

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
ÁCIDAS DE LOS PASIVOS AMBIENTALES
MINEROS EN EL PERÚ”

Tesis para optar al título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Autores:

Anderson Bardales Shuña

Evaristo Vilcazan Mamani

Asesor:

M. Sc. Marieta Eliana Cervantes Peralta

<https://orcid.org/0000-0001-9405-7048>

Cajamarca - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1	Gladys Licapa Redolfo	41379556
Presidente(a)	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Julian Díaz Ruiz	09294063
Secretario(a)	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Irma Horna Hernandez	40317442
Integrante	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

A mis padres y familia quienes son fuente de inspiración inagotable. A Sergio, por haber compartido soñar conmigo y apoyarme incondicionalmente.

Evaristo Vilcazan Mamani

Esta tesis dedico a mi esposa, hijo, padres y hermanos, por el apoyo incondicional que siempre me brindaron durante mi formación personal y profesional; a Dios, quien supo guiarme siempre por el camino correcto, darme la fuerza que necesitaba para seguir adelante y por ayudarme a salir de los problemas que se presentaban.

Anderson Bardales Shuña

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por cada día, a los docentes y amigos por haber marcado un horizonte en la percepción concienciada de nuestra casa común “la tierra”.

Agradezco a mi familia por su continuo apoyo.

Evaristo Vilcazan Mamani

Agradecer a nuestros formadores, que a lo largo de mi vida universitaria se esforzaron para ayudarme a culminar con éxito mi carrera profesional, el proceso no ha sido sencillo, pero estoy muy agradecido por transmitirme sus conocimientos con los que logré culminar el desarrollo de esta tesis con éxito.

Gracias a todas aquellas personas que estuvieron en los momentos felices y tristes y que siempre me apoyaron para salir adelante y cumplir con mis objetivos.

Anderson Bardales Shuña

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Marco teórico	19
1.3. Formulación del problema	26
1.4. Objetivos	26
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	27
2.1. Tipo de investigación	27
2.2. Técnicas e instrumentos de la recolección y análisis de datos	28
2.3. Instrumento de recolección y análisis de datos	28
2.4. Procedimiento	29
CAPÍTULO III: RESULTADOS	32
3.1. Identificación de los sistemas de tratamiento en pasivos ambientales mineros en Perú	34
3.2. Clasificación de sistemas de tratamientos utilizados en Perú	42
3.3. Eficiencia de sistemas de tratamientos utilizados en Perú	43
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	44
4.1. Discusión	44
4.2. Conclusiones	48

	49
	55
Anexo 01: Matriz de consistencia	55
Anexo 02: Fichas de registro de investigaciones	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01; <i>Resultados del sistema pasivo Bacterias sulfato-reactoras aplicado</i>	pág. 35
Tabla 02; <i>Resultados del sistema pasivo Bacterias Sulfato reactivas aplicado</i>	pág. 36
Tabla 03; <i>Resultados del sistema pasivo sustrato alcalino disperso aplicado</i>	pág. 37
Tabla 04; <i>Resultados del sistema pasivo humedal aplicado</i>	pág. 38
Tabla 05; <i>Resultados del sistema mixto Productores continuos de alcalinidad aplicado</i>	pág. 40
Tabla 06; <i>Resultados de dos sistemas pasivos Drenajes Anóxico Calizo y Humedal aplicado</i>	pág. 41
Tabla 07; <i>Resultados del sistema activo usando cal, alumbre y almidón aplicado</i>	pág. 42
Tabla 08; <i>Sistemas de tratamiento de aguas ácidas de pasivo ambiental minero en el Perú</i>	pág. 43
Tabla 09; <i>Eficiencia de los sistemas de tratamiento de pasivos ambientales mineros</i>	pág. 44

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 01</i> ; número de PAMs, según actualización de inventario anual.....	<i>pág. 24</i>
<i>Figura 02</i> ; Distribución porcentual de los PAMs, según la actualización del monitoreo al año 2019.....	<i>pág. 25</i>
<i>Figura 03</i> ; Distribución porcentual y numérica de PAMs en las cinco regiones.....	<i>pág. 26</i>
<i>Figura 04</i> ; Tendencia de la identificación de PAMs, en la región Cajamarca.....	<i>pág. 26</i>
<i>Figura 05</i> ; Ejemplo de contenido de una ficha de registro.....	<i>pág. 29</i>
<i>Figura 06</i> ; Procedimiento de la búsqueda de la información documentaria.....	<i>pág. 31</i>
<i>Figura 07</i> ; Flujograma para la valoración de Pasivo Ambiental Minero.....	<i>pág. 34</i>

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es revisar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas en los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), la preocupación en la prevención, mitigación y tratamiento dio buenos avances en investigación que se puede encontrar en la base de datos regionales e internacionales Redalyc, Scielo, Dialnet, Springer y Elsevier, se realiza una búsqueda sistemática, usando palabras claves referidos a las variables del trabajo; se obtuvo como resultados encontrados como respuesta al problema de investigación se tiene los sistemas de tratamiento pasivo y activo en recuento de la información se ha encontrado también métodos emergentes, fitorremediación y la biotecnología. Concluyendo que los tratamientos utilizados para remover metales y aumentar pH son los humedales artificiales, uso de bacterias sulfato reductoras, Fitorremediación, la metodología de sustrato alcalino disperso, canales de roca caliza y adición de cal directa para aumentar el pH. De igual forma, entre las metodologías más eficientes se encuentra los humedales artificiales, cuando utilizan la fitorremediación y uso de bacterias sulfato reductoras, llegando a una eficiencia entre el 90% y hasta el 100% en el mejor de los casos

PALABRAS CLAVES: Pasivo Ambiental Minero, Tratamiento, Aguas y drenaje ácidos de mina

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La actividad minera metálica y de carbón en el mundo y en los países que han desarrollado estas industrias presenta una preocupación común, residuos de los procesos del beneficio de los minerales, instalaciones, escombreras y efluentes como recuerdos de estas actividades extractivas. Actividades que han operado sin conciencia ambiental y menos con un marco normativo en el pasado (RoyChowdhry, Sarkar y Datta, 2015), extendiéndose una problemática ambiental por los Drenajes Ácidos de Mina, los DAM o Acid Mine Drainage (AMD) en inglés, uno de los más considerables pasivos que sin ningún control comprende la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

La urgencia de evitar la formación de DAM, ha iniciado avances en las investigaciones en la predicción, prevención y tratamiento de estos efluentes, a nivel internacional se ha reconocido la problemática; se ha unido esfuerzos para compartir los avances en la literatura, algunos logros consolidados a nivel internacional son la International Network for Acid Prevention (INAP): empresas mineras asociadas para el control de los DAM, la Acid Drainage Technology Initiative (ADTI) agrupa a agencias federales, estatales, industrias, universidades consultoras que trabajan en temas como la prevención y control de los drenajes ácidos, también está la Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND) órgano creado por el ámbito estatal del gobierno canadiense, teniendo como meta extender tecnologías para mitigar los impactos de los DAM y por otra parte de la International Mine Water Association que cuenta con la comisión europea la Partnership for Acid Drainage Remediation (PADRE), orientada a las investigaciones en la mejora de tratamiento de DAM (Pozo, Puente, Lagüela y Veiga, 2017, pp. 76), por ultimo tenemos a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, quien contribuye con las revisiones, análisis y propuestas para los países con alto número de pasivos ambientales mineros en la región.

Los Pasivos Ambientales Mineros deben ser definidos, como los daños ambientales no reparados por las actividades minero-extractivas en el periodo activo (exploración, construcción, operación y cierre) en el pasado y presente minero del país. Lo que ha puesto en evidencia esa deuda e incumplimiento de la actividad extractiva hoy es uno de los problemas más complejos que se tiene que enfrentar el estado. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe, define que “La denominación “pasivo ambiental minero” “hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño u operador identificados y en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad componente” (CEPAL, 2008, pp. 9).

El material descartado estéril de mina y los residuos del proceso o relaves de las extracción de los minerales que se encuentran expuestas al oxígeno y al agua de lluvia son de aguas ácidas, en el primer caso se oxida la Pirita (FeS_2), Enargita (CuFeS_2), en una atmosfera oxidante, posteriormente se inicia la oxidación de sulfuros menos susceptibles como la Arsenopirita (FeAsS), Calcopirita (CuFeS), Marcasita (FeS_2) y la Esfalerita (ZnS) consecuentemente empieza la lixiviación de las aguas ácidas. (Pozo et al, 2017, pp. 86 – 87). y (Jara 2011, pp. 233). Los relaves y su potencial generador de DAM representan un problema para el medio ambientes, ya que estos se van adicionando a los cuerpos de agua mediante percolación, lavado y arrastre de estos.

Los factores determinantes según su influencia en la generación de los DAM; primero las rocas minerales sulfuradas, relaves con alto contenido en metales pesados donde principalmente oxida la pirita, la geoquímica del área puede contribuir a la generación o atenuación, segundo oxidan los sulfuros menos susceptibles como la pirita, arsenopirita, calcopirita, marcasita y la esfalerita, tercero dependiendo de la disponibilidad de minerales en las aguas ácidas, lixiviación, arcilla, carbonatos y feldespatos finalmente se contará con la

deposición de iones disueltos en forma de sulfato como la epsomita, yeso, melanterita, jorosita, alunita y entre otros (Jara, 2011).

La generación de Drenajes Ácidos de Mina (DAM) se ha convertido en una de las problemáticas ambientales más preocupantes procedentes de la meteorización y oxidación de sulfuros metálicos, estos drenajes tienen la particularidad de tener un Potencial de Hidrogeno (pH) bajo, solutos alcalinos mínimos y una acidez en aumento, niveles altos de metales pesados, mayormente contiene Hierro, Manganeso, Aluminio y Zinc (Sánchez y Ferreira, 2016).

Los avances en la literatura, en la caracterización de los potenciales generadores de acidez están bien documentados, esto puede variar de acuerdo con las configuraciones geológicas del área u los residuos expuestos. Estos efluentes líquidos además de presentar características muy visibles también pueden contener sólidos disueltos en suspensión o coloidales, cationes y aniones, el grado de toxicidad puede ser diferente según los puntos de generación, sin embargo, representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos y a la salud humana

1.1. Realidad problemática

La minería cumple un rol fundamental en la economía de los países del mundo, dentro de los que se encuentra el Perú y donde constituye un gran factor de desarrollo: siendo el primer proveedor de divisas aporta hoy más del 60% del total de nuestros ingresos por exportaciones; no obstante es también un generador de residuos, los cuales, si no son adecuadamente manejados, tienen el potencial de generar impactos ambientales que podrían permanecer mucho tiempo después del cierre de las operaciones (impactos a perpetuidad); en particular, los relaves y desmontes de mina pueden contener sulfurosos metálicos que, al quedar expuestas al oxígeno de la atmósfera y las aguas de lluvia, son oxidados y generan drenaje ácido, también está el caso de los metales en la solución

como el plomo, iniciando una fuente de contaminación que luego es muy difícil y costoso de controlar (Andía y Lagos, 2000).

