando su disolución en el agua ácida.
- Temperatura: Las reacciones químicas que conducen a la formación de DAM se aceleran con el aumento de la temperatura ambiental.
- Área superficial de los minerales de sulfuro expuestos

(Turingan et al. 2022).

Además, los minerales coexistentes son relevantes, ya que la mayoría de ellos se disuelven en condiciones ácidas, liberando iones como:

- Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )
- Aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ )
- Sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ )

(Turingan et al. 2020; 2022; Chen et al. 2015).

Estos iones pueden interferir con las reacciones de precipitación de metales pesados durante el tratamiento, afectando la eficiencia del proceso de remediación. Por lo tanto, todos estos factores deben ser considerados al seleccionar la estrategia de tratamiento más adecuada para el DAM.

En el marco de la legislación peruana que regula la gestión ambiental y la seguridad industrial, especialmente en el sector minero, se han establecido diversas normas que abordan específicamente la problemática del drenaje ácido de minas, un efluente que puede tener significativos impactos negativos tanto ambientales como en la salud pública. Estas regulaciones buscan tanto prevenir la formación de nuevos pasivos ambientales como mitigar los efectos de los ya existentes. A continuación, en la Tabla 2, se presentan las principales disposiciones legales relacionadas con DMA:

*Tabla 2 Principales normas legales relacionadas a DAM*

<b>Documento</b>	<b>Descripción</b>
Ley N° 28271 y sus modificatorias	Establece la identificación, responsabilidad y financiación para la remediación de áreas afectadas por pasivos ambientales mineros. Obliga a los titulares mineros a presentar un Plan de Cierre de los pasivos ambientales y celebrar contratos de remediación ambiental.
D.S. No 059–2005-EM	Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera.
D.S.N° 003-2009-EM	Modificatoria del Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera, en la cual detalla procedimientos para la identificación y gestión de pasivos ambientales mineros, definiendo responsabilidades de titulares y del Estado. Establece requisitos para la presentación de planes de cierre y ejecución de actividades de remediación.
D.S N° 013-2008-EM 2008	Facilita el uso y reaprovechamiento de residuos derivados de las operaciones de cierre o remediación ambiental, incluyendo los provenientes del tratamiento del drenaje ácido.



Documento	Descripción
D.S. N° 040-2014-EM 2014	Abarca la gestión ambiental en operaciones mineras, incluyendo el manejo de efluentes y el drenaje ácido, enfocándose en minimizar impactos ambientales y promover prácticas sostenibles.

Estas normativas forman un marco legal que no solo busca mitigar los efectos del drenaje ácido de minas sino también promover una gestión ambiental responsable y sostenible en el sector minero, garantizando así la protección de los recursos naturales y la salud de las poblaciones afectadas.

La Tabla 3 detalla los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos en actividades minero-metalúrgicas, conforme al Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. Estos límites están diseñados para controlar la calidad de los vertidos en cualquier momento y en promedio anual, incluyendo parámetros críticos como pH, concentraciones de sólidos en suspensión, aceites, grasas y metales pesados. Estas medidas regulatorias son vitales para mitigar la contaminación hídrica y proteger la salud ecológica y pública frente a los impactos potenciales del drenaje ácido de minas y otros contaminantes asociados a la industria minero-metalúrgica.

*Tabla 3 Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM 2010)*

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH	-	6-9	6-9
Sólidos Totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

La concentración de sulfatos en el agua es un indicador crítico de calidad, impactando tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos. Para proteger

estos aspectos, diversas organizaciones y reguladores en todo el mundo han establecido límites específicos sobre los niveles aceptables de sulfatos en diferentes tipos de aguas, incluyendo agua potable, descarga de efluentes y aguas utilizadas en la agricultura e industria. La Tabla 4 presenta una comparación de las normativas de concentración de sulfatos dictadas por diferentes entidades regulatorias a nivel global. Estos valores limitantes varían dependiendo del uso previsto del agua, la sensibilidad de las poblaciones locales y los ecosistemas, y la evidencia científica disponible sobre los efectos de los sulfatos. Las referencias citadas ofrecen un contexto adicional y justificación para cada uno de los estándares mencionados.

*Tabla 4 Normativas para la concentración de Sulfatos en el Agua*

<b>Organización</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Referencia</b>
OMS y EPA (agua potable)	250	Guimarães y Leão 2014 (Council of the European Union 1998)
Europa (agua potable)	250	
Descarga de agua superficial – Chile	1000–2000	(Guimarães y Leão 2014)

Así, este trabajo contribuye al conocimiento identificando un perfil para los posibles agentes neutralizantes con capacidad para tratar el DAM, teniendo en cuenta su origen en subproductos de la actividad minera u otras actividades industriales.

Por lo anteriormente expuesto se planteó el siguiente problema general:

¿Cuál es la eficacia de los subproductos industriales comparada con los métodos convencionales como agentes neutralizantes en el tratamiento del drenaje ácido de minas?

y como problemas específicos los siguientes:

¿Qué tan efectivos son los subproductos industriales comparados con los agentes neutralizantes convencionales en la neutralización del pH del drenaje ácido de minas?

¿Qué tan efectivos son los subproductos industriales comparados con los agentes neutralizantes convencionales en la reducción de metales pesados en el drenaje ácido de mina?

¿Qué tan efectivos son los subproductos industriales comparados con los agentes neutralizantes convencionales en la disminución de sulfatos en el drenaje ácido de minas?

Como objetivo general se buscó:

Evaluar y comparar la eficacia de los subproductos industriales frente a los métodos convencionales como agentes neutralizantes en el tratamiento del drenaje ácido de minas, en términos de neutralización del pH, reducción de metales pesados y disminución de sulfatos.

Y los objetivos específicos fueron:

Comparar la eficacia de los subproductos industriales y los agentes neutralizantes convencionales en la neutralización del pH en el drenaje ácido de minas.

Comparar la eficacia de los subproductos industriales y los métodos convencionales en la reducción de metales pesados presentes en el drenaje ácido de minas.

Comparar la eficacia de los subproductos industriales frente a los agentes neutralizantes convencionales en la disminución de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en el drenaje ácido de minas.

## II. METODOLOGÍA

En esta sección, se abordarán aspectos esenciales como la naturaleza de la investigación, su alcance y la metodología que seguirá.

### 2.1 Tipo, enfoque y diseño de investigación

De acuerdo con su propósito esta investigación es del tipo aplicada ya que busca encontrar soluciones prácticas a problemas prácticos y presenta una utilidad de corta duración, además se verifica por medio de observaciones (Congreso de la República del Perú 2021)

En función del enfoque general y a los métodos de investigación que se usarán, es una investigación cuantitativa, porque se recogen datos de naturaleza cuantitativa y se soportará en la estadística, además sigue un patrón predecible y estructurado (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio 2014). Además, según la guía de Snyder (2019), las revisiones sistemáticas también pueden tener un enfoque cuantitativo. Él clasifica las revisiones en tres grupos, reservando la exclusividad del enfoque cualitativo para las integrativas. La Figura 1 esquematiza el trabajo del autor de manera concisa.

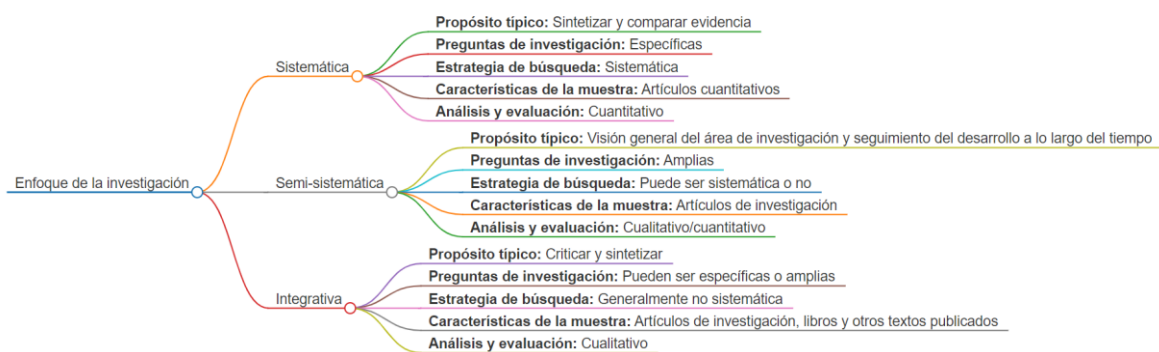


Figura 1: Enfoques para revisiones de la literatura

Fuente: Snyder 2019

El nivel de investigación es descriptivo ya que busca explicar eventos y situaciones exactamente durante su estado actual. Al proporcionar investigación sistemática sobre el fenómeno, tiene como fin encontrar una relación entre los fenómenos mediante observaciones o definir sus actitudes (Taherdoost 2022).

