



# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“NEUTRALIZACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS CON ELEVADA CONCENTRACIÓN DE METALES”

Trabajo de investigación para optar al grado de:

**Bachiller en Ingeniería Ambiental**

**Autores:**

Anderson Bardales Shuña

Evaristo Vilcazan Mamani

**Asesor:**

Mg. Ing. Marieta Eliana Cervantes Peralta

Cajamarca - Perú

2019

## **DEDICATORIA**

Dedicado a nuestros padres, quienes son fuente de

Inspiración inagotable.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por cada uno de los días, a nuestros docentes que han marcado un horizonte en la percepción de nuestra casa común “la tierra”, a nuestras familias por su apoyo y respaldo incondicional continuo.

## Tabla de contenido

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES .....</b>	<b>20</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>22</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 01. *Clasificación de documentos*.....pág. 11.

Tabla N° 02. *Estudios seleccionados para la revisión*.....pág. 19.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 01. *Consideraciones básicas en un drenaje ácido de mina*.....pág. 18

## RESUMEN

La generación de aguas ácidas se produce por, exposición de material estéril de mina con contenidos sulfurosos y las relaveras abandonadas sin responsables identificados en contacto con el oxígeno y el agua atmosférico. Los cuerpos receptores suelo y agua son los más afectados perdiendo el equilibrio de sus ecosistemas. El objetivo del presente trabajo es evaluar y analizar las investigaciones primarias en el tratamiento pasivo, activo de los drenajes ácidos de mina en los últimos nueve años, accediendo a la información a través de las bases de datos académicas Redalyc, Scielo, Dialnet, Springer y revistas de universidades nacionales e internacionales. Se han seleccionado trabajos primarios, de últimos nueve años de publicación, con énfasis en las metodologías y las condiciones de aplicación semejantes al entorno ambiental de la región. Sintetizando procedimientos y resultados, encontramos ensayos en prevención de la generación de los Drenajes Ácidos de Mina, cuantificación de las capacidades de generación, tratamientos pasivos biológicos y mejoramiento de los procesos de absorción de metales con la complementación de los agentes quelantes. Conclusión, se cuenta con las experimentaciones documentadas con los avances en la mejora de los mecanismos en los procesos de prevención y tratamiento para los Drenajes Ácidos de Mina.

**PALABRAS CLAVES:** Drenaje ácido de mina, Thiobacillus Ferrooxidans y tratamiento de aguas ácidas.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La actividad minera metálica en el Perú, tuvo sus inicios desde tiempos inmemoriales, se puede evidenciar desde herramientas hasta orfebrería y ornamentos encontrados como distinciones entre sus autoridades e integrantes en las diferentes culturas desarrolladas en el territorio. Entre una de las regiones con más historia minera es Cajamarca, ese mismo camino viene acompañado de experiencias con una mala gestión de “instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad” (Ley 28271).

Tanto el material estéril de mina y los residuos del proceso o relaves de la extracción de los minerales que se encuentran expuestas al oxígeno y al agua de lluvia son generadores de aguas ácidas, en el primer caso se oxida la Pirita ( $\text{FeS}_2$ ), Enargita ( $\text{CuFeS}_2$ ) en una atmósfera oxidante, posteriormente se inicia la oxidación de sulfuros menos susceptibles como la Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), Calcopirita ( $\text{CuFeS}$ ), Marcasita ( $\text{FeS}_2$ ) y la Esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) consecuentemente empieza la lixiviación de aguas ácidas (Pozo, Puente, Lagüeña, y Veiga, 2017). Los residuos del proceso de extracción del mineral o llamado también relaves según (Jara, 2011) “los relaves representan un problema para el medio ambiente”, ya que estos se van adicionando a los cuerpos de agua mediante percolación, lavado y arrastre de relaves.

La generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM) se ha convertido en una de las problemáticas ambientales más preocupantes procedente de la meteorización y oxidación de los sulfuros metálicos, estos drenajes tienen la particularidad de tener un Potencial de Hidrógeno (pH) bajo, alcalinidad mínima y una acidez en aumento, niveles altos de metales pesados, mayormente contiene Hierro, Manganeso, Aluminio y Zinc (Sánchez y Ferreira, 2016). Los avances en la literatura, en la caracterización de los potenciales generadores de acidez están bien documentados, esto puede variar de acuerdo a las configuraciones geológicas del área geográfica.

