



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE
REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES
MINEROS EN EL PERÚ”**

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Hernan Alfredo Azcona Hidalgo

Asesor:

Ing. Jesús Gabriel Vilca Pérez

<https://orcid.org/0000-0002-8348-8624>

Trujillo - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Mag. Ing. Wilson Carlos Gómez Hurtado	18900541
	Nombre y Apellidos	Nro. Colegiatura o DNI

Jurado 2	Mag. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque	02044966
	Nombre y Apellidos	Nro. Colegiatura o DNI

Jurado 3	Mag. Ing. Gladys Sandi Licapa Redolfo	41379556
	Nombre y Apellidos	Nro. Colegiatura o DNI

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios quien me da la vida,
y a mi familia por la ayuda, paciencia y apoyo que
siempre me brindan a lo largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme vida y dones del que me ha dotado, sin cuya dádiva no hubiese sido posible realizar la presente tesis. A mi familia, por infundirme siempre aspiración de superación y responsabilidad en la vida, valores que han sido el pilar de mi desarrollo profesional. A la Universidad Privada del Norte por permitirme el crecimiento en mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

JURADO EVALUADOR.....	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I.....	10
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO II.....	23
MÉTODO	23
CAPÍTULO III.....	27
RESULTADOS	27
CAPÍTULO IV.....	49
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS.....	56
ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del DAM de la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. - pre tratamiento mediante el método de encapsulamiento, impermeabilización y relleno ..	27
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del DAM pre tratamiento mediante el método de Fangos artificiales - Mina Orcopampa.....	28
Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del DAM de los pasivos ambientales mineros de la Quebrada Mesa de Plata, Hualgayoc - pre tratamiento mediante el método de Fitorremediación	28
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del DAM provenientes de Southern Copper Corporation pre tratamiento mediante el método de Electrocoagulación	29
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del DAM del pasivo ambiental de la Mina Nuncia pre tratamiento mediante el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor)	29
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas del DAM de Unidad Minera Coimolache - pre tratamiento mediante el método de Lodos de alta densidad (HDS) y por Lodos de baja densidad (LDS)	29
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi pre tratamiento mediante el método de neutralización activo con lechada de cal	30
Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi - pre tratamiento mediante el método de Biorremediación.....	31
Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Ajoyani - pre tratamiento mediante el método pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino)	31
Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas del DAM procedente de Hualgayoc - pre tratamiento mediante el método de humedales artificiales.....	32
Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas del DAM de la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. - post tratamiento mediante el método de encapsulamiento, impermeabilización y relleno.	32
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del DAM post tratamiento mediante el método de Fangos artificiales - Mina Orcopampa.....	33
Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas del DAM de los pasivos ambientales mineros de la Quebrada Mesa de Plata, Hualgayoc - post tratamiento mediante el método de Fitorremediación	34
Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas del DAM provenientes de Southern Copper Corporation - post tratamiento mediante el método de Electrocoagulación	35
Tabla 15. Propiedades fisicoquímicas del DAM del pasivo ambiental de la Mina Nuncia post tratamiento mediante el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor)	35
Tabla 16. Propiedades fisicoquímicas del DAM de Unidad Minera Coimolache - post tratamiento mediante el método de Lodos de alta densidad (HDS) y por Lodos de baja densidad (LDS)	36
Tabla 17. Propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi - post tratamiento mediante el método neutralización activo con lechada de cal.....	37
Tabla 18. Propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Ajoyani - post tratamiento mediante el método de Biorremediación	38
Tabla 19. Propiedades fisicoquímicas del DAM de Cia. Minera Telsa S.A.C. - post tratamiento mediante el método pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino)	38
Tabla 20. Propiedades fisicoquímicas del DAM procedente de Hualgayoc – post tratamiento mediante el método de humedales artificiales	39
Tabla 21. Remoción del método de Encapsulamiento, impermeabilización y relleno	40
Tabla 22. Remoción del método de Fangos artificiales	41
Tabla 23. Remoción del método de Fitorremediación	41

Tabla 24. Remoción del método de Electrocoagulación.....	42
Tabla 25. Remoción del método Biorremediación (bacterias sulfato reductor)	42
Tabla 26. Remoción del método de Lodos de alta densidad (HDS)	43
Tabla 27. Remoción del método de Lodos de baja densidad (LDS)	43
Tabla 28. Remoción del método Neutralización activo con lechada de cal	44
Tabla 29. Remoción del método Biorremediación	44
Tabla 30. Remoción del método Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino).....	45
Tabla 31. Remoción del método del método de Humedales artificiales	45
Tabla 32. Eficiencia de los métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina de pasivos ambientales mineros en el Perú.....	47
Tabla 33. Formato para comparación de eficiencia de los métodos de tratamiento de DAM	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Eficiencia de los de los métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina de pasivos ambientales mineros en el Perú	48
Figura 2. Remoción del pH	60
Figura 3. Remoción de la conductividad	61
Figura 4. Remoción de Aluminio (Al).....	62
Figura 5. Remoción de Arsénico (As)	63
Figura 6. Remoción de Bario (Ba).....	64
Figura 7. Remoción de Berilio (Be)	65
Figura 8. Remoción de Boro (B)	66
Figura 9. Remoción de Cadmio (Cd).....	66
Figura 10. Remoción de Cobalto (Co).....	68
Figura 11. Remoción de Cobre (Cu)	69
Figura 12. Remoción de Cromo (Cr).....	70
Figura 13. Remoción de Hierro (Fe)	71
Figura 14. Remoción de Magnesio (Mg).....	72
Figura 15. Remoción de Manganeso (Mn)	73
Figura 16. Remoción de Níquel (Ni)	74
Figura 17. Remoción de Plomo (Pb)	75
Figura 18. Remoción de Selenio (Se).....	76
Figura 19. Remoción de Zinc (Zn).....	77

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es realizar un estudio comparativo de los métodos de Remediación de Pasivos Ambientales Mineros utilizados por la actividad minera en el Perú. El tipo de investigación es descriptiva, con diseño no experimental y corte transversal. Los resultados revelan que la mayor eficiencia del potencial de hidrógeno se logró con neutralización activo con lechada de cal (271 %), mientras que con la electrocoagulación se alcanzó el 13,28 %. Asimismo, la mayor eficiencia de conductividad se obtuvo por fitorremediación 96,93 %; difiriendo significativamente con el 22,32 % logrado por fangos artificiales. Finalmente, la remoción de metales tomó su valor máximo al aplicar el tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) removiendo el 98,68 %; seguido del 97,81 % obtenido mediante Neutralización activo con lechada de cal. En conclusión, de los métodos de remediación de pasivos ambientales mineros en la minería peruana, el método de Neutralización con lechada de cal y tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) son los más eficientes (mayor al 97 %) ; los DAM mostraron pH entre 2,18 y 10,3; del mismo modo, la concentración de metales fue muy elevada respecto a los estándares exigibles; posterior a su tratamiento estas características cumplen con la normatividad que rige el sector minero.

Palabras clave: Drenaje ácido de mina, Pasivo ambiental minero, método de remediación, eficiencia.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades extractivas más relevantes y de mayor impacto en la economía peruana. El Perú es un sustancial actor mundial en la producción de metales preciosos y metales básicos, lo que le permite ocupar el segundo lugar de la producción de cobre, plata y zinc a nivel mundial, el tercer lugar en cobre a nivel global y en su territorio alberga las reservas más grandes de plata. El sector minero contribuye con el 61,9 % de las exportaciones totales, 60,5 % corresponde a los minerales metálicos y el 1,3 % a los no metálicos (Chappuis, 2019).

Sin embargo, las labores mineras, en el territorio peruano, han estado enmarcados de cuantiosas zonas abandonados, en dónde no se realizaron labores de rehabilitación inmediata, lo cual conllevó a la generación de Pasivos Ambientales Mineros (PAMs). En la actualidad, estos pasivos se presentan en la forma de residuos, labores mineras, infraestructura, maquinaria, etc. de distintos tipos y en diferentes cantidades, los que desencadenan riesgos para la humanidad y el ambiente.

Como secuela de las presiones sobre el medio ambiente, las poblaciones contiguas a las operaciones mineras han mostrado su rechazo al desarrollo de nuevos proyectos ante la zozobra de generar más pasivos que contaminen lugares donde se realizará las operaciones mineras. De acuerdo a Vargas (2018), el rechazo a la minería y la generación de conflictos sociales se ha marcado como producto de amplias brechas de los indicadores de salud y de educación, la ausencia de infraestructura, la pobre gestión de las autoridades regionales y locales, y la existencia de antiguos PAMs.

En el Perú, estos pasivos mineros se han convertido en uno de los problemas de contaminación más serios del país, las empresas mineras generan pasivos ambientales que

no son contabilizados (Wong y Bernardo, 2018). Los pasivos ambientales mineros por regiones están ubicados en seis regiones principalmente, que representan más del 71 % del total acumulado, en primer lugar, figura la región de Ancash donde se encuentra un total de 1,251 pasivos (14,5 %), seguido por Cajamarca y Puno con 1,075 (12,5 %) y 1,050 (12,2 %) pasivos; el cuarto lugar corresponde a Huancavelica con el 9,96 %. En el quinto y sexto se encuentran Junín con un 7,39 % y Lima con un 7,11 %. El resto de las regiones enmarcan el 29,6 % del total de los pasivos mineros. (Sotomayor, 2015)

Con base a la información del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), se estiman 8,794 PAMs, de ellos el 24 % es gestionado, es decir, existe un responsable para su remediación con convenios de reaprovechamiento, incluyendo instrumentos de gestión ambiental. Los lugares con mayor cantidad de PAMs son la cuenca del Mantaro, que abarca las regiones de Pasco, Junín y Huancavelica, Llaucano, en la región de Cajamarca, la provincia del Santa en la región de Ancash, así como en las regiones Madre de Dios y Apurímac.

La génesis de un pasivo ambiental viene en asociación con la degradación de la tierra, resulta ser multifactorial (actividades humanas, variaciones climáticas, cambios de la naturaleza) y al mismo tiempo multifacético (ambiental, productiva, social, etc.). Estos se conjugan con las políticas de gobierno, cultura de uso, manejo y protección de los recursos naturales, el medioambiente, las características biofísicas del espacio terrestre y la variabilidad climática (Jensen y Birche, 2018). Los PAMs se originan cuando una actividad extractiva, petrolera o gasífera cesa y deja el lugar donde operaba sin reparar los daños ambientales que produjo. Estos pasivos contaminan el agua, el suelo, el aire, afecta la salud de la población hasta puede perjudicar la propiedad de terceros. (Mejía, 2017)

La existencia y permanencia de pasivos ambientales mineros (PAM) preocupa de todos los actores implicados, desde las poblaciones afectadas hasta los gobiernos, a partir del análisis del estado actual, se deben de fijar medidas de mitigación y prevención, al igual que los costos y financiamiento que implica. (López, López y Medina, 2017).

Es importante mencionar que los inventarios de PAMs involucran a todos los componentes abandonados o inactivos localizados en las antiguas operaciones mineras y que algunos de ellos no presumen un riesgo ambiental como campamentos, canales y carreteras. De acuerdo con la norma peruana, los pasivos ambientales pueden ser diferenciados según el tipo de componente: i) labores mineras (bocaminas, chimeneas), ii) residuos mineros (relaves, desmontes), iii) infraestructura (campamentos, oficinas, talleres), y iv) otros (residuos químicos) (MINEM, 2018).

Según el MINEM los PAMs se clasifican de acuerdo a su prioridad de riesgo, desde muy alta hasta insignificante, empero se presentan casos en que no está definida (ELCOM, 2018). La evaluación del riesgo debe considerar los tipos de contaminantes, sus cantidades, sus características físicas, químicas, biológicas o toxicológicas, obtenidos mediante muestreos sistemáticos.

Según el MINEM la distribución de PAMs por tipo de componente es del modo siguiente: Labor Minera (5 133 - 58,37 %), Residuo Minero (2 779 - 31,59 %), Infraestructura (861 - 9,79 %), Otro Residuo (17 - 0,20 %) y Productos Químicos (4 - 0,05 %)

Por otro lado, los PAMs se pueden categorizar del modo siguiente (Portal, 2013): En primer lugar, *utilizable o reprocesable económicamente*: Estos depósitos deben ser transitoriamente asegurados de manera adecuada al riesgo ambiental y pueden demandar frecuentemente de monitoreo. En segundo lugar, *posiblemente utilizable en el futuro*: En

este caso existe de por medio conflicto de objetivos entre la protección del área de influencia directa, agua, suelos, etc. contra una tentativa contaminación y la facilitación del futuro uso. Para concretar, los gastos y esfuerzos de su remediación se demandan de un análisis costo-beneficio para cada caso en específico. Finalmente, *sin uso económico*: Alude al tratamiento según el riesgo que representa el depósito con el propósito de aislar, minimizar y controlar su contenido tóxico de manera permanente.

De acuerdo con el MINEM la cronología de la Normativa para Gestión de PAMs es: 1996 - Ejecución del Proyecto EPA-MINEM para recolectar datos de PAMs y Se iniciaron las Evaluaciones Ambientales Territoriales EVAT-MINEM para diagnosticar las condiciones ambientales de las principales cuencas mineras y ubicar PAMs; 2001 - Proyecto de Remediación de Pasivos Ambientales (MINEM) para caracterizar los PAMs y realización de estudios básicos de remediación; 2002 - Proyecto de Ley N° 3801. Iniciativa legal para enfrentar PAMs dentro de un programa de gestión ambiental; 2003 - DS 042-EM exige la presentación de una declaración jurada de compromiso con la excelencia ambiental y de respeto a las instituciones locales, autoridades, cultura y costumbres; 2004 - Ley que regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (Ley N° 28271).

Posteriormente, en el 2005 se promulgó la Ley que modifica la Ley N° 28271 (Ley N° 28526), exige la presentación de un Plan de Cierre de Pasivos (PCPAM) y Reglamento de la Ley que regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (Decreto Supremo N° 059-2005-EM); 2006 - Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros (Resolución Ministerial N° 290-2006- MEM/DM) y Fideicomiso Forestal como Garantía de Cierre de Minas (Resolución Ministerial N° 515-2006-MEM-DM); 2008 - Decreto Legislativo N° 1042 que modifica la Ley N° 28271; 2009 - Modificación al Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (Decreto Supremo N°003-2009-EM); 2010 - Modelos de Convenios de Remediación Voluntaria (Resolución Ministerial N° 136-2010-MEM-

DM); 2011 - Procedimiento para la Actualización de Inventario: Identificación, Caracterización y Priorización de los Pasivos Ambientales Mineros (Resolución Directoral N° 012-2011-MEM/DM).

Hacia el 2012 - Decreto Legislativo N° 1100; promueve la participación de Activos Mineros SAC para la remediación de los PAMs originados por la actividad minera ilegal y Plan de Manejo y Guía para la Identificación de los Responsables de la Remediación de PAMs (Resolución Directoral N° 088-2012-MEM/DGM); 2014 - Guía para la Identificación de los Responsables de la Remediación de Pasivos Ambientales Mineros (Resolución Directoral N° 0278-2014-DM); 2015 - Guía para la Elaboración de Planes de Cierre de Pasivos Ambientales Mineros (MINEM); 2017 - Aprobación de Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados (Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM); 2018 - Inventario de Pasivos Ambientales Mineros (Resolución Ministerial N° 224 2018- MEM/DM) y 2018 - Incorporación a la remediación de pasivos ambientales el mecanismo de Obras por Impuestos (Decreto Legislativo N° 1361).

En el período 1995-2000, el Ministerio de Energía y Minas, implementó el Proyecto Desarrollo Sostenible (PRODES) con la finalidad de identificar, estudiar y diagnosticar los pasivos ambientales producto de las minas abandonadas; mediante la evaluación ambiental a nivel nacional, se detectó y evaluó cuantiosos pasivos ambientales en 16 cuencas hidrográficas afectadas por la actividad extractiva. (Oblasser, 2016)

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en conjunto con la OCDE (2015) referente a la gestión de los PAMs, recomienda continuar con las políticas destinadas para resolver esta problemática, profundizar información sobre riesgos ambientales, aprovechar su potencial económico mediante minería secundaria, determinar

responsabilidades, así como diseñar e implementar mecanismos de monitoreo. (AMSAC, 2018).

Actualmente, el gobierno peruano tiene la responsabilidad de remediar aquellos PAMs cuyos responsables no han podido ser identificados y cuando a juicio del MINEM se evidencie un alto riesgo y el responsable a cargo del saneamiento no haya realizado la remediación del área afectada o exista una ejecución negligente reiterativa del Plan de Cierre del PAM. El MINEM es el responsable de la búsqueda de financiamiento para la remediación de PAMs. De acuerdo a la normativa, la DGM tiene es responsable de ubicar a los responsables de los PAMs y, por ley del Consejo de Minería, tiene que estimar el aporte de contaminación de todos los titulares que laboraron en un lugar determinado.

Cabe mencionar que las Instituciones relacionadas con la gestión y remediación de los pasivos ambientales mineros son: *Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM)* - Evalúa y aprueba los instrumentos de remediación y posteriores modificaciones presentados por los generadores y remediadores voluntarios, aprueba las guías técnicas que resulten necesarias; *Ministerio de Energía y Minas a través de Dirección General de Minería (DGM)* - Elabora y actualiza el inventario de pasivos ambientales mineros, identifica a los responsables de pasivos ambientales mineros abandonados e inactivos, aplica las sanciones de los numerales 52.1, 52.2, 52.7 y 52.8 del Artículo N° 52 del Reglamento; *Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN)* - Fiscaliza el cumplimiento de las obligaciones que se originen en los instrumentos de gestión ambiental con respecto a la seguridad de instalaciones e infraestructura.

Además, el *Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA)* - Fiscaliza y controla el cumplimiento de las obligaciones ambientales asumidas por los generadores y

remediadores voluntarios, según su competencia; el *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)* - Recibe las solicitudes y otorga las concesiones mineras, brinda opinión previa en áreas de no admisión de denuncias en los casos de remediación voluntaria; *Ministerio del Ambiente* - establece los límites máximos permisibles y los estándares de calidad del ambiente que deben ser cumplidos en los Planes de Cierre de Pasivos Ambientales; *Ministerio de Agricultura* - Brinda opinión técnica de los Planes de Cierre de Pasivos Ambientales; *Ministerio de Salud* - Brinda opinión técnica de los Planes de Cierre de Pasivos Ambientales; *Ministerio de Salud* - Brinda opinión técnica de los Planes de Cierre de Pasivos Ambientales.

Asimismo, los *Gobiernos Regionales y Locales* - Fiscalizan e imponen sanciones, realiza otras acciones según competencias delegadas en el marco del proceso de descentralización; *Agencia de Promoción a la Inversión Privada (PROINVERSION)* - Promueve la inversión privada bajo las modalidades del Decreto Legislativo 674, sus modificatorias y ampliatorias; *Fondo Nacional del Ambiente* - Capta recursos provenientes de la cooperación financiera internacional, donaciones, canje de deuda y otros, a fin de solventar la remediación de pasivos ambientales asumidos por el Estado.

García (2018), realizó su estudio *Remediación de los pasivos ambientales mineros generados por la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. con fines de disminuir los lixiviados a la subcuenca del Río Santa Eulalia y cuenca del Río Rímac*, con el objetivo evaluar si la remediación de los pasivos ambientales mineros generados por la ex unidad minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. disminuirá los lixiviados a la subcuenca del río Santa Eulalia y cuenca del Río Rímac. El desarrollo de la Investigación fue de tipo descriptivo y transversal, con diseño descriptivo correlacional. Este estudio concluye, que en la remediación se realizó obras que corresponden a movimientos de tierra tales como corte y relleno; y en bocaminas relleno y habilitación de tapones; la calidad de

agua a diferencia del inicio se recuperó en el color, antes de la remediación a los bordes presentaban colores amarillentos y ahora se ven aguas más claras sin la presencia de este color característicos de aguas acidas.