La minería es una de las actividades con una gran fuente de generación de DAM, este resulta ser un contaminante de los recursos hídricos. Los drenajes ácidos (DAM) de antiguas minas de carbón y minería metálica son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en el mundo.

Estos drenajes son tóxicos en diversos grados para el hombre, la fauna y la vegetación, contienen metales disueltos y orgánicos solubles e insolubles.

La minería es una actividad transitoria, y una vez que finaliza las operaciones mineras, se llevan a cabo actividades de cierre para minimizar el impacto ambiental de un sitio minero. Estas actividades pueden incluir limpiar cualquier mineral depositados en pilas de lixiviación para eliminar los restos químicos, drenar y tapar los estanques de relaves con arcilla densa para evitar la filtración de agua y la contaminación del agua subterránea, eliminar o estabilizar cualquier mineral contaminante en el sitio. El monitoreo y tratamiento del agua es a menudo un componente del plan de cierre de minas, especialmente donde se forma Drenajes Ácidos de Mina.

Actualmente en nuestro país se están impulsando políticas de remediación ambiental minera, se ha iniciado a identificarlos, comunicando a los responsables existentes y de aquellos abandonados o huérfanos se está haciendo cargo el gobierno a través de la empresa estatal Activos Mineros de derecho privado. Se cuenta con una normativa desde el 2004 la Ley N° 28271, Ley que regula los Pasivos Ambientales de la actividad Minera que de acuerdo con la CEPAL es uno de los países pioneros en legislar en la materia entre los que más minería desarrolla en América del Sur, lo que le ha permitido iniciar

con la gestión de los PAM, partiendo del mapeo de los pasivos ambientales mineros a nivel nacional e identificar los responsables.

Iniciativa normativa que ha tenido una acogida y aceptación internacional que extendieron su respaldo, uno de los más concretos en anunciarse fue la Mine Reclamation Cooperation de Corea (MIRECO), juntamente con el Ministerio de Energía y Minas de Perú (MINEM) de acuerdo a su página web impulsaron un proyecto de “Fortalecimiento de la gestión para la remediación de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú” para cooperar en actividades y proyectos que fortalezcan en campo (Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2018)

También el Organismo para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la CEPAL realizaron un estudio en el país llamado “Evaluación de Desempeño Ambiental” donde se enumeran una serie de recomendaciones que deberían concretarse para la OCDE, ya que todos sus miembros cuentan con esas exigencias. La gestión de los PAMs, era una de las recomendaciones, se solicita “continuar con las políticas” que se habían iniciado para mitigar la problemática, “profundizar la generación de información sobre riesgos, aprovechar su potencial económico, determinar la prioridad y responsables, diseñar e implementar mecanismos de monitoreo” (Chappuis, 2019, pp. 9)

Según la actualización al 2021, inventario de Pasivos Ambientales Mineros, realizada por la Dirección General de Minería del Ministerio de Energía y Minas aprobada por la Resolución Ministerial N° 200-2021-MEN/DM, se ha realizado en inventario, dando un número total de 7 668 (siete mil seiscientos sesenta y ocho) Pasivos Ambientales Mineros a nivel nacional en veinte departamentos, esto en cumplimiento de la Ley 28271, en su artículo 3, referido a la identificación, elaboración y actualización del inventario de los PAMs, refiere que “serán efectuadas por el órgano técnico competente

del Ministerio de Energía y Minas”, adicionalmente la norma establece la atribución de los responsables de los Pasivos Ambientales Mineros, cuando los titulares mineros mantienen el “derecho a la titularidad de la concesión a través de la vigencia minera, deberán presentar el plan de cierre” y en caso que no se haya podido identificar el responsable, refiere la ley “ el estado asumirá progresivamente los pasivos ambientales mineros en abandono” Ley 28271, (2004).

La misma norma y sus reglamentos se menciona las fases del manejo de los PAMs, se inicia con la actualización del inventario que cumple con la identificación, caracterización y priorización según el riesgo evaluado, luego sigue la determinación de los responsables, ya determinado los responsables empieza la elaboración de estudios de ingeniería para la remediación que haya asumido el estado y finalmente se ejecuta las obras de remediación de los PAMs.

Según Servendi (2019), indica que Cajamarca, en base a la actualización del inventario del Ministerio de Energía y Minas, se encuentra en el segundo lugar con un total de 1 183 Pasivos Ambientales Mineros ubicados en la región y la mayor parte se encuentra en el distrito de Hualgayoc con 1 067 PAMs. Todos los pasivos ambientales inventariados y no contabilizados tienen la capacidad de generar los Drenajes Ácidos en menor o mayor grado según su composición mineralógica. Esto genera gran preocupación y una percepción negativa de la actividad minera en la ciudadanía por el deterioro de los ecosistemas acuáticos, suelos y la salud de las personas.

Como avances en proponer soluciones a la problemática se ha planteado como primera medida de mitigación de los drenajes ácidos de mina, prevenir antes que su generación sea incontrolable, para ello, se ensayan nuevas opciones y se recomienda una adecuada gestión de los residuos mineros, entre los tratamientos de los DAM

encontramos que existen sistemas pasivos y activos en este trabajo nos avocaremos en ambos sistemas de tratamiento, los activos podemos diferenciarlos a aquellos que emplean agentes químicos y ofrecen un proceso más dinámico donde se emplea Carbonato de Calcio (CaCO_3), Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2), Hidróxido de Sodio (NaOH) e Hidróxido de Magnesio (Mg(OH)_2) (RoyChowdhry et al, 2015, pp. 133).

Así mismo Sánchez y Ferreira (2016) indican que estos químicos normalmente tienen un alto costo, por lo que la disponibilidad y acceso a estos recursos es limitado y los tratamientos pasivos son aquellos que simulan procesos físicos, químicos y biológicos que la naturaleza realiza ante una amenaza a su equilibrio o la sostenibilidad en los ecosistemas, entre estas reacciones están los humedales artificiales, reactores anaeróbicos de sulfato biorreactores, drenajes de piedra caliza anóxica, canales de piedra caliza, camas de lixiviación de piedra caliza y camas de lixiviación de escorias. El alcance del trabajo es revisar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de pasivo ambiental minero, los métodos de tratamiento tienen distintos requerimientos para su aplicación, también depende de su disponibilidad de materiales ante el problema ambiental.

León (2018) en su estudio, "Aplicación de método de tratamiento pasivo Dispersed Alkaline Substrate (DAS), para remoción de metales, contenidos en drenaje ácido de mina Julcani, Perú" planeó probar la capacidad de tratamiento del sistema DAS; con sustrato DAS-Caliza y DAS-Magnesio, la autora ensayó esta alternativa debido a deficiencias presentadas en los sistemas de tratamiento pasivo para DAMs, por la saturación del medio, pérdida de la porosidad del medio reactivo y la pasivación de los sustratos reactivos que compromete el éxito del sistema de tratamiento pasivo. el proceso de la experimentación involucró construir y mantener a escala laboratorio, la

operatividad del sistema por 24 horas y nueve semanas, realizar seguimiento para la caracterización hidroquímica del DAM Julcani presentando valores de pH <3, 10.7 de pe, 3380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de Conductividad Eléctrica, 452 mg/L de Fe total, especiación variante entre 298 mg/L de Fe (II) y 127 mg/L de Fe (III), 120 mg/L de Mn, 2052 mg/L de SO_4^{-2} en menor concentración, 19 mg/L de Zn y 10 mg/L de Al y con concentraciones de metales minoritarios en 51 $\mu\text{g}/\text{L}$ de Cd, 179 $\mu\text{g}/\text{L}$ Co, 208 $\mu\text{g}/\text{L}$ de Ni y 101 $\mu\text{g}/\text{L}$ de Pb. Consideró para fines del trabajo el cálculo de la acidez neta obteniendo; una concentración de 1175 mg/L como equivalente de CaCO_3 , este valor influenciado por la mayor concentración de Fe y Mn de 74 y 21% respectivamente. El sustrato DAS-Caliza estaría gobernada por el intercambio superficial del sulfato y cationes básicos que amortiguan el pH hasta 5.5. El DAS-Magnesio influye en la variación del pH que depende de la disolución de MgO en el medio, que aumenta la concentración de Mg en el medio con la finalidad de elevar el pH amortiguando al sistema entre 8.5 a 10.5, con un flujo de 0.432 l/día alcanzó una remoción del 100% de metales presentes en la muestra. Obteniendo valores dentro del rango de los Estándares de Calidad Ambiental para agua.

Quispe (2021) en su trabajo “Evaluación de pasivo ambientales mineros en mesa de plata, Río Hualgayoc Cajamarca” planteó evaluar los PAMs en la microcuenca de Mesa de Plata; para ello, determina el volumen del desmonte y tipos de PAMs, pasivos acumulados cinco (desmonte) con un volumen de 1, 038, 344 m^3 y drenajes ácidos para determinar la calidad de las aguas ácidas. Realizó una evaluación de la Importancia de Pasivos Ambientales mediante una Matriz con datos obtenidos en campo e interpreta los datos generados como línea de base mediante fichas de inventario ambiental en las cinco zonas de afectación al agua, suelo y flora. Obtuvo como resultado una afectación de

moderado a alto. Sus evaluaciones de la calidad de las aguas ácidas en los cinco puntos de muestreo revelan que en dos puntos el valor del pH <6 , con un caudal menor a los otros puntos de muestreo. El autor afirma que en los meses de estiaje (junio – septiembre) el pH baja a niveles inferiores a seis y en los meses de lluvia el pH aumenta a nueve por el aumento del caudal. En promedio obtiene un pH de 7.73 que está dentro de los LMP. Con los resultados de la evaluación de los PAMs propone la biorremediación con plantas nativas *Calamagrostis ligata*, *Cyperus* y *Juncus imbricatus* para la bioacumulación de los metales como Pb, As, y Cu. Los PAMs del estudio se encontraba con una remediación parcial cuatro de cinco.

De igual forma, Aduvire y Aduvire (2021) en su estudio "Diagnostico y rehabilitación de bofedales afectados por Pasivos Ambientales Mineros" reconoce y cita la normativa nacional peruana fomentada por el Ministerio del Ambiente, que considera a los bofedales como ecosistemas frágiles, agrega también la Estrategia Nacional de Humedales. Los autores realizan un diagnóstico situacional del bofedal con la identificación de las características climáticas, geológicas, hidrológicas y las del suelo. Además de una línea de base ecológica, flora y fauna. Identifican las fuentes de emisión de contaminantes del PAM (acumulado de desmonte) con drenajes de aguas ácidas, que es evaluado mediante ensayos de laboratorio de Acid-Base Accounting (ABA) para conocer la cantidad de ácido que podría generar. Luego del análisis se lee en base al criterio del Potencial Netos de Neutralización (NNP) y la Razón de Potencial Neto (NPR). De acuerdo con los resultados el PAM tiene un potencial generador de acidez por lo que se retira y traslada a un depósito de desmonte para aislarlo y estabilización geoquímica. Así mismo, se usa la información obtenida en el censo de la vegetación para

la selección en la propuesta de recuperar la funcionalidad ecológica de la zona afectada por el PAM.