Estos efluentes líquidos además de presentar características muy visibles también pueden contener sólidos disueltos, en suspensión o coloidales, cationes y aniones, el grado de

toxicidad puede ser diferente según los puntos de generación, sin embargo representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos, de suelo y a la salud humana.

Entonces se debe cuestionar ¿Existen métodos eficientes, accesibles en el tratamiento de los Drenajes Ácidos de Mina? Nuestra búsqueda de las bases teóricas estará orientadas en esa dirección. El objetivo de esta revisión es evaluar y analizar las investigaciones primarias en el tratamiento pasivo, activo de los drenajes ácidos de mina entre los años 2010 - 2019. Con resultados analizados y a las eficiencias logradas en los estudios primarios, se elegirá un método para su aplicación.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

Revisión sistemática de la literatura científica, este proceso se aplica para la identificación de lo fundamental en la investigación de interés para su aplicación, tiene una alta aceptación y credibilidad en su forma de buscar, organizar y comparar los estudios desarrollados en el área elegida, así mismo, organiza los resultados de las indagaciones primarias apoyándose en métodos para alejarse de los errores que usualmente se suele cometer, como la falta de objetividad o no tener bases académicas que respalden la experimentación de métodos en una investigación. ¿Existen métodos eficientes, accesibles en el tratamiento de los Drenajes Ácidos de Mina? La finalidad del estudio está determinada por los avances en la metodología, procedimiento de la neutralización de las aguas ácidas, para ello se realiza una elección de trabajos vigentes, últimos diez años, sean investigaciones locales, regionales e internacionales, incluyen documentos en inglés, se opta más por los trabajos primarios trabajados en el tema. Se excluyen artículos de décadas anteriores, estudios secundarios como las revisiones teóricas y algunos que difícilmente se pudieran aplicar al contexto local.

La búsqueda de la bibliografía se ejecuta en revistas académicas como de universidades, centros de investigaciones en minería y medio ambiente y base de datos Ebsco, Redalyc, Scielo, Academia, Dialnet y Springer. Para la reunión de los artículos se utiliza palabras claves identificadas y se organiza conforme a la similitud en definiciones, problemática y objeto de estudio. Se ha organizado los principales trabajos según las siguientes propiedades en la Tabla N° 01.

Tabla N° 01. *Clasificación de documentos.*

<b>Año</b>	<b>Revista</b>	<b>País</b>	<b>Institución</b>	<b>Base de datos</b>
2017	Tecnología y ciencia del agua.	Chile	Universidad de Concepción.	Scielo.org
2017	Revista Colombiana de Biotecnología.	Colombia	Universidad Central	Scielo.org
2015	Curr Pollution R	USA	Montclair State University, Montclair	Springer
2014	UCV - Scientia	Perú	Universidad Cesar Vallejo – Trujillo.	Dialnet
2013	Revista de investigación UNMAM	Perú	UNMSM	Revistadeinvestigación.unmsm.edu.pe
2012	Revista Mexicana de Ciencias Geológicas	México	Universidad Nacional Autónoma de México	Scielo.org
2012	Revista Gestión y Ambiente.	Colombia	Universidad Nacional de Colombia	Redalyc.org
2011	Revista de la Facultad de Ingeniería	Chile	Universidad de Atacama	Revistaingeniería.uda.cl
2011	South African Journal of Science	South African	School of Geosciences, University of the Witwatersrand, Johannesburg	Scielo.org

Los trabajos se seleccionaron con las características presentadas en la tabla N° 01, se puede encontrar trabajos anteriores a los años planteados en esta revisión, los cuales se han descartado, así mismo se valora los estudios empíricos con el propósito de analizar la metodología del trabajo.