Salvador (2015), desarrolló su investigación titulada *Recuperación de los metales pesados presentes en el Drenaje Ácido de Mina mediante la Precipitación Selectiva para su posterior utilización*, con el objetivo de evaluar el efecto del pH en la recuperación de los metales pesados presentes en el DAM mediante la precipitación selectiva. El tipo de investigación es aplicada, nivel de investigación cuantitativa, con diseño experimental. Se revela en sus resultados que los diagramas de precipitación permiten establecer el pH adecuado para la mejor selectividad de los metales pesados estableciéndose una recuperación en hierro de 94,06 % a un pH de 4,285; de 88,42 % de recuperación del cobre a un pH de 5,811; de 84,13 % de recuperación del zinc a un pH de 8,025 y de 96,89 % de recuperación de manganeso a un pH de 10,385. Se concluye que la recuperación de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina es posible mediante la variación del pH para su posterior utilización.

Los PAM generados por el sector minero son un riesgo potencial para el medio ambiente y nocivo para la humanidad; todos los elementos ambientales generados en las instalaciones, depósitos de residuos mineros, edificaciones, movimiento de tierras en las superficies del entorno afectadas por vertidos, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres en estado de abandono componen un elevado riesgo para la biodiversidad y por ello van en contra a lo estipulado en la normatividad acerca del uso y conservación de la biodiversidad cultural y ambiental. (Marín y Escobar, 2014)

El drenaje ácido de mina (AMD) es la formación y movimiento de aguas altamente acidificadas y ricas en metales pesados. Estas aguas ácidas resultan ser muy tóxicas y al

mezclarse con aguas subterráneas o superficiales, o interactuar con el suelo, generan consecuencias perniciosas en los humanos, animales y plantas. (Macías, Nieto y Caraballo, 2012)

Los tratamientos de DAM son comúnmente categorizados como pasivo o activo, ambos combinan enfoques físicos, químicos y biológicos; cabe precisar que los tratamientos activos son generalmente de un mayor costo, ya que requiere de mantenimientos continuos; a diferencia de los métodos de tratamiento pasivo que requieren solo mantenimientos ocasionales (Palma, 2018).

Entre los métodos a analizar se describen a los siguiente: Según García (2018), el objetivo principal de las técnicas de *encapsulamiento* es limitar la percolación del oxígeno y del agua como método de prevención del proceso generador de drenaje ácido, en consecuencia, se limita la movilización de elementos contaminantes. Estas barreras se construyen con materiales artificiales, y cubren o encapsulan el PAM. El método de *impermeabilización* consiste en el empleo de capas impermeabilizantes que suponen un encapsulamiento funcional, con el objetivo de limitar la circulación de gases (oxígeno) y evitar la infiltración de agua; este método implica el empleo de geosintéticos (geomembrana). El *relleno* consiste en el uso de material propio del lugar a remediar, implica la colocación de cobertura con caliza, cascajo y material orgánico.

Asimismo, se encuentran *los fangos*, que son depósitos o estanques poco profundos excavados que contienen: agua, tierras naturales, substrato, plantas y microorganismos (De la Cruz, 2016). Las técnicas de *fitorremediación* se caracterizan por ser una práctica de limpieza pasiva y agradable que aprovechan la capacidad de las plantas y la energía solar para el tratamiento de una gran variedad de contaminantes del medio ambiente; tienen la

capacidad de reducir, mineralizar, degradar, volatilizar y estabilizar los diversos contaminantes. (Aguilar y Aguilar, 2017)

La *Biorremediación* (bacterias sulfato reductor) es un procedimiento de sulfato-reducción para la remoción de metales en lixiviados de minas y efluentes del sector minero. Por ende, tiene alta capacidad de producir alcalinidad y neutralizar el pH de aguas ácidas; y su elevada facultad para la remoción sincrónica de materia orgánica, sulfatos y metales pesados (Cadillo, 2018). Las bacterias reductoras de sulfato o sulfato reductoras (BSR) son un grupo fisiológico único de procariontas porque tienen la capacidad de usar sulfato como aceptor de electrones en su respiración. (Huilca, 2018)

Además, el método de *electrocoagulación* es un proceso electroquímico que presenta ventajas de costos, eficiencias, tiempos de residencia, y protección al medio ambiente sobre los procesos químicos respectivos, es una técnica que involucra la adición electrolítica de iones metálicos coagulantes directamente del electrodo de sacrificio. Estos iones permiten que los contaminantes se aglomeren de la misma forma que si se adicionara un producto químico como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, etc. y permitir con ellos su remoción (Huayta, 2017).

Asimismo, el tratamiento de *lodos de baja densidad (low density sludge) - LDS* se basa en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para precipitar los metales pesados. Estos metales precipitan como hidróxidos insolubles en un intervalo de pH de 7 a 10. A diferencia del tratamiento de *lodos de alta densidad HDS (high density sludge)*, que consiste en recircular un porcentaje ($\leq 80\%$) del lodo final del estanque de sedimentación hasta el punto de arranque de la planta. Los lodos son retornados a un reactor, donde se adiciona cal

hidratada. La cal y el lodo se mezclan con las aguas ácidas, en el tanque de neutralización, donde se provee aire para la oxidación del ion ferroso. (Choque, 2020)

El método de *neutralización activo con lechada de cal* se basa en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa caústica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de metales pesados. (Jiménez, 2017)

El *tratamiento pasivo anaeróbico* según López (2016) es un resultado de la falta de oxígeno en el medio de vida de algún tipo de bacteria o microorganismo vivo. Es un sistema que opera en permanente inundación, el agua fluye por gravedad a través de un sustrato orgánico y otro alcalino, incrementándose el pH hasta niveles cercanos al neutro, debido a la alcalinidad de los bicarbonatos que se generan en el sistema a partir de la reducción anaerobia del sulfato y la disolución de la caliza (CaCO_3). Cabe mencionar que el travertino (CaCO_3) es un mineral carbonatado que consume ácido a través de la formación de bicarbonato (HCO_3) y tiende a neutralizar las soluciones llevándolas hasta un pH neutro.

Finalmente, los *humedales artificiales* son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y promover un mejoramiento ambiental. Pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua como: nutrientes, metales, patógenos y otros productos químicos. (Licapa, 2015)

La reutilización es el uso que puede realizar el titular de una concesión minera de pasivos ambientales que se encuentren dentro del área correspondiente, como, por ejemplo: labores subterráneas, plataformas de exploración, desmontes, relaveras, entre otros, los cuales pueden ser incluidos como parte de las nuevas actividades mineras. El reaprovechamiento implica la reprocesamiento para la extracción de elementos valiosos y

de interés económico, producto de residuos de actividades pasadas (desmontes, relaves o escorias) en el que se toma la obligación de su remediación ambiental (Pinto, 2014).

El presente tema se justifica porque las actividades mineras en el Perú, a través del tiempo, han dado origen a la formación de los pasivos ambientales mineros, cuyos componentes son: labores subterráneas de la mina, labores de tajo abierto, depósitos de desmontes, depósitos de relaves, pilas de lixiviación, generación de aguas ácidas, residuos metalúrgicos, entre otros. Este estudio se centra en el tratamiento y recuperación del drenaje ácido de mina, dado que el DAM constituye uno de los contaminantes más perniciosos producto de la actividad minera, por ello se han desarrollado diferentes métodos pasivos y activos para su remediación. Estos tratamientos de remediación se realizan con el fin de utilizar los metales recuperados ya sea como catalizadores coaguladores, etc.; asimismo hacer uso de nuevas técnicas y métodos sofisticados para alcanzar una alta eficiencia, ello contribuiría para que la población genere nuevos ingresos; por último, se evite la acumulación de dichos pasivos.

La formulación del problema de investigación es el siguiente: ¿Cuáles son los métodos más eficientes de remediación de Pasivos Ambientales Mineros utilizados por la actividad minera en el Perú?

El objetivo general planteado es: Comparar los métodos de remediación de Pasivos Ambientales Mineros utilizados por la actividad minera en el Perú. Además, los objetivos específicos percibidos son: a) Evaluar las características fisicoquímicas de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros in situ y posterior a su tratamiento, b) Analizar la remoción fisicoquímica de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros después de haber aplicado los métodos de tratamiento y c) Comparar

la eficiencia de los métodos de tratamiento de Drenajes Ácidos de los Pasivos Ambientales Mineros en el Perú.

La hipótesis planteada es: Los métodos de remediación de pasivos ambientales mineros (en especial para drenaje ácido de mina – DAM) en la minería peruana más eficientes son: Fitorremediación, Biorremediación, Electrocoagulación, Neutralización con lechada de cal y Humedales artificiales de los cuales resulta ser más eficiente el método de Neutralización con lechada de cal, ya que su eficiencia supera el 98 % en promedio, mientras que con el método de fitorremediación solo se logra una eficiencia del 70 %.

CAPÍTULO II.

MÉTODO

Enfoque de investigación es Cualitativo, este enfoque según Fernández, Hernández y Baptista (2014) es una "investigación naturalista, fenomenológica e interpretativa, donde se envuelve una serie de concepciones, visiones, técnicas y estudios no cuantitativos". Por tal, en la presente se busca interpretar los resultados de manera comparativa respecto a los métodos de tratamiento de pasivos ambientales mineros en la minería peruana.

El tipo de investigación es Descriptiva, "es la investigación que comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza, composición o procesos de los fenómenos; se trabaja sobre la realidad de los hechos y su correcto análisis e interpretación" (Fernández, Hernández y Baptista, 2010). En la presente investigación se basa principalmente en la información proporcionada por las diferentes fuentes de información, respecto al tratamiento de pasivos ambientales, específicamente en los drenajes ácidos de minas; los cuales han sido dilucidados y aplicados de manera experimental. Teóricamente, contiene información de investigaciones anteriores vinculadas al sector minero y de bibliografía afín, con el propósito de articular dichos antecedentes técnicos con el objetivo de esta investigación.

El diseño de investigación es de carácter no experimental; según Fernández, Hernández y Baptista (2010), en esta investigación "se observan fenómenos tal como son para poder ser analizados posteriormente; es decir, resulta absurdo la manipulación de variables". En este sentido, se presenta una interpretación y análisis comparativo de los métodos de remediación de pasivos ambientales por la minería moderna existente en el Perú.

El corte de investigación es transversal, puesto que “se relaciona en base a datos en un solo momento y tiempo” (Hernández, Fernández y Baptista, 2010). Además, tiene como finalidad describir los métodos de remediación de PAMs y analizar su eficiencia.

Por otro lado, en el presente estudio se consideró una población finita, dado que se conoce el número de elementos que constituyen la investigación, por ende, se consideró una población de 19 estudios relativos a los métodos de tratamiento de pasivos ambientales mineros, considerando un alcance a nivel nacional como internacional.

Asimismo, la muestra está conformada por 10 (diez) estudios concernientes a los métodos de tratamiento de pasivos ambientales mineros utilizados por la actividad minera en el Perú, en específico a los drenajes ácidos de mina. Los criterios de selección para la muestra fueron:

Criterios de inclusión: investigaciones que mostraron un enfoque más práctico que teórico, es decir que revelaron resultados concisos, de manera explícita y fundamentada, además de presentar una metodología bien elaborada; esencialmente se consideró a estudios con contenido netamente de métodos de tratamiento de drenajes ácidos de minas.

Criterio de exclusión: se dejaron de lado los estudios que no presentan resultados técnicos, respecto a métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina, además que estos estudios hayan sido publicados anterior al 2011.

Por otro lado, los métodos de investigación *que se desarrollaron en este estudio fueron:* en primer lugar, el *método descriptivo*, este método consiste en “describir las variables en estudio y analizar su comportamiento para la inferencia de las características de la población” (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Se hace uso de este método para describir las propiedades y características fisicoquímicas, como la concentración de metales

de los drenajes ácidos antes y después de ser tratados con los métodos determinados; en segundo lugar, el *método analítico*, mediante este método "se descompone un todo en sus partes, con la finalidad de estudiar y conocer sus características, naturaleza y propiedades de los elementos para encontrar la verdad" (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Mediante este método se percibió los componentes lógicos como propiedades de relaves mineros en su estado natural, y también se evaluó la eficiencia de los métodos después del tratamiento o remediación.

En tercer lugar, el *Método deductivo*, "el estudio parte de lo general a lo particular, de la ley al hecho, puede afirmarse que va de arriba hacia abajo". (Romero y Flores, 2010). Para la presente investigación se recurrió a la información teórica y conceptual respecto a los métodos de tratamiento pasivos ambientales mineros, en especial de drenajes ácidos, para después analizar y evaluar su eficiencia de los mismos, de una manera comparativa.

Por otra parte, las técnicas e instrumentos de recolección de datos empleados en la presente investigación fueron: a) técnica de *fuentes Secundaria* - implica la Revisión documentaria y recopilación de información de investigaciones similares al tema en cuestión, b) *técnica de análisis documental* - con el propósito de lograr la documentación teórica del problema y objetivo de investigación, se evaluó estudios y acontecimientos relativos al tema. Para ello, se valió de instrumentos de recolección de información como: 1) *bases de datos virtuales*: Scielo, Redalyc, Dialnet, entre otros; estos facilitaron la extracción de artículos científicos y tesis, principalmente, 2) *guías para el análisis documental* y 3) *hojas de cálculo de Excel* para ordenar, organizar y analizar los contenidos y cantidad de fuentes de información como parte de la revisión sistemática. En síntesis, la relación de técnica - instrumento fue: a)-1) y b)-2), 3)

Además, las técnicas e instrumentos de análisis de datos enmarcaron el proceso de ordenar, organizar, procesar, analizar e interpretar la información en Microsoft Excel, lo cual permitió elaborar las tablas y gráficos que describen los resultados finales de las variables de estudio de la presente investigación. Asu vez, para la redacción del informe se utilizó el paquete Microsoft Office 2019. Asimismo, se realizó el análisis e interpretación de datos extraídos de los antecedentes de investigación, lo cual permitió describir tanto las características y propiedades de pasivos ambientales mineros, en particular de los drenajes ácidos de mina in situ; como los métodos que utiliza la actividad minera para el tratamiento de los DAMs. En este proceso se hizo uso principalmente de tablas y gráficos de barras.

El procesamiento desarrollado comprende tres etapas, *etapa 1- Trabajo de pre-campo*: Consistió en la revisión sistemática de la literatura, para tal se validó de recursos llamados buscadores virtuales de información, entre los que destacan: Google Académico, Dialnet, Redalyc, Ebsco, Alicia.net, Scielo, Cybertesis, Science Direct. La *etapa 2 - Trabajo de gabinete*: implica el análisis e interpretación de los resultados, para tal se empleó figuras y tablas haciendo uso de la herramienta técnica Microsoft Excel. Finalmente, *etapa 3 - Elaboración de la tesis*: Con los resultados obtenidos se procedió a la redacción final de la tesis, bajo lineamiento y formato que maneja la Universidad Privada del Norte.

Respecto a los *aspectos éticos*, la presente investigación se realizó de acuerdo a los estándares que exige la Universidad Privada del Norte, siendo así que el autor: Presentará un contenido entendible de todo el desarrollo de la tesis; está sujeto a cumplir la normatividad institucional que rige una investigación como derechos de autor; revelará las fuentes y hallazgos informativos considerados para el presente estudio, plasmando información abierta y completa en favor de la comunidad científica, la cual servirá como antecedente para póstumas investigaciones, proporcionando la publicación virtual en páginas propias de la Universidad Privada del Norte.

CAPÍTULO III.

RESULTADOS

Los resultados correspondientes al primer objetivo específico: análisis de las propiedades fisicoquímicas de los Drenajes Ácidos de Minas de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú, pre y post a su tratamiento, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 1.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. - pretratamiento mediante el método de encapsulamiento, impermeabilización y relleno

Parámetro	Unidad	CALI04	CALI01	CAL02
Conductividad	µS/cm	502,667	388,571	594,815
Oxígeno disuelto	mg/L	35,625	48,333	42,857
pH		3,650	3,720	3,750
Temperatura	°C	133,333	96,154	84,286
Metales totales				
Níquel (Ni)	mg/L	0,0043	0,0059	0,3467
Cobre (Cu)	mg/L	0,0933	0,0607	0,6250
Zinc (Zn)	mg/L	1,5650	1,8045	1,2000
Arsénico (As)	mg/L	0,0400	0,0307	1,6667
Selenio (Se)	mg/L	0,0011	0,0012	0,0333
Cadmio (Cd)	mg/L	0,0044	0,0060	0,0018
Antimonio (Sb)	mg/L	0,0089	0,0074	3,5556
Bario (Ba)	mg/L	0,0331	0,0421	5,3846
Mercurio (Hg)	mg/L	0,0003	0,0002	0,0006
Talio (Tl)	mg/L	0,0025	0,0021	0,0042
Plomo (Pb)	mg/L	0,0610	0,0308	0,0184

Fuente: García (2018)

En la tabla, se muestra los resultados del análisis de las propiedades fisicoquímicas de un drenaje ácido de mina generado por la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C., el pH oscila entre 3,65 y 3,75; y los metales detectados fueron Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Ba, Hg, Tl y Pb.

Tabla 2.

Propiedades fisicoquímicas del DAM pre tratamiento mediante el método de Fangos artificiales - Mina Orcopampa

Parámetro	Unidad	Bocamina Santiago y Tudela
pH		3,3
Conductividad	μS/cm	838
Temperatura	°C	9,9
TSS	mg/l	60,4
Cobre (Cu)	mg/l	4,8
Hierro (Fe)	mg/l	68,56
Plomo (Pb)	mg/l	0,08
Zinc (Zn)	mg/l	9,3

TSS (total de sólidos suspendidos)

Fuente: De la cruz (2016)

Las propiedades fisicoquímicas del drenaje ácido de mina en la Mina Orcopampa, indica que el pH es 3,3; una conductividad de 838 μS/cm, los metales presentes han sido Cu, Fe, Pb y Zn.

Tabla 3.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de los pasivos ambientales mineros de la Quebrada Mesa de Plata, Hualgayoc - pre tratamiento mediante el método de Fitorremediación

Parámetro	Unidad	ME-1
pH		4,62
Conductividad	uS/cm	44597
Aluminio (Al)	mg/L	30,21
Arsénico (As)	mg/L	215
Bario (Ba)	mg/L	0,34
Berilio (Be)	mg/L	2,21
Boro (B)	mg/L	14,36
Cadmio (Cd)	mg/L	1,48
Cobre (Cu)	mg/L	7250,23
Cobalto (Co)	mg/L	1,13
Cromo (Cr)	mg/L	55,2
Hierro (Fe)	mg/L	898,97
Litio (Li)	mg/L	0,05
Magnesio (Mg)	mg/L	45,45
Manganeso (Mn)	mg/L	71,56
Níquel (Ni)	mg/L	0,053
Plomo (Pb)	mg/L	3,15
Selenio (Se)	mg/L	0,24
Zinc (Zn)	mg/L	58,36

Fuente: Aguilar y Aguilar (2017)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM de los pasivos ambientales mineros de la Quebrada Mesa de Plata – Hualgayoc, fueron: pH de 4.62, conductividad de 44597 $\mu\text{S}/\text{cm}$, concentraciones de metales: Al, As, Ba, Be, B, Cd, Cu, Co, Cr, Fe, Li, Pb, Se y Zn.

Tabla 4.

Propiedades fisicoquímicas del DAM provenientes de Southern Copper Corporation pre tratamiento mediante el método de Electrocoagulación

Voltaje	Evaluación	pH	Conductividad			
			eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl^- (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
10 V	Concentración inicial	7,56	1190	801,8	801,8	2098
13 V	Concentración inicial	7,57	1196	801,08	801,08	2098
70 V	Concentración inicial	7,53	1198	801,8	801,8	2098

Fuente: Huayta (2017)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM provenientes de Southern Copper Corporation, en tres (03) muestras indican un pH entre 7,53 y 7,57; conductividad de 1190 a 1198 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y presencia de Cloro (Cl^-), Calcio (Ca^{2+}) y Sulfatos (SO_4^{2-}).