Paredes y Villanueva (2004), en su trabajo de investigación a nivel laboratorio realizaron un aserie de experimentos y lograron incrementar el pH de 2.39 a 7.23, con una remoción de 94,8% de sulfatos; 99,60% de precipitación de hierro, 99,23% de plomo, y 98,57% de cobre empleando BSR y mecanismos de bioadsorción con especies fitorremediadoras (44 especies identificadas). Este sistema sinérgico se denomina sistema de humedales o wetlands, el humedal se implementó en la Cancha de Relave Mesapata (Huaraz).

De igual forma en la investigación titulada “Evaluación de riesgo ambiental generado por pasivo ambiental minero en la calidad de agua superficial” desarrollada por Cervantes y Quita (2020) plantean como objetivo pronosticar el nivel de riesgo ambiental para los PAMs en la calidad de agua superficial de la localidad de San Miguel de Viso; para ello emplean la metodología propuesta por el MINAM titulada Guía de Evaluación de Riesgo Ambiental. De ello los resultados indican que los pasivos tolva de mineral (PAS-1) y la bocamina (PAS-14) representan un nivel de riesgo moderado; y la relavera (PAS-8) y la bocamina (PAS-16) representan un nivel de riesgo significativo para la calidad de agua superficial.

1.2. Marco teórico

1.2.1. Definición de Pasivo Ambiental Minero

De acuerdo con la Ley N° 28271, artículo 2°. Ley que regula los pasivos ambientales mineros de la actividad minera que viene del 2004, define a los PAMs como “aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que

constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad”. El abandono de estas instalaciones, socavones, disposición de residuos mineros, residuos sólidos y la generación de drenajes ácidos son hoy una preocupación mayor al ocasionar daño ambiental.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe reconocida como un organismo dependiente de la Organización de las Naciones Unidas encargada de promover el desarrollo económico y social de la región también considera que los PAMs “hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño u operador identificados y en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad competente”, definición que involucra no solo un cumplimiento legal, sino, que deben contar con una certificación ambiental por la autoridad encargada de la gestión, regulación de instrumentos y el de los monitoreos.

1.2.2. Normativa para los Pasivos Ambientales Mineros en el Perú

Ley N° 28271, Ley que regula los pasivos ambientales mineros de la actividad minera, emitido el 02 de julio del 2004.

Decreto Supremo N° 059-2005-EM. Aprueba el Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera.

Ley N° 28526, Ley que modifica los artículos 5°, 6°, 7° y 8° la primera disposición complementaria y final de la Ley N° 28271, ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, y le añade una tercera disposición complementaria y final, emitido el 25 de mayo del 2005.

Decreto Legislativo que modifica y adiciona diversos artículos a la Ley N° 28271, ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, a fin de “hacer posible

la mayor participación en las distintas modalidades a terceros en la remediación de pasivos ambientales, además de establecer los incentivos para su identificación y remediación, y permitir su reutilización, reaprovechamiento, uso alternativo o turístico”.

Modifican reglamento de pasivos ambientales mineros de la actividad minera aprobada por D.S. N° 059-2005-EM, mediante Decreto Supremo N° 003-2009-EM. Del 2007 al 2010, inicia la elaboración de estándares para la priorización de cuencas y PAM implementación del Sistema de Gestión de Pasivos Ambientales Mineros (SIGEPAM) y la elaboración de un plan de manejo ambiental, según R.D. N°209-2010-MEN-DGM.

Y otros instrumentos como la guía para la elaboración de planes de cierre de pasivos ambientales mineros el 18 de agosto de 2021, se publicó en el Diario Oficial El Peruano, la Ley N° 31347, mediante la cual se modifica la Ley N° 28090 “Ley que regula el cierre de minas”. estos últimos para prevenir la generación de nuevos PAMs en el país y el cumplimiento de los planes de cierre. A pesar de los avances en materia normativa se percibe aun una insuficiente gestión empezando con el respeto de la institucionalidad y ejercer una gobernanza adecuada para alcanzar el cumplimiento de los objetivos y minimizar “los riesgos a la salud de la población, a los ecosistemas circundantes y para la propiedad” (Chappuis, 2019, pp. 12).

1.2.3. Proceso de la gestión de PAMs en el Perú

El proceso de la gestión de los PAMs, de acuerdo con la normativa arriba mencionada debe seguir cinco fases.

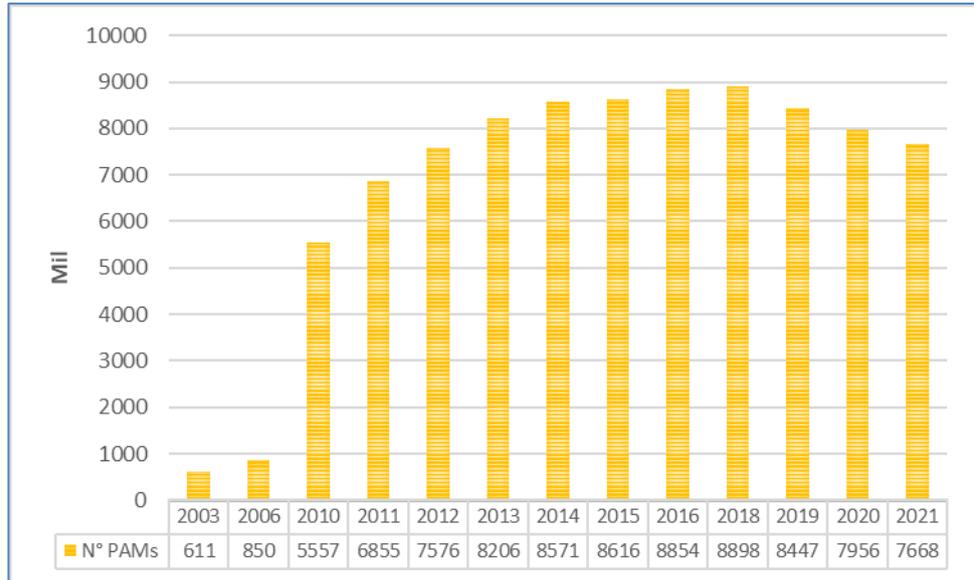
- ✓ En la primera, que obedece a la actualización del inventario nacional también comprende la identificación, caracterización y priorización, todo proceso de

la evaluación se basa en los datos obtenidos en campo mediante el uso de las seis fichas aprobadas mediante Resolución Directoral 173-2009-MEN-DGM. Las fichas desarrollan tres criterios: Riesgo a la salud humana, Riesgo a la salud humana y ambiente físico y el Riesgo a la fauna silvestre y conservación, además de los datos generales de los PAMs.

- ✓ En la segunda fase, debe determinarse el remediador, este puede ser el generador identificado o voluntario, caso contrario el estado asume la remediación.
- ✓ La tercera fase, se inicia a proyectar los estudios de ingeniería necesarios para el Plan de Cierre de Pasivos Ambientales Mineros (PCPAM), sea el remediador que asume la responsabilidad o Activos Mineros encomendado por la Dirección General de Minería.
- ✓ En la cuarta fase, Valoración y Aprobación del PCPAM.
- ✓ Quinta fase, la ejecución del PCPAM.

1.2.4. Datos de la actualización del inventario nacional de PAMs

En cumplimiento del artículo 3°, de la Ley 28271 de la identificación e inventario de PAM, se cuenta con los números de pasivos ambientales mineros por año.



Fuente: Dirección General de Minería y MINEM.

Figura 01. Número de PAMs, según la actualización de los inventarios anuales al 2021

Nota: Número de pasivos ambientales mineros identificados desde el año 2003 que en ese entonces se abarcó 17 regiones del país registrando un total de 611, de ese año hasta el 2005, 2007, 2008, 2009 y 2017 no se cuenta con los datos de la actualización en la base de datos del MINEM. En el 2006 se había llegado a 20 regiones a inventariar un total de 850. Este último año total está en descenso debido a la exclusión de algunos pasivos que ya están en proceso de remediación.

La distribución según la última actualización que registra los Pasivos Ambientales Mineros realizado en el 2019 en las 21 regiones del país, el número de los PAMs está marcado en las regiones con una actividad minera muy dinámica en el pasado y hasta la actualidad.

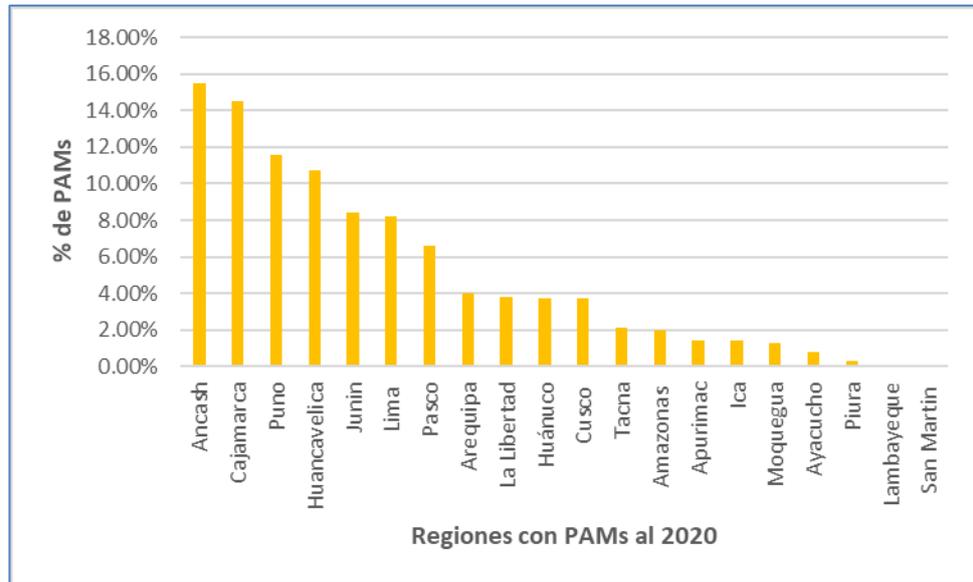


Figura 02. Distribución porcentual de los PAMs en regiones, según la actualización del inventario al año 2020

Fuente: En base a los datos. Pasivos Ambientales Mineros en el Perú: Resultado de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAMs – Contraloría General de la República.