Se realizará una investigación no experimental, ya que la obtención de nuevos datos no se llevará a cabo mediante la manipulación de variables. Lo que se buscará será combinar y sintetizar los resultados de múltiples estudios existentes utilizando un enfoque estadístico (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio 2014).

## 2.2 Variables y operacionalización

**Variable Independiente:** Tipo de neutralizante químico.

**Variable dependiente:** Eficacia en la neutralización del drenaje ácido de minas, medido en términos de pH, reducción de metales y sulfatos

Consultar la Tabla 7 con relación a la operacionalización de las variables

## 2.3 Población y muestra.

La población es el conjunto de todos los artículos científicos que cumplen con los criterios de búsqueda booleanos que se utilizarán (n= 147). Mientras que la muestra es el conjunto de artículos científicos que se revisarán y que contienen la información buscada (n=15).

El muestreo es el proceso de selección de los artículos científicos que formarán parte de la muestra. En este caso, el muestreo es no probabilístico (Montgomery 2002; Navidi 2006), ya que no todos los artículos científicos que cumplen con los criterios de búsqueda booleanos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados.

La unidad de análisis en este trabajo son los estudios seleccionados con resultados específicos relacionados con agentes neutralizantes que realizan cambio de pH, reducción de metales y la disminución de sulfatos.

## 2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la estrategia y búsqueda de selección, se llevará a cabo una revisión sistemática por conveniencia de estudios de tipo cohorte, ya que están vinculados

de alguna manera, creando agrupamientos temporales de artículos sobre drenaje ácido de minas tratados con neutralizantes químicos.

Se realizará una búsqueda exhaustiva de los artículos y trabajos relacionados en los motores de búsqueda de Science Direct. Se tomará en cuenta un rango de artículos con hasta 5 años de antigüedad.

Las estrategias de búsqueda se basarán en la combinación de palabras clave: ((acid mine drainage) and (neutralization) and (concrete)).

## 2.5 Procedimientos

### Extracción de Datos

Se llevará a cabo la búsqueda de estudios en bases de datos, recopilando los artículos en una nube de almacenamiento. Estos artículos serán examinados para determinar su elegibilidad, revisando títulos y resúmenes de acuerdo con los criterios de exclusión e inclusión.

## 2.6 Método de análisis de datos

Se usará algoritmos basados en regresiones lineales múltiples (Lantz 2019), los cuales se ejecutarán en JMP.

## 2.7 Aspectos éticos

En esta investigación, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos éticos:

Respeto a las fuentes de información: Se citarán adecuadamente todas las fuentes de información siguiendo estándares internacionales, como el ISO-690 para referencias bibliográficas. Esto asegurará el respeto al trabajo de otros investigadores y la integridad académica.

Cumplimiento del código de ética del área de Investigación de la Universidad César Vallejo y de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Estos principios éticos guiarán las buenas prácticas de investigación, promoviendo la responsabilidad y honestidad de los investigadores.

### III. RESULTADOS

Se realizó una revisión exhaustiva de las bases de datos académicas Scopus, Web of Science, SciELO y ScienceDirect, centrada en publicaciones científicas entre los años 2018 y 2024. El objeto de estudio fue la neutralización del drenaje ácido de minas mediante el uso de concreto. La metodología de búsqueda implementada consistió en la aplicación de la expresión booleana ((acid mine drainage AND (neutralization AND concrete))). Esta indagación inicial permitió identificar un total de 7 artículos en Scopus, 8 en Web of Science, 1 en SciELO y 131 en ScienceDirect. Tras eliminar duplicados, se consolidó un corpus de 130 documentos únicos y un capítulo de libro. Aunque la búsqueda estaba dirigida exclusivamente a artículos de investigación, se detectaron 8 revisiones que no estaban claramente señaladas en sus respectivos títulos, lo que ajustó el número a 121 trabajos pertinentes. En una fase posterior, se evaluaron estos artículos para asegurar que reportaran datos sobre muestras de drenaje ácido de minas, tanto reales como sintéticas, y que idealmente contrastaran métodos de neutralización tradicionales, tales como  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Se excluyeron aquellos estudios enfocados en gestión o que no abordaran tecnologías de tratamiento, resultando en un total de 31 artículos relevantes para la investigación. Finalmente, tras el proceso de selección ilustrado en la Figura 2, se incluyeron 15 artículos para la investigación.

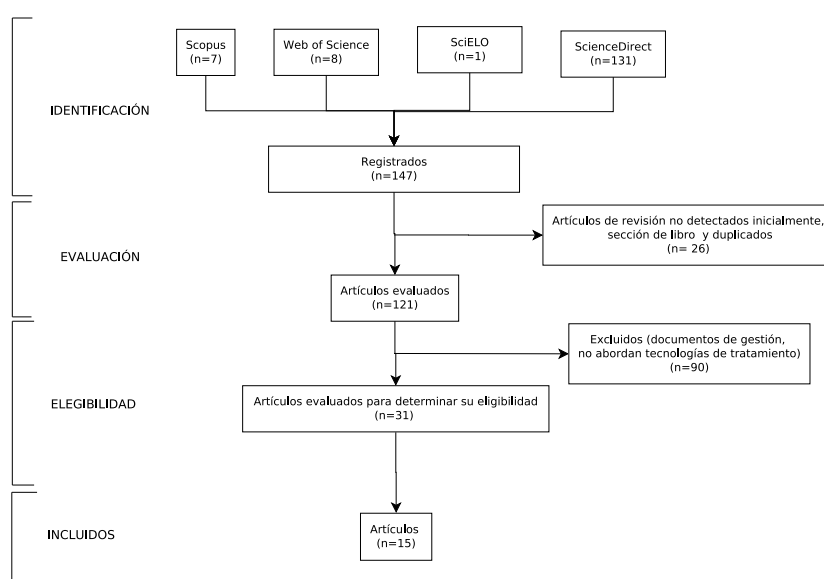


Figura 2 Procedimiento de selección de las fuentes.

La Figura 3 presenta la distribución geográfica de las fuentes seleccionadas, subrayando la ubicación de las investigaciones que abordan la neutralización del drenaje ácido de minas. Este mapamundi resalta las regiones que han contribuido al corpus de conocimientos existentes sobre el tema, con marcadores que señalan las áreas específicas de cada estudio identificado.

Se observa una concentración de estudios en regiones donde la minería es una actividad predominante y, por ende, la problemática del drenaje ácido de minas es de especial relevancia. En particular, se destacan investigaciones procedentes de Europa, especialmente Finlandia, y Asia, con una presencia notable en Japón. También se aprecia la contribución de estudios provenientes de Sudáfrica y América del Sur, específicamente de Chile, lo que indica un interés global por abordar esta problemática ambiental.

Autor - Año	Ubicación del estudio
Brooshan et al. 2023	Aijala, Finlandia
Ho et al. 2023	Sendai, Japón
Iizuka et al. 2022	Tohoku, Japón
Shabalala y Masindi 2022	No especificado
Stylianou et al. 2022	No especificado
Turingan et al. 2022	No especificado
Weinberg et al. 2022	No especificado
Crane y Stewart 2021	Comwall, Reino Unido
Pratinthong et al. 2021	Lampang y Lamphun, Tailandia
Larraguibel et al. 2020	Andes, Chile
Sithole et al. 2020	Sudáfrica
Sephton et al. 2019	Reino Unido
Turingan et al. 2020	Pyhäsalmi, Finlandia
Sephton et al. 2019	Reino Unido
Nariyan et al. 2018	Mina de Pyhäsalmi, Finlandia



Figura 3 Distribución de las fuentes

Tras la revisión y selección meticulosa de los artículos pertinentes, se consolidó la información cuantitativa de cada estudio en la Tabla 9. Dicha tabla detalla los parámetros químicos y físicos evaluados por diversos autores en muestras de Drenaje Ácido de Mina (DAM) antes de su tratamiento. Es notorio que los parámetros medidos no siguen un estándar uniforme, reflejando una variada aproximación en el estudio de estas muestras. Esta diversidad en los parámetros



analizados subraya la complejidad del DAM y la adaptabilidad de las metodologías de estudio en función de los objetivos específicos de cada investigación.