### CAPÍTULO III. RESULTADOS

En los últimos años se ha visto un gran avance en cuanto a investigaciones para el control, tratamiento y medidas de prevención en la generación de DAM. La problemática que ha venido generando el manejo inadecuado de estos efluentes, también ha hecho posible ensayar distintas metodologías para disminuir sus impactos en los ecosistemas (Sánchez et al, 2016). En la presente revisión daremos un análisis de métodos de tratamiento pasivo de drenajes ácidos de mina, entre ellos está los humedales artificiales, reductores anaeróbicos de sulfato, drenaje de piedra caliza anóxica, piedra caliza abierta canales, camas de lixiviación de escoria, birreactores y Fito remediación (RoyChowdhry, Sarkar y Datta, 2015), en estos métodos los niveles de eficiencia varían de acuerdo a las características del agua ácida y las condiciones del agente neutralizador. Entre los tratamientos activos podemos diferenciar a los que emplea agentes químicos y ofrecen un proceso más dinámico como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), carbonato de sodio ( $\text{NaCO}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), amoníaco anhídrido ( $\text{NH}_3$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) e hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) (RoyChowdhry et al, 2015), esos compuestos químicos normalmente tienen un alto costo, por ello la disponibilidad y acceso a estos recursos es limitado.

- Como primera medida de tratamiento de los drenajes ácidos de mina se recomienda prevenir antes que su generación sea incontrolable, para ello, se ensayan nuevas opciones y se recomienda una adecuada gestión de los residuos mineros, una alternativa de prevención presenta el siguiente trabajo, *Uso de compost de champiñón como enmienda orgánica, para la prevención en la generación de drenaje ácido de mina* (Forigua, Fonseca, y Vásquez 2017), el objetivo en este trabajo fue “evaluar el compost de champiñón como enmienda de carbono orgánico



para promover sulfato-reducción y precipitación de metales durante la formación de DAM". Importante resalta que en el área de estudio se contaba con material estéril de carbón con un porcentaje de sulfuros piríticos ( $\text{FeS}_2$ ) de 0.84 a 2.38 % de una producción de 20 Tn/día. Para el ensayo se utilizan 8 Kg de material y compostaje de champiñones, se preparan cinco celdas en duplicado con capacidad de 2,4 L, utilizando tubos de PVC (30 cm alto  $\times$  10 cm ancho), Las proporciones para el manejo del método fue, las primeras tres celdas contenían 300 g de mezcla de agente generador y compost de champiñón en porcentajes 40:60, 25:70, 60:40, los dos finales también tenían 300g de compost de champiñón y material estéril, finalmente han adicionado a cada uno 5 g de estiércol de vacuno (húmedo) y 400 ml de agua des ionizada. Se realizaron ensayos de lixiviación, determinación de mecanismos de remoción, determinación de actividad microbiana y análisis estadístico. Obteniéndose Ensayo de lixiviación, los cambios químicos en el lixiviado, ha tenido un incremento continuo de la alcalinidad en todas las celdas que contenían compost de champiñones alcanzándose una concentración máxima de  $1.500 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , esto se vio reflejado en el pH llegando a superar datos mayores de 6,5, los resultados se atribuyen a la disolución del carbonato que contiene el compost de champiñones. También se obtuvieron datos de la disminución del OD en los lixiviados el oxígeno disuelto ( $<2,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) y potencial de óxido reducción ORP en milivoltios ( $<100 \text{ mV}$ ), todas las mezclas durante el tiempo que fueron monitoreados (6 semanas), así como la actividad microbiana (actividad enzimática) en las mezclas que contenía compost, ha favorecido en que se condiciones un ambiente apropiado para los microorganismos anaeróbicos en cuanto a OD, pH, ORP



y nutrientes. En los lixiviados fueron eficientes en precipitar los metales ( $\text{Fe}^{2+} > 95\%$ ;  $\text{Mn}^{2+} > 96\%$ ;  $\text{Zn}^{2+} > 52\%$ ) y remover sulfato ( $> 50\%$ ).