La concentración de PAMs, identificados por el MINEM al 2020 se encuentra principalmente en cinco regiones que sumados la cantidad total representa el 60.7% a nivel nacional, el cumplimiento de la normativa nacional debe lograr hacer un registro de priorización para su tratamiento según la evaluación del riesgo, así mismo, deben completar los Instrumentos de Gestión para los PAMs, el Inventario de los PAMs, el Plan de Cierre y la Certificación de Cierre Final que establece la normativa vigente.

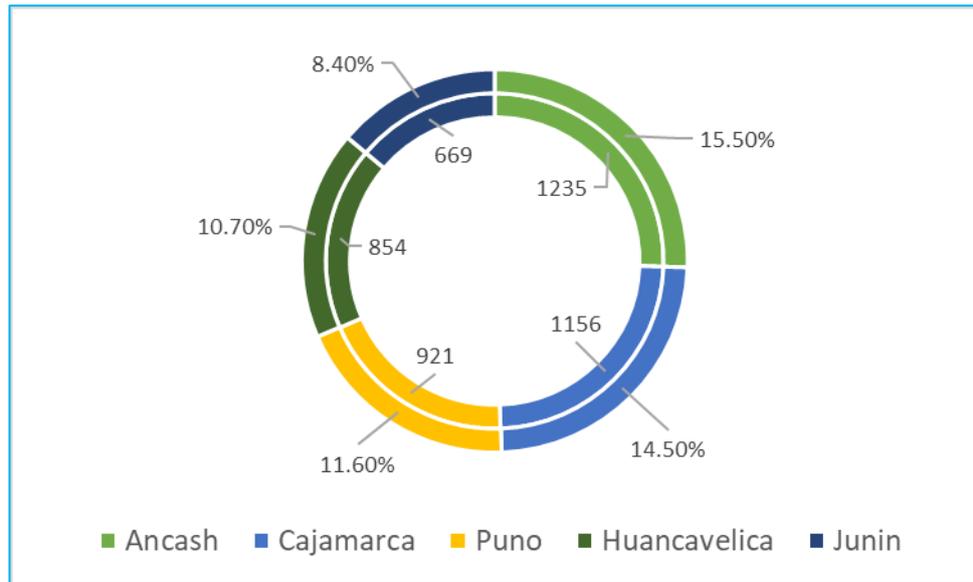


Figura 03. Distribución porcentual y numérica de los PAMs, en las cinco regiones al 2020

Nota: Cinco regiones con mayor cantidad de PAMs, identificados que representa en 61%.

El caso de las regiones con mayor impacto por los PAMs en el país es también Cajamarca, el número identificado de pasivos ambientales mineros ha ido en aumento hasta el año 2018, además, de tener la mayor cantidad de PAMs en condiciones de muy alto riesgo según la Contraloría General de la República (2022), con en el último año de la actualización la cantidad disminuye debido a que está en proceso de tratamiento por parte de la entidad estatal Activos Mineros S.A.C., cuya información no están pública.

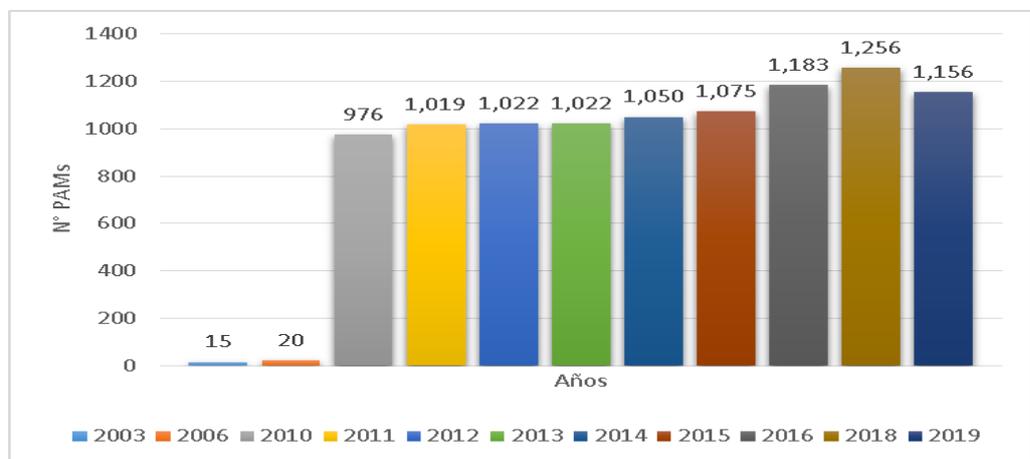


Figura 04. Tendencia en la identificación de PAMs, en la región Cajamarca

Fuente: Dirección General de Minería – Ministerio de Energía y Minas al 2020

Dada la problemática de los Pasivos Ambientales Mineros en el país, surge la necesidad de recabar información de los Sistemas de Tratamiento existentes a nivel internacional y nacional y cuál de ellas se vienen aplicando con mayor eficiencia en las remediaciones o mitigación de los impactos a los ecosistemas en el territorio nacional.

1.3. Formulación del problema

¿Cuáles son los sistemas de tratamiento de las aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el Perú?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el Perú.

1.4.2. Objetivos específicos

Identificar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el país.

Clasificar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros.

Describir la metodología más eficiente de los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La metodología general de la investigación es explicativo y documental, complementariamente se presenta y se discute los resultados.

De acuerdo con Hernández et al, (2014) una investigación descriptiva es cuando considera el fenómeno de estudio, miden conceptos y variables, generan un sentido de entendimiento y son rigurosamente estructuradas. Por lo tanto, se recoge la información de manera conjunta de las variables mas no se busca relacionarlas (pp. 92).

Se organiza la información basada en la evidencia, con el fin de conocer los avances de tratamiento existentes para las aguas ácidas de pasivos ambientales mineros.

De igual forma, se enmarca en el tipo transversal ya que los datos serán recolectados en un momento único (Ñaupas et al, 2014, pp. 343).

2.2. Técnicas e instrumentos de la recolección y análisis de datos

Se recurre al método de investigación explicativa y en base al estado de la evidencia, mediante el análisis documental revisión de las fuentes primarias y secundarias; libros, revistas, artículos y tesis de postgrado y pregrado son utilizados para reunir la documentación a cerca de las variables, sistemas de tratamiento y aguas ácidas de pasivo ambiental minero. Una de las herramientas a usar es la ficha de registro de datos.

2.3. Instrumento de recolección y análisis de datos

Autores: Bejarano, J. J. y Estacio, J. M.

Título: Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo combinado con humedal en la Mina Michiquillay – Encañada

Año: 2019

Universidad: Universidad Privada del Norte – Cajamarca

Tipo de documento: Tesis de grado

Resumen: El estudio realizó la simulación de tratamiento con una muestra de 120L divididos en tres ensayos, utilizaron 250 gr de piedra caliza por 40 L y 7 kg. De materia orgánica. Logro la neutralización en un tiempo de tres días de 3.9 a 7 de pH complementando con humedad de 50 cm de carga orgánica, 30 cm de agua pre

Figura 05. Ejemplo de contenido de ficha de registro

En logro del objetivo a desarrollar en este trabajo se realizará la recolección de información que incluya la valoración de las variables, en esta metodología se aplica para la identificación de lo principal en la investigación de interés para la revisión, tienen una alta aceptación y credibilidad en su forma de buscar, organizar y comparar los estudios desarrollados en el área elegida (Banet et al, 2015); así mismo, facilita la organización de los resultados de las indagaciones primarias apoyándose en lo planteado para alejarse de los errores que usualmente se suele incurrir como la pérdida de objetividad o no tener bases académicas que respalden los métodos de la investigación. El horizonte del trabajo está direccionado en las aplicaciones existentes en el tratamiento y neutralización de las aguas ácidas, para ello se realiza una búsqueda de la documentación existente.

La búsqueda de la documentación se emprende en dos etapas, primero de manera sistemática en las revistas académicas indexadas, centros de investigación en minería y medio ambiente y bases de datos regionales principalmente en la lengua española e inglés Redalyc, Scielo, Dialnet y el repositorio regional La Referencia y nacional Renati, internacionales Ebsco, Springer y Elsevier. Bases de datos que han ofrecido mayores números de estudios o aplicaciones con referencia a las variables elegidas, se hace una selección de los estudios por los títulos y resúmenes individualmente.

La segunda etapa es una búsqueda manual en las referencias bibliográficas que nos llevarán a los estudios primarios, se deduce la importancia de separarlos los trabajos más resaltantes que nos enlazan directamente a nuestro problema de investigación. La búsqueda empieza con la identificación de las palabras claves que comprenden las variables del trabajo.



Figura 06. Procedimiento de la búsqueda documental

Nota: secuencia gráfica de la búsqueda bibliográfica.

La revisión de los documentos secundarios y terciarios nos facilita los títulos de documentos primarios donde encontramos conceptos y principios fundamentales del tema, adicionalmente nos guiarán a instituciones especializadas que difunden investigaciones, tecnologías y todo los avances que se vienen dando en la problemática tratada, las más destacadas son la International Network for Acid Prevention (INAP), la Acid Drainage Technology Initiative (ADTI), la Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND) y también la Mine Water Association (Pozo et al., 2017), en el ámbito regional tenemos la Comisión Económica Para América Latina, que disponen de investigaciones al respecto.