Tabla 5.

Propiedades fisicoquímicas del DAM del pasivo ambiental de la Mina Nuncia pre tratamiento mediante el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor)

Parámetro	Unidad	Muestra In situ
pH		3,91
Cobre (Cu)	mg/L	0,63
Plomo (Pb)	mg/L	0,06
Zinc (Zn)	mg/L	1,1
Hierro (Fe)	mg/L	1,63

Fuente: Cadillo (2018)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM del pasivo ambiental de la Mina Nuncia sin tratamiento revelan un pH de 3,91 y presencia de metales como Cu, Pb, Zn y Fe.

Tabla 6.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de Unidad Minera Coimolache - pre tratamiento mediante el método de Lodos de alta densidad (HDS) y por Lodos de baja densidad (LDS)

Parámetro	Unidad	Concentración de metales in situ
pH	pH	10,3
Aluminio (Al)	mg/L	3,91
Manganeso (Mn)	mg/L	11,7
Hierro (Fe)	mg/L	193
Arsénico (As)	mg/L	0,021
Cobre (Cu)	mg/L	7,158
Plomo (Pb)	mg/L	0,002
Zinc (Zn)	mg/L	26,73

Fuente: Choque (2020)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM de Unidad Minera Coimolache indican un pH de 10.3, presencia de metales: Al, Mn, Fe, As, Cu, Pb y Zn.

Tabla 7.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi pre tratamiento mediante el método de neutralización activo con lechada de cal

Parámetros	Unidad	Pre - análisis
pH		2,18
Conductividad	μS/cm	14,87
Oxígeno disuelto	mg/L	1,29
Aluminio (Al)	mg/L	1963
Arsénico (As)	mg/L	0,12
Berilio (Be)	mg/L	0,305
Boro (B)	mg/L	5,515
Cadmio (Cd)	mg/L	0,279
Cobalto (Co)	mg/L	8,54
Cobre (Cu)	mg/L	33,87
Cromo (Cr)	mg/L	1,975
Hierro (Fe)	mg/L	5216
Magnesio (Mg)	mg/L	665,6
Manganeso (Mn)	mg/L	115,9
Níquel (Ni)	mg/L	12,39
Plomo (Pb)	mg/L	3,41
Selenio (Se)	mg/L	0,24
Zinc (Zn)	mg/L	46,97

Fuente: Jiménez (2017)

Según las propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi in situ, indican un pH de 2,18; conductividad de 14.18 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y concentraciones de metales como: Al, As, Ba, Be, B, Cd, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se y Zn.

Tabla 8.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi - pre tratamiento mediante el método de Biorremediación

Parámetro	Unidad	EST1
pH		3,61
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	310
Oxígeno disuelto	mg/L	4,2
Cobre (Cu)	mg/L	1,2
Zinc (Zn)	mg/L	4,92
Hierro (Fe^{+2})	mg/L	1,09
Hierro (Fe^{+3})	mg/L	2,49

Fuente: Huilca (2018)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi en su estado natural son: pH 3,61; conductividad 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y concentraciones de Cu, Zn y Fe.

Tabla 9.

Propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Ajoyani - pre tratamiento mediante el método pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino)

Evaluación	Parámetro				
	pH	Eh (mV)	STS (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)
Sin tratamiento	2,44	780	1015	174,72	12,25

Eh (Potencial redox), STS (sólidos totales suspendidos)

Fuente: López (2016)

Se resalta de las propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Ajoyani el pH con valor de 2,44 y la presencia de metales Fe y Cu.

Tabla 10.

Propiedades fisicoquímicas del DAM procedente de Hualgayoc - pre tratamiento mediante el método de humedales artificiales

Parámetro	Unidad	S1:20 % E.V. y 80 % M.A.			S1:80 % E.V. y 20 % M.A.		
		1	2	3	1	2	3
Hierro (Fe)	mg/L	107,43	107,57	107,37	108,69	106,67	106,97
Cobre (Cu)	mg/L	0,649	0,643	0,637	0,638	0,644	0,642

E.V. (Estiércol de vaca predescompuesto), M.A. (Musgos y aserrín)

Fuente: Licapa (2015)

Concerniente a las propiedades fisicoquímicas del DAM procedente de Hualgayoc, se muestra altas concentraciones de metales, principalmente de Fe y Cu.

Tabla 11.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. - post tratamiento mediante el método de encapsulamiento, impermeabilización y relleno.

Parámetro	Unidad	CALI04	CALI01	CAL02	ECA del agua
Conductividad	µS/cm	75,4	54,4	80,3	1000
Oxígeno disuelto	mg/L	5,7	5,8	6	≥ 5
pH		6,85	6,45	6,97	6,5-9,0
Temperatura	°C	12	12,5	11,8	Δ 3
Metales totales					
Níquel (Ni)	mg/L	0,0006	0,0008	0,0006	0,052
Cobre (Cu)	mg/L	0,0112	0,0085	0,1129	0,1
Zinc (Zn)	mg/L	0,1565	0,1985	0,1391	0,12
Arsénico (As)	mg/L	0,0052	0,0043	0,0041	0,15
Selenio (Se)	mg/L	0,00015	0,00015	0,00015	0,005
Cadmio (Cd)	mg/L	0,0007	0,0009	0,0007	0,00025
Antimonio (Sb)	mg/L	0,0016	0,0013	0,0014	0,64
Bario (Ba)	mg/L	0,0059	0,0059	0,0051	0,7
Mercurio (Hg)	mg/L	0,00005	0,00005	0,00005	0,0001
Talio (Tl)	mg/L	0,00035	0,00035	0,00035	0,0008
Plomo (Pb)	mg/L	0,0061	0,004	0,0036	0,0025

Fuente: García (2018)

Se revela las propiedades fisicoquímicas del DAM de la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. post tratamiento mediante el método de encapsulamiento, impermeabilización y relleno, obteniendo un pH entre 6,45 y 6,97; los cuales cumplen con la normatividad peruana, asimismo, las concentraciones de metales obtenidas son inferiores a lo exigible por ley.

Tabla 12.

Propiedades fisicoquímicas del DAM post tratamiento mediante el método de Fangos artificiales - Mina Orcopampa

Parámetro	Unidad	Bocamina Santiago y Tudela	Salida de fango anaeróbico	NMPELMM
pH		3,3	6,45	5,5-10,5
Conductividad	μS/cm	838	651	
Temperatura	°C	9,9	9,5	
TSS	mg/l	60,4	15,3	50
Cobre (Cu)	mg/l	4,8	0,03	1
Hierro (Fe)	mg/l	68,56	0,44	2
Plomo (Pb)	mg/l	0,08	0,0019	0,5
Zinc (Zn)	mg/l	9,3	0,35	3

NMPELMM: Niveles Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos Minero-Metalúrgicos

Fuente: De la cruz (2016)

Luego de aplicar el método de Fangos artificiales - Mina Orcopampa, se aprecia un pH de 6,45; el cual está en el rango de exigible, la conductividad se ha reducido a 651 μS/cm y es notoria la disminución de concentraciones minerales (Cu, Fe, Pb y Zn).

Tabla 13.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de los pasivos ambientales mineros de la Quebrada Mesa de Plata, Hualgayoc - post tratamiento mediante el método de Fitorremediación

Parámetro	Unidad	ME-1-pre	ME-1-post	LCM
pH		4,62	7,81	5,5-9,5
Conductividad	μS/cm	44597	1368	
Aluminio (Al)	mg/L	30,21	0,906	0,022
Arsénico (As)	mg/L	215	0,021	0,003
Bario (Ba)	mg/L	0,34	0,015	0,002
Berilio (Be)	mg/L	2,21	0,31	0,002
Boro (B)	mg/L	14,36	0,42	0,021
Cadmio (Cd)	mg/L	1,48	0,126	0,002
Cobre (Cu)	mg/L	7250,23	0,072	0,014
Cobalto (Co)	mg/L	1,13	0,124	0,002
Cromo (Cr)	mg/L	55,2	0,005	0,002
Hierro (Fe)	mg/L	898,97	8,989	0,019
Litio (Li)	mg/L	0,05	0,011	0,004
Magnesio (Mg)	mg/L	45,45	15	0,017
Manganeso (Mn)	mg/L	71,56	20,75	0,002
Níquel (Ni)	mg/L	0,053	0,009	0,002
Plomo (Pb)	mg/L	3,15	0,031	0,003
Selenio (Se)	mg/L	0,24	0,053	0,017
Zinc (Zn)	mg/L	58,36	8,171	0,016

LCM: Límite de cuantificación del método

Fuente: Aguilar y Aguilar (2017)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM de los pasivos ambientales mineros de la Quebrada Mesa de Plata, Hualgayoc luego del tratamiento mediante el método de Fitorremediación, presenta un pH de 7,81 y una remoción muy significativa de metales presentes, cuyos parámetros cumplen con la normatividad.

Tabla 14.

Propiedades fisicoquímicas del DAM provenientes de Southern Copper Corporation - post tratamiento mediante el método de Electrocoagulación

Voltaje	Evaluación	Cl ⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)
10 V	Concentración inicial	801,8	801,8	2098	7,56	1190
	Concentración final	718,24	636,34	1858,33	6,8	614,33
13 V	Concentración inicial	801,08	801,08	2098	7,57	1196
	Concentración final	620	485,74	716,2	6,8	569
70 V	Concentración inicial	801,8	801,8	2098	7,53	1198
	Concentración final	15,53	173,99	27,33	6,53	633,33

Fuente: Huayta (2017)

Las propiedades fisicoquímicas del DAM provenientes de Southern Copper Corporation después del tratamiento mediante el método de Electrocoagulación muestran una óptima remoción, esta aumentó a medida que se incrementó el voltaje aplicado, obteniendo un pH final de 6,53; conductividad de 633,33 μS/cm y la concentración reducida de Cl⁻, Ca²⁺, y SO₄²⁻.

Tabla 15.

Propiedades fisicoquímicas del DAM del pasivo ambiental de la Mina Nuncia post tratamiento mediante el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor)

Parámetro	Unidad	Muestra In situ	Muestra piloto (unidad/mg/L)
pH		3,91	6,24
Cobre (Cu)	mg/L	0,63	0,21
Plomo (Pb)	mg/L	0,06	0,03
Zinc (Zn)	mg/L	1,1	0,9
Hierro (Fe)	mg/L	1,63	1,22

Fuente: Cadillo (2018)

Según la tabla, las propiedades fisicoquímicas del DAM del pasivo ambiental de la Mina Nuncia posterior al tratamiento mediante el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor) indican un pH de 6,24; remoción en la concentración de Cu, Pb, Fe y Zn.

Tabla 16.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de Unidad Minera Coimolache - post tratamiento mediante el método de Lodos de alta densidad (HDS) y por Lodos de baja densidad (LDS)

Parámetro	Unidad	Concentración de metales in situ	Tratamiento propuesto	Tratamiento actual	LMP	ECA
pH		10,3	8,1600	6,8	6,0-9,0	6,5-8,4
Aluminio (Al)	mg/L	3,91	0,9850	5,6		5
Manganeso (Mn)	mg/L	11,7	0,0790	1,22		0,2
Hierro (Fe)	mg/L	193	0,0152	0,05	1,6	5
Arsénico (As)	mg/L	0,021	0,0091	0,005	0,08	0,1
Cobre (Cu)	mg/L	7,158	0,0195	0,381	0,4	0,2
Plomo (Pb)	mg/L	0,002	0,0006	0,0006	0,16	0,05
Zinc (Zn)	mg/L	26,73	0,0122	0,4336	1,2	2

Fuente: Choque (2020)

De acuerdo con los resultados, las propiedades fisicoquímicas del DAM de Unidad Minera Coimolache luego de su tratamiento mediante el método de Lodos de alta densidad (HDS) y por Lodos de baja densidad (LDS), se evidencia la reducción en la concentración de metales, y la acidez (pH) con valor de 6,8 y 8,1 está dentro del rango exigente según LMP y ECA.

Tabla 17.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi - post tratamiento mediante el método neutralización activo con lechada de cal

Parámetros	Unidad	Pre - análisis	Post - análisis
pH		2,18	8,1
Conductividad	μS/cm	14,87	3,14
Oxígeno disuelto	mg/L	1,29	5,54
Aluminio (Al)	mg/L	1963	0,769
Arsénico (As)	mg/L	0,12	0,01
Berilio (Be)	mg/L	0,305	0,001
Boro (B)	mg/L	5,515	0,01
Cadmio (Cd)	mg/L	0,279	0,003
Cobalto (Co)	mg/L	8,54	0,009
Cobre (Cu)	mg/L	33,87	0,018
Cromo (Cr)	mg/L	1,975	0,009
Hierro (Fe)	mg/L	5216	0,893
Magnesio (Mg)	mg/L	665,6	109,5
Manganeso (Mn)	mg/L	115,9	1,484
Níquel (Ni)	mg/L	12,39	0,012
Plomo (Pb)	mg/L	3,41	0,008
Selenio (Se)	mg/L	0,24	0,01
Zinc (Zn)	mg/L	46,97	0,022

Fuente: Jiménez (2017)

Según las propiedades fisicoquímicas del DAM de la Unidad Minera Arasi posterior a su tratamiento mediante el método neutralización activo con lechada de cal, se obtuvo un pH de 8,1; conductividad de 3,14 y se redujo considerablemente la concentración de metales.

Tabla 18.

Propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Ajoyani - post tratamiento mediante el método de Biorremediación

Parámetro	Tiempo (días)					
	0	15	30	45	60	75
pH	3,61	3,74	5,56	5,59	5,75	6,09
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	310	322	388	371	409	418
Oxígeno disuelto (mg/L)	4,2	4,11	1,85	1,49	1,4	1,12
Cobre (Cu)	1,2	0,99	1,29	0,8	0,47	0,09
Zinc (Zn)	4,92	4,05	3,72	4,32	3,55	3,26
Hierro (Fe^{+2})	1,09	0,76	0,76	0,88	0,62	0,74
Hierro (Fe^{+3})	2,49	1,33	1,34	1,08	1,02	1,01

Fuente: Huilca (2018)

Según lo obtenido las propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Ajoyani luego de su tratamiento mediante el método de Biorremediación han sido removidas en función del tiempo, alcanzando a los 75 días un pH de 6,09; conductividad de 418 y las concentraciones de Cu, Zn y Fe han sido reducidas en un alto grado.

Tabla 19.

Propiedades fisicoquímicas del DAM de Cia. Minera Telsa S.A.C. - post tratamiento mediante el método pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino)

Evaluación	Parámetro				
	pH	Eh (mV)	STS (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)
Sin tratamiento	2,44	780	1015	174,72	12,25
Con tratamiento	7,54	323	15	0,62	0,28

Eh (Potencial redox), STS (sólidos totales suspendidos)

Fuente: López (2016)

Nota. Las propiedades fisicoquímicas del DAM del distrito minero de Cia. Minera Telsa S.A.C., luego de su tratamiento mediante el método pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino), presentan un pH de 7,54; las concentraciones de metales se han removido significativamente.

Tabla 20.

Propiedades fisicoquímicas del DAM procedente de Hualgayoc – post tratamiento mediante el método de humedales artificiales

Parámetro	Unidad	Tiempo de retención (h)	S1:20 % E.V. y 80 % M.A.			S1:80 % E.V. y 20 % M.A.		
			1	2	3	1	2	3
Hierro (Fe)	mg/L	12	11,71	11,6	11,58	9,97	10,07	10,12
		24	6,82	6,73	6,62	9,97	9,95	9,9
		36	4,77	4,95	4,82	3,67	3,61	3,57
		48	2,88	2,86	2,87	2,52	2,49	2,52
Cobre (Cu)	mg/L	12	0,107	0,105	0,115	0,246	0,21	0,202
		24	0,105	0,103	0,103	0,19	0,17	0,2
		36	0,105	0,101	0,101	0,11	0,092	0,082
		48	0,103	0,097	0,099	0,076	0,056	0,058

E.V. (Estiércol de vaca predescompuesto), M.A. (Musgos y aserrín)

Fuente: Licapa (2015)

Se aprecia que las propiedades fisicoquímicas del DAM procedente de Hualgayoc - pre tratamiento mediante el método de humedales artificiales, han experimentado una variabilidad considerable, es decir, las concentraciones de metales tanto de Fe como de Cu han sido removidas casi en su totalidad en función del tiempo evaluado (12 a 48 horas).

A continuación, se presentan los resultados de la remoción fisicoquímica de Drenajes Ácidos de Minas de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú, según los métodos de tratamiento, el cual corresponde al segundo objetivo.

Tabla 21.

Remoción del método de Encapsulamiento, impermeabilización y relleno

Parámetro	Unidad	CALI04	CALI01	CAL02
Conductividad Específica	μS/cm	85,00 %	86,00 %	86,50 %
Oxígeno disuelto	mg/L	84,00 %	88,00 %	86,00 %
pH		90,00 %	90,00 %	89,00 %
Temperatura	°C	91,00 %	87,00 %	86,00 %
Metales totales				
Níquel (Ni)	mg/L	86,00 %	86,50 %	99,83 %
Cobre (Cu)	mg/L	88,00 %	86,00 %	81,94 %
Zinc (Zn)	mg/L	90,00 %	89,00 %	88,41 %
Arsénico (As)	mg/L	87,00 %	86,00 %	99,75 %
Selenio (Se)	mg/L	86,00 %	87,00 %	99,55 %
Cadmio (Cd)	mg/L	84,00 %	85,00 %	60,80 %
Antimonio (Sb)	mg/L	82,00 %	82,50 %	99,96 %
Bario (Ba)	mg/L	82,20 %	86,00 %	99,91 %
Mercurio (Hg)	mg/L	85,00 %	76,00 %	91,50 %
Talio (Tl)	mg/L	86,00 %	83,00 %	91,69 %
Plomo (Pb)	mg/L	90,00 %	87,00 %	80,42 %

Fuente: García (2018)

La remoción del método de Encapsulamiento, impermeabilización y relleno está enmarcada en la acidez del DAM, alcanzando valores entre 89 % y 90 %, la remoción de metales oscila entre 60,80 % y 99,96 %.

Tabla 22.

Remoción del método de Fangos artificiales

Parámetro	Remoción (%)
pH	95,45
Conductividad	22,32
Temperatura	4,04
Cobre (Cu)	99,38
Hierro (Fe)	99,36
Plomo (Pb)	97,63
Zinc (Zn)	96,24

Fuente: De la cruz (2016)

La remoción del método de Fangos artificiales alcanzada es del 95.45% para el pH, conductividad del 22,32 % y para los metales entre 96,24 % y 99,38 %.

Tabla 23.

Remoción del método de Fitorremediación

Parámetro	Remoción (%)
pH	69,05 %
Conductividad	96,93 %
Aluminio (Al)	97,00 %
Arsénico (As)	99,99 %
Bario (Ba)	95,59 %
Berilio (Be)	85,97 %
Boro (B)	97,08 %
Cadmio (Cd)	91,49 %
Cobre (Cu)	100,00 %
Cobalto (Co)	89,03 %
Cromo (Cr)	99,99 %
Hierro (Fe)	99,00 %
Litio (Li)	78,00 %
Magnesio (Mg)	67,00 %
Manganeso (Mn)	71,00 %
Níquel (Ni)	83,02 %
Plomo (Pb)	99,02 %
Selenio (Se)	77,92 %
Zinc (Zn)	86,00 %

Fuente: Aguilar y Aguilar (2017)

La remoción del método de Fitorremediación refleja 69,05 % para el pH, 96,93 % para conductividad y para metales alcanzó una remoción entre 67 % para el caso del Mg y 100% para Cu.

Tabla 24.