- Para determinar la capacidad de generación de drenajes ácidos se requieren evaluar los pasivos mineros, un ejemplo de la metodología aplicada muestra el trabajo denominado *Extracción química secuencial de metales pesados en el estudio de alteración química de relaves de mina en Ticapampa (Jara, 2011) Huaraz - Perú*, Evaluaron la movilidad de los metales pesados en los relaves abandonados, aplicando el método de extracción química secuencial, en muestras tomadas de un número de seis a una profundidad de 30 a 45 de profundidad y 40 centímetros de diámetro, tres en la parte superior y tres en el lateral sur del talud. Se realizan pruebas de granulometría hasta  $37 \mu\text{m}$ , mineralogía para la caracterización química de los relaves y cuantificar los minerales sulfurados, caracterización química; el pH de las muestras de relaves fue obtenido por suspensión de la muestra en agua bidestilada en una relación 1:2,5 (sólido/líquido). El ensayo estático de generación de drenaje ácido se llevó a cabo por Contabilidad Acido-Base. También se realizó un análisis físicos químicos de las aguas del río Santa en dos puntos aguas arriba y aguas abajo de la relavera abandonada, los resultados más significativos muestran una variación, confirmando la influencia en las características de las aguas del cuerpo receptor, sólidos totales disueltos (mg/l) 106,5 y 111,0; sólidos totales suspendidos en (mg/l) 7,0 y 5,0; pH de 7,4 a 7,1; Ion sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  (mg/l) 26,0 a 136,0; Zn ( $\mu\text{g/l}$ ) 2,6 a 120; Cu ( $\mu\text{g/l}$ ) 3,2 a 22,0; Fe (mg/l) 0,2 a 0,9; Pb ( $\mu\text{g/l}$ ) 1,7 a 10,7; As ( $\mu\text{g/l}$ ) 1,0 a 88,6; Cr ( $\mu\text{g/l}$ ) 0,8 a 10,0 son los más significativos, que se han incorporado de la relavera. De acuerdo a los ensayos la composición mineralógica de la relavera mediante difracción de rayos X, se obtuvo con mayor porcentaje en los seis puntos de

muestreo, Cuarzo  $\text{SiO}_2$  de 72,22 %; Pirita  $\text{FeS}_2$  3,65 %; Moscovita (K, Ca, Na)  $(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$  8,2 %; Clorita  $(\text{Mg}, \text{Fe})_6 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$  2,8 %.

Resaltan como parte de la composición del relave, los resultados mineralógicos también nos infiere la facilidad de movilización del Pb y Cd y una fuerte inmovilización de Ag, Cr y Co y se tiene movilizaciones intermedias de Cu, Zn y As.

- La influencia de los pasivos mineros ubicados en las riberas de los ríos tienen una fuerte influencia en la variación de las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos receptores de los drenajes. *Evaluación de la calidad del agua asociado al drenaje ácido de mina (DAM), en el río Yauli en época de estiaje distrito de Yauli – Junín, (Núñez, Benites y Zevallos 2014)*, se cuantifican los metales Plomo y Hierro en las aguas del río, utilizando el protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos normados por DIGESA, para hacer un comparativo con los Estándares de Calidad Ambiental de las aguas, en su categoría 3; “Riego de vegetales y bebida de animales”. Apoyándose en la observación como método general, para la toma de muestras se elige 4 puntos más dos subpuntos en cada uno; aguas arriba de la planta de tratamiento de las aguas residuales de la mina **RY – 1**, RY – 1A, RY – 1B; a la altura de la actividad minera **RY – 2**, RY – 2A, RY – 2B; aguas debajo de la planta de tratamiento de las aguas residuales de la mina **RY – 3**, RY – 3A, RY – 3B; a la altura del puente Cut Off de la carretera central **RY – 4**, RY – 4A, RY – 4B. Se encontraron los resultados significativos en las tres fechas de muestreo y análisis fecha 1 (26 de Julio 2013), fecha 2 (28 de agosto 2013) y fecha 3 (30 de septiembre 2013) el metal que sobre pasa en las tres fechas es el hierro en los mismos puntos RY – 4, RY – 4A y RY – 4B. con un promedio en fecha 1 en

(mg/l) 11,967; fecha 2 en 12,617 y en la fecha 3 un promedio de 12,617 sobrepasando el ECA que es de 1,0 (mg/l) para este metal.