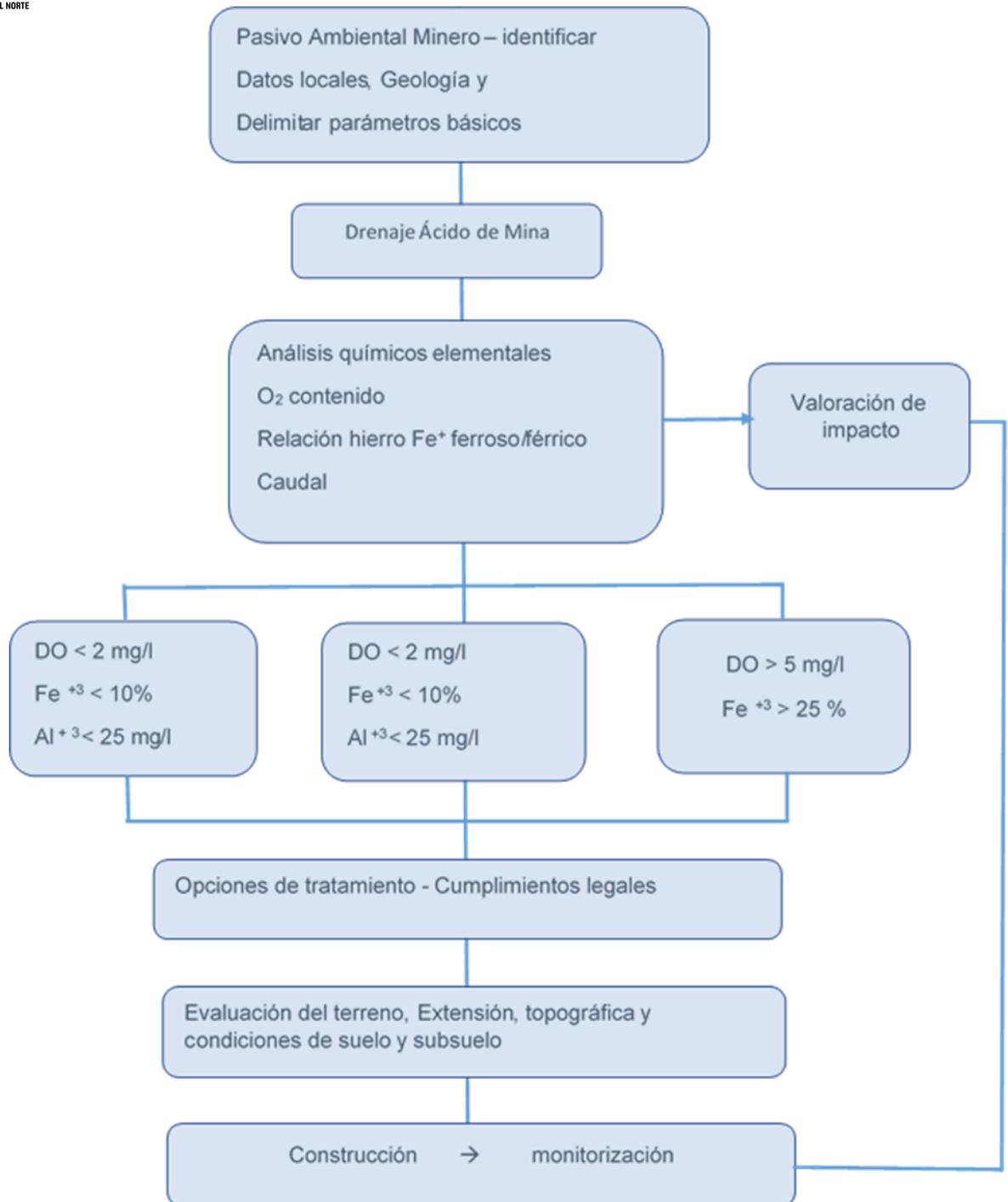
Por otro lado, luego de realizar la búsqueda de los artículos en las diversas bases de datos, aplicamos distintos criterios de inclusión: el estudio corresponda al tema sistema de tratamiento de aguas ácidas de pasivo ambiental minero, sean únicamente en el país de Perú, el documento se encuentre el texto completo, presente en una metodología Introducción

Metodología Resultados y Discusión (IMRD), presente una antigüedad de diez años como máximo y no sea duplicados. De la misma forma, nuestros criterios de exclusión estuvieron sujetos a si pertenecía a las investigaciones realizadas en el país Perú, traten otros temas distintos al de la investigación y no muestren resultados al que llegaron.

Finalmente, dentro de los aspectos éticos utilizados, el presente trabajo sigue los procedimientos establecidos para la obtención de grados y títulos de la Universidad Privada del Norte, además que toda información que no es de nuestra autoría está siendo citado por las indicaciones de la normativa APA sexta edición y la investigación realizada únicamente con fines académicos.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

En los últimos años se ha visto un gran avance en cuanto a investigaciones para el control, tratamiento y medidas de prevención en la generación de DAMs; así como, el fortalecimiento de normas reguladoras. Identificando no solo a la minería como único generador de pasivos ambientales que luego terminan lixiviando drenajes ácidos, según Akcil y Koldas (2005) las actividades como la construcción, minería y canteras puede disminuir si se trabajan en tres niveles en la prevención primaria en la generación, control secundario que consiste en la prevención de la migración y control terciario de recolección y tratamiento. La problemática que ha venido generando el manejo inadecuado de estos efluentes, también ha hecho posible ensayar distintas metodologías para disminuir sus impactos en los ecosistemas (Sánchez et al., 2016). Para una adecuada elección de un sistema de tratamiento se deben tener primero consideraciones respecto a las características de pasivo ambiental minero que lixivia drenajes ácidos o alcalinos. Según Aduvire citado en (Sánchez et al., 2016) las aguas ácidas pueden clasificarse en débil, moderado y muy ácido con una acidez neta que van de 0 a 300 mg/l de CaCO_3 equivalente y las aguas alcalinas de débil a fuerte con alcalinidad neta de 0 a 300 mg/l CaCO_3 equivalente, resulta importante tener una caracterización del efluente.



Fuente: Adaptado de Hedin et al., (1994), Aduvire et al., (2017), Sánchez et al., (2016) y Jarris (1997)

Figura 07. Flujograma para la valoración de pasivos ambientales mineros.

3.1. Identificación de los sistemas de tratamiento en pasivos ambientales mineros en Perú

3.1.1. Investigación 01

- **Título:** “Evaluación del funcionamiento de un biorreactor pasivo utilizando bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de mina”
- **Autores:** Palma Huillca, Greys Almendra.
- **Año:** 2018
- **Universidad:** Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
- **Tipo de documento:** Tesis de grado

Tabla 01

Resultados del sistema pasivo Bacterias sulfato-reactoras aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM*
	La diversidad de los biorreactores en su composición depende generalmente de los recursos disponibles	pH 3.48	pH 6.09	Labor minera /subterránea
Tratamiento pasivo Bacterias Sulfatos Reductores BSR	Mezcla Reactiva	Carga máx. metálica	Carga mín. metálica	Sub-Tipo PAM
	Guano de alpaca 7%	$Cu^{+2} = 52 \text{ mg/L}$	$Cu^{+2} = 0.09 \text{ mg/L}$	
	Guano de isla 31%	$Fe^{+2} = 1.35 \text{ mg/l}$	$Fe^{+2} = 0.06 \text{ mg/l}$	
	Roca Fosfórica 31%	$Fe^{+3} = 3.08 \text{ mg/L}$	$Fe^{+3} = 1.01 \text{ mg/L}$	Bocamina
	Heno 1%	$Zn^{+2} = 4.97 \text{ mg/L}$	$Zn^{+2} = 3.36 \text{ mg/L}$	
		Caudal 0.2 l/s	Caudal 0.2 l/s	

Fuente: adaptado de Palma, 2018.

*Los pasivos minero-ambientales: diagnóstico y propuesta. RED MUQUI, 2015. En base a la Guía para la elaboración de planes de cierre de PAMS.

El sistema implementado por la autora consiguió una mayor efectividad en un tiempo de 75 días, removiendo las cargas metálicas para ofrecer mejores condiciones.

3.1.2. Investigación 2

- **Título:** “Propuesta de mejoramiento de la calidad de las aguas ácidas que drenan del pasivo ambiental de la mina Nuncia, mediante el uso de bacterias sulfato reductoras – Ataquero – Carhuaz - Ancash”
- **Autores:** Erick Manuel Cadillo Nieto
- **Año:** 2018
- **Universidad:** Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
- **Tipo de documento:** Tesis de grado

Tabla 02

Resultados del sistema pasivo Bacterias Sulfato rectoras aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM
Tratamiento pasivo Bacterias Sulfatos Reductores BSR	La diversidad de los biorreactores en su composición depende generalmente de los recursos disponibles	pH 3.91	pH 6.24	Labor minera /subterránea
	Mezcla Reactiva	Carga máx. metálica	Carga mín. metálica	Sub-Tipo PAM
	Turba 7%	Cu = 0.63 mg/L	Cu = 0.21 mg/L	No precisa
	Bosta 25%	Pb = 0.06 mg/l	Pb = 0.03 mg/l	
	Paja 25%	Zn = 1.1 mg/L	Zn = 0.9 mg/L	
	Fe = 1.63 mg/L	Fe = 1.22 mg/L		
	Caudal/Volumen 4 L.	Caudal/Volumen 1.545 L.		

Fuente: Adaptado de Cadillo 2017.

En base a los datos de Cadillo el sistema tubo una efectividad de cinco días, pasado el tiempo los valores por ejemplo del pH bajaron de 6.24 a 6. El autor deduce que uno de los factores podría ser la saturación del medio reactante.

El sistema de tratamiento redujo las concentraciones de los metales presentes en porcentajes aceptables para la clasificación de un tipo de agua apta para el consumo de animales y riego.

3.1.3. Investigación 3

- **Título:** “Desarrollo del sistema pasivo sustrato alcalino disperso (DAS) para el tratamiento de drenaje ácido de mina – Cajamarca 2018”
- **Autores:** Sánchez Castillo y Sánchez Espinoza
- **Año:** 2019
- **Universidad:** Universidad Privada del Norte
- **Tipo de documento:** Artículo

Tabla 03

Resultados del sistema pasivo sustrato alcalino disperso aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM
	Disolución de arena caliza para eliminar metales trivalentes y disolución óxido de magnesio para retención de metales divalentes	pH 2.02 y 2.02	pH 7.21 y 7.34	Labor minera /subterránea
Tratamiento pasivo Sustrato Alcalino Disperso (DAS)	Mezcla Reactiva	Ensayo 01 y 02	Ensayo 01 y 02	Sub-Tipo PAM
	Virutas de madera pino 80%	Conductividad (uS/cm) = 1617 y 1622	1518 y 1511	
	Arena caliza de 2mm 20%	OD (mg/L) = 7.12 y 7.12	6.01 y 6.02	
	Virutas de madera pino 80%	Turbidez = 297 y 268	33.4 y 31.0	Bocamina

Grano polvo MgO 20 %	STD (mg/L) = 809 y 811	658 y 661
1 cm. de cuarzo para ambos	Salinidad (%) = 0.82 y 0.82	0.76 y 0.76
	Caudal /Volumen	Caudal/Volumen
	8 L	8 L.

Fuente: Adaptado de Sánchez y Sánchez, 2019.

Los autores recomiendan como uno de los sistemas pasivos más efectivos para el tratamiento de aguas ácidas de PAMs. Con el sistema han logrado reducir las concentraciones de los metales disueltos a niveles de calidad tipo III de acuerdo con el D. S. 010-2010-MINAM de las actividades mineras; así mismo, resalta el tiempo de retención hidráulica en el sistema que ha sido de ocho horas con diecisiete minutos.

3.1.4. Investigación 4

- **Título:** “Diseño de un humedal como técnica de remediación para las aguas del pasivo ambiental El Dorado de Hualgayoc”
- **Autores:** Delgado Espinoza Yaceli Maribel
- **Año:** 2020
- **Universidad:** Universidad Privada del Norte – Cajamarca
- **Tipo de documento:** Tesis de grado

Tabla 04

Resultados del sistema pasivo humedal aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM
	Dimensionamiento de la pila a partir de la carga metálica de hierro se tiene 12 m. de largo, 8.33 de ancho y 1.20m de altura.	pH 2.9	pH	Residuo Minero

Tratamiento pasivo	Mezcla Reactiva	Carga máx. metálica	Carga mín. metálica	Sub-Tipo PAM
diseño de un humedal para el PAM el dorado	25 603.2 Kg. De caliza	Al = 166.302 mg/L Cu = 7.791 mg/l Fe = 53.084 mg/L Mn = 27.494 mg/L Zn =160.879 mg/L		5 relaveras
		Caudal 25.684 l/min.	Caudal	

Fuente: Adaptado de delgado, 2020.