Remoción del método de Electrocoagulación

Voltaje	Cl ⁻	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	pH	Conductividad
10 V	10,42	20,56	11,43	10,05	48,37
13 V	22,67	39,36	65,87	10,17	52,42
70 V	98,06	78,28	98,69	13,28	47,13

Fuente: Huayta (2017)

La remoción máxima del método de Electrocoagulación al aplicar voltajes de 10 V, 20 V y 70 V fue de 13.28% para el pH, 52,42% para la conductividad y en el caso de los metales fue de 98.69% para los sulfatos.

Tabla 25.

Remoción del método Biorremediación (bacterias sulfato reductor)

Parámetro	Remoción (%)
pH	59,59
Cobre (Cu)	66,67
Plomo (Pb)	50,00
Zinc (Zn)	18,18
Hierro (Fe)	25,15

Fuente: Cadillo (2018)

La remoción del método Biorremediación (bacterias sulfato reductor) alcanzada fue de 59,59 % para el pH, en el caso de los metales se obtuvo una remoción mínima de 18,18 % para el zinc y máxima de 66,67 % para el cobre.

Tabla 26.

Remoción del método de Lodos de alta densidad (HDS)

Parámetro	Remoción (%)
pH	20,78
Aluminio (Al)	74,81
Manganeso (Mn)	99,32
Hierro (Fe)	99,99
Arsénico (As)	56,67
Cobre (Cu)	99,73
Plomo (Pb)	70,00
Zinc (Zn)	99,95

Fuente: Choque (2020)

La remoción del método de Lodos de alta densidad (HDS) obtenida para el pH fue de 20,78 %, respecto a la remoción de metales estuvo enmarcada en el rango 56,67 % (As) y 99,99 % (Fe).

Tabla 27.

Remoción del método de Lodos de baja densidad (LDS)

Parámetro	Remoción (%)
pH	33,98
Aluminio (Al)	43,22
Manganeso (Mn)	89,57
Hierro (Fe)	99,97
Arsénico (As)	76,19
Cobre (Cu)	94,68
Plomo (Pb)	70,00
Zinc (Zn)	98,38

Fuente: Choque (2020)

La remoción del método de Lodos de baja densidad (LDS) refleja 33,98 % de acidez, en el caso de los metales se removió el 43,21 % (Al) y el máximo valor se alcanzó en el Fe (99,97 %).

Tabla 28.
Remoción del método Neutralización activo con lechada de cal

Parámetros	Remoción (%)
pH	271,6
Conductividad	78,9
Oxígeno disuelto	329,5
Aluminio (Al)	99,96
Arsénico (As)	91,67
Berilio (Be)	99,67
Boro (B)	99,82
Cadmio (Cd)	98,92
Cobalto (Co)	99,89
Cobre (Cu)	99,95
Cromo (Cr)	99,54
Hierro (Fe)	99,98
Magnesio (Mg)	83,55
Manganeso (Mn)	98,72
Niquel (Ni)	99,90
Plomo (Pb)	99,77
Selenio (Se)	95,83
Zinc (Zn)	99,95

Fuente: Jiménez (2017)

La remoción lograda al aplicar el método Neutralización activo con lechada de cal fue de 271,6 % en el pH, 78,9 % en la conductividad y en la concentración de metales la mínima eficiencia fue de 83,55 % en el caso del magnesio y la máxima de 99,98% para el hierro.

Tabla 29.
Remoción del método Biorremediación

Parámetro	Remoción (%)					
	0 días	15 días	30 días	45 días	60 días	75 días
pH						68,70 %
Conductividad						34,84 %
Oxígeno disuelto						73,33 %
Cobre (Cu)		17,93	15,33	40,37	65,42	93,19 %
Zinc (Zn)		17,65	16,4	13,21	22,52	28,19 %
Hierro (Fe ⁺²)		30,29	20,97	34,26	33,99	34,6 %
Hierro (Fe ⁺³)		46,16	15,27	26,24	60,09	67,21 %

Fuente: Huilca (2018)

La remoción del método Biorremediación enmarca un 68,7 % en el pH, 34,84 % en la conductividad, al término de los 75 días de tratamiento, la eficiencia en la concentración de metales estuvo en el rango de 28,19 % (Zn) y 93.19% (Cu).

Tabla 30.

Remoción del método Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino)

Evaluación	Parámetro				
	pH	Eh (mV)	STS (mg/L)	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)
Sin tratamiento	2,44	780	1015	174,72	12,25
Con tratamiento	7,54	323	15	0,62	0.28
Remoción (%)	209,0%	58,6%	98,5%	99,6%	97,7%

Eh (Potencial redox), STS (sólidos totales suspendidos)

Fuente: López (2016)

La eficiencia del método Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) fue de 209 % en el pH, 99,6 % en el caso del Fe y 97,7 % para el Cu.

Tabla 31.

Remoción del método del método de Humedales artificiales

Parámetro	Tiempo de retención (h)	S1:20 % E.V. y 80 % M.A.			S1:80 % E.V. y 20 % M.A.		
		1	2	3	1	2	3
Hierro (Fe)	12	89,09	89,21	89,21	90,82	90,55	90,53
	24	93,64	93,74	93,82	90,82	90,67	90,73
	36	95,55	95,39	95,5	96,61	96,61	96,65
	48	97,31	97,33	97,32	97,68	97,66	97,63
Cobre (Cu)	12	83,51	83,67	81,94	61,44	67,39	68,53
	24	83,82	83,98	83,83	70,21	73,6	68,84
	36	83,82	84,29	84,14	82,75	85,71	87,22
	48	84,12	84,91	84,45	88,08	91,3	90,96

E.V. (Estiércol de vaca predescompuesto), M.A. (Musgos y aserrín)

Fuente: Licapa (2015)

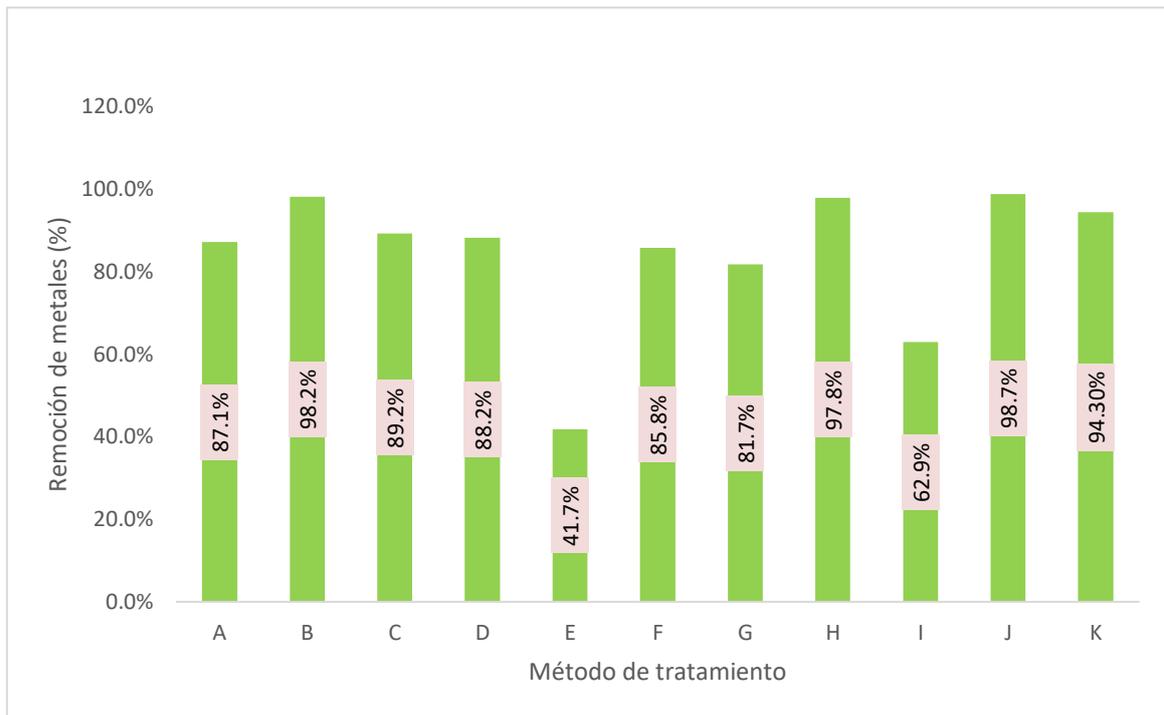
La remoción lograda mediante el método del método de Humedales artificiales para el Fe estuvo entre 89,09 % y 97,68 %; en el caso del Cu, la remoción estuvo comprendida entre 61,44 % y 91,3 %.

Los resultados que comprende el tercer objetivo específico: Comparar la eficiencia de los métodos de tratamiento de Drenajes Ácidos de Mina de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú, se presentan en las siguientes tablas y figuras.

Tabla 32.
Eficiencia de los métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina de pasivos ambientales mineros en el Perú

Parámetro	Método de tratamiento/remediación										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Encapsulamiento, impermeabilización y relleno.	Fangos artificiales	Fitorremediación	Electrocoagulación	Biorremediación (bacterias sulfato reductor)	Lodos de alta densidad (HDS)	Lodos de baja densidad (LDS)	Neutralización activa con lechada de cal	Biorremediación	Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino)	Humedales Artificiales
	García (2018)	De la Cruz (2016)	Aguilar y Aguilar (2017)	Huayta (2017)	Cadillo (2018)	Choque (2020)	Choque (2020)	Jiménez (2017)	Huilca (2018)	López (2016)	Licapa (2015)
Parámetros – Físicos											
pH	82,31 %	95,45 %	69,05%	13,28 %	59,59 %	20,78 %	33,98 %	271,56 %	68,70 %	209,02 %	
Conductividad	85,83 %	22,32 %	96,93%	47,13 %				78,88 %	34,84 %		
Parámetros Químicos - Metales totales											
Aluminio (Al)			97,00%			74,81 %	43,22 %	99,96 %			
Antimonio (Sb)	88,15 %										
Arsénico (As)	90,92 %		99,99%			56,67 %	76,19 %	91,67 %			
Bario (Ba)	89,37 %		95,59%								
Berilio (Be)			85,97%					99,67 %			
Boro (B)			97,08%					99,82 %			
Calcio (Ca)				78,28 %							
Cadmio (Cd)	76,60 %		91,49%					98,92 %			
Cloro (Cl)				98,06 %							
Cobalto (Co)			89,03%					99,89 %			
Cobre (Cu)	85,31 %	99,38 %	100,00%		66,67 %	99,73 %	94,68 %	99,95 %	93,19 %	97,71 %	90,96 %
Cromo (Cr)			99,99%					99,54 %			
Hierro (Fe)		99,36 %	99,00%		25,15 %	99,99 %	99,97 %	99,98 %	67,21 %	99,65 %	97,63 %
Litio (Li)			78,00%								
Magnesio (Mg)			67,00%					83,55 %			
Manganeso (Mn)			71,00%			99,32 %	89,57 %	98,72 %			
Mercurio (Hg)	84,17 %										
Níquel (Ni)	90,78 %		83,02%					99,90 %			
Plomo (Pb)	85,81 %	97,63 %	99,02%		50,00 %	70,00 %	70,00 %	99,77 %			
Selenio (Se)	90,85 %		77,92%					95,83 %			
Talio (Tl)	86,90 %										
Zinc (Zn)	89,14 %	96,24 %	86,00%		25,15 %	99,95 %	98,38 %	99,95 %	28,19 %		
Promedio	87,09 %	98,15 %	89,24%	88,17 %	41,74 %	85,78 %	81,72 %	97,81 %	62,86 %	98,68 %	94,30 %

En la tabla se muestra el resumen comparativo de la eficiencia o remoción los parámetros fisicoquímicos de los DAMs de los pasivos ambientales mineros seleccionados; luego de ser tratados con los métodos presentados.



A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, D=Electrocoagulación, E=Biorremediación (bacterias sulfato reductor), F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación, J=Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino), K=Humedales Artificiales

Figura 1.

Eficiencia de los de los métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina de pasivos ambientales mineros en el Perú

De acuerdo con la figura, el método más eficiente para el tratamiento de relaves mineros de pasivos ambientales es el tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino), en promedio se alcanzó una remoción del 98,68 %; seguida del 97,81 % por Neutralización activo con lechada de cal, a comparación del método biorremediación (bacterias sulfato reductor) sólo se logró remover en promedio el 41.74 % de la concentración de metales.

CAPÍTULO IV.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

De acuerdo con los resultados analizados, *las características fisicoquímicas de los drenajes ácidos de mina in situ* muestran un potencial de hidrógeno (pH) entre 2,18 (básico) y 10,3 (alcalino); cuyos valores indican la necesidad de tratamiento con el fin de cumplir con la normatividad ambiental (LMP y ECA). La conductividad en los DAM analizados revela un valor mínimo de 14,87 Us/cm y máximo de 44597 Us/cm. La concentración de metales supera significativamente los LMPs y ECAs. Posterior al tratamiento con los métodos descritos se cumplió con lo exigible por el sector minero, es decir, el pH estuvo comprendido en el rango estipulado (LMP: 6,0 – 9,0) y ECA (6,5 – 8,4) y los metales fueron removidos en algunos casos en su totalidad.

Respecto a la *remoción fisicoquímica de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros* después de haber aplicado los métodos de tratamiento se sintetiza que por encapsulamiento, impermeabilización y relleno, se logró una remoción de 90 % en el pH, la remoción de metales compren el 60,80 % y 99,96 %; mediante fangos artificiales se obtuvo una remoción en el pH de 95,45 %, conductividad (22,32 %) y en la concentración de metales entre 96,24 % y 99,38 %; con fitorremediación se logró remover el 69,05 % del pH, 96,93 % de conductividad y para metales alcanzó una remoción entre 67 % y 100 %. Con la electrocoagulación se alcanzó una remoción de 13,28 % para el pH, 52,42 % para la conductividad y en los metales fue de 98,69 % para los sulfatos; al aplicar biorremediación (bacterias sulfato reductor) la eficiencia fue 59,59 % para el pH, en el caso de los metales se obtuvo una remoción entre 18,18 % y 66,67 % para el Zn, para el cobre; la eficiencia

lograda por Lodos de alta densidad (HDS) indica 20,78 % en el pH, la remoción de metales estuvo en el rango 56,67 % (As) y 99,99 % (Fe).

Asimismo, con Lodos de baja densidad (LDS) se removió el 33,98 % de pH, en los metales se removió el 43,21 % (Al) y el 99,97 % de Fe; por Neutralización activo con lechada de cal se obtuvo una capacidad de remoción del 271,6 % en el pH, 78,9 % en la conductividad y en la concentración de metales la mínima fue de 83,55 % para el manganeso y la máxima de 99,98 % para el hierro; mediante biorremediación, se logró una eficiencia 68,7 % en el pH, 34,84 % en la conductividad y en los metales estuvo en el rango de 28,19 % (Zn) y 93,19 % (Cu); con el tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) se alcanzó una capacidad de remoción de 209 % en el pH, 99,6 % en el Fe y 97,7 % para el Cu; finalmente, mediante humedales artificiales se logró una eficiencia entre 89,09 % y 97,68 % para el Fe y en el caso del Cu, la remoción estuvo comprendida entre 61,44 % y 91,3 %.

Concerniente al *análisis comparativo de la eficiencia de los métodos de tratamiento* se sintetiza que la mayor eficiencia del potencial de hidrógeno se logró con neutralización activo con lechada de cal (271 %), mientras que con la electrocoagulación se alcanzó el 13,28 %. Asimismo, la mayor eficiencia de conductividad se obtuvo por fitorremediación 96,93 %; difiriendo significativamente con el 22,32 % logrado por fangos artificiales. Finalmente, la remoción de metales tomó su valor máximo al aplicar el tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) removiendo el 98,68 %; seguido del 97,81 % obtenido mediante Neutralización activo con lechada de cal; mientras que con Biorremediación (bacterias sulfato reductor) sólo se logró una remoción promedio de 41,74 %.

Cabe resaltar que la evaluación por Neutralización activo con lechada de cal consistió en 15 metales, comparado con el tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) donde sólo se evaluó Fe y Cu. Analizando cuál método es más eficiente, se considera la remoción solo de hierro y cobre, mediante Neutralización activo con lechada de cal se removió 99,96 % en promedio, a diferencia del 98,68 % alcanzado por tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino). Por tanto, de los estudios y método analizados, el método más eficiente para tratamiento de drenajes ácidos de minas (DAM) de pasivos ambientales mineros (PAM) es neutralización activa con lechada de cal.

Lo presentado, se fundamenta con los estudios siguientes:

Según García (2018), luego de aplicar el método de encapsulamiento, impermeabilización y relleno el pH (6,45), conductividad (651 uS/cm), y la presencia de metales están por debajo de los estándares de calidad ambiental (ECA para categoría 3) referido al Zinc, Cadmio y Plomo y Cobre. Asimismo, De la cruz (2016), sintetiza que el tratamiento pasivo aplicando fangos artificiales ha sido un éxito porque se logró disminuir la acidez, el contenido de los metales pesados hasta obtener los niveles máximos permisibles fijados por el sector minero.

De acuerdo con Aguilar y Aguilar (2017), al aplicar el método de Fitorremediación lograron reducir la concentración en un 97 % de Aluminio, 100 % de Arsénico, 81 % de Cadmio, 100 % de Cobre, 100 % Cromo, 99 % de Hierro, 71 % de Manganeso, 29 % de Sodio, 83 % de Níquel, 99 % Plomo, 38 % de Sílice, 78 % de Talio, 77 % de Vanadio y 56 % de Zinc con un tiempo de residencia hidráulica equivalente a 2 días y elevándose un pH en el orden de 4,79 a 7,16, de ese modo se demostró que estas concentraciones están por debajo de los estándares de calidad ambiental (ECA) para aguas - categoría 3.

De manera similar, Huayta (2017), en base a los resultados obtenidos después del tratamiento de electrocoagulación, el 100 % de los ensayos realizados tuvo como resultado la remoción de los iones Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} que se encontraban en exceso de acuerdo a lo establecido en los ECA (Estándares de Calidad Ambiental); así mismo se obtuvo que en el ensayo de 70 voltios la muestra de efluente alcanzó los valores necesarios establecidos teniendo como porcentajes de remoción 98,06 % Cl^- , 78,28 % Ca^{2+} y 98,69 % SO_4^{2-} con tales resultados se confirma la eficiencia del tratamiento además, de la rentabilidad en tiempo de remoción y costos, siendo también un tratamiento ambientalmente compatible.

Por su parte Cadillo (2018), aplicó el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor), logrando elevar el pH hasta 6,24; asimismo, las concentraciones de los metales disminuyeron hasta obtener valores aceptables, tal es el caso del Cobre (Cu) con un valor final de 0,21 mg/l, de ese modo se cumple con la normativa peruana D.S 010-2010-MINAM para límites máximos de descarga de efluentes para la actividad minera. En concordancia con Choque (2020), el propósito de mejorar la calidad del tratamiento de las aguas ácidas se cambiará el sistema de tratamiento del sistema LDS al sistema HDS, con recirculación de lodos; de este modo se cumplirá los LMP y ECAs establecidos en la normativa vigente.

Los resultados obtenidos por Jiménez (2017) en la remoción de metales pesados en el efluente a nivel campo a un pH de 8,1, C.E de 5.14 mS/cm revela una remoción de 99,96 % de Al; 0 % de As; 99,7 % de Be; 99,8 % de B; 98,9 % de Cd; 99,9% de Co, 99,9 % de Cu; 99,5% Cr; 99,98 % de Fe; 83,5 % de Mg; 98,7 % de Mn; 99,9 % de Ni; 0 % de Pb; 0 % de Se, y 99,95 % de Zn. Por tanto, al neutralizar el drenaje ácido con lechada de cal existe una eficiencia de remoción considerable de los parámetros físico químico e inorgánico.

Por ello Huilca (2018), alude que las bacterias reductoras de sulfato son capaces de inmovilizar metales disueltos en el afluente precipitándolos como sulfuros y reduciendo la acidez, si se crea un ambiente bioquímico favorable. Dicho entorno se brinda con la mezcla de varios sustratos orgánicos, recalcitrantes e inorgánicos y evaluar en funcionamiento del biorreactor pasivo a un tiempo de retención hidráulica eficiente para el tratamiento, por ello la eficiencia del reactor relacionada al incremento del pH y, remoción de metales es considerable.