La Tabla 5 resume la esencia de la caracterización química del Drenaje Ácido de Mina (DAM) pre-tratamiento, enfatizando los parámetros más frecuentemente evaluados por los autores en la literatura seleccionada. Esta compilación resulta de la exclusión de aquellos parámetros esporádicamente medidos para brindar una visión concentrada de los indicadores más relevantes. Los datos presentados reflejan las medidas de pH, concentraciones de Cobre (Cu), Hierro total (Fe), Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Zinc (Zn), proporcionando así un perfil común de contaminantes priorizados en estudios de DAM.

*Tabla 5 Parámetros Químicos Principales en el Drenaje Ácido de Mina (DAM) Según la Literatura Revisada*

Autor año	Procedencia de la muestra	pH	Cu (mg/l)	Fe (total) (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	Zn (mg/l)
(Brooshan et al. 2023)	mina polimetálica	4.16	0.05	0.33	0.59	0.07	1035.6	2.71
(Ho et al. 2023)	sintético	2		300				
(Iizuka et al. 2022)	mina abandonada	2		241		0.11	1703	
(Shabalala y Masindi 2022)	mina de carbón	3.01		7				1.69
(Stylianou et al. 2022)	mina polimetálica	2.6	3.93	88.8	19.78		4373	31.4
(Turingan et al. 2022)	sintético	1.35	16.58	16.2			1300	
(Weinberg et al. 2022)	sintético	3	1	20		0.082		5
(Crane y Stewart 2021)	mina polimetálica	3.51	0.29	94.98	4.02	0.06	1023	27.81
(Pratinthong et al. 2021)	mina de carbón	2.7		0.068		0.092	946.34	0.057
(Larraguibel et al. 2020)	sintético	3.7	7.9	10.11	7.1		1234	2.6
(Sithole, Ntuli y Okonta 2020)	mina de carbón	2.5	432	546	542	0.9	3400	364
(Turingan et al. 2020)	sintético	1.45	16.6	16.45			1350	
(Sephton y Webb 2019)	mina polimetálica	2.3	40	26000	195		93000	589
(Sephton, Webb y McKnight 2019)	mina polimetálica	2	50	27000	200		9500	601
(Nariyan, Wolkersdorfer y Sillanpää 2018)	mina polimetálica	2.68	400	531			130000	

La presenta un resumen detallado de los parámetros químicos evaluados en diversas muestras de Drenaje Ácido de Minas (DAM) tras ser sometidas a tratamientos con diferentes agentes neutralizantes (ver). En ella, se documentan los cambios observados en el pH y las concentraciones de metales pesados como Cobre (Cu), Hierro total (Fe), Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Zinc (Zn). Los resultados reflejan la eficacia de diversos materiales, incluidos agregados

de concreto reciclado, lodos de hormigón, ceniza volante, entre otros, destacando su capacidad para mitigar la contaminación y ajustar el pH a niveles más seguros.

La Tabla 6 ofrece un resumen detallado de los parámetros químicos más representativos, seleccionados a partir de la Tabla 10, la cual contiene la totalidad de estudios y parámetros evaluados en diversas muestras de Drenaje Ácido de Minas (DAM) después de su tratamiento con diferentes agentes neutralizantes. La Tabla 6 se centra en aquellos parámetros en los que ha habido mayor coincidencia entre los autores, documentando los cambios observados en el pH y las concentraciones de metales pesados como cobre (Cu), hierro total (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y zinc (Zn). Los resultados reflejan la eficacia de una variedad de materiales, incluidos agregados de concreto reciclado, residuos de hormigón, y ceniza volante, destacando su capacidad para mitigar la contaminación y ajustar el pH a niveles más seguros.

*Tabla 6 Parámetros Químicos Principales en el Drenaje Ácido de Mina (DAM) después de tratamiento según la literatura revisada*

Autor_año	Procedencia de la muestra	Agente neutralizante	pH	Cu (mg/l)	Fe Total (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	Zn (mg/l)
(Brooshan et al. 2023)	mina polimetálica	Agregado De Concreto	7	0.017	0	0.0295	0.0168	165.696	0.0813
(Ho et al. 2023)	sintético	Concreto Molino Fino	12		0.1				
(Iizuka et al. 2022)	mina abandonada	Lodos De Hormigón	7.9		0.13		0.01	1575	
	mina de carbón	Cemento Portland	7.8		0				0.77
(Shabalala y Masindi 2022)	mina de carbón	Cenizas Volantes	7.5		0				0.13
	mina de carbón	Cal Hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$	7.4		0.02				0.84
	mina de carbón	Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	7.6		0.11				0.31
(Stylianou et al. 2022)	mina polimetálica	Celdas Electroquímicas	8	0.004	0.8	0.01978		874.6	0.05
(Turingan et al. 2022)	sintético	Laterita	8.08	0.004	0.03			104	
(Weinberg et al. 2022)	sintético	Cenizas Volantes	8	0.01	0.3		0.01		0.05
(Crane y Stewart 2021)	mina polimetálica	Ocre	7	0.5	0.5	2	0.05	500	2
(Pratinthong et al. 2021)	mina de carbón	Hidróxido De Calcio E Hidróxido De Aluminio	7		0.001		0.039	3.99	0.001
(Larraguibel et al. 2020)	sintético	Conchas De Mar	7.34	0.01	0.1	6.63		1280	0.71
(Sithole, Ntuli y Okonta 2020)	mina de carbón	Escoria De Horno/ Cenizas Volantes	7	4.32	5.46	5.42	0.009	34	3.64
(Turingan et al. 2020)	sintético	Caliza ( $\text{CaCO}_3$ )	8.08	0.004	0.03			104	
(Sephton y Webb 2019)	mina polimetálica	Cenizas Volantes	7.4	0.1	50	1.6		25000	1.9
(Sephton, Webb y McKnight 2019)	mina polimetálica	Cenizas Volantes	7.4	0.1	50	1.6		25000	1.9
(Nariyan, Wolkersdorfer y Sillanpää 2018)	mina polimetálica	Cao	12	0.1	0.15			1600	
	mina polimetálica	Celdas Electroquímicas	12	0.1	0.001			250	

Evaluando la efectividad de los agentes neutralizantes utilizados para pH, hierro y sulfatos:

Respecto del pH (Figura 4 a), vemos que los datos muestran una mejora significativa en el pH tras la aplicación de los agentes neutralizantes. La tendencia inicial del pH era ácida, situándose en 2.67 aproximadamente, y tendiendo hacia la neutralidad después del tratamiento, lo que indica un cambio hacia condiciones alcalinas. Este cambio manifiesta una alta efectividad de los agentes neutralizantes para elevar el pH de un estado ácido a uno neutral o ligeramente alcalino, lo cual es generalmente el objetivo al tratar drenajes ácidos de minas o aguas residuales industriales.

Con relación al Hierro (Figura 4 b), la concentración promedio inicial de hierro era de 2917.05 mg/L, lo cual es considerablemente alto y típicamente asociado con aguas afectadas por drenaje ácido de minas. Después de la neutralización, la concentración promedio de hierro disminuyó drásticamente a 5.67 mg/L. Este es un descenso sustancial que sugiere que los agentes neutralizantes han sido extremadamente efectivos en precipitar el hierro y reducir su concentración a niveles mucho más bajos, posiblemente a niveles aceptables dependiendo de los estándares ambientales aplicables.

En cuanto a los sulfatos (Figura 4 c), la concentración promedio inicial era de 29143.46 mg/L, y la concentración promedio después del tratamiento fue de 4345.48 mg/L. Aunque sigue siendo una concentración alta, la reducción es notable. La efectividad de los agentes neutralizantes en la reducción de sulfatos, aunque no tan dramática como en el caso del hierro, es significativa y apunta a la capacidad de estos agentes para tratar eficazmente las aguas contaminadas con sulfatos.