En el sistema de tratamiento pasivo con humedales la autora realizo un diseño a partir de las características del DAM del PAM que inicialmente sobrepasan los Límites Máximos Permisibles correspondientes de la actividad, identificando principales concentraciones y determinando que tipo de agua es la que se desea obtener.

El dimensionamiento del área del humedal lo considero a partir de reconocer la carga metálica diaria de fierro, con ello, resuelve el espacio necesario la cantidad de material reactante y los microfitos adecuados.

3.1.5. Investigación 5

- **Título:** “Tratamiento de aguas de efluente minero – metalúrgico utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales”
- **Autores:** Rimarachin Varas Félix y Huaranga Moreno
- **Año:** 2015
- **Tipo de documento:** Articulo

Tabla 05

Resultados del sistema mixto Productores continuos de alcalinidad aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM
Tratamiento activo y pasivo en conjunto	El sistema consta de dos pozas pasivas; uno con piedra caliza/humus, piedra caliza/compost y una simulación de osmosis inversa con membrana semipermeable (vejiga de chanco)	pH 0	pH 0	Residuo minero
	Mezcla Reactiva Piedra caliza/humus Piedra caliza/compost Membrana semipermeable (vejiga de chanco)	Carga máx. metálica Plomo en 14.70 g. de relave = 50.00 mg/l Cobre en 54.05 g. de relave = 20.00 mg/l Zinc en 42.90 g. de relave = 20.00 mg/l Arsénico en 32.78 g. de relave = 2.00 mg/l Cadmio en 69.40 g. de relave = 20.00 mg/l Mercurio en 92.16 de relave = 2.00 mg/l	Carga mín. metálica La remoción de los metales pesados como el Cu, As, Cd y Hg al 97 % en el sistema humus, porcentajes menores para remoción de Zn al 85.67% y 95.66% para cobre en el sistema compost Uso del sistema semipermeable permite retener Pb, Cu, Zn, As, Cd y Hg a niveles mínimos, en el caso del cadmio y mercurio logró retener al 100%	Sub-Tipo PAM Relaves

Fuente: adaptado de Rimarachin y Huaranga, 2015

Los autores diseñaron los sistemas pasivos productores continuos de alcalinidad (Sánchez et al, 2016 pp. 26), secuenciados con el activo en ambos casos y para mayor control de la efectividad hicieron análisis a cada salida, salida del sistema pasivo piedra caliza/humus, piedra caliza/compost y finalmente en ambas salidas del sistema activo, simulación de osmosis inversa con vejiga de chanco que complementa los sistemas y entrega los resultados con las remociones efectivas y promete resultados.

3.1.6. Investigación 6

- **Título:** “Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo combinado con humedal en la mina Michiquillay – Encañada 2019”
- **Autores:** Jesenya Jessica Bejarano Rodríguez y Micaela Nataly Estacio Ocas
- **Año:** 2019
- **Universidad:** Universidad Privada del Norte – Cajamarca
- **Tipo de documento:** Tesis de grado

Resultados de dos sistemas pasivos Drenajes Anóxico Calizo y Humedal aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM
	Recipientes de 40 x 40 cm anóxicos calizos y humedal aerobio 3 cm de agua con dos especies, Berro de agua (<i>Nasturtium officinale</i>) y Carrizo de Jalca (<i>Phragmites australis</i>)	pH 3.9; 5 y 4	pH 9.4; 9.8 y 8.9	Labor minera /subterránea
	Mezcla Reactiva	Carga máx. metálica		Sub-Tipo PAM
Tratamiento pasivo anóxico calizo combinado con humedal	30 kg. De materia orgánica 750 gr. Piedra caliza Berro de agua (<i>Nasturtium officinale</i>) y Carrizo de Jalca (<i>Phragmites australis</i>)	Fe = 6.296 mg/l Cu = 1.155 mg/l Al = 0.932 mg/L Mn = 0.088 mg/L		Bocamina
		Muestra 120 L.		

Fuente: Bejarano y Estacio, 2019.

Las autoras combinaron dos sistemas pasivos de tratamiento a nivel laboratorio secuenciándolo, de tal manera, que el DAM pase una primera etapa por el medio anóxico en 4 días, donde aumentaron el potencial hidrogeno, ya al rango neutro para luego ingresar al humedal acondicionado por las dos especies elegidas para la experimentación durante 9 días y volver a evaluar el pH obteniendo un valor mayor a 9.

3.1.7. Investigación 7

- **Título:** “Influencia del alumbre, cal y almidones como coagulantes-floculantes en el tratamiento del drenaje ácido del pasivo ambiental bocamina Prosperidad de la empresa San Nicolás, Hualgayoc - 2018”
- **Autores:** Sánchez Castillo MA, Sánchez Espinoza D.
- **Año:** 2018

- **Universidad:** Universidad Privada del Norte
- **Tipo de documento:** Tesis de grado

Tabla 07

Resultados del sistema activo usando cal, alumbre y almidón aplicado

Variable Dependiente		Variable Independiente		
Tipo de sistema de tratamiento	Descripción	Datos iniciales del DAM	Datos finales del DAM	Tipo PAM
Tratamiento activo uso de cal, alumbre y almidón de yuca como coagulantes	Realizaron cinco ensayos probando combinaciones entre los insumos seleccionados obteniendo mejores resultados con cal a 0.75 gr./l y la combinación de éste con 8 gr. de almidón de yuca.	pH	pH	Labor minera /subterránea
	Mezcla Reactiva	1.9	6.9	
	Cal a 0.75 gr./l	Carga máx. metálica	Carga mín. metálica	Sub-Tipo PAM
	Cal a 0.75 gr./l + almidón de yuca a 8 gr/l	As = 17.5 mg/L	As = 12.91 mg/L	Bocamina
		Pb = 0.33 mg/L	Pb = 0.1 mg/L	
		Cu = 41.11 mg/L	Cu = 0.06 mg/L	
		Muestra		
		22 L		

Fuente: Adaptado de Chinchay y Ortiz, 2018.

El tratamiento pasivo ensayado es aplicable aún con la sola aplicación de dosis de cal en el DAM a partir de 0.75 g/l., las autoras plantearon una alternativa que hizo complementar al insumo químico como coagulante orgánico el almidón de yuca elevando al mismo nivel el pH y reduciendo con algunas diferencias los metales presentes como As de 17.05 a 13.75, Pb de 0.33 a 0.29, y Cu de 41.11 a 0.10.

Los datos de la tabla representan en promedio de los resultados favorables obtenidos de las diferentes dosis.

3.2. Clasificación de sistemas de tratamiento utilizados en Perú

De acuerdo con las investigaciones encontradas para el sistema de tratamiento de aguas ácidas de pasivos ambientales mineros en el Perú, se pueden clasificar en tratamiento pasivos y activos, siendo los de tipo pasivo los más utilizados, tal como muestra a continuación.

Tabla 08

Sistemas de tratamiento de aguas ácidas de pasivos ambientales mineros en Perú

Tipo	Tratamiento	Concepto
Pasivo	Reductor anaeróbico de sulfato	Este tipo de proceso se basa en el uso de bacterias que tienen la capacidad de reducir sulfato, sulfito o tiosulfato de manera no asimilatoria, utilizándolos como aceptores de electrones, produciendo como desecho metabólico ácido sulfhídrico.
	Sustrato alcalino disperso (DAS)	Es el de tratamiento pasivo que supera dichos problemas de pasivación y/o obstrucción, se compone de un reactivo alcalino de grano fino que puede ser arena de calcita, siendo mezclado con un material inerte de tamaño grueso con alta superficie específica como viruta de madera.
	Humedales artificiales	Son sistemas de depuración construidos con agua, poco profundos de menos de un metro de profundidad, de tipo químico o biológico, físico.
	Canales de roca caliza	Canales revestidos de caliza por el que fluye el agua a tratar, cuyo objetivo es incrementar el pH y la alcalinidad para disminuir la acidez.
	Fitorremediación	Conjunto de plantas con capacidades metabólicas y físicas utilizadas para degradar, asimilar, detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, etc.
Activo	Tratamiento con Cal	Tratamiento de adición directa de cal al agua a tratar con el fin de aumentar el pH del agua ácida.

3.3. Eficiencia de sistemas de tratamiento utilizado en Perú

Los tratamientos más usados en el Perú son del tipo pasivo, debido a su mejor eficiencia y a la disponibilidad económica en la remediación de pasivos ambientales mineros, según las investigaciones realizadas se pudo concluir las siguientes eficiencias según tipo de tratamiento.

Tabla 09

Eficiencia de los sistemas de tratamiento de pasivo ambiental minero

Tratamiento	Eficiencia (%)
Bacterias sulfato reductoras (BSR)	0.40 -0.90
Humedales artificiales	90
Canales de roca caliza	0.25-40
Sustrato alcalino disperso	50-90
Sistemas mixtos	82

Para seleccionar y procesar la información, inicialmente se creó una base de datos en Excel con los campos de título de investigación, nombre y apellidos del autor, año de publicación, universidad, tipo de documento, resumen y palabras claves. Luego de aplicar nuestros criterios de inclusión y selección; y para dar respuesta a los objetivos propuestos se redacta una ficha con los campos de autores, título, año, universidad, tipo de documento y resumen. Plasmando siete investigaciones acordes a nuestro tema de estudio.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

En Palma (2018) se utiliza la metodología de reductor anaeróbico de sulfato, evaluando al drenaje ácido en el tratamiento pasivo vierte por una bocamina que desemboca en la cuenca del río San German en el nevado Quenamari perteneciente al distrito minero de Ajoyani en la región de Puno, donde determinaron que las bacterias reductoras de sulfato son capaces de inmovilizar metales disueltos en el afluente precipitándolos como sulfuros y reduciendo la acidez, si crea un ambiente bioquímico favorable.

De manera similar, en la investigación de Cadillo (2017) se evalúa a las bacterias sulfato reductoras, en compañía de materiales identificados con posible poder remediador y disponibles en la zona donde seleccionaron a tres de ellos, la turba (50%), paja (25%) y bosta de la vaca (25%), mismos que resultaron efectivos para ciertos tiempos mejorando la calidad de las aguas ácidas del pasivo ambientales de la minera estudiada, sin embargo, la saturación del medio reactivo es un factor no previsto por el autor. Otros estudios también consideran el agotamiento de los substratos orgánicos, la reducción del área reactiva de la mezcla y la disminución de la permeabilidad afectan la eficiencia y longevidad de los reactores (Genty, Bussiere, Benzaazoua, Neculita, y Zagury 2020, pp. 7 (citado en Vazquez y Escobar, 2020).