En el método pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) de acuerdo con López (2016), la neutralización hacia un pH de 7 ocurre donde hay suficiente tiempo de contacto con los minerales consumidores de ácido. Bajo condiciones de pH neutro, la mayoría de los metales presenta baja solubilidad y precipitan en forma de hidróxidos u óxidos metálicos. La eficiencia de las pruebas depende, principalmente del tiempo que el agua ácida está circulando a través de ella, del porcentaje de travertino y el porcentaje de compost.

En el estudio de Licapa (2015), se evidencia que después del tratamiento de drenaje ácido de mina en humedales artificiales con la composición del sustrato de 80 % de estiércol de vaca y 20 % de musgo y aserrín (1:1), se removió un 97,66 % de hierro y 90,12 % de cobre para un tiempo de retención de 48 horas.

De este modo se cumple con la hipótesis formulada, los métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina de pasivos ambientales mineros en la minería peruana más eficientes son: Fitorremediación, Biorremediación, Electrocoagulación, Neutralización con lechada de cal; encapsulamiento, impermeabilización y relleno; Lodos de alta densidad (HDS), Lodos de baja densidad (LDS), tratamiento pasivo anaeróbico y Humedales artificiales; de los cuales resulta ser más eficiente el método de Neutralización con lechada de cal, ya que su

eficiencia supera el 98 % en promedio, mientras que con el método de biorremediación solo se logra una eficiencia del 70 %, en este caso se logró una eficiencia promedio de 41,74 %.

Conclusiones

Según lo analizado se sintetiza que los métodos de tratamiento de drenaje ácido de mina de pasivos ambientales mineros en la minería peruana más eficientes son: Fitorremediación, Biorremediación, Electrocoagulación, Neutralización con lechada de cal; encapsulamiento, impermeabilización y relleno; Lodos de alta densidad (HDS), Lodos de baja densidad (LDS), tratamiento pasivo anaeróbico y Humedales artificiales de los cuales resulta ser más eficiente el método de Neutralización con lechada de cal, ya que su eficiencia supera el 98 % en promedio.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que los drenajes ácidos de minas en campo presentan *características fisicoquímicas* que no cumplen con la normatividad peruana respecto al sector minero, muestra de ello se mostró potencial de hidrógeno en unos casos de 2,18 y 10,3 en otros casos; del mismo modo, la concentración de metales fue muy elevada respecto a los estándares exigibles; posterior a su tratamiento estas características cumplen con los Límites Máximos Permisibles y con los Estándares de Calidad Ambientales, tanto en la acidez como en la conductividad y metales totales.

Después de analizar la eficiencia de los métodos estudiados, se concluye que con los 11 tratamientos se han logrado *remover* gran cantidad de metales y en algunos procesos se han logrado remover en su totalidad, es decir, se logró una eficiencia alrededor del 100 %, tal fue el caso del Cu, Fe y As por fitorremediación, como también del Pb, Ni, Zn mediante Neutralización activo con lechada de cal; asimismo, se infiere que el potencial de hidrógeno

alcanzó una eficiencia en promedio de 93 %, con lo cual se cumplió con parámetros exigibles.

La *comparación de eficiencia* conllevó a concluir que el método de Neutralización activo con lechada de cal es el más eficiente, logrando una remoción promedio de 97,81 %, dado que muestra un análisis de 15 elementos metálicos; a diferencia del tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) donde sólo se evaluó 2 elementos (Fe y Cu), al comparar sólo en estos elementos el primer método alcanzó una eficiencia del 99,96 %, mientras que con el segundo 98,68 %.

REFERENCIAS

- Aguilar, D. A., & Aguilar, D. H. (2017). *Sistema piloto de fitorremediación para el tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros de la quebrada Mesa De Plata – Hualgayoc – 2017*. (Tesis de grado). Universidad privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca, Perú.
- AMSAC. (25 de 6 de 2018). *Activos Mineros SAC*. Obtenido de <https://www.amsac.pe/publicaciones/> 1|
- Cadillo, N. E. (2018). *Propuesta de mejoramiento de la calidad de las aguas acidas que drenan del pasivo ambiental de la Mina Nuncia mediante el uso de bacterias sulfato reductoras –Ataquero – Carhuaz -Ancash*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú.
- Chappuis, M. (2019). *Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Choque, G. Y. (2020). *Anteproyecto de mejoramiento y ampliación de la planta de tratamiento de agua de drenaje ácido de mina para la Unidad Minera Coimolache, en el Distrito de Hualgayoc, Provincia de Hualgayoc, Departamento de Cajamarca*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- De la Cruz, C. E. (2016). Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales. Caso: mina Orcopampa. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 9(17), 69-74.
- ELCOM. (29 de 09 de 2018). *Diario el El comercio*.
- García, A. A. (2018). *Remediación de los pasivos ambientales mineros generados por la ex Unidad Minera Lichicocha Activos Mineros S.A.C. con fines de disminuir los lixiviados a la subcuenca del Río Santa Eulalia y cuenca del Río Rímac*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Daniel Alcidez Carrión, Cerro de Pasco, Perú.
- Huayta, G. L. (2017). *Propuesta de tratamiento electroquímico en aguas de filtración de relave, provenientes de Southern Copper Corporation en la región Moquegua, para su uso agrícola*. (Tesis de bgrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Huilca, P. G. (2018). *Evaluación del funcionamiento de un biorreductor pasivo utilizando baterías sulfato reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de Mina*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Augustín de Arequipa, Perú.

- Jensen, K., & Birche, M. (2018). La recuperación de pasivos ambientales desde el proyecto de paisaje: el parador ecológico. *Geograficando*, 14(2), 1-15. doi:<https://doi.org/10.24215/2346898Xe044>
- Jiménez, H. C. (2017). *Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno*. (Tesis de grado). Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
- Licapa, R. G. (2015). *Influencia del Tiempo de Retención y Composición del Sustrato en la Remoción de Hierro y Cobre del Drenaje Ácido de Mina en Humedales Artificiales*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- López, G. H. (2016). *Tratamiento anaeróbico de aguas ácidas de mina con travertino y compost a escala de laboratorio*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- López, S. L., López, S. M., & Medina, S. G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Entramado*, 13(1), 78-91. doi:<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>
- Macías, S. F., Nieto, L. J., & Caraballo, M. M. (2012). Gestión Ambiental de los residuos generados en el tratamiento pasivo de Drenaje Ácido de Mina. *Revista de de la sociedad española de mineralogía*, 16(12), 144-146.
- Marín, P. E., & Escobar, M. F. (2014). Drenaje de aguas y Pasivos Ambientales en la inactiva Mina Pompería, Puno, Perú. *Revista de Investigación Altoandina*, 16(2), 41-48. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5607227>
- Mejía, H. (2017). Pasivos Ambientales Mineros: Repensando el pasado en aras de una minería responsable. *Cedemin*, 1-10. Obtenido de https://www.usmp.edu.pe/derecho/cedemin/revistaminasyderecho/edicion_5/seccion_opinion/Mejia_Herrera_Milgaros-Pasivos_Ambientales_Mineros.pdf
- MINEM. (2018). *La Intervención del Estado en la Remediación de Pasivos Ambientales Mineros*. Lima, Perú: Ministerio de Energía y Minas-Informativo minero.
- Oblasser, A. (2016). *Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras Bolivia, Chile, Colombia y el Perú*. Cooperación Alemana CEPAL Serie Medio Ambiente y Desarrollo.

- Palma, H. G. (2018). *Evaluación del funcionamiento de un Biorreactor pasivo utilizando bacterias Sulfato-Reductoras para el tratamiento de Drenaje ácidos de Minas*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.
- Pinto, H. (2014). Los pasivos mineros ambientales y los conflictos sociales en Hualgayoc. *Investigaciones Sociales*, 17(30), 265-277. doi:<https://doi.org/10.15381/is.v17i30.8033>
- Portal, L. (2013). *Cierre de minas y remediación ambiental*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- Salvador, T. O. (2015). *Recuperación de los metales pesados presentes en el Drenaje Ácido de Mina mediante la Precipitación Selectiva para su posterior utilización*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro el Perú, Huancayo, Perú.
- Sotomayor, C. A. (2015). Remediación de pasivos ambientales mineros como estrategia para el cuidado del ambiente. *Universidad de Lima*, 81-91.
- Vargas, C. (2018). *Alternativas de desarrollo en las regiones mineras de Perú. Impactos ambientales de la minería e ingresos alternativos en la agricultura en Junín y Cajamarca*. Berlín: Centro de Desarrollo Rural (SLE), Serie de Publicaciones. Humboldt – Universität zu Berlin.
- Wong, F. B., & Bernardo, T. A. (2018). Estimaciones de pasivos ambientales para acrecentar la contabilidad tridimensional y la sostenibilidad integral en las empresas mineras. *Investigación Valdizana*, 12(4), 193-205. doi:<https://doi.org/10.33554/riv.12.4.155>

ANEXOS

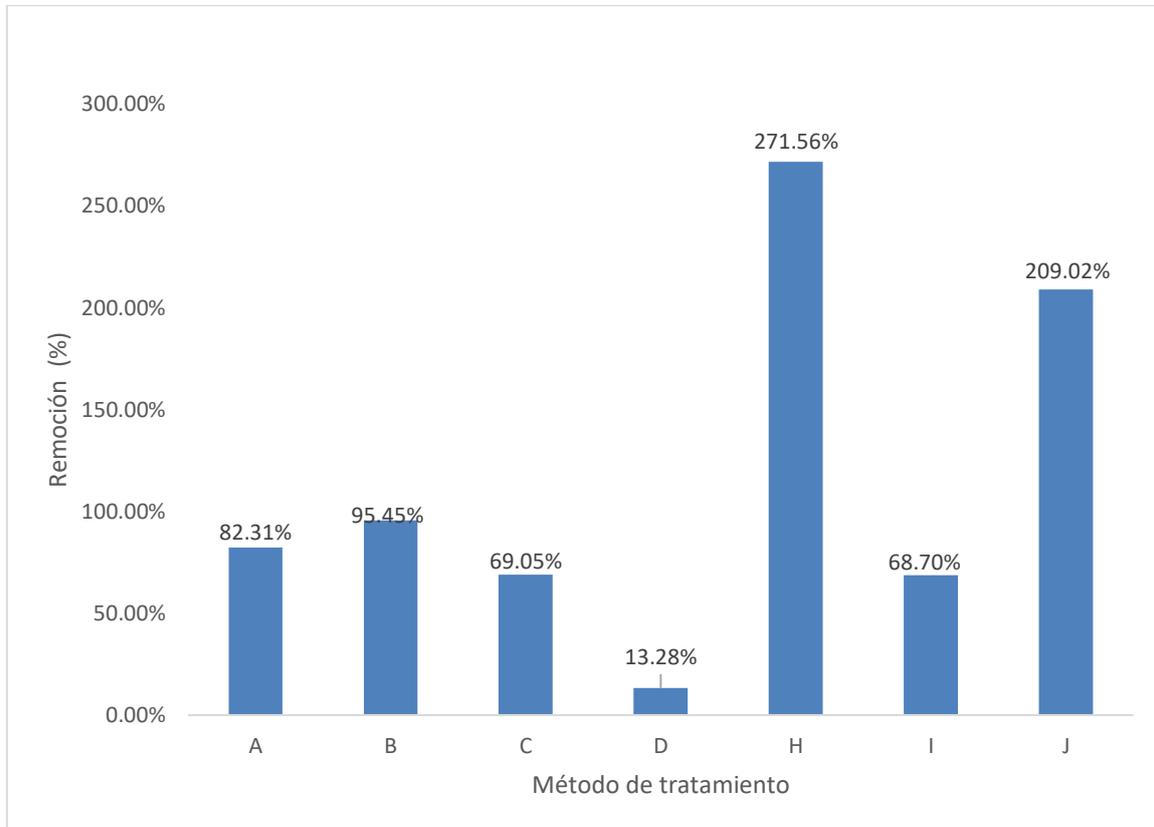
Anexo 1. Formato para comparación de eficiencia de los métodos de tratamiento de DAM

Tabla 33.

Formato para comparación de eficiencia de los métodos de tratamiento de DAM

	Método de tratamiento			
	A	B	C	D
Parámetro				
Parámetros - Físicos				
A				
B				
Parámetros Químicos - Metales totales				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
Promedio				

Anexo 2: Eficiencia de los métodos de tratamiento de Drenajes Ácidos de Mina de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú

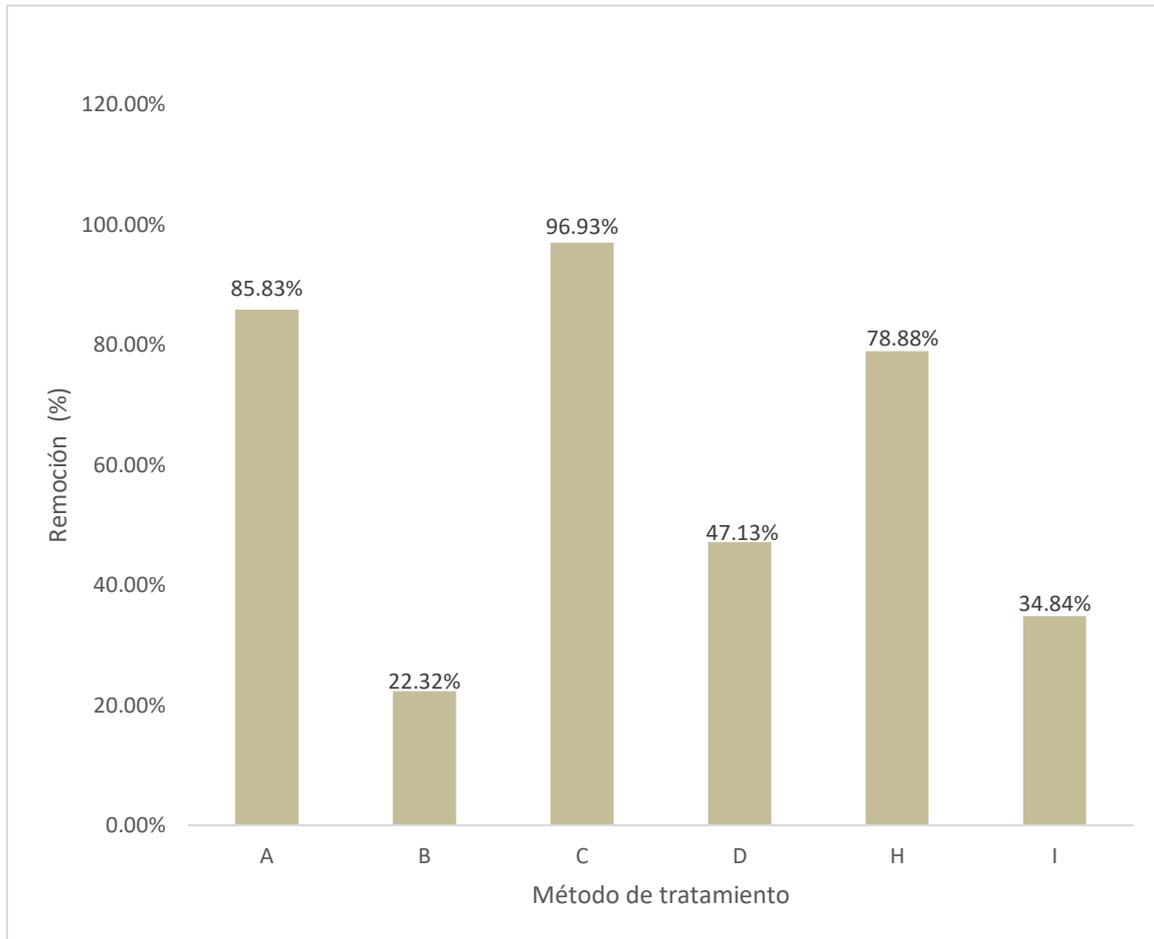


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, D=Electrocoagulación, E=Biorremediación (bacterias sulfato reductor), F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación, J=Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino).

Figura 2.

Remoción del pH

La eficiencia máxima en la acidez (pH) se alcanzó con el método Neutralización activo con lechada de cal (271,56 %), seguida del tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino) – 209,02 % y la eficiencia mínima se obtuvo en el tratamiento por electrocoagulación (13,28 %).

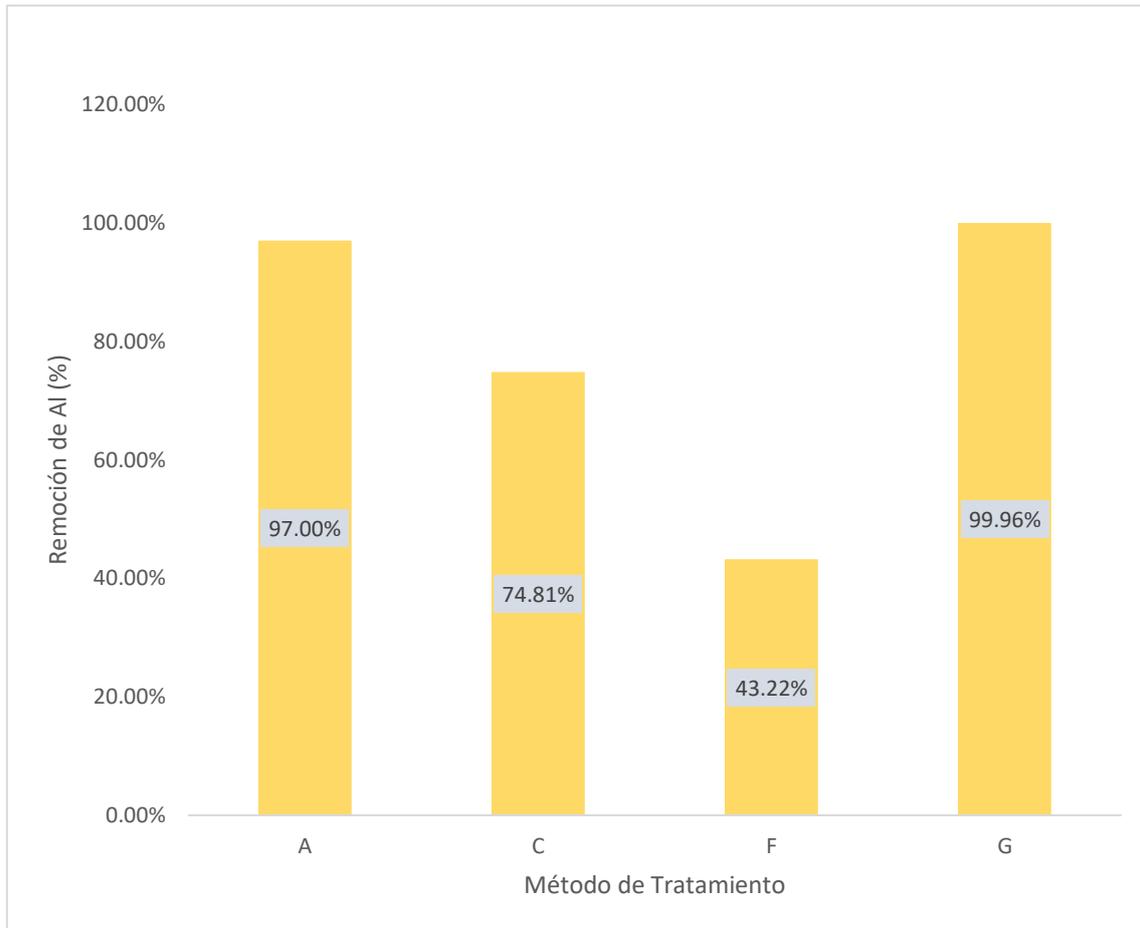


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, D=Electrocoagulación, H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación.

Figura 3.