- Los avances en los tratamientos biológicos también presentan una gran documentación entre una de los procesos aplicados está la *Adaptación del Thiobacillus Ferrooxidans a sustratos conformados con especies de minerales piríticos (Arias, Anaya, Quiñones, Salazar, Gil y Jamanca, 2013)*, se evaluado las condiciones específicas en las que se puede aptar este micro organismos, se evaluaron dos variables representativas el pH del medio y la concentración de sulfato ferroso a partir del medio 9K. El efluente que se dispone inicialmente tenía un pH de 1,84 a 2,04 (+ 0,01pH) y el sustrato 9K con concentraciones de 22,4 a 44,4 g/L de sulfato ferroso, se trabajó en cinco puntos de diseño y un aprueba en blanco. Los primeros cambios en los ocho días de evaluación fue registrado una evolución favorable en las interacciones con el potencial oxido reducción del medio en una variación de 386,1 a 372,6 milivoltios (mV), en el pH a partir de las 48 horas debido a la actividad microbiana y el mecanismo de oxidación biológica se genera ácido sulfúrico y esto resulta en un incremento del grado de acidez. Acondicionando de tal forma que se observa el crecimiento del Thiobacillus Ferrooxidans en una mezcla de DAM un 33.3 % de sulfato ferroso, alcanzando una fase límite de crecimiento a los 5 días.
- *Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas (Pérez, Schwarz, y Urrutia, 2017)*, trabaja con un mecanismo de barreras permeables reactivas BPR, el compuesto reactivo contiene sustratos orgánicos (biosólidos, tejido óseo de peces, compost de corteza y hierro cero Valente ( $Fe^0$ )), que permite el crecimiento de los microorganismos, esto facilita la reducción



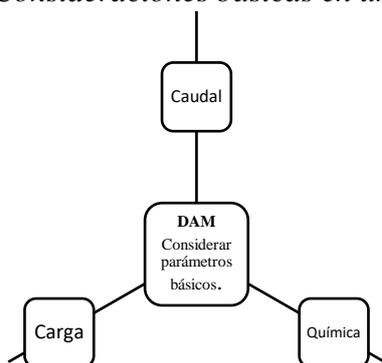
del sulfato mediante la actividad microbiana, se realizan cultivos en recipientes de 0,5 y 1 litro en un número de 10 (R1,.....R10.)de manera anaeróbica en diferentes proporciones, el inóculo biológico es de  $10^4$  Microorganismo Reductores de Sulfato MRS / ml y el drenaje ácido sintético. Se adicionaron mezclas en peso de 100 y 200 g para los recipientes de 0,5 y 1 litro correspondientemente. Se incubó a una temperatura de  $30 \pm 2$  °C y en condiciones anaeróbicas y una composición para el drenaje de mina sintético de (en g/l) 5,8  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 2,5  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 0,3  $\text{NaSO}_4$ ; 0,178 $\text{K}_2\text{SO}_4$ ; 2,28  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 0,308  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; 1,0  $\text{CaCO}_3$ ; 0,233  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 0,302  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y pH 5,8. Se realizan análisis de las muestras de 5 ml. a partir del día 47, para determinar la alcalinidad, se obtuvieron en dos muestras 58 y 95 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  y en otras 4 muestras de 600 y 719 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  y uno que acumuló 1 000 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  debido a la disponibilidad en la materia orgánica. Potencial oxido reducción en todas las mezclas se evidenció una disminución, lo que confirma una actividad anaeróbica. pH fue disminuyendo en el tiempo de 5,45 a 4,40 esto se debe a la oxidación del  $\text{Fe}^{+2}$  agregado y liberación de protones durante la precipitación de  $\text{Fe}^{+3}$  como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Sulfatos, la presencia de mezclas con diferentes fuentes de carbono es visible por los altos consumos de sulfato que muestran el compuesto R1 y R2 de 115 y 272 mg/l y R3, R5, R6, R9 y R10 mostraron una concentración de sulfato de 3 y < 1 mg/l, en R5, R9 y R10 a partir del día 31 se tuvo valores menores a 100 mg/l. análisis y cuantificación microbiológico mediante epifluorescencia usando DAPI en el estudio durante el monitoreo se ha evidenciado una etapa estacionaria a partir del día 47, se registra una variación de  $1,6 * 10^8$  Células/ml y 8, 95 \*  $10^9$  células/ml. De acuerdo con los resultados químicos y microbiológicos indicaron que las mejores compuesto para favorecer la actividad de

los microorganismo reductores de sulfato son los que contienen mayor cantidad de compost, biosólidos y hierro cero valente.