Por otro lado, el estudio realizado por Sánchez y Sánchez (2019) se determina que el diseño del tratamiento pasivo Sustrato Alcalino Disperso (DAS), fue capaz de elevar el pH de 2.02 a 7.2 y 7.34 lo cual indica que cumple con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM; así mismo mediante el tratamiento pasivo DAS se lograron también bajar la conductividad eléctrica, lo que representa una disminución de los metales existentes, en ambas repeticiones.

Delgado (2020), formula un diseño de humedal para las aguas ácidas del pasivo ambiental

El Dorado con cinco relaveras abandonadas, en la caracterización del DAM obtiene el valor del hierro presente con 53.084 mg/l, a partir de ahí realiza una ponderación de las dimensiones del humedal dando un área de 12 metros de largo, 8.33 metros de ancho y una profundidad de 1.20 metros para un caudal de 25.684 l/min., un pH inicial de 2.9. y una carga reactiva de 25 603.2 Kg. De roca caliza y los macrófitos adecuados. La importancia de conocer las condiciones físicas y químicas del DAM para luego determinar el tipo de tratamiento más adecuada (Aduvire, 2006).

La preocupación por la mitigación de los impactos de las aguas ácidas a los componentes ambientales está haciendo que, no solo se busque cumplir los objetivos de un sistema de tratamiento para medir su eficacia, es buscar también que las condiciones de los ecosistemas sigan garantizando la salud y el bienestar de las personas que, según Cantú, están entrañablemente unidos (2012, pp.29). Examinar las mejores alternativas con tecnologías emergentes o combinando las ya conocidas aplicaciones ofrecen mejores soluciones así en el trabajo de Rimarachín y Huaranga (2015), prueban los sistemas de tratamiento en secuencia dos sistemas pasivos con piedra caliza/humus y piedra caliza/compost para la primera fase y sistema activo simulación de osmosis inversa con vejiga de chanco para la segunda fase de ambos. La remoción que logran de los metales pesados como el Cu, As, Cd y Hg es de un 97% en el medio humus, los porcentajes menores fueron para la remoción de Zn al 85.67% y 95.66% para el cobre en el medio compost con la complementación de la simulación semipermeable les permite remover Pb, Cu, Zn, As, Cd y Hg a niveles mínimos y favorablemente el procedimiento retienen al 100% del cadmio y mercurio.

Por otro lado, el estudio de Bejarano y Estacio (2019) se desarrolla otra complementación de un sistema pasivo anóxico calizo con humedal artificial implementado con las especies

Berro de agua (*Nasturtium officinale*) y Carrizo de Jalca (*Phragmites australis*), del sistema anóxico (materia orgánica y piedra caliza) primario pasa a los humedales logrando un aumento máximo de pH de 9.8 que favorece la precipitación de los metales disueltos en el drenaje ácido de mina.

En el Perú se ha identificado metodologías para tratamiento de pasivos ambientales mineros, mismos que en su mayoría son de tipo pasivo o las combinaciones con los sistemas activos, debido a que una de las problemáticas más importantes es la acidez baja del agua por contaminación con los drenes provenientes de bocaminas, depósitos de relave o instalaciones abandonadas de la minería, cargadas de metales afectando directamente la calidad del recurso hídrico y otros componentes ambientales.

Entre los tratamientos existentes encontramos a los de canales de roca caliza, el cual es un tipo de canaleta que se encuentra relleno de caliza por lo que fluye el agua a tratar, con el fin de incrementar el pH por contacto directo con el canal con una eficiencia del 0.25 a 40%, tal como se aprecia en la tabla 08 y 09.

Como segundo proceso tenemos a los humedales artificiales, el cual se basa en sistemas de agua poco profundas que en su interior contiene plantas fitorremediadoras u organismos a fin de remover los contaminantes del agua, con una eficiencia del 90% aproximadamente, este proceso va de la mano con la fitorremediación el cual se encarga de purificar el agua por medio de la utilización de plantas con la capacidad fisiológica y bioquímica.

Como tercer proceso tenemos al Sustrato Alcalino Disperso, que es un sistema de tratamiento pasivo que se compone de un reactivo alcalino de grano fino (arena de caliza) mezclado con un material inerte de tamaño grueso con alta superficie específica (viruta de madera) a fin de remover componentes presentes en el agua, éste método presenta una efectividad del 50 al 90%, coincidiendo con la investigación de León (2018), quien concluye

que este proceso ayudó a subir el pH y remover metales hasta en un 100%, obteniendo valores dentro del rango de los Estándares de Calidad Ambiental para agua.

El proceso es el que emplea bacterias sulfato reductoras, mismas que tienen la facultad de reducir sulfato, sulfito o tiosulfato, principales componentes de los efluentes mineros de manera no asimiladora, produciendo como desecho metabólico ácidos sulfhídrico y llegando a obtener porcentajes de eficiencia de entre 40 a 90%, tal como lo muestra las tablas 01 y 02, dando los mismos resultados con la investigación de Paredez y Villanueva (2004), quien concluye mediante el uso de bacterias sulfato reductoras logrando incrementar el pH de 2.39 a 7.23, una remoción del 94,8% de sulfatos; 99,60% de precipitación de hierro, 99,23% de plomo y 98.57% de cobre empleando BSR y mecanismos de biosorción con especies fitorremediadoras de 44 especies identificados.

Finalmente se concluye que los sistemas pasivos no mixtos pueden comprometer la eficiencia en el tiempo debido a lo señalado por (León 2018) y (Genty, Bussiere, Benzaazoua, Neculita, y Zagury 2020, pp. 7 (citado en Vazquez y Escobar, 2020) que principalmente pueden integrar tres factores influyentes, como la saturación del medio, disminución de la porosidad del área reactante y con ello la pasivación de los sustratos reactantes, es conveniente plantear y diseñar sistemas mixtos con humedal, microorganismos y fitorremediación.

- Se identificó y analizo los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de pasivos ambientales mineros en el Perú, determinando que los tratamientos utilizados para remover metales y aumentar el pH son los siguientes: humedales artificiales, uso de bacterias sulfato reductoras, la metodología de sustrato alcalino disperso, canales de roca caliza y la adición de cal directa para aumentar el pH.
- Se clasifico los sistemas de tratamientos de pasivos ambientales mineros en pasivo y activo, siendo los sistemas pasivos los más utilizados: humedales artificiales, uso de bacterias sulfato reductoras, la metodología de sustrato alcalino disperso, canales de roca caliza y tratamientos mixtos: humedales más fitorremediación y microorganismos sulfato reductoras o sistemas pasivos secuenciados con activos (Piedra caliza/compost, Piedra caliza/humus y osmosis inversa)
- Se identificó entre las metodologías más eficiente se encuentra los humedales artificiales, cuando utiliza la fitorremediación y el uso de bacterias sulfato reductoras, llegando a una eficiencia entre el 90% y hasta el 100% en el mejor de los casos.

REFERENCIAS

- Aduvire, H., Vadillo, L. y Aduvire, O (2017) Innovaciones en la caracterización de las aguas ácidas de mina y su tratamiento con tecnologías ecológicas. *Minería*, 1, 58 – 63.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. *Instituto Geológico y Minero, Dirección de Recursos Minerales y Geoambinete*
- Akcil, A. y Koldas, S. (2005) Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14, (12-13), 1139 – 1145.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Andamayo Vitor, A. (2019). “Tratamiento de aguas ácidas para la obtención de agua tipo III en la Sociedad Minera El Brocal S.A.A. – Tinyahuarco - Pasco – 2019”. Pasco: UNDAC.
- Aparicio, R., Mejía, A. y Ingol, E. (2014). Tratamiento del drenaje ácido de mina mediante bacterias sulfato reductoras caso unidad minera Iscaycruz. *XII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología*.
- Arango, M. y Olaya, Y. (2012) Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Revista gestión y ambiente*, 15 (3), 125 – 133.
- Arce Sancho, S., Calderón Celis, J. M., & Jarecca Cusacani, Y. (2020). “Optimización del proceso de Fito remediación con Festuca Dolichophylla y tiosulfato de amonio para mejorar la eficacia de la absorción del mercurio de suelos contaminados con mercurio por la minería del distrito de Ananea Puno-Perú”. Instituto de investigación facultad de minas y metales.

Bazan Agüero, D. (2020). “Eficiencia de canales con dos diámetros de roca caliza en la precipitación del aluminio total y mejora del pH de las aguas ácidas del Río Negro, captadas a través del canal Mátara en el sector Canrey Chico, Distrito y provincia de Recuay - Ancash, period. Ancash: UNAM.

Benet, M., Zafra, S., y Quintero, S., (2015) La revisión sistemática de la literatura científica y la necesidad de visualizar los resultados de las investigaciones. *Revista Logos Ciencia & tecnología*, 7 (1), 101 – 103

Cadillo Nieto, E. M. (2018). “Propuesta de mejoramiento de la calidad de las aguas ácidas que drenan del pasivo ambiental de la mina Nuncia mediante el uso de bacterias sulfato reductoras – Ataquero – Carhuaz –Ancash”. Ancash: UNFV.

Cadorin, L., Carissimi, E. y Rubio, J. (2003) Flotation in water and wastewater treatment and reuse: Recent trends in Brazil. *International Journal of Environment and Pollution*, 30, 193 - 203

Cadorin, L., Carissimi, E. y Rubio, J. (2007) Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. *Scientia et Technica*, 1, (36), 349 – 854.

Cantú, P. (2021) Medio ambiente y salud: un enfoque ecosistémico. *Red de revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 15(57), 26-32.

Castillo, L., Satalaya, C., Paredes, U., Encalada, M., Zamora, J. y Cuadros, M. (2021). *Pasivos ambientales mineros en el Perú: Resultados de la auditoria de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAM. Documento de política en control gubernamental*. Contraloría General de la República. Lima, Perú. Recuperado de: https://doc.contraloria.gob.pe/estudios-especiales/documento_trabajo/2021/PAM_FINAL_25-08-21.pdf

Chappuis, M. (2019). *Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el*

Perú, Serie medio ambiente y desarrollo N° 168, Santiago. Comisión Económica para

América Latina y el Caribe. Recuperado de:

https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45068/1/S1901182_es.pdf

Decreto Legislativo N° 1042, que modifica y adiciona diversos artículos a la Ley N° 28271, ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, 28 de febrero 2017.

Decreto Supremo N° 059-2005-EM, Aprueban Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera. 9 de diciembre del 2005.

Decreto Supremo N°003-2009-EM. Modifican reglamento de pasivos ambientales mineros de la actividad minera aprobada por D.S. N° 059-2005-EM. 14 de enero 2009. Diario Oficial El Peruano.