Remoción de la conductividad

Respecto a la conductividad, la eficiencia fue mayor con el método de fitorremediación (96,93 %), mientras que con el método de fangos artificiales se logró una remoción del 22,32 %.

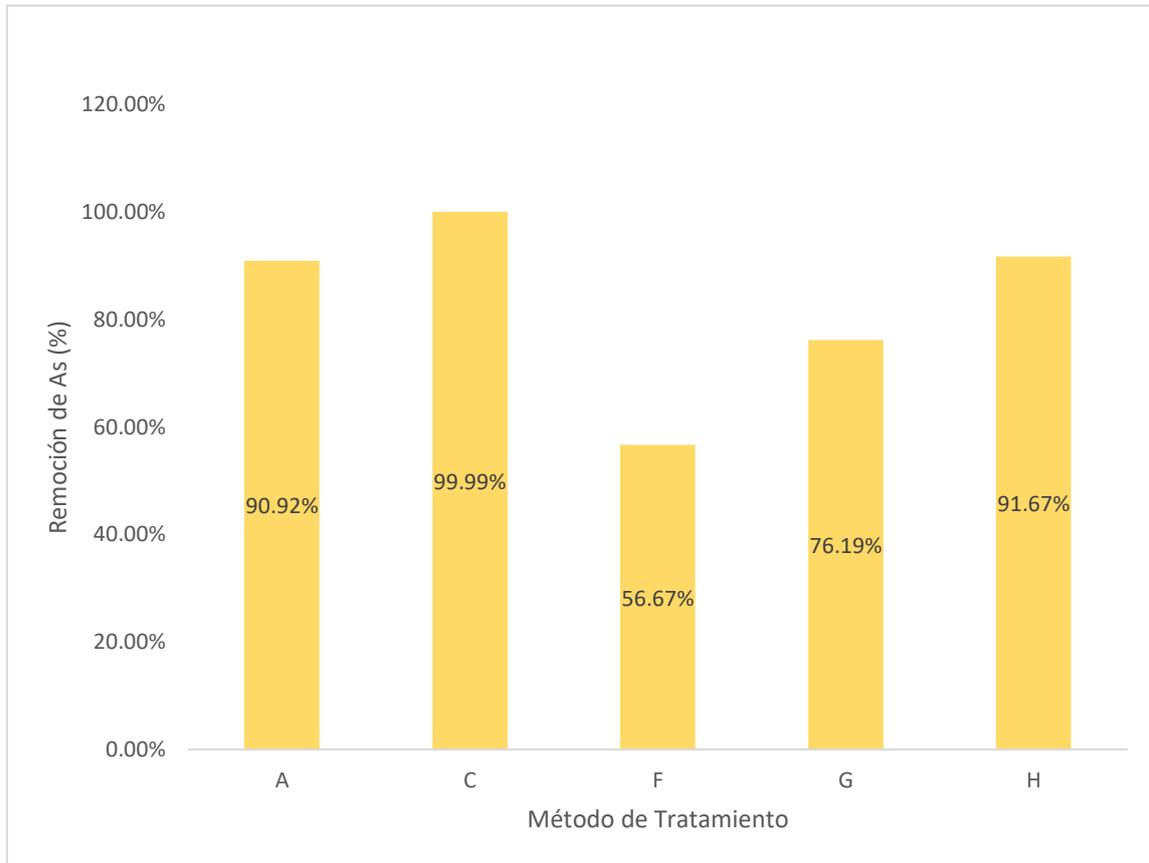


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, C=Fitorremediación, F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS).

Figura 4.

Remoción de Aluminio (Al)

La remoción de Aluminio (Al) tomó un valor máximo con el método de lodos de baja densidad (LDS) – 99,96 %, y el mínimo con el método de lodos de alta densidad (HDS) – 43,22 %.

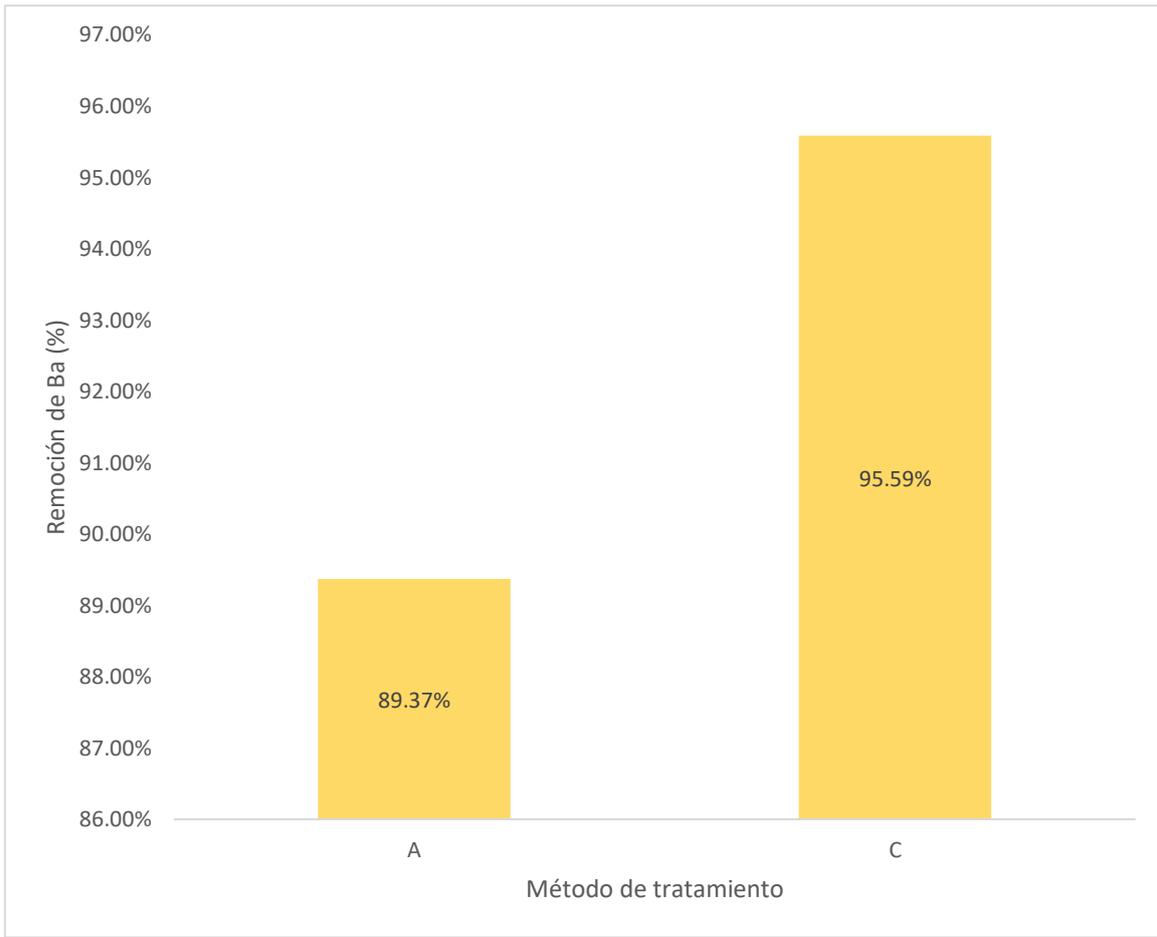


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, C=Fitorremediación, F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 5.

Remoción de Arsénico (As)

Se muestra que con el método de fitorremediación se alcanzó una remoción del 99,99 % de Arsénico (As), mientras que con Lodos de alta densidad (HDS) se logró remover el 56,67 %.

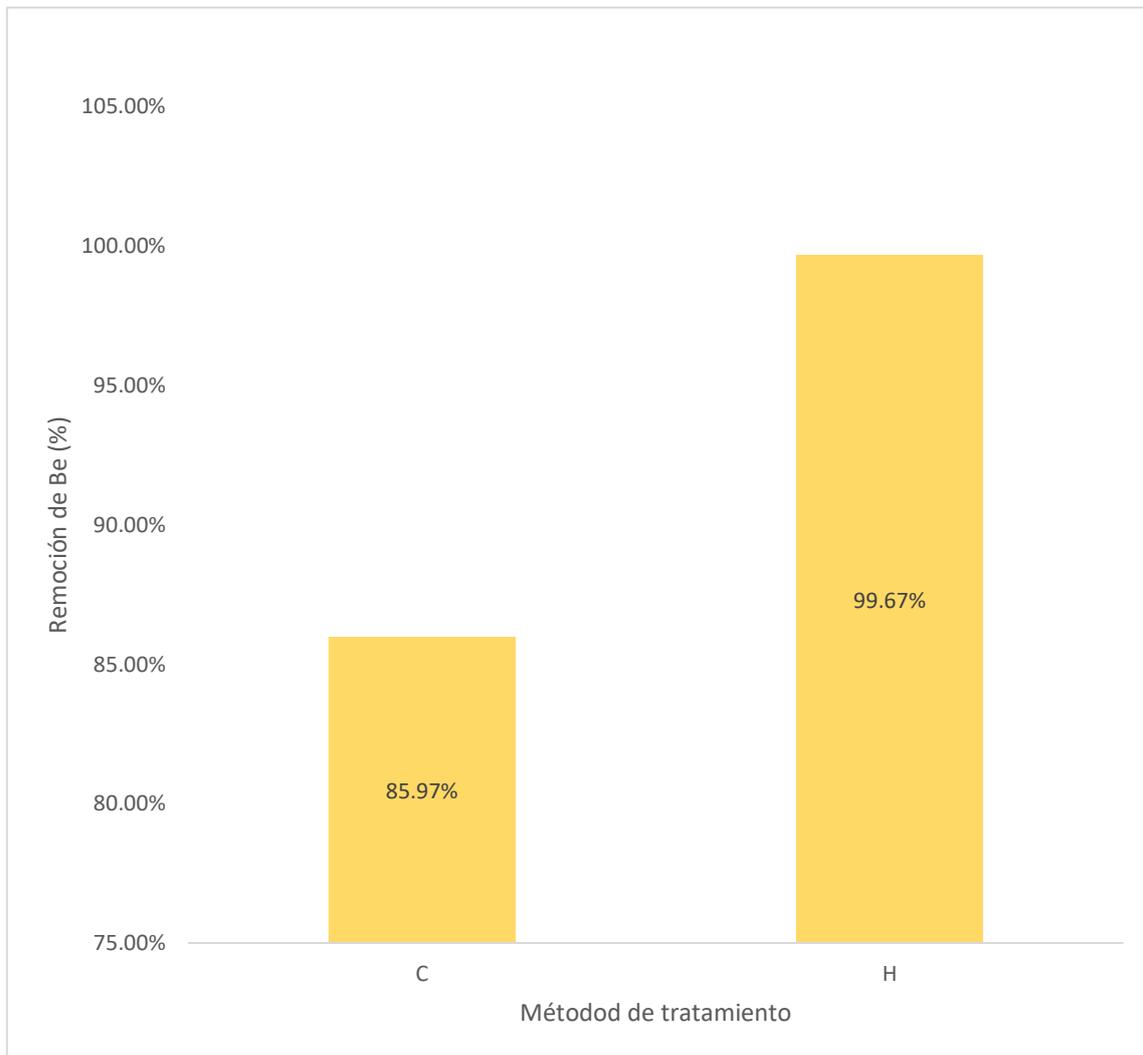


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, C=Fitorremediación.

Figura 6.

Remoción de Bario (Ba)

El Bario (Ba) fue removido en el 95,89 % con el método de fitorremediación y fue menor con el método de Encapsulamiento, impermeabilización y relleno (89,37 %).

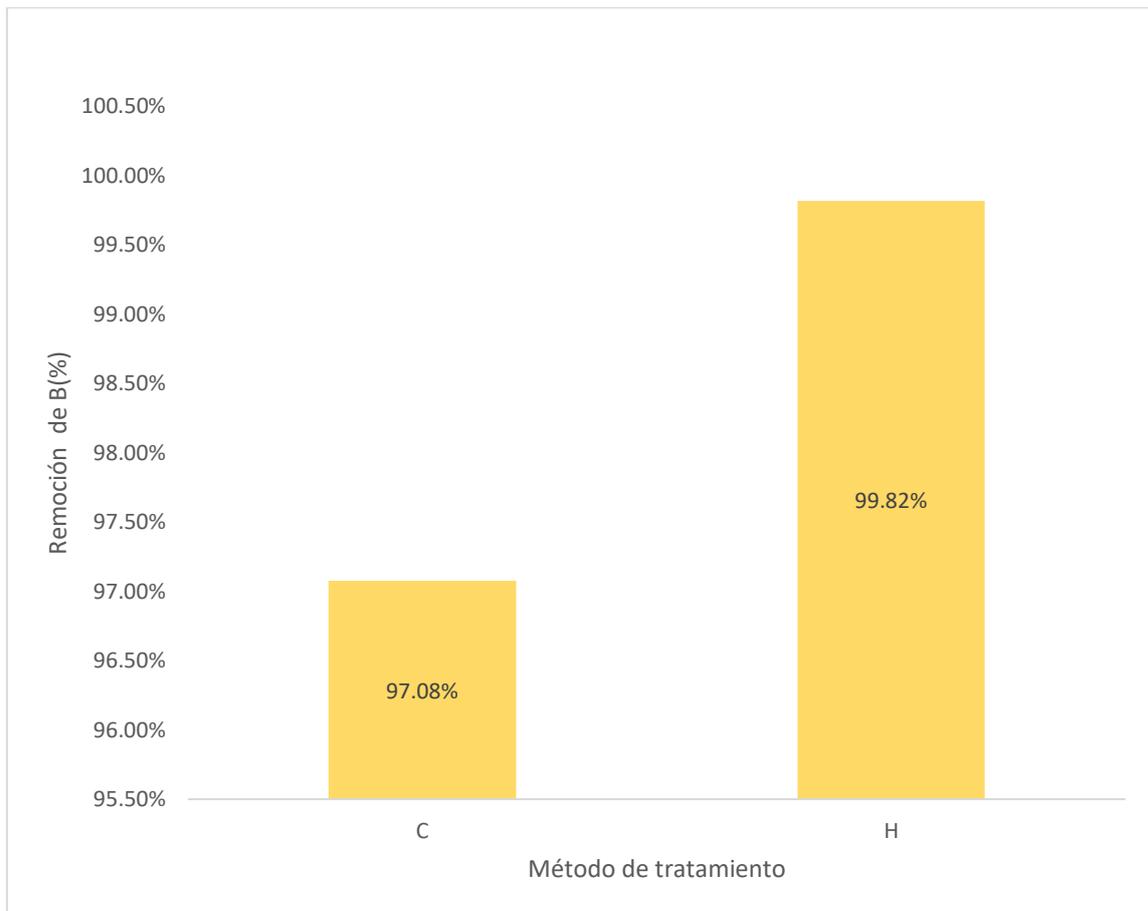


C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 7.

Remoción de Berilio (Be)

Se aprecia que la remoción de Berilio (Be) fue mayor con el método de Neutralización activo con lechada de cal (99,67 %), y menor con el método de fitorremediación (85,97 %).

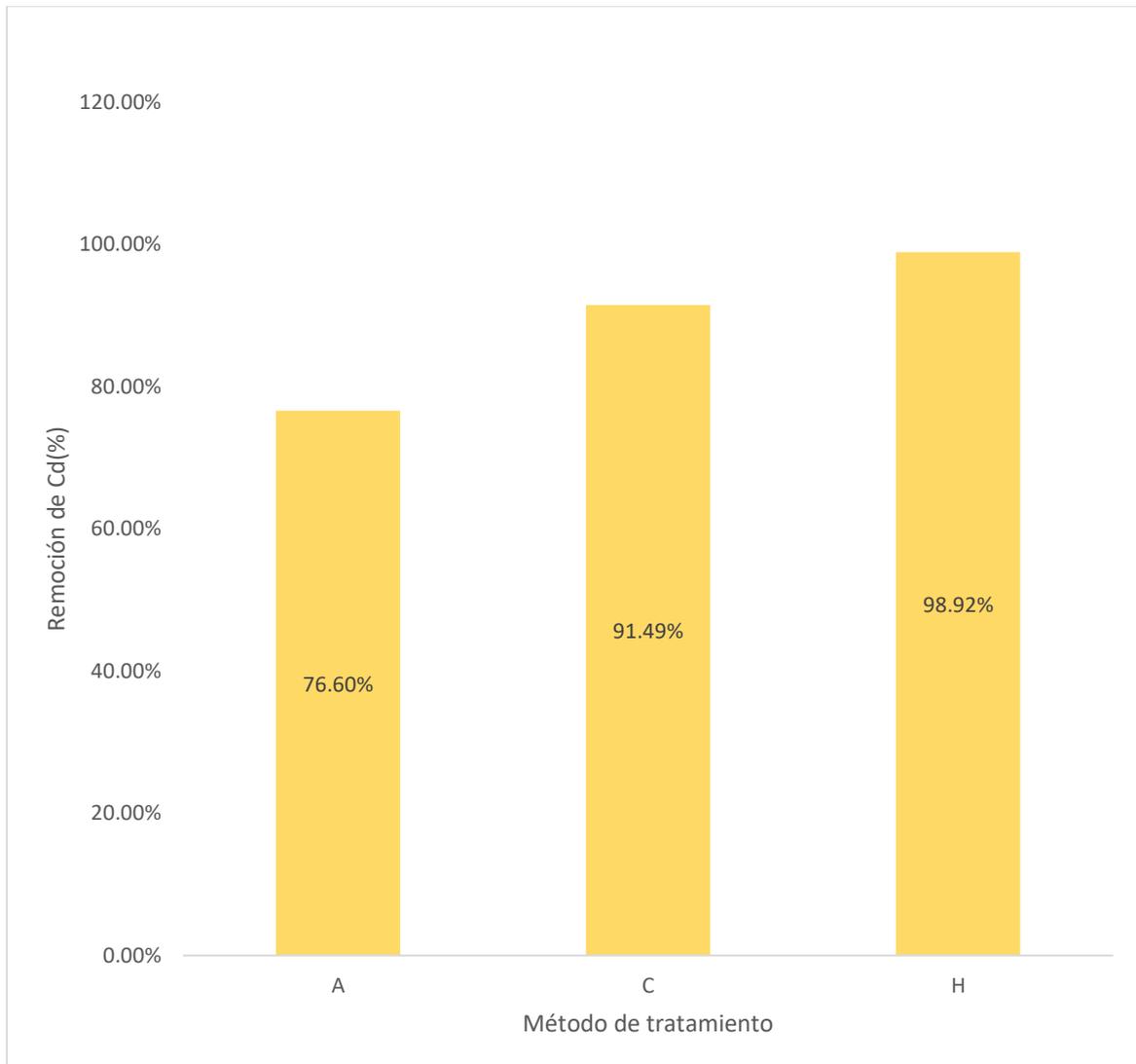


C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 8.

Remoción de Boro (B)

Con el método de Neutralización activo con lechada de cal se removió el 99,82 % de Bario (Ba), a diferencia del método de fitorremediación, donde se alcanzó el 97,08 %.