En resumen, los agentes neutralizantes empleados han demostrado ser altamente efectivos en la mejora del pH y la reducción de las concentraciones de hierro, con una efectividad más moderada pero aún notable para la reducción de sulfatos. Estos resultados indican un tratamiento exitoso que podría adecuarse a los estándares de descarga o reutilización de aguas, aunque la viabilidad final dependerá de los requisitos específicos de calidad de agua y de la aplicación a la que se destine

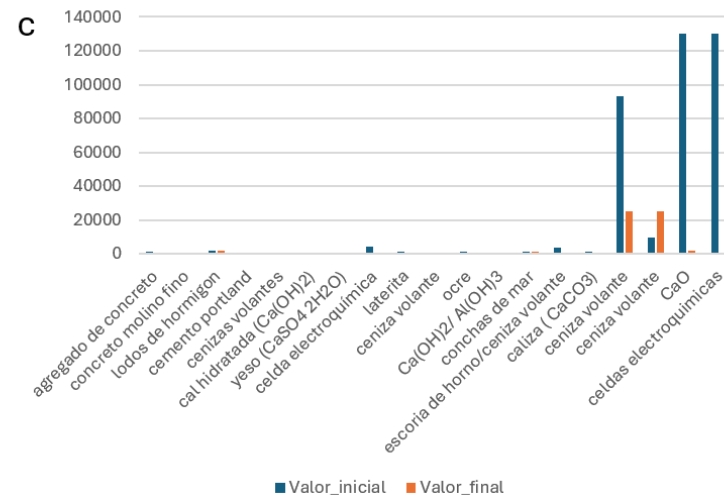
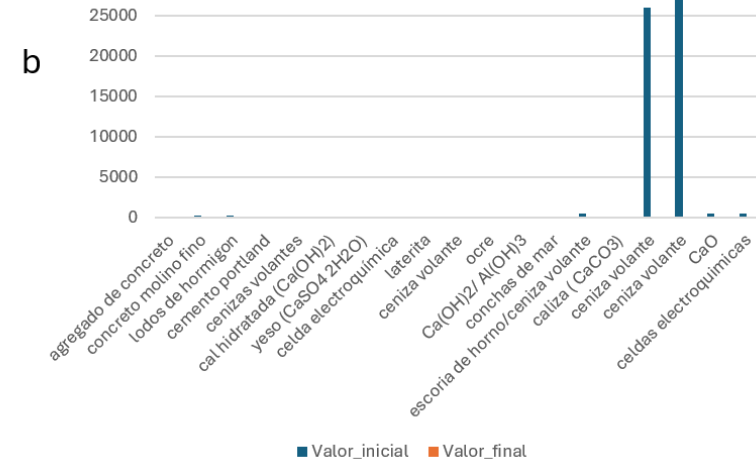
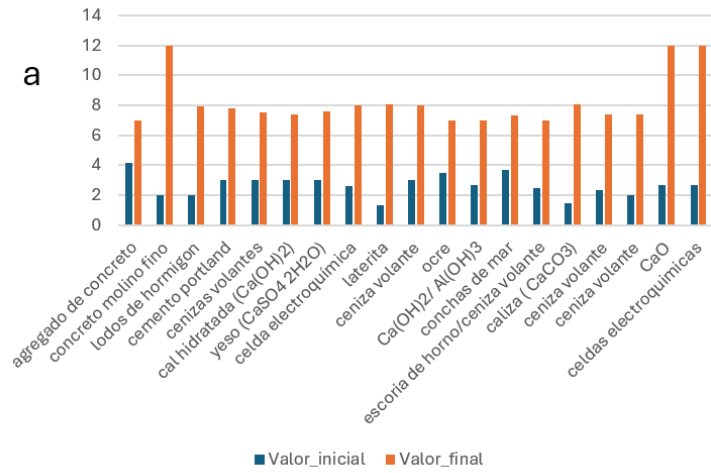


Figura 4 Remoción de contaminantes de los DAM por agentes neutralizantes. (a) Variación de pH por agente neutralizante (b) Variación de concentración de Sulfatos (mg/l) por agente neutralizante (c) Variación de concentración de Hierro (mg/l) por agente neutralizante.

#### IV. DISCUSIONES

El estudio se centró en evaluar la eficacia de subproductos industriales como agentes neutralizantes en el tratamiento del drenaje ácido de minas (DAM), comparando su rendimiento con los métodos convencionales. Uno de los enfoques clave fue analizar la capacidad de estos agentes para neutralizar el pH, reducir metales pesados y disminuir la concentración de sulfatos, comparando los resultados obtenidos con las normativas vigentes tanto peruanas como internacionales.

Los resultados obtenidos a través de la investigación de material secundario existente indican que los subproductos industriales pueden ser efectivos en la neutralización del pH del drenaje ácido de minas (DAM). El análisis comparativo de estudios previos muestra que materiales como el agregado de concreto, lodos de hormigón, cemento Portland, mineral laterita, cenizas, arcillas como el ocre y escoria, pueden alcanzar y mantener un pH de 8.

Estos residuos industriales han demostrado ser tan eficaces como los agentes neutralizantes convencionales manteniendo el pH en niveles óptimos. Tal como lo indican Sephton y Webb 2019; Sephton, Webb y McKnight 2019; Amouzadeh Omrani y Modarres 2018; Iizuka et al. 2022 y Ho et al. 2023, quienes encontraron que los residuos industriales pueden aumentar significativamente el pH del DAM, reduciendo su acidez y la solubilidad de los metales pesados.

La reducción de metales pesados, otro problema presente en el DAM, también mostró resultados favorables con el uso de subproductos industriales. Los datos indican que estos subproductos son tan eficientes en la precipitación y remoción de metales pesados al igual que los métodos convencionales. Este comportamiento puede explicarse por la capacidad del cambio de pH del DAM al momento de la neutralización de manera que los metales presentes tienden a oxidarse con lo que se favorece la precipitación de los mismos, al formarse óxidos que no son solubles en medios neutros o alcalinos, como lo indican: Brooshan et al. 2023; Chen et al. 2015; Crane y Stewart 2021; Larraguibel et al. 2020 y Stylianou et al. 2022

Con respecto a la efectividad de la remoción los investigadores Iizuka et al. 2022; Ho et al. 2023; Sephton y Webb 2019; Sephton, Webb y McKnight 2019 y Roulia et al. 2022 evalúan esta efectividad en función de la cantidad de lodo generado en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI).

El análisis de la variación de la concentración de sulfatos antes y después del tratamiento mostró una reducción significativa, confirmando la efectividad de los residuos industriales como agentes neutralizantes. La reducción de sulfatos, que constituyen la parte aniónica de la mayoría de los compuestos iónicos presentes en el drenaje ácido de minas (DAM), obliga a la parte catiónica a buscar otros agentes aniónicos con los cuales interactuar. En este proceso, los cationes se oxidan y forman compuestos que no son solubles en el nuevo medio, que es neutro o alcalino.

Esta reducción no solo mejora la calidad del agua tratada, sino que también reduce el riesgo ambiental asociado con la liberación de estos contaminantes en el ecosistema. Los estudios de Iizuka et al. 2022; Ho et al. 2023; Sephton y Webb 2019; Sephton, Webb y McKnight 2019; Aigbe et al. 2021; Wilk, Ciechanowska y Kociolek-Balawejder 2020; Roulia et al. 2022; Chen et al. 2015; Guimarães y Leão 2014; Larraguibel et al. 2020 y Nariyan, Wolkersdorfer y Sillanpää 2018) respaldan estos hallazgos, al demostrar que los residuos industriales pueden ser eficaces en la neutralización de DAM y en la disminución de la concentración de sulfatos, contribuyendo a una mejora significativa en la calidad del agua y la reducción de riesgos ambientales asociados.

En cuanto a la comparación con normativa peruana, la Tabla 3 proporciona los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas según la normativa peruana (D.S. N° 010-2010-MINAM). En el estudio, los resultados mostraron que la aplicación de subproductos industriales como agentes neutralizantes fue capaz de reducir significativamente la concentración de sulfatos, pH y metales pesados en el DAM. Al comparar estos resultados con los LMP peruanos, se observó que los niveles alcanzados después del tratamiento cumplían con los estándares requeridos, indicando la efectividad de estos subproductos en la conformidad con la legislación local.

Por su parte, la comparación con normativa internacional, la Tabla 4 se enfoca en las normativas internacionales para la concentración de sulfatos en el agua. A través de la aplicación de subproductos industriales, los niveles de sulfatos se redujeron de manera efectiva, alcanzando concentraciones que están en conformidad con los estándares internacionales. Este resultado no solo subraya la capacidad de los subproductos para tratar eficazmente el DAM, sino también su potencial para ser implementados en diferentes contextos geográficos, cumpliendo con regulaciones internacionales de calidad de agua.

En relación a las implicaciones y valor agregado de los agentes neutralizantes empleados, los resultados del estudio implican un doble beneficio: cumplimiento regulatorio y eficiencia en la gestión de residuos industriales. Utilizar subproductos industriales no solo reduce la carga de contaminación en las fuentes de agua afectadas por DAM, sino que también promueve un enfoque de economía circular, donde los desechos de una industria se convierten en recursos para otra.