Forigua, D., Fonseca, N. y Vásquez, Y. (2017) Prevención de drenajes de ácidos de mina utilizando compost de Champiñones como enmienda orgánica. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19 (1), 92 – 100.

DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.58904>

Genty, T., Bussiere, B., Benzaazoua, M., Neculita, C. y Zagury, G. (2020) Treatment efficiency of iron-rich acid mine drainage in a tri-unit pilot system, *environmental Science and Pollution Research*, 27(8), 8418-8430.

Hedin, R., Watzlaf, G. y Nairn, R. (1994) Passive treatment of Acid Mine Drainage with Limestone. *Journal of Environmental Quality*, 23, 1338 – 1345.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014) Metodología de la investigación. Sexta edición. McGrawHill y americana editores.

Jara, M. (2011) Extracción química secuencial de metales pesados en el estudio de alteración

química de relaves de mina en Ticapampa (Huaraz, Perú). *Boletín Geológico y Minero*,

122 (2), 221 – 234.

Johnson, D. y Hallberg, K. (2005) Acid mine drainage remediation options: A review. *Sci*

Total Environ. 338, 3 – 14.

Ley N° 28271 de 2004, Ley que regula los pasivos ambientales mineros de la actividad minera,

02 de julio del 2004. Diario Oficial el peruano

Ley N° 28526, Ley que modifica los artículos 5°, 6°, 7° y 8° la primera disposición

complementaria y final de la Ley N° 28271, ley que regula los pasivos ambientales de

la actividad minera, y le añade una tercera disposición complementaria y final, emitido

el 25 de mayo del 2005.

Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Minem recibe apoyo de Agencia de Cooperación*

Internacional de corea para fortalecer gestión en la remediación de pasivos

ambientales

mineros.

<http://www.minem.gob.pe/detallenoticia.php?idSector=4&idTitular=8564>

Ñaupas, H., Mejia, E., Novoa, E. y Villagomez, A. (2014). *Metodología de la investigación*

cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. (Ed. Cuarta). Bogotá.

Oblasser, A. y Chaparro, E. (2008). *Estudio comparativo de la gestión de los pasivos*

ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. Comisión Económica

para América Latina y el Caribe, Serie Recursos Naturales y infraestructura,

Santiago. Recuperado de [https://www.cepal.org/es/publicaciones/6333-estudio-](https://www.cepal.org/es/publicaciones/6333-estudio-comparativo-la-gestion-pasivos-ambientales-mineros-bolivia-chile-peru)

[comparativo-la-gestion-pasivos-ambientales-mineros-bolivia-chile-peru](https://www.cepal.org/es/publicaciones/6333-estudio-comparativo-la-gestion-pasivos-ambientales-mineros-bolivia-chile-peru)

Palma Huilca, G. (2018). “Evaluación del funcionamiento de un biorreactor pasivo utilizando bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de mina”. Arequipa: UNSA.

Panda, S., Mishra, S. y Akcil, A. (2016) Biorremediation of acidic mine effluents and the role of sulfidogenic biosystems: a mini review. *Euro-Mediterr J Environ Integr*, 1, (8).
<https://doi.org/10.1007/s41207-016-0008-3>

Papuico Huayta, K. (2018). “Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta Yaluzai (senecio rudbeckiaefolius) en la relavera de Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de Rancas”. Simón Bolívar: UNDAC.

Paredes Mur, J. (2015). Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. *ECIPerú*.

Paredes, P. y Villanueva. (2004). Biorremediación de Drenajes Ácidos de Mina (DAM) mediante el sistema de humedales. (U. N. (UNSAM), Ed.)

Pozo, J., Puente, I., Lagüela, S. y Veiga, M. (2017) Tratamiento Microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 8, (3), 75 – 91. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3,

RoyChowdhury, A., Sarkar, D. y Datta, R. (2015) Remediation of acid mine drainage-impacted water. *Curr Pollutio Rep*, 1, 131 – 141 DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3

Sanchez Castillo, M. A., y Sanchez Espinoza, D. (2019). “Desarrollo del sistema pasivo sustrato alcalino disperso (DAS) para el tratamiento de drenaje ácido de mina – Cajamarca 2018”. Cajamarca: UNP.

Sánchez, J. y Ferreira, J. (2016) Drenajes ácidos de mina – alternativas de tratamiento. *Revista de Medioambiente y Minería*, (1), 20 – 30.

De Echave, J. (12 de febrero del 2019). *Cajamarca: los pasivos mineros de Hualgayoc.*

Servindi: Comunicación intercultural para un mundo más humano y diverso.

Recuperado de. [https://www.servindi.org/actualidad-noticias/11/02/2019/los-pasivos-mineros-de-hualgayoc#:~:text=Cabe%20se%20alar%20que%20Cajamarca%20es,de%20Hualgayoc%20\(1%2067%20PAM\).](https://www.servindi.org/actualidad-noticias/11/02/2019/los-pasivos-mineros-de-hualgayoc#:~:text=Cabe%20se%20alar%20que%20Cajamarca%20es,de%20Hualgayoc%20(1%2067%20PAM).)

Vásquez, Y. y Escobar, M. (2020) Reactores bioquímicos pasivos: una alternativa biotecnológica para la remediación de drenajes ácidos de mina, *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(2), pp. 53-69.

Villanueva, C., Llamosas, J., y Villachica, J. (2005). Tecnología Nacional comprobada para el tratamiento de efluentes ácidos mineros. (S. S.–C. NCD, Ed.) *SMALLVILL S.A.C. – CONSULCONT S.A.C. Proceso NCD.*

Villaseñor, J. (2001). Procesos tecnológicos en el tratamiento de aguas. *Tratamiento físico-químico de aguas.*

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

Titulo	SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE LOS PASIVOS AMBIETALES MINEROS EN EL PERÚ			
Problema	Objetivos	Variables	Tipo de investigación	Dimensión de las variables
¿Cuáles son los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de pasivos ambientales mineros en el Perú?	Objetivo general: Analizar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el Perú.	V.I.: Aguas Ácidas de los Pasivos Ambientales Mineros	De acuerdo con el objetivo de la investigación y el desarrollo de la información es explicativo y documental complementariamente se presenta y discute los resultados. Se enmarca en el tipo transversal ya que los datos serán recolectados en un momento único.	V-I.: Drenajes ácidos de los Pasivos Ambientales mineros
	Objetivos específicos: <ul style="list-style-type: none"> - Identificar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros en el Perú - Clasificar los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros. - Describir la metodología más eficiente de los sistemas de tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros 	V.D.: Sistemas de tratamiento		V.D.: Tratamientos pasivos Tratamientos activos Tratamientos emergentes

Anexo 02: Fichas de registro de investigaciones

Autores: Bernejo, J & Estacio, J	
Título: Propuesta de tratamiento de drenes anóxico calizo combinado con humedal en la Mina Michiquillay - Encañada	
Año: 2019	
Centro de estudios: Universidad Privada del Norte - Cajamarca	
Tipo de Documento: Tesis de grado	
Resumen	
El estudio realizó una simulación de tratamiento con una muestra de 120 L. divididos en tres ensayos, utilizaron 250 gr. De piedra caliza por 40 L y 7 Kg. De materia orgánica. Logró la neutralización en un tiempo de tres días, partiendo de un pH 3.9 a 7. complementando con humedad de 50 cm de carga orgánica, 30 cm de agua pre tratada, utilizan plantas de la zona (Berros de agua y Carrizo de jalca). En el décimo día obtienen una alcalinidad de 9.	
Sistema de tratamiento: Sistema de tratamiento pasivo combina dos sistemas ; drenajes de anóxico calizo y humedal.	
Autor (es): Meza, R. A.	
Título: Propuesta de Biorremediación del pasivo minero ambiental de Frankeita - Oruro - Bolivia	
Año: 2018	
Centro de estudios: Universidad Nacional de San Agustín	
Tipo de Documento: Tesis de Maestría	
Resumen	
Plantea estudiar técnica, económica y ambientalmente la biorremediación del PAM de Frakeita en la ciudad de Oruro, mediante el uso de coberturas secas de SDR, de acuerdo al diagnóstico el PAM se ubica a una altura de 3 700 m.s.n.m., con temperaturas de +24° durante el día en verano y -17° durante la noche de invierno, una precipitación media anual de 460.73 mm., con un pH de 1.5 a 2.0 y un volumen de 102 mil toneladas. Valorados como altamente generadores de DAR. La propuesta contempla un volumen de perfilamiento de 1 062 m ³ , con un acapde grava fina de 20 cm. por encima de las colas del PAM, Capa de cobertura SDR orgánica (top Soil, con capacidades de retención de agua) 50 cm., capa de suelo vegetal 10 cm y cobertura vegetal autoctona, además considera pendientes de terrazo 2:1, Bermas de 2 m y muros de contención 2*1*1.	
Sistema de tratamiento: Sistema de tratamiento pasivo (Biorremediación y cobertura de SDR con material local)	
Autor (es): Delgado, Y. M.	
tulo: Diseño de un humedal como técnica de remediación para las aguas ácidas del pasivo ambiental el Dorado de Hualgayoc	
Año: 2020	
Centro de estudios: Universidad Privada del Norte - Cajamarca	
Tipo de Documento: Tesis de Grado	
Resumen	
En la Hualgayoc histórica con la minería y los PAM que aún genera DAM, la autora se propone Diseñar un humedal para remediar los grenajes ácidos de mina producidos por los PAMs en el Dorado, los análisis de los DAM le dieron un pH de 2.9 y concentraciones de metales en ppm que exeden los LMPs como El Hierro 53.084, Aluminio 166.39233 y Zinc 160.87933 principalmente con un caudal promedio de 25.684 l/min. El humedal tiene 12 m. de largo, 8.33 de ancho y 1.20 de altura y los requerimientos de los sustratos de acuerdo a la dimensión.	
Sistema de tratamiento: Sistema de tratamiento pasivo (humedal con caliza)	
Autor (es): Mendoza, D. M., Sañazar, K. P. y Bravo, L. A.	
ón acuática con <i>Myriophyllum aquaticum</i> para el tratamiento de efluentes generados por Pasivos ambientales mineros de	
Año: 2016	
Centro de estudios: Universidad Nacional del Callao	
Tipo de Documento: Tesis de Grado	
Resumen	
El estudio se propone evaluar el potencial de la fitorremediación acuática con <i>Myriophyllum aquaticum</i> (vell.) a nivel de laboratorio para tratar los efluentes generados por PAMs, el estudio concluye que obtiene una dilución óptima de DAM y ARU para el tratamiento por fitorremediación en una relación de 1 a 4 respectivamente con una agitación de 42 RPM. la adaptación de la macrófita con mayor desarrollo a 4 de 7 unidades de pH. Presenta un potencial bioacumulador de Fe y Zn en el tejido.	
Sistema de tratamiento: Sistema de tratamiento pasivo (fitorremediación a nivel laboratorio)	