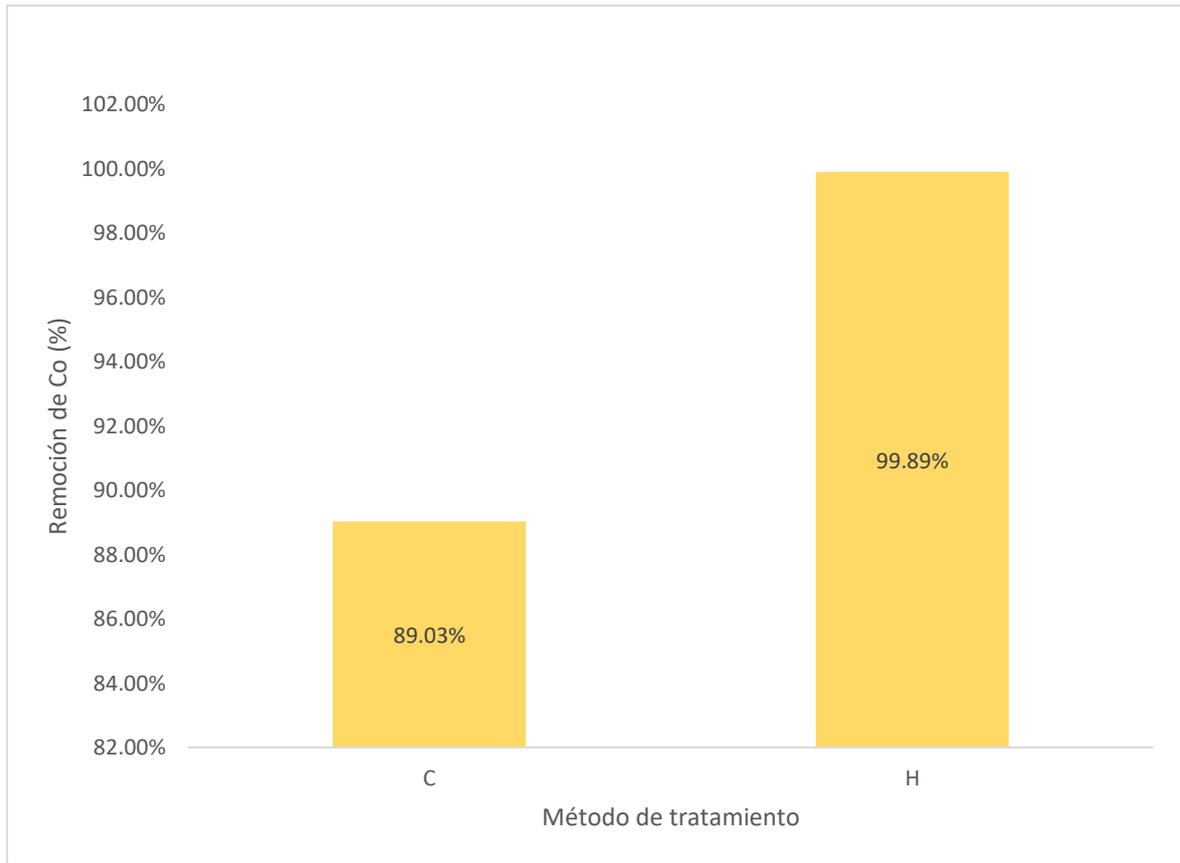


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 9.

Remoción de Cadmio (Cd)

Según la figura, la mayor eficiencia de remoción de Cadmio (Cd) se logró con la aplicación de la Neutralización activo con lechada de cal (98,92 %), a comparación del método por Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, con el cual se removió el 76,60 %.

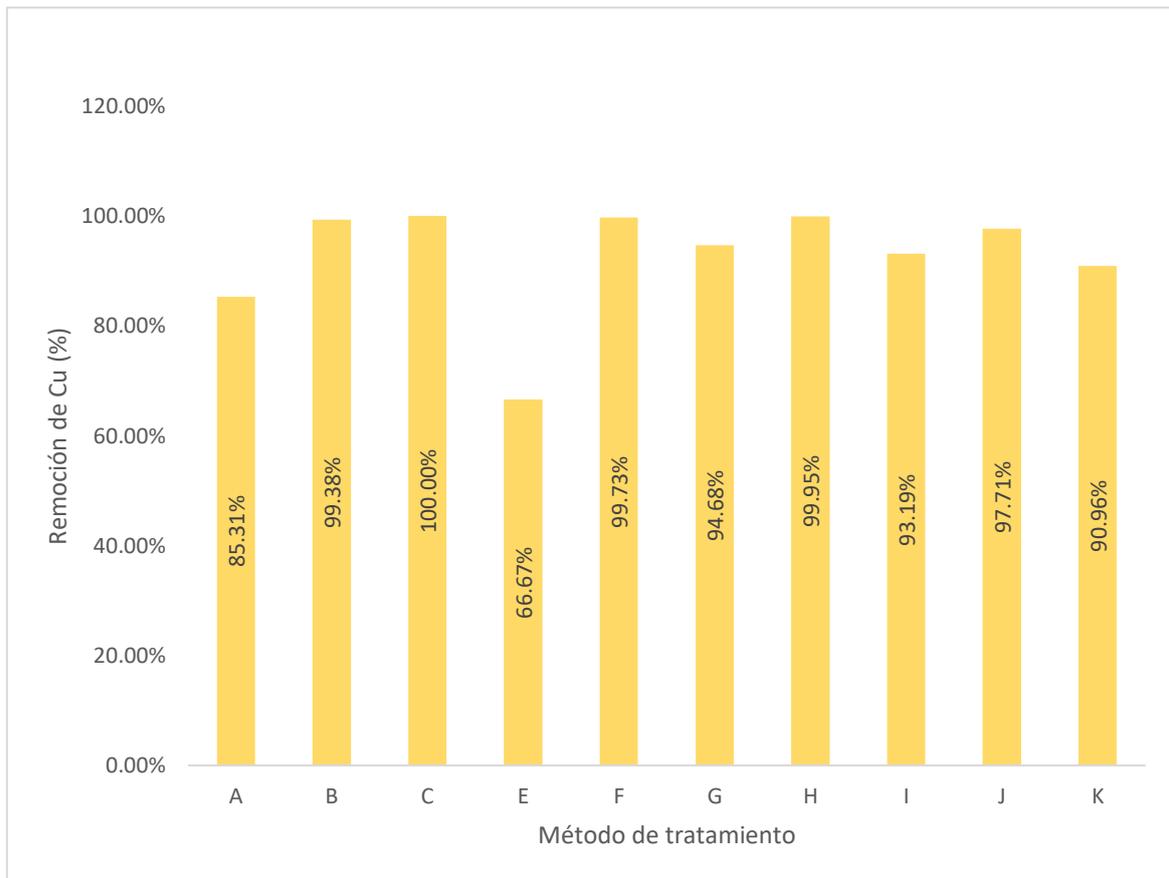


C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 10.

Remoción de Cobalto (Co)

Mediante el método Neutralización activo con lechada de cal se removió el 99,89 % de Cobalto (Co), sin embargo, con el método de fitorremediación se muestra una eficiencia del 89,03 %.

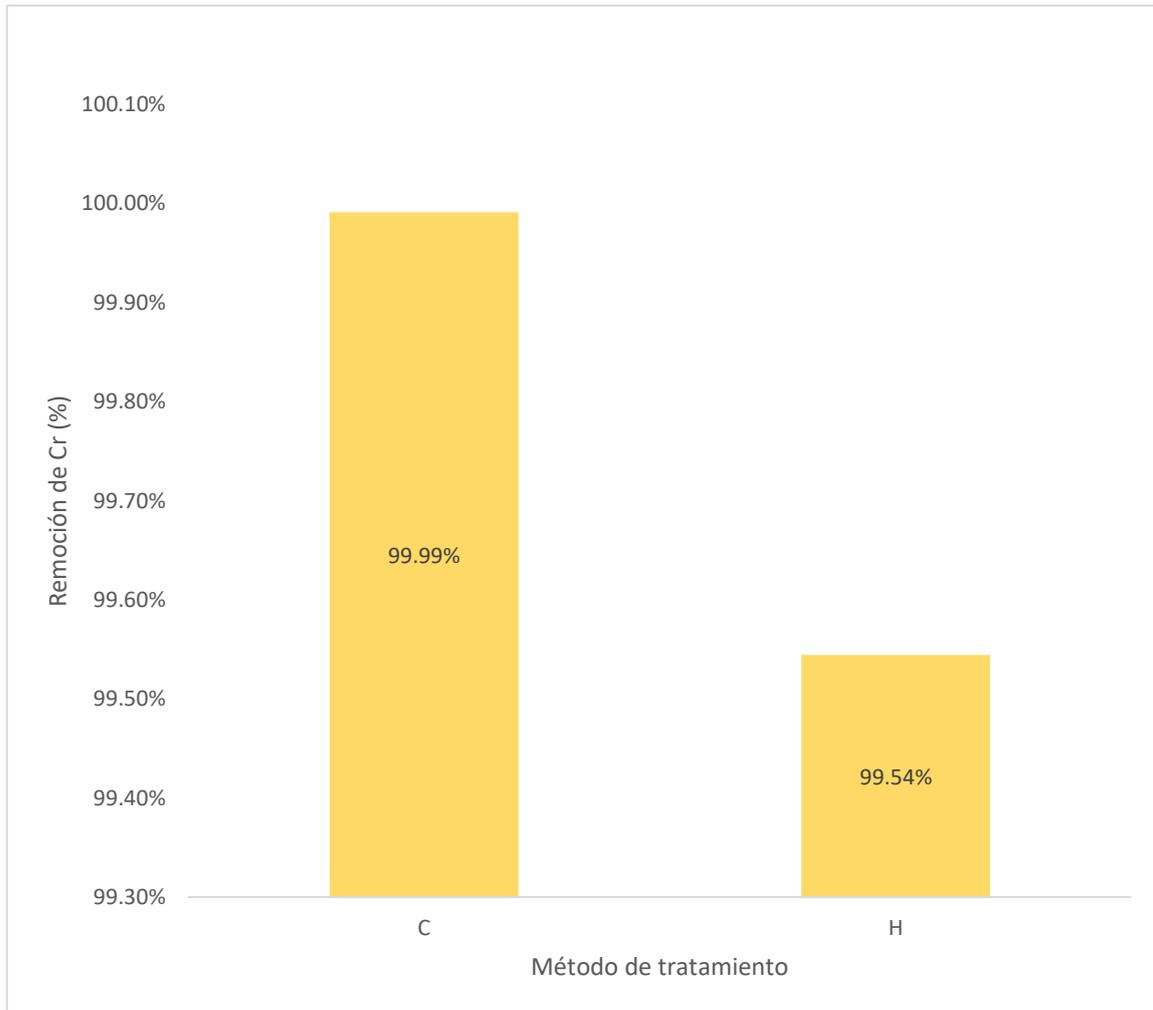


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, E=Biorremediación (bacterias sulfato reductor), F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación, J=Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino), K=Humedales Artificiales

Figura 11.

Remoción de Cobre (Cu)

Se remueve el 100 % de Cobre (Cu) con el método de fitorremediación, seguida del método Lodos de alta densidad (HDS) con 99,73 %, difiriendo del método Biorremediación (bacterias sulfato reductor) con el cual se logró remover el 66,67 % de Cu.

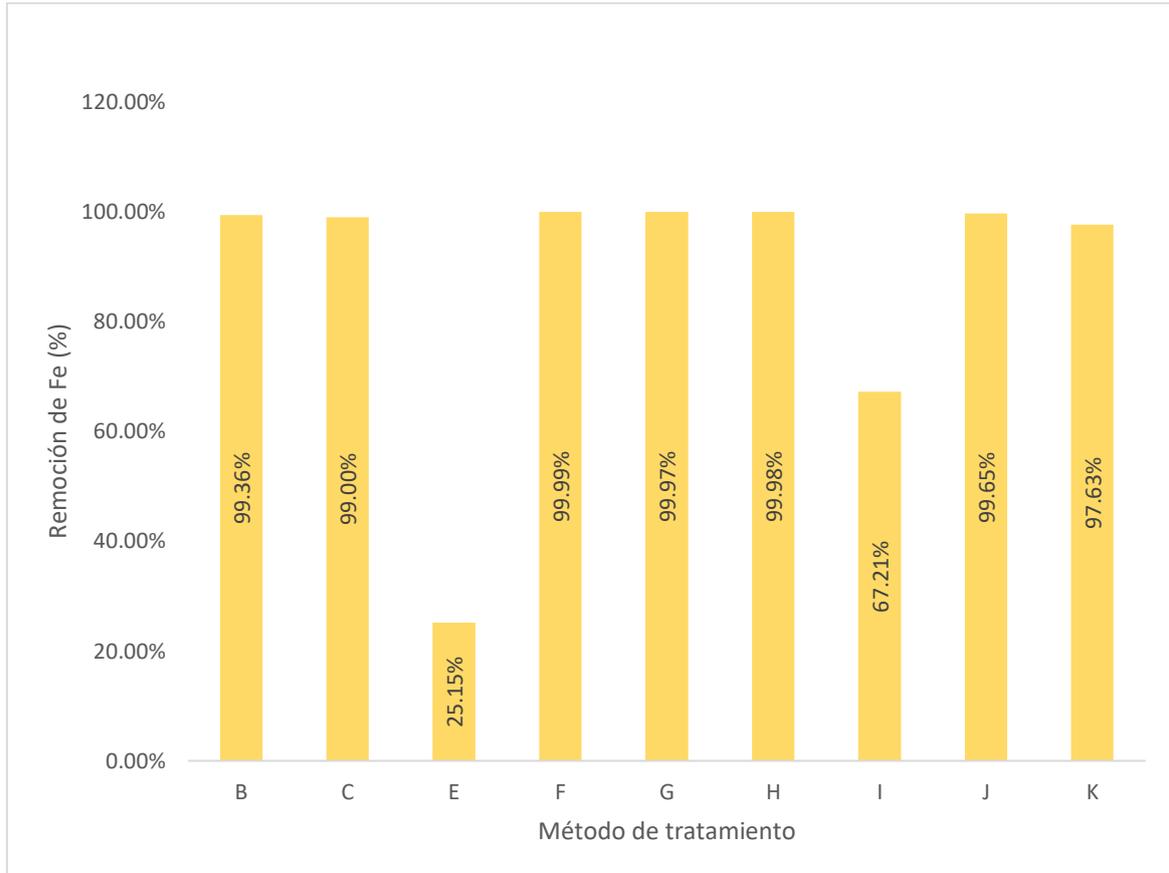


C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 12.

Remoción de Cromo (Cr)

La remoción de Cromo (Cr) fue del 99,99 % con el método de fitorremediación, mientras que con el método de Neutralización activo con lechada de cal se removió el 99,54 %.

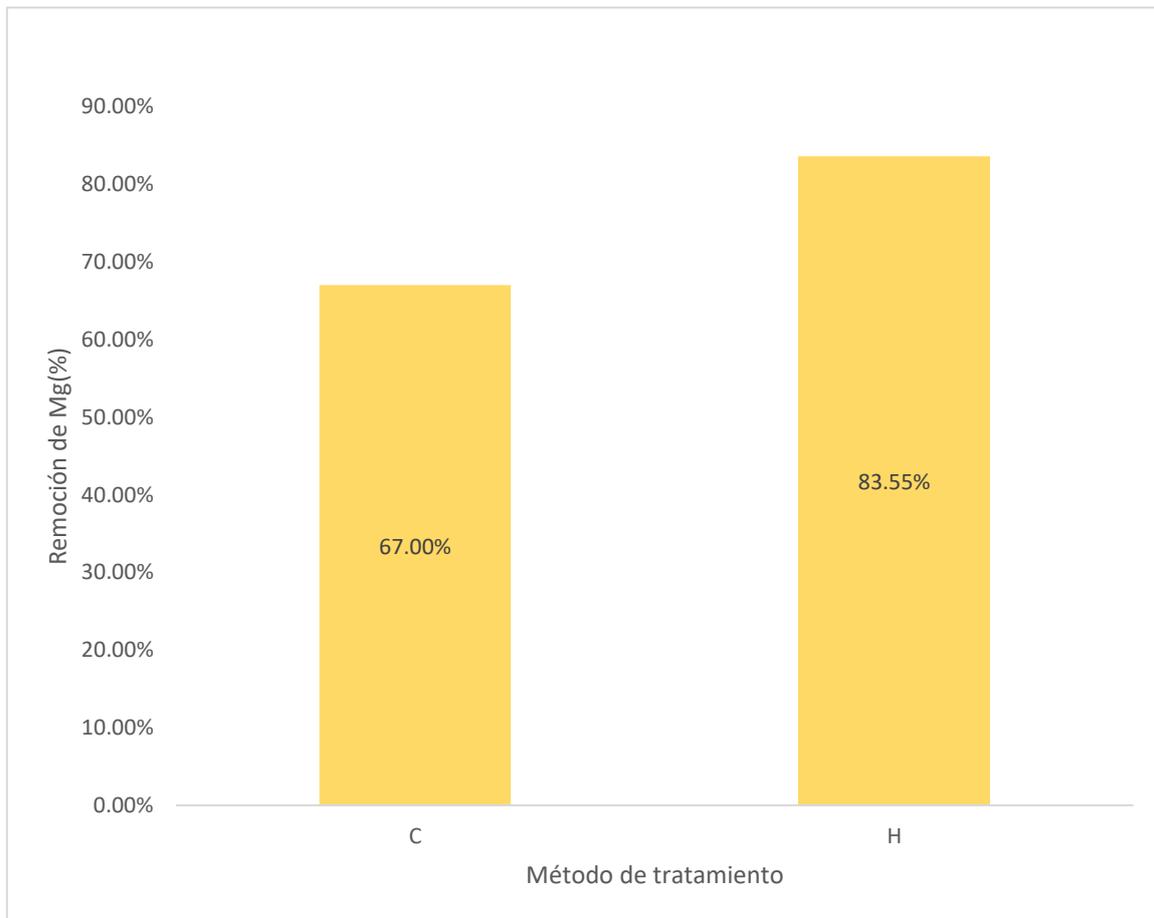


B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, E=Biorremediación (bacterias sulfato reductor), F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación, J=Tratamiento pasivo anaeróbico (travertino y compost en base a estiércol bovino), K=Humedales Artificiales.

Figura 13.

Remoción de Hierro (Fe)

De acuerdo con la figura, se muestra que la máxima remoción de Hierro (Fe) se obtuvo con el método Lodos de alta densidad (HDS) – 99,99 %; pero, sólo se removió el 25,15 % con el método Biorremediación (bacterias sulfato reductor).

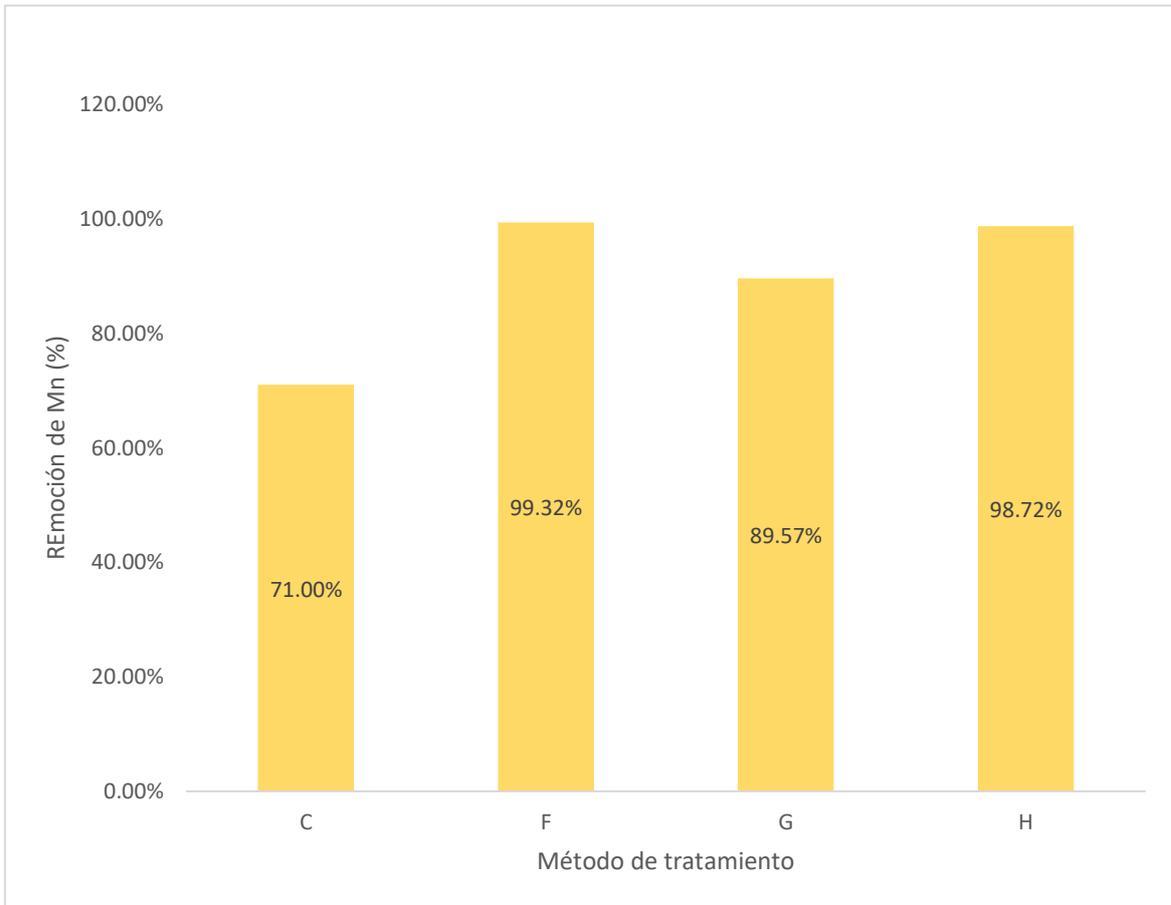


C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 14.