Además, la comparación de los resultados obtenidos con las normativas tanto peruanas como internacionales proporciona una base sólida para argumentar a favor de la implementación de estas técnicas en la industria minera. La efectividad demostrada en el estudio sugiere que estos métodos pueden ser una alternativa viable y sostenible a los tratamientos convencionales, especialmente en regiones donde la disposición de residuos industriales y la protección ambiental son de crucial importancia.

En resumen, la discusión de los resultados en relación con las normativas muestra no solo la viabilidad técnica del aprovechamiento de los subproductos industriales como agentes neutralizantes, sino también su alineación con los requisitos legales y su potencial para mejorar las prácticas de sostenibilidad en la industria minera.

En lo que respecta a los aportes, la investigación demuestra que los subproductos industriales son tan efectivos como los métodos convencionales en la neutralización del pH, la reducción de metales pesados y la disminución de sulfatos en el drenaje ácido de minas (DAM). Este hallazgo sugiere que los subproductos industriales

pueden ofrecer una solución eficiente para el tratamiento del DAM, mejorando significativamente la calidad del agua tratada.

Al reutilizar subproductos industriales, la investigación contribuye a la economía circular. Este enfoque no solo ofrece una solución ambientalmente sostenible para el tratamiento del DAM. La reutilización de residuos industriales que de otro modo serían desechados, contribuye a una gestión más sostenible de los recursos.

Los subproductos industriales pueden ser implementados en otras operaciones mineras con problemas similares de DAM. Este hallazgo es particularmente relevante para regiones mineras como los Andes centrales del Perú, donde la gestión del DAM es un desafío ambiental y económico significativo.

La relevancia de esta investigación en el contexto científico-social es significativa, ya que al reducir los niveles de contaminantes en el drenaje ácido de minas se mejora la calidad del agua y del suelo en áreas afectadas por la minería. Esto tiene un impacto directo en la salud y bienestar de las comunidades locales, reduciendo riesgos de enfermedades y mejorando la calidad de vida. Asimismo, la reutilización de subproductos industriales no solo ayuda a manejar los residuos de manera más efectiva, sino que también reduce la necesidad de nuevas extracciones de recursos naturales.

La investigación también tiene una importancia significativa en el ámbito de la política y las regulaciones. Los hallazgos pueden ser utilizados por legisladores y responsables de políticas para formular regulaciones más efectivas, a fin de promover el reaprovechamiento de los subproductos de otras industrias con fines ambientales.



## V. CONCLUSIONES

La presente investigación se centró en evaluar la eficacia de subproductos industriales como agentes neutralizantes en el tratamiento del drenaje ácido de minas (DAM), comparándolos con métodos convencionales utilizados en la industria minera. El estudio abordó aspectos críticos como la neutralización del pH, la reducción de metales pesados y la disminución de sulfatos en las aguas afectadas por el DAM. Los resultados obtenidos demostraron que los subproductos industriales no solo ofrecen una alternativa viable y sostenible, sino que también cumplen con los estándares ambientales establecidos por la normativa peruana e internacional, contribuyendo a una solución integral y económicamente viable para la gestión de pasivos ambientales mineros.

Los residuos de actividades industriales se identificaron como agentes altamente efectivos en generar alcalinidad, elevando significativamente el pH del DAM tratado. En ensayos específicos, el pH fue elevado superando claramente las condiciones ácidas iniciales y promoviendo un ambiente más neutro necesario para la estabilización química del DAM. Este incremento del pH es vital para prevenir la solubilidad de metales pesados y facilitar su precipitación.

La aplicación de residuos de actividades industriales demostró ser una estrategia efectiva para la reducción de sulfatos en el tratamiento del drenaje ácido de minas (DAM). Aunque el tratamiento logró reducir la concentración de sulfatos por debajo de lo requerido según la normativa peruana e internacional.

La eliminación de hierro (Fe) fue notablemente alta, alcanzando casi la totalidad de remoción del Fe soluble como Fe(II) en los tratamientos aplicados. Esto indica que los materiales utilizados, como los residuos de actividades industriales, no solo ajustan el pH sino que también son muy eficaces en la captura y precipitación de metales pesados, lo que contribuye significativamente a la mitigación del impacto ambiental del DAM.

## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar en la investigación sobre el uso de subproductos industriales como agentes neutralizantes en el tratamiento del DAM. Específicamente, sería beneficioso realizar pruebas a largo plazo en condiciones reales de campo, para determinar la estabilidad química de estos subproductos y su efectividad en diferentes condiciones ambientales. Esto permitiría garantizar que los beneficios observados en estudios de laboratorio se mantengan en el tiempo, lo que es crucial para la implementación a gran escala.

Asimismo, sería valioso optimizar la mezcla de estos subproductos para mejorar aún más su eficacia en la neutralización del pH y la reducción de metales pesados y sulfatos. Experimentos con diferentes combinaciones de subproductos, como cenizas volantes, lodos de hormigón y escorias de procesos industriales, podrían revelar sinergias que potencien la efectividad del tratamiento. Además, se recomienda explorar la posibilidad de incorporar otros agentes complementarios que permitan mejorar la capacidad de eliminación de sulfatos, dado que este es uno de los desafíos persistentes en la remediación de DAM.

Otra recomendación clave es la integración de estos métodos de tratamiento en los instrumentos de gestión ambiental de las operaciones mineras, particularmente en los planes de cierre y post-cierre. La normativa actual ya establece la necesidad de remediar los pasivos ambientales mineros, y la implementación de tecnologías sostenibles como las propuestas en este estudio podría convertirse en una opción viable para cumplir con esos requisitos legales de manera más eficiente y económica.

También se sugiere evaluar el impacto ambiental a largo plazo de la aplicación de estos subproductos en el sitio minero. Es necesario considerar no solo la eficacia en la reducción de DAM, sino también los efectos potenciales en la biodiversidad y la calidad del agua en áreas circundantes. Estudios complementarios deberían incluir monitoreos periódicos de la fauna y flora local, así como de la calidad del suelo y agua, para garantizar que no existan efectos adversos inesperados.

Finalmente, es importante destacar el valor social y económico de la implementación de estos tratamientos. La reutilización de subproductos industriales podría no solo reducir los costos asociados con la remediación del DAM, sino también generar beneficios económicos para las comunidades locales, al promover prácticas de economía circular. Se recomienda trabajar en conjunto con las autoridades locales, empresas mineras y comunidades para diseñar estrategias de implementación que maximicen estos beneficios.

## REFERENCIAS

- AIGBE, U.O., UKHUREBOR, K.E., ONYANCHA, R.B., OSIBOTE, O.A., DARMOKOESOEMO, H. y KUSUMA, H.S., 2021. *Fly ash-based adsorbent for adsorption of heavy metals and dyes from aqueous solution: a review*. 1 septiembre 2021. S.I.: Elsevier Editora Ltda.
- AKCIL, A. y KOLDAS, S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, no. 12-13, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2004.09.006.
- AMOUZADEH OMRANI, M. y MODARRES, A., 2018. Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash-mechanical-environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, vol. 199, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.155.
- BROOSHAN, E., KAUPPILA, T., SZLACHTA, M., JOOSHAKI, M. y LEVEINEN, J., 2023. Utilizing Recycled concrete aggregate for treating Acid mine drainage. *Cleaner Materials*, vol. 9, ISSN 27723976. DOI 10.1016/j.clema.2023.100205.
- BRYAN, C.G., WILLIAMSON, B.J., CAŁUS-MOSZKO, J., VAN HAUTE, Q., GUEZENNEC, A.G., GAYDARDZHIEV, S., WAVRER, P. y FRĄCZEK, R., 2020. CEReS – co-processing of coal mine & electronic wastes: Novel resources for a sustainable future. *Hydrometallurgy*, vol. 197, ISSN 0304386X. DOI 10.1016/j.hydromet.2020.105444.
- CHEN, H., XIAO, T., NING, Z., LI, Q., XIAO, E., LIU, Y., XIAO, Q., LAN, X., MA, L. y LU, F., 2020. In-situ remediation of acid mine drainage from abandoned coal mine by filed pilot-scale passive treatment system: Performance and response of microbial communities to low pH and elevated Fe. *Bioresource Technology*, vol. 317, ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2020.123985.
- CHEN, M., LU, G., GUO, C., YANG, C., WU, J., HUANG, W., YEE, N. y DANG, Z., 2015. Sulfate migration in a river affected by acid mine drainage from the Dabaoshan mining area, South China. *Chemosphere*, vol. 119, ISSN 00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2014.07.094.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA DEL PERÚ, 2021. *Ley N° 31250. Ley del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación (SINACTI)* [en línea]. 2 julio 2021. Lima: Diario Oficial El Peruano. [consulta: 29 septiembre 2023]. Ley N° 31250. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1968664-1>.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1998. *Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption*. 1998. S.I.: Official Journal of the European Communities.