- ***El efecto del ácido cítrico y las bacterias sobre la absorción de metales en las cañas cultivadas en una solución de drenaje de drenaje de ácido sintético para minas (Guo y Guttrich, 2015)*** Como nuevas alternativas de fitorremediación evaluando el ácido cítrico como quelante, las bacterias oxidantes de Fe (II) y la edad de la *Phragmites australis* L. (caña común) en la fitoextracción de metales en drenajes de aguas ácidas de mina, para ello se cultivan hidropónicamente en soluciones que contienen DAM, ácido cítrico y bacterias rizosféricas durante tres meses. El ácido cítrico (quelante) inhibió el crecimiento de Fe (II) OB, disminuyó la formación de la placa metálica y aumenta la acumulación de Fe y Mn en las cañas. Los heterótrofos acidófilos consumieron el quelante acondicionando de manera favorable el ambiente adecuado para el crecimiento de Fe (II) OB. Quedando como base para más investigaciones en esta nueva alternativa de tratamiento de las aguas ácidas de mina.

Estudios de revisión muestran el avance de los métodos de tratamiento de los drenajes ácidos de mina, del potencial generador de acidez de los relaves mineros abandonados conocidos como pasivos mineros ambientales y las influencias en los cuerpos de agua alterando sus propiedades físicas – químicas. A medida que se ha avanzado con la comprensión de los mecanismos de los procesos, se reafirma que el hombre trata de aprovechar los recursos disponibles de la naturaleza para el beneficio mutuo en la recuperación de los ambientes degradados, de tal modo se conoce las alternativas y su viabilidad de los métodos de tratamiento pasivos e activos para la minimización de los impactos en los ecosistemas de suelo, agua y aire de las aguas ácidas. Para una buena elección del tipo de tratamiento se debe conocer parámetros mínimos de las aguas ácidas.

Figura N° 01. Consideraciones básicas en un drenaje ácido de mina.



El proceso de elección y revisión de los estudios está basado en las características resaltadas en la tabla N° 02 siguiente.

Tabla N° 02. Estudios seleccionados para la revisión.

Titulo	Año	Metodología replicable		Tipo de tratamiento	
		Si	No	Pasivo	activo
Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica.	2017	X		X	
Extracción química secuencial de metales pesados en el estudio de alteración química de relaves de mina en Ticapampa (Huaraz, Perú).	2011	X			
Evaluación de la calidad del agua asociado al drenaje ácido de mina (DAM), en el río Yauli en época de estiaje distrito de Yauli – Junín, 2013.	2013	X			
Adaptación del Thiobacillus Ferrooxidans a sustratos conformados con especies de minerales piríticos.	2013	X		X	
Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas.	2017	X		X	
El efecto del ácido cítrico y las bacterias sobre la absorción de metales en las cañas cultivadas en una solución de drenaje de drenaje de ácido sintético para minas.	2015	X		X	

Los trabajos revisados ofrecen una secuencia de reproducción ante las problemáticas ambientales locales presentes, obteniéndose secuencias, metodologías y parámetros y/o protocolos a seguir en condiciones similares.

## CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Los pasivos mineros ambientales y los drenajes ácidos de mina presentan un alto impacto a los sistemas suelo, agua y aire e incluso llegando a afectar la salud humana. Esta preocupación ha hecho que se busque nuevas alternativas en prevención, tratamiento y minimización de sus consecuencias. Se ha evaluado y analizado estudios primarios en tratamiento de aguas ácidas, encontrándose métodos de prevención y tratamiento pasivo, debido a los bajos costos y disponibilidad en el acceso a los recursos. Por tanto, existen métodos de prevención y tratamiento pasivo y accesibles para la neutralización de los drenajes ácidos de mina, en la prevención de la generación de las aguas ácidas los autores recomiendan una adecuada gestión y preparación de manera paralela una barrera de neutralización con componentes concentradores de agentes generadores de alcalinidad como piedras carbonatadas, compost de champiñones y materia orgánica como correctores en la formación de los drenajes ácidos de mina.