Remoción de Magnesio (Mg)

La remoción de Magnesio (Mg) fue mayor (83,55 %) con el método de Neutralización activo con lechada de cal, y menor (67 %) con el método de fitorremediación.

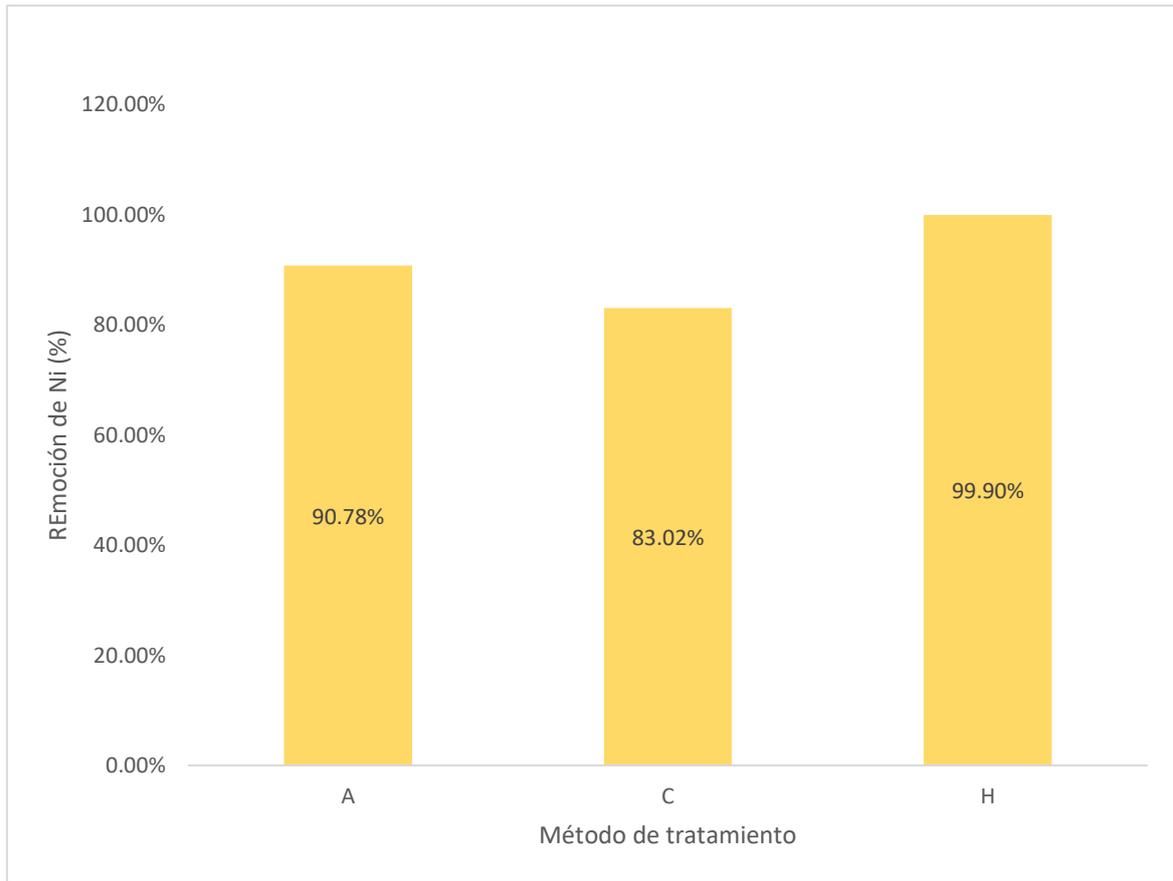


C=Fitorremediación, F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 15.

Remoción de Manganeso (Mn)

Respecto a la eficiencia de métodos luego de tratar la concentración de Manganeso (Mn), se aprecia que la remoción fue de 99,32 % con el método Lodos de alta densidad (HDS), a diferencia del método fitorremediación, con el cual se removió el 71 % de Mn.

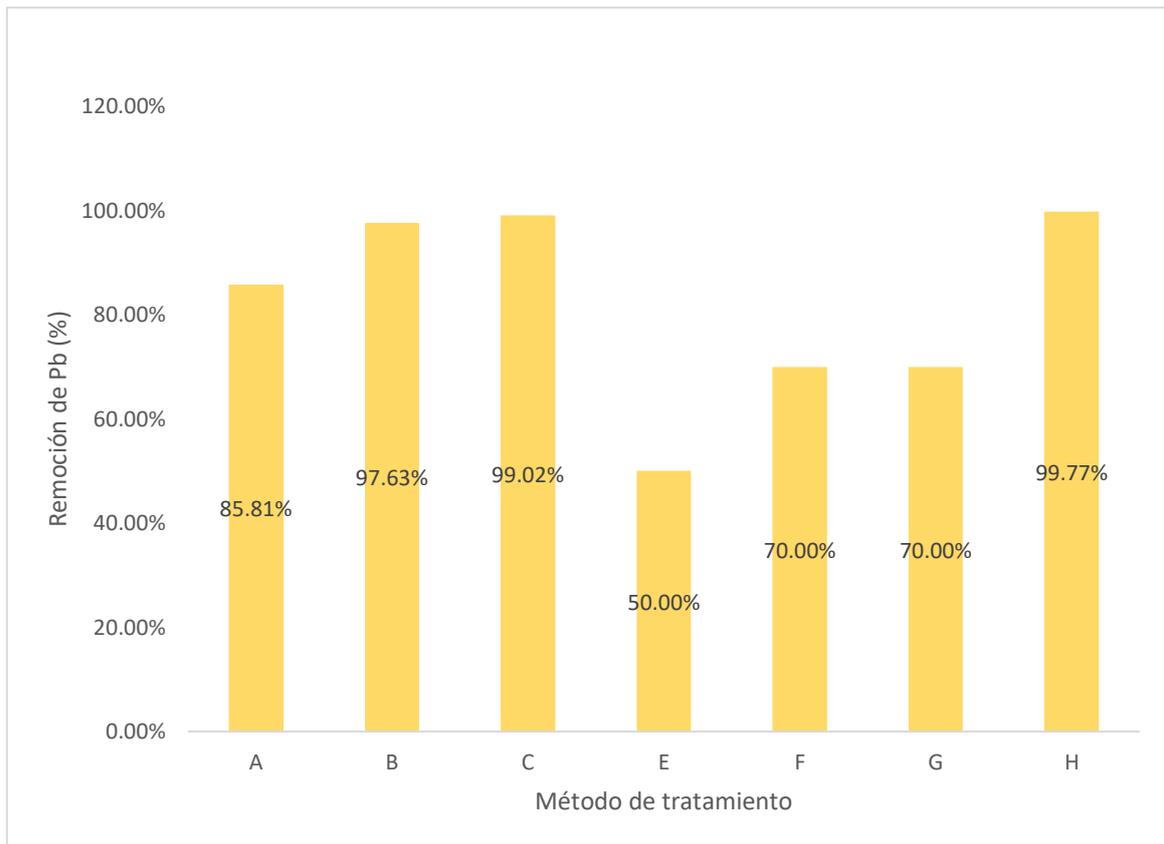


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación.

Figura 16.

Remoción de Níquel (Ni)

El 99,90 % de la concentración de Níquel (Ni) fue removida con el método Neutralización activo con lechada de cal, a comparación del 83,02 % alcanzado con el método de fitorremediación.

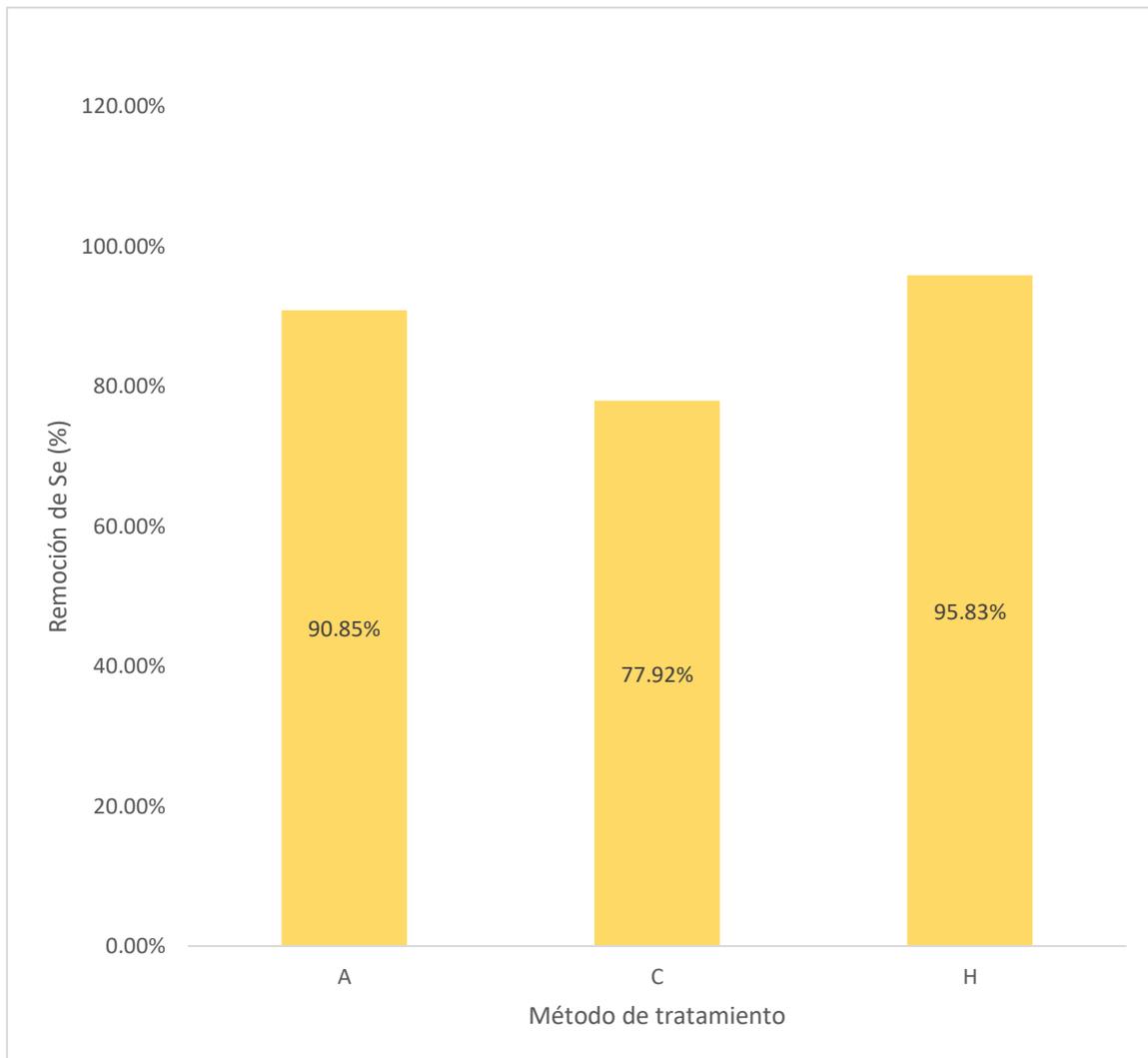


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, E=Biorremediación (bacterias sulfato reductor), F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 17.

Remoción de Plomo (Pb)

Se aprecia que la remoción de Plomo (Pb) fue del 99,77 % al aplicar el método de Neutralización activo con lechada de cal, y la menor remoción fue del 50 % con el método de Biorremediación (bacterias sulfato reductor).

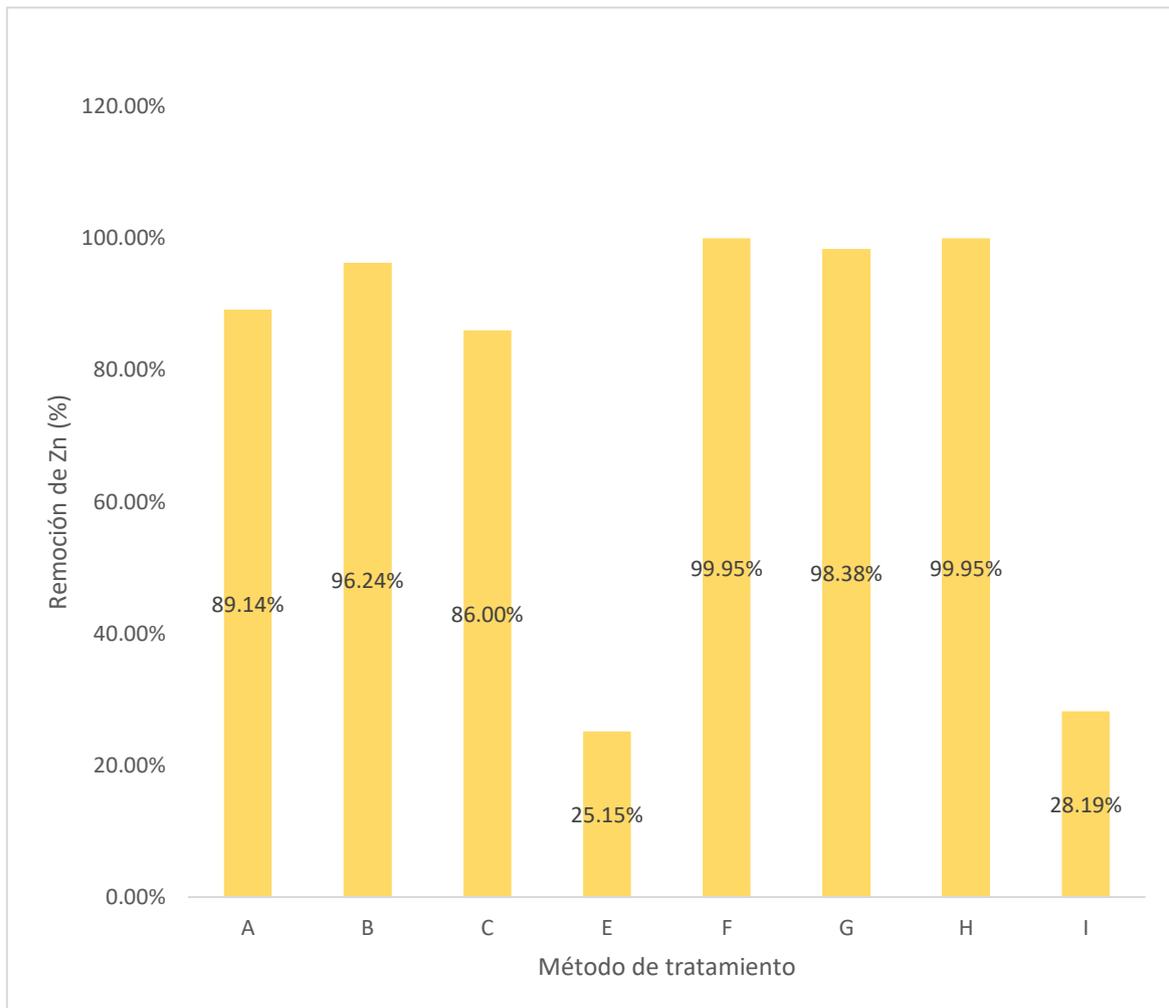


A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, C=Fitorremediación, H=Neutralización activo con lechada de cal.

Figura 18.

Remoción de Selenio (Se)

La remoción más eficiente de Selenio (Se) se logró con por Neutralización activo con lechada de cal (95,83 %), y menos eficiencia se obtuvo por Fitorremediación (77,92 %).



A=Encapsulamiento, impermeabilización y relleno, B=Fangos artificiales, C=Fitorremediación, E=Biorremediación (bacterias sulfato reductor), F=Lodos de alta densidad (HDS), G=Lodos de baja densidad (LDS), H=Neutralización activo con lechada de cal, I=Biorremediación.

Figura 19.

Remoción de Zinc (Zn)

/Se revela que la mayor remoción de Zinc (Zn) se obtuvo con la aplicación de Lodos de alta densidad (HDS) y Neutralización activo con lechada de cal, en ambos casos se se removió el 99,95 % de Zn, mientras que con Biorremediación (bacterias sulfato reductor) sólo se alcanzó el 25,15 %.

Anexo 3. Matriz de consistencia

TÍTULO: “ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN EL PERÚ”

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y=f(X)	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE (X)	
¿Cuáles son los métodos más eficientes de remediación de Pasivos Ambientales Mineros utilizados por la actividad minera en el Perú?	Realizar un estudio comparativo de los métodos de remediación de Pasivos Ambientales Mineros utilizados por la actividad minera en el Perú		Métodos de remediación	Enfoque de investigación: Cualitativo Tipo de investigación: Descriptiva
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS		VARIABLE DEPENDIENTE (Y)	Diseño de investigación: no experimental
¿Cuáles son las características fisicoquímicas de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros in situ y posterior a su tratamiento?	Evaluar las características fisicoquímicas de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros in situ y posterior a su tratamiento	Los métodos de remediación de pasivos ambientales mineros (en especial para drenaje ácido de mina – DAM) en la minería peruana más eficientes son: Fitorremediación, Biorremediación, Electrocoagulación, Neutralización con lechada de cal y Humedales artificiales de los cuales resulta ser más eficiente el método de Neutralización con lechada de cal, ya que su eficiencia supera el 98 % en promedio, mientras que con el método de fitorremediación solo se logra una eficiencia del 70 %.	Pasivos Ambientales Mineros	Población: 19 estudios relativos a los métodos de tratamiento de pasivos ambientales mineros. Muestra: 10 estudios concernientes a los métodos de tratamiento de pasivos ambientales mineros utilizados por la actividad minera en el Perú

<p>¿Cuánto es la remoción fisicoquímica de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros después de haber aplicado los métodos de tratamiento?</p>	<p>Analizar la remoción fisicoquímica de los Drenajes Ácidos de Minas de los Pasivos Ambientales Mineros después de haber aplicado los métodos de tratamiento</p>			
<p>¿Cuál es la eficiencia de los métodos de tratamiento de Drenajes Ácidos de los Pasivos Ambientales Mineros en el Perú?</p>	<p>Comparar la eficiencia de los métodos de tratamiento de Drenajes Ácidos de los Pasivos Ambientales Mineros en el Perú</p>			

Anexo 4. Operacionalización de variables

Variab les	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Variable Independiente: Métodos de remediación	Constituyen un conjunto de operaciones que se realizan con el objetivo de recuperar la calidad del suelo contaminado (suelos y aguas asociadas).	Eficiencia	%	Base de datos
Variable dependiente: Pasivos Ambientales Mineros	Son elementos ambientales generados en las instalaciones, depósitos de residuos mineros, edificaciones, movimiento de tierras, áreas de talleres, etc. que en estado de abandono componen un elevado riesgo para la biodiversidad.	pH		Base de datos
		Concentración de metales	mg/L	
		Conductividad	uS/cm	
		Temperatura	°C	