CRANE, R.A. y STEWART, J., 2021. Selective leaching of ecotoxic metals from lime dosing plant metalliferous ochre using acid mine drainage and organic acids. *Minerals Engineering*, vol. 160, ISSN 08926875. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106687.

D.S. N° 010-2010-MINAM, 2010. *Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas*. 2010. S.I.: s.n.

D.S N° 013-2008-EM, 2008. *Dictan disposiciones para el aprovechamiento de residuos de los Proyectos de Cierre o remediación Ambiental a cargo de la empresa del estado Activos Mineros S.A.C.* 2008. S.I.: s.n.

D.S. N° 040-2014-EM, 2014. *Reglamento de protección y gestión ambiental para las actividades de explotación, beneficio, labor general, transporte y almacenamiento minero*. 2014. S.I.: s.n.

D.S. N° 059–2005-EM, 2005. *Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera*. 2005. S.I.: s.n.

D.S.N° 003-2009-EM, 2009. *Modificación del Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera aprobado por D.S. N°-059-2005-EM*. 2009. S.I.: s.n.

EVANGELOU, V.P., 1998. Pyrite Chemistry: The Key for Abatement of Acid Mine Drainage. *Acidic Mining Lakes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 197-222.

FERNANDEZ-ROJO, L., CASIOT, C., LAROCHE, E., TARDY, V., BRUNEEL, O., DELPOUX, S., DESOEUVRE, A., GRAPIN, G., SAVIGNAC, J., BOISSON, J.,

- MORIN, G., BATTAGLIA-BRUNET, F., JOULIAN, C. y HÉRY, M., 2019. A field-pilot for passive bioremediation of As-rich acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, vol. 232, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.11.116.
- GARCÍA-VALERO, A., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S., FAZ, A., RIVERA, J. y ACOSTA, J.A., 2020. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Use of natural alkaline material. *Journal of Water Process Engineering*, vol. 33, ISSN 22147144. DOI 10.1016/j.jwpe.2019.101064.
- GUIMARÃES, D. y LEÃO, V.A., 2014. Fundamental aspects related to batch and fixed-bed sulfate sorption by the macroporous type 1 strong base ion exchange resin Purolite A500. *Journal of Environmental Management*, vol. 145, ISSN 03014797. DOI 10.1016/j.jenvman.2014.06.006.
- HE, J., LI, W., LIU, J., CHEN, S. y FROST, R.L., 2019. Investigation of mineralogical and bacteria diversity in Nanxi River affected by acid mine drainage from the closed coal mine: Implications for characterizing natural attenuation process. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 217, ISSN 13861425. DOI 10.1016/j.saa.2019.03.069.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. del P., 2014. *Metodología de la investigación*. 6ta ed. México: Mc Graw Hill . ISBN 9781456223960.
- HO, H.-J., IIZUKA, A., VADAPALLI, V.R.K., COETZEE, H., PETRIK, L., PETERSEN, J. y OJUMU, T., 2023. Potential investigation of concrete fines as an alternative material: A novel neutralizer for acid mine drainage treatment. *Environmental Technology & Innovation* [en línea], vol. 29, ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2022.102985. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352186422004084>.
- HOLMES, P.R. y CRUNDWELL, F.K., 2000. The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: an electrochemical study. *Geochimica et*

*Cosmochimica Acta*, vol. 64, no. 2, ISSN 00167037. DOI 10.1016/S0016-7037(99)00296-3.

IIZUKA, A., HO, H.-J., SASAKI, T., YOSHIDA, H., HAYAKAWA, Y. y YAMASAKI, A., 2022. Comparative study of acid mine drainage neutralization by calcium hydroxide and concrete sludge-derived material. *Minerals Engineering* [en línea], vol. 188, ISSN 08926875. DOI 10.1016/j.mineng.2022.107819. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687522004290>.

JI, M., LI, B., MAJDI, A., ALKHALIFAH, T., ALTURISE, F. y ALI, H.E., 2023. Application of nano remediation of mine polluted in acid mine drainage water using machine learning model. *Chemosphere*, vol. 311, ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2022.136926.

JOHNSON, D.B. y HALLBERG, K.B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of The Total Environment*, vol. 338, no. 1-2, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2004.09.002.

KEFENI, K.K., MSAGATI, T.A.M. y MAMBA, B.B., 2017. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 151, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.03.082. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617305164>.

KEFENI, K.K., MSAGATI, T.A.M., NKAMBULE, T.T.I. y MAMBA, B.B., 2018. Synthesis and application of hematite nanoparticles for acid mine drainage treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2018.02.037.

KHALID, M.K., AGARWAL, V., WILSON, B.P., TAKALUOMA, E. y LUNDSTRÖM, M., 2020. Applicability of solid process residues as sorbents for the treatment of industrial wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, vol. 246, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118951.

- LANTZ, B., 2019. *Machine learning with R: Expert techniques for predictive modeling*. S.I.: Packt Publishing. ISBN 1788295862.
- LARRAGUIBEL, A., NAVARRETE-CALVO, A., GARCÍA, S., ARMIJOS, V.F. y CARABALLO, M.A., 2020. Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO<sub>3</sub>-rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO<sub>3</sub>). *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.123450.
- LEY N° 28271, 2004. *Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera*. 2004. S.I.: s.n.
- LI, X., GAO, M., HIROYOSHI, N., TABELIN, C.B., TAKETSUGU, T. y ITO, M., 2019. Suppression of pyrite oxidation by ferric-catecholate complexes: An electrochemical study. *Minerals Engineering*, vol. 138, ISSN 08926875. DOI 10.1016/j.mineng.2019.05.005.
- MAHEDI, M., DAYIOGLU, A.Y., CETIN, B. y JONES, S., 2020. Remediation of acid mine drainage with recycled concrete aggregates and fly ash. *Environmental Geotechnics*, vol. 11, no. 1, ISSN 2051803X. DOI 10.1680/jenge.19.00150.
- MINEM/DGAAM, 2006. Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas. [en línea]. S.I.: Disponible en: [https://www.minem.gob.pe/\\_publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50](https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50).
- MINEM/DM, 2022. *RM N° 335-2022-MINEM/DM* [en línea]. 9 septiembre 2022. Perú: Diario Oficial El Peruano. [consulta: 27 noviembre 2023]. RM 355-2022-MINEM/DM. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/3456690-335-2022-minem-dm>.
- MONTGOMERY, D.C., 2002. *Diseño y análisis de experimentos*. Mexico: s.n.
- NARIYAN, E., WOLKERSDORFER, C. y SILLANPÄÄ, M., 2018. Sulfate removal from acid mine water from the deepest active European mine by precipitation and various electrocoagulation configurations. *Journal of Environmental Management*, vol. 227, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.08.095.



- NAVIDI, W., 2006. *Estadística para ingenieros y científicos*. S.l.: s.n. ISBN 9788448156169.
- NYSTRÖM, E., KAASALAINEN, H. y ALAKANGAS, L., 2019. Suitability study of secondary raw materials for prevention of acid rock drainage generation from waste rock. *Journal of Cleaner Production*, vol. 232, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.05.130.
- PARK, I., TABELIN, C.B., JEON, S., LI, X., SENO, K., ITO, M. y HIROYOSHI, N., 2019. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, vol. 219, ISSN 00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.11.053.
- PARK, I., TABELIN, C.B., SENO, K., JEON, S., INANO, H., ITO, M. y HIROYOSHI, N., 2020. Carrier-microencapsulation of arsenopyrite using Al-catecholate complex: nature of oxidation products, effects on anodic and cathodic reactions, and coating stability under simulated weathering conditions. *Heliyon*, vol. 6, no. 1, ISSN 24058440. DOI 10.1016/j.heliyon.2020.e03189.
- PRATINTHONG, N., SANGCHAN, S., CHIMUPALA, Y. y KIJJANAPANICH, P., 2021. Sulfate removal from lignite coal mine drainage in Thailand using ettringite precipitation. *Chemosphere*, vol. 285, ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2021.131357.
- RÍOS-GUERRERO, J. y BALLESTEROS-CAMARO, C.A., 2021. Clasificación química y geotermométrica de sulfuros del depósito aurífero Mina Pilar (Greenstone Belt, Cuadrilátero Ferrífero, Brasil). *Boletín de Geología*, vol. 43, no. 1, ISSN 21458553. DOI 10.18273/revbol.v43n1-2021007.
- ROULIA, M., ALEXOPOULOS, D., ITSKOS, G. y VASILATOS, C., 2022. Lignite fly ash utilization for acid mine drainage neutralization and clean-up. *Cleaner Materials*, vol. 6, ISSN 27723976. DOI 10.1016/j.clema.2022.100142.
- SEPHTON, M.G. y WEBB, J.A., 2019. The role of secondary minerals in remediation of acid mine drainage by Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 367, ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2018.12.035.