En cuanto al tratamiento pasivo se analizó la teoría de los métodos para la terminación de la capacidad de generación de acidez de los pasivos mineros ambientales para proponer un tratamiento, así mismo se afirmó que los drenajes ácidos de mina, los lixiviados de las relaveras y las características geológicas influyen en los factores físicos químicos de las aguas del río Santa – Junín. La promoción de bioremediadores presenta a dos microorganismos el *Thiobacillus ferrooxidans* y Microorganismos Reductores de Sulfato (*Enterococcus*) en presencia de mezclas orgánicas, para el uso de tratamiento biológico se acondicionaron los ambientes favorablemente para la efectividad de los microorganismos, en la fitorremediación se recomienda la utilización de agentes quelantes para la mejora de la absorción de los metales.

Las limitaciones de los estudios revisados, es que se han desarrollado a nivel de laboratorio. Se recomienda, para ensayos en adelante tener las capacidades del potencial generador de acidez de los pasivos mineros ambientales y una evaluación de la composición mineralógica de los mismos, para determinar las posibles opciones de tratamiento y especies bioremediadores a elegir.

Se excluyen artículos de décadas anteriores, estudios secundarios como las revisiones teóricas y algunos que difícilmente se pudieran aplicar al contexto local. La búsqueda de la bibliografía se ejecuta en revistas académicas como de universidades, centros de

Neutralización de aguas ácidas con elevada concentración de metales.  
investigaciones en minería y medio ambiente y base de datos Ebsco, Redalyc, Scielo, Academia, Dialnet y Springer, este ultimo ofrece materiales en el idioma inglés.

## REFERENCIAS

- Arias, V., Anaya, F., Quiñones, J., Salazar, D., Gil, J. y Jamanca, G. (2013) Adaptación de *Thiobacillus Ferrooxidans* a sustratos conformados con especies de minerales pirítico. *Revista de investigación UNMSM*, 16 (31), 1 – 12.
- Arango, M. y Olaya, Y. (2012) Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Revista gestión y ambiente*, 15 (3), 125 – 133.
- Benet, M., Zafra, S., y Quintero, S., (2015) La revisión sistemática de la literatura científica y la necesidad de visualizar los resultados de las investigaciones. *Revista Logos Ciencia & tecnología*, 7 (1), 101 – 103
- Forigua, D., Fonseca, N. y Vásquez, Y. (2017) Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de Champiñón como enmienda orgánica. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19 (1), 92 – 100.  
DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.58904>
- Guo, L. y Gutrigh, T. (2015) Effect of citric acid and bacteria on metal uptake in reeds grown in a synthetic acid mine drainage solution. *Journal of Environmental Management*, 150 (1), 235 – 243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.022>
- Jara, M. (2011) Extracción química secuencial de metales pesados en el estudio de alteración química de relaves de mina en Ticapampa (Huaraz, Perú). *Boletín Geológico y Minero*, 122 (2), 221 - 234.
- Méndez, M., Armienta, M. (2012) Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, 29 (2), 450 – 462.
- McCarthy, T. (2011) The impact of acid mine drainage in South Africa. *South African Journal of Science*, 107 (5 – 6). 1 – 7. DOI:10.4102/sajs.v107i5/6.712
- Núñez, M., Benites, E. y Zevallos, M. (2014) Evaluación de la calidad del agua asociada al drenaje ácido de mina (DAM), en el río Yauli en época de estiajes del distrito de Yauli – Junín, 2013. *UCV – Scientia*, 6 (1), 25 – 30.

- Pérez, N., Schwarz, A. y Urrutia, H (2017) Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción del sulfato en mezclas orgánicas. *Revista tecnológica y ciencia del agua*, 8 (1), 53 – 63.
- RoyChowdhry, A., Sarkar, D. y Datta, R. (2015) Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. *Curr Pollution Rep*, 1, 131 – 141. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3
- Urta, E. y Barría, R. (2010) La revisión sistemática y su relación con la práctica basada en la evidencia en salud. *Revista Latino Americana Enfermagem*, 4 (8), 1 – 8.
- Ley 28271 ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera. (Julio 02, 2004) Congreso de la República del Perú. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-que-regula-pasivos-ambientales-actividad-minera>
- Sánchez, J. y Ferreira, J. (2016) Drenajes Ácidos de Mina - alternativas de tratamiento. *Revista de Medioambiente y Minería*, (1), 20 – 33.