- SEPHTON, M.G., WEBB, J.A. y MCKNIGHT, S., 2019. Applications of Portland cement blended with fly ash and acid mine drainage treatment sludge to control acid mine drainage generation from waste rocks. *Applied Geochemistry* [en línea], vol. 103, ISSN 08832927. DOI 10.1016/j.apgeochem.2019.02.005. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0883292719300319>.
- SHABALALA, A. y MASINDI, V., 2022. Insights into mechanisms governing the passive removal of inorganic contaminants from acid mine drainage using permeable reactive barrier. *Journal of Environmental Management*, vol. 321, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2022.115866.
- SIMATE, G.S. y NDLOVU, S., 2014. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 3, ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2014.07.021.
- SITHOLE, N.T., NTULI, F. y OKONTA, F., 2020. Fixed bed column studies for decontamination of acidic mineral effluent using porous fly ash-basic oxygen furnace slag based geopolymers. *Minerals Engineering*, vol. 154, ISSN 08926875. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106397.
- SNYDER, H., 2019. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, vol. 104, ISSN 01482963. DOI 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
- STYLIANOU, M., MONTEL, E., ZISSIMOS, A., CHRISTOFOROU, I., DERMENTZIS, K. y AGAPIOU, A., 2022. Removal of toxic metals and anions from acid mine drainage (AMD) by electrocoagulation: The case of North Mathiatis open cast mine. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 29, ISSN 23525541. DOI 10.1016/j.scp.2022.100737.
- TABELIN, C.B., IGARASHI, T., VILLACORTE-TABELIN, M., PARK, I., OPISO, E.M., ITO, M. y HIROYOSHI, N., 2018. Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: A review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies.

*Science of The Total Environment*, vol. 645, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.103.

TABELIN, C.B., SILWAMBA, M., PAGLINAWAN, F.C., MONDEJAR, A.J.S., DUC, H.G., RESABAL, V.J., OPISO, E.M., IGARASHI, T., TOMIYAMA, S., ITO, M., HIROYOSHI, N. y VILLACORTE-TABELIN, M., 2020. Solid-phase partitioning and release-retention mechanisms of copper, lead, zinc and arsenic in soils impacted by artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities. *Chemosphere*, vol. 260, ISSN 00456535. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.127574.

TAHERDOOST, H., 2022. What are Different Research Approaches? Comprehensive Review of Qualitative, Quantitative, and Mixed Method Research, Their Applications, Types, and Limitations. *Journal of Management Science & Engineering Research*, vol. 5, no. 1, ISSN 2630-4953. DOI 10.30564/jmser.v5i1.4538.

TOMIYAMA, S., IGARASHI, T., TABELIN, C.B., TANGVIROON, P. y II, H., 2019. Acid mine drainage sources and hydrogeochemistry at the Yatani mine, Yamagata, Japan: A geochemical and isotopic study. *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 225, ISSN 18736009. DOI 10.1016/j.jconhyd.2019.103502.

TURINGAN, C.O.A., CORDERO, K.S., SANTOS, A.L., TAN, G.S.L., TABELIN, C.B., ALORRO, R.D. y ORBECIDO, A.H., 2022. Acid Mine Drainage Treatment Using a Process Train with Laterite Mine Waste, Concrete Waste, and Limestone as Treatment Media. *Water* [en línea], vol. 14, no. 7, ISSN 2073-4441. DOI 10.3390/w14071070. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/7/1070>.

TURINGAN, C.O.A., SINGSON, G.B., MELCHOR, B.T., ALORRO, R.D., BELTRAN, A.B. y ORBECIDO, A.H., 2020. Evaluation of Efficiencies of Locally Available Neutralizing Agents for Passive Treatment of Acid Mine Drainage. *Minerals* [en línea], vol. 10, no. 10, ISSN 2075-163X. DOI 10.3390/min10100845. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/10/845>.

- WEINBERG, R., COYTE, R., WANG, Z., DAS, D. y VENGOSH, A., 2022. Water quality implications of the neutralization of acid mine drainage with coal fly ash from India and the United States. *Fuel*, vol. 330, ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2022.125675.
- WILK, Ł.J., CIECHANOWSKA, A. y KOCIOŁEK-BALAWAJD, E., 2020. Removal of sulfides from water using a hybrid ion exchanger containing manganese(IV) oxide. *Separation and Purification Technology*, vol. 231, ISSN 18733794. DOI 10.1016/j.seppur.2019.115882.
- WOOD, D.L., COLE, K.A., HERNDON, E.M. y SINGER, D.M., 2023. Lime slurry treatment of soils developing on abandoned coal mine spoil: Linking contaminant transport from the micrometer to pedon-scale. *Applied Geochemistry*, vol. 151, ISSN 18729134. DOI 10.1016/j.apgeochem.2023.105617.
- ZENG, J., QIU, J., ZHANG, J., QI, Y., LIU, R., JIAN, C., LIU, N. y SU, Y., 2023. Plant ash prevents acid mine drainage from sulfur-bearing tailings through multiple actions — A low-cost alkaline material. *Applied Geochemistry*, vol. 155, ISSN 18729134. DOI 10.1016/j.apgeochem.2023.105702.

## ANEXOS

Tabla 7 Tabla de operacionalización de variables

<b>Variables de estudio</b>	<b>Definición Conceptual</b>	<b>Definición Operacional</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala de Medición</b>
Tipo de Neutralizante	Clasificación de las sustancias utilizadas para tratar el DAM.	Clasificación de los neutralizantes en subproductos industriales o convencionales.	Clase de neutralizante	-Subproducto industrial - Agente convencional	Categoría (Nominal)
Eficacia en pH	Capacidad del neutralizante para incrementar el pH del DAM a niveles neutros o cercanos.	Diferencia en los valores de pH antes y después del tratamiento reportados en los estudios.	Nivel de pH	- Valor de pH inicial - Valor de pH final	Cuantitativa (Ratio)
Eficacia en Metales Pesados	Efectividad del neutralizante en reducir la concentración de metales pesados en el DAM.	Porcentaje de reducción de metales pesados como Cu y Mn después del tratamiento.	Concentración de metales	- Concentración inicial de metales - Concentración final de metales	Cuantitativa (Ratio)
Eficacia en Sulfatos	Efectividad del neutralizante en disminuir la concentración de sulfatos en el DAM.	Porcentaje de reducción de sulfatos después del tratamiento reportado en los estudios.	Concentración de sulfatos	- Concentración inicial de sulfatos - Concentración final de sulfatos	Cuantitativa (Ratio)

Tabla 8 Resumen de los principales estudios para neutralización del Drenaje Ácido de Minas (DAM)

Número	Autor-Año	Método Utilizado	Materiales Estudiados	Reducción de Contaminantes	Principales Conclusiones
1	(Mahedi et al. 2020)	Estudio experimental	Hormigón reciclado (RCA), ceniza volante (FA)	pH neutralizado, reducción de metales, FA aumenta metales	RCA efectivo en neutralización y reducción de metales, FA puede incrementar la contaminación
2	(Brooshan et al. 2023)	Enfoque experimental por lotes	Árido Reciclado de Hormigón (RCA)	Sulfato y metales pesados reducidos significativamente	RCA como solución rentable y sostenible para DAM, excelente en reducción de metales y sulfato
3	(Ho et al. 2023)	Investigación experimental	Finos de concreto	Eliminación de arsénico y hierro	Finos de concreto prometedores como neutralizadores
4	(Ji et al. 2023)	Diseño experimental	Resina de extracción de cobre, tierra diatomeas	Eficiente absorción de cobre	innovadores, necesidad de más estudios sobre emisiones de CO2
5	(Wood et al. 2023)	Experimentos de campo y laboratorio	Lechadas de cal	Mejora en la composición de efluentes	Resina PEI-DE eficaz en la absorción de cobre, especialmente a pH 4
6	(Zeng et al. 2023)	Experimentos estático y dinámico	Ceniza de planta	Reducción significativa de metales pesados	Lechadas de cal prácticas y económicas, necesarias más investigaciones para optimización
7	(Iizuka et al. 2022)	Operación de tanques de reacción	PAdeCS	Eficacia en neutralización y sedimentación por coagulación	Ceniza de planta eficaz en la neutralización ácida y reducción de metales, rol crucial de microorganismos
8	(Rouliia et al. 2022)	Enfoque experimental	Cenizas volantes (FAs)	Regulación del pH y eliminación de iones metálicos	PAdeCS, efectivo y con beneficios ambientales en la reducción de CO2
9	(Shabalala y Masindi 2022)	Experimentos y modelado geoquímico	Materiales cementantes	Eliminación de metales pesados y otros contaminantes	FAs eficientes en la reducción de acidez y metales, potencial en economía circular
10	(Stylianou et al. 2022)	Proceso de electrocoagulación	Electrodos de aluminio	Eliminación alta de metales pesados y aniones	PRB con materiales cementantes como solución efectiva, especialmente con cal
					Electrocoagulación eficaz en combinación con neutralización con cal

Número	Autor-Año	Método Utilizado	Materiales Estudiados	Reducción de Contaminantes	Principales Conclusiones
11	(Turingan et al. 2022)	Análisis factorial	Residuos mineros de laterita, concreto, piedra caliza	Eliminación significativa de metales y sulfatos	Tren de proceso con varios materiales efectivo en tratamiento de DAM
12	(Weinberg et al. 2022)	Experimentos de laboratorio	Cenizas volantes (FA)	Neutralización de DAM y eliminación de metales	FA Clase-C más eficaz, aunque algunas FA pueden aumentar riesgos ambientales
13	(Crane y Stewart 2021)	Evaluación de disolución de metales	DAM, ácido cítrico y ácido oxálico	Disolución selectiva de metales ecotóxicos	Potencial de integración de DAM y ácidos en el proceso LD-HDS para reducir ecotoxicidad
14	(Pratinthong et al. 2021)	Diseño Central Compuesto	Ettringita	Eliminación casi total de sulfato	Condiciones óptimas identificadas para la precipitación de ettringita, importante para la gestión ambiental
15	(Bryan et al. 2020)	Desarrollo de hoja de ruta de coprocesamiento	CEReS	Reducción significativa de sulfato y metales	Estrategia CEReS efectiva para tratamiento de DAM y reducción de impacto ambiental
16	(Chen et al. 2020)	Sistema piloto de tratamiento pasivo	Comunidad microbiana	Eliminación efectiva de hierro	Biorremediación efectiva del DAM, importancia de la composición microbiana
17	(García-Valero et al. 2020)	Diseño experimental tipo batch	Materiales alcalinos (marl, arenisca, costra calcárea)	Reducción significativa de metales y metaloides	Materiales alcalinos eficaces en la neutralización del DAM y reducción de metales
18	(Kefeni et al. 2018)	Investigación experimental	Ceniza de carbón de leña	Eliminación casi completa de metales tóxicos	Ceniza de carbón de leña efectiva y sostenible para tratamiento de DAM
19	(Khalid et al. 2020)	Comparación de adsorbentes	Geopolímeros, sorbente comercial a base de MgO	Remoción de cobre de soluciones acuosas	El sorbente comercial PM (PalPower M10) es prometedor para la remoción de cobre en aguas residuales industriales
20	(Larraguibel et al. 2020)	Uso de witherita y alternativas	Witherita, calcita, cáscaras de huevo, conchas marinas	Reducción de sulfato en aguas residuales industriales	La tecnología DAS mejorada con witherita y alternativas a la piedra caliza es viable
21	(Sithole, Ntuli y Okonta 2020)	Evaluación del potencial de geopolímeros FA/BOFS	Geopolímeros FA/BOFS	Remoción de metales, sulfatos y acidez del DAM	Los geopolímeros FA/BOFS tienen alto potencial para la remoción



Número	Autor-Año	Método Utilizado	Materiales Estudiados	Reducción de Contaminantes	Principales Conclusiones
22	(Turingan et al. 2020)	Comparación de agentes generadores de alcalinidad	Mineral de baja ley, piedra caliza, agregados de concreto, cenizas volantes	Eliminación de metales pesados y sulfatos	efectiva de metales, sulfatos y acidez del DAM Los agregados de concreto son altamente efectivos en el tratamiento del DAM
23	(Fernandez-Rojo et al. 2019)	Evaluación de un biorreactor piloto	Biorreactor piloto	Tratamiento pasivo de aguas ácidas ricas en arsénico	El biorreactor piloto diseñado es efectivo para el tratamiento de aguas ácidas ricas en arsénico
24	(He et al. 2019)	Estudio de las variaciones geoquímicas y biológicas	Muestras de sedimentos y agua de arroyos afectados por el DAM	Variaciones en la química y biología de arroyos afectados por el DAM	El estudio proporciona información importante para entender los efectos del DAM
25	(Nyström, Kaasalainen y Alakangas 2019)	Evaluación del potencial de materiales	Escoria de alto horno, escoria granulada de alto horno, polvo de horno de cemento, ceniza de corteza de árbol, polvo de horno de cal	Prevención de la liberación de ácido, metales y metaloides	Ciertos materiales secundarios primarios pueden prevenir eficazmente el drenaje ácido de roca
26	(Sephton y Webb 2019)	Utilización de cemento Portland	Cemento Portland, cenizas volantes, lodo de neutralización del DAM	Reducción de la generación de DAM	El cemento Portland mezclado con cenizas volantes y lodo de DAM es una opción viable
27	(Tomiyama et al. 2019)	Estudio de la geoquímica del agua subterránea	Análisis geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos e isotópicos	Comprender la formación de DAM en la mina Yatani	Se propone prevenir el contacto entre el oxígeno disuelto y los minerales de sulfuro como método prometedor
28	(Amouzadeh Omrani y Modarres 2018)	Evaluación de aditivos en mezclas recicladas en frío	Cement kiln dust (CKD), coal waste ash (CWA)	Mejora de propiedades mecánicas y evaluación ambiental	CKD y CWA como aditivos en mezclas recicladas en frío de emulsión ofrecen beneficios económicos y ambientales
29	(Kefeni et al. 2018)	Síntesis de nanopartículas de hematita	Nanopartículas de hematita	Eliminación de cationes metálicos del DAM	Las nanopartículas de hematita son prometedoras para el tratamiento del DAM debido a su alta eficacia
30	(Nariyan, Wolkersdorfer y Sillanpää 2018)	Evaluación de la precipitación con cal	Óxido de calcio, electrodos de aluminio y hierro	Remoción de sulfato del agua de mina	La precipitación con cal integrada con electrocoagulación es efectiva para la remoción de sulfato



Autor año	(Brooshan et al. 2023)	(Ho et al. 2023)	(Iizuka et al. 2022)	(Shabalala y Masindi 2022)	(Stylianou et al. 2022)	(Turingan et al. 2022)	(Weinberg et al. 2022)	(Crane y Stewart 2021)	(Pratinthong et al. 2021)	(Larraguibel et al. 2020)	(Sithole, Ntuli y Okonta 2020)	(Turingan et al. 2020)	(Sephton y Webb 2019)	(Sephton, Webb y McKnight 2019)	(Nariyan, Wolkersdorfer y Sillanpää 2018)
Procedencia de la muestra	mina polimetálica	minero sintético	mina abandonada	mina de carbón	mina polimetálica	minero sintético	minero sintético	mina polimetálica	mina de carbón	minero sintético	mina de carbón	minero sintético	mina polimetálica	mina polimetálica	mina polimetálica
Pb	0.07		0.11				0.082	0.06	0.092		0.9				
Sb								0.002							
Sn								0.0003							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1035.6		1703		4373	1300		1023	946.34	1234	3400	1350	93000	9500	130000
V								0.005							
Zn	2.71			1.69	31.4		5	27.81	0.057	2.6	364		589	601	

