



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

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

“Revisión sistemática de metodologías para la remoción de  
metales pesados en aguas ácidas de mina”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES:**

Celis Velásquez, Estefany Geraldine (ORCID:0000-0003-0757-0500)

Medina Pinillos, José Orlando (ORCID:0000-0001-9077-017X)

**ASESOR:**

Dr. Quezada Álvarez, Medardo Alberto (ORCID:0000-0002-0215-5175)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

**TRUJILLO - PERÚ**

**2021**

## **Dedicatoria**

Esta tesis está dedicada a Dios, por darnos fuerza de voluntad y fortaleza para salir adelante brindándonos su amor y fidelidad hasta el día de hoy.

A nuestros padres, ya que son nuestros pilares fundamentales en nuestra formación académica, dándonos todo lo que somos como personas; quienes con su paciencia, esfuerzo y perseverancia nos han permitido cumplir un sueño más en nuestras vidas. Agradeciéndolos de todo corazón por inculcarnos buenos valores y no temer frente a cualquier desequilibrio y adversidades porque Dios está con nosotros siempre.

## **Agradecimiento**

Agradecer a todos los docentes que asistieron en nuestra formación académica, quienes con su experiencia nos brindaron sus conocimientos obtenidos en su experiencia profesional y nos hicieron crecer día a día como personas y profesionales. Gracias a todos ustedes por su paciencia, tiempo, esmero y sobre todo el apoyo incondicional.

Finalmente queremos expresar nuestro agradecimiento al asesor de tesis el Dr. Medardo Alberto Quezada Álvarez, gracias a él quien nos apoyó en todo este proceso, para poder culminar este trabajo de investigación.

## Índice de contenidos

Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Índice de contenidos .....	iv
Resumen .....	vii
Abstract .....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	11
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	11
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística .....	11
3.3. Escenario de estudio.....	11
3.4. Participantes .....	12
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	12
3.6. Procedimientos .....	12
3.7. Rigor científico .....	13
3.8. Método de análisis de datos .....	13
3.9. Aspectos éticos.....	14
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
V. CONCLUSIONES.....	48
VI. RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS.....	50
ANEXOS	

## Índice de tablas

Tabla N° 01: Clasificación de drenajes en función del pH.....	10
Tabla N° 02: Metodologías de tratamiento de agua acida de mina.....	16
Tabla N° 03: Análisis químico del drenaje de mina.....	33
Tabla N° 04: Neutralización del DAM con lechada de cal.....	34
Tabla N° 05: Caracterización del agua de ingreso.....	34
Tabla N° 06: Comparación de resultados.....	35
Tabla N° 07: Resultados de los valores iniciales y finales del caudal.....	36
Tabla N° 08: Tratamiento activo con cal.....	37
Tabla N° 09: Tratamiento activo mediante osmosis inversa.....	38
Tabla N° 10: Tratamiento activo mediante intercambio iónico.....	39
Tabla N° 11: Tratamiento activo mediante absorción.....	41
Tabla N° 12: Tratamiento pasivo mediante humedales artificiales.....	43
Tabla N° 13: Tratamiento pasivo mediante drenes anoxicos.....	45
Tabla N° 14: Comparación entre tratamiento activo y pasivo.....	46

## Índice de figuras

Figura N° 01: Etapas del DAM... ..	8
Figura N° 02: Formación del DAM.....	10
Figura N° 03: Artículos de revisión por año... ..	15

## **Resumen**

En esta tesis se mostró los métodos de remoción de metales pesados en aguas acidas de mina, donde se estudiaron los sistemas de tratamientos activos y pasivos. El objetivo general de esta investigación fue el analizar las metodologías utilizadas en la remoción de metales pesados de las aguas ácidas de mina mediante una revisión sistemática. Fue una investigación de tipo básica de enfoque cualitativo, teniendo como metodología de estudio la recolección de datos mediante tablas de información. Los resultados que se obtuvieron fueron que los sistemas de tratamientos activos más relevantes fueron los tratamientos activos con cal, osmosis inversa, intercambio iónico y absorción; mientras que, en los tratamientos pasivos se consideraron a los humedales artificiales (aeróbico y anaerobio), debido que son tecnología limpia, capaz de elevar el pH y remover los metales pesados de las aguas contaminadas. Esta tesis tuvo como conclusión, la utilización de sistemas de tratamientos pasivos debido a que el costo de utilización es menor al de un tratamiento activo, por ende, sería muy beneficioso para la empresa y el recurso natural, disminuyendo la contaminación o impacto que se da al medio ambiente.

Palabras Claves: metodologías, metales pesados, aguas acidas.

## **Abstract**

In this thesis, the methods for removing heavy metals in acid mine waters were shown, where active and passive treatment systems were studied. The general objective of this research was to analyze the methodologies used in the removal of heavy metals from acid mine waters through a systematic review. It was a basic type research with a qualitative approach, having as a study methodology the collection of data through information tables. The results obtained were that the most relevant active treatment systems were active treatments with lime, reverse osmosis, ion exchange and absorption; while, in the passive treatments, artificial wetlands (aerobic and anaerobic) were considered, because they are clean technology, capable of raising the pH and removing heavy metals from polluted waters. This thesis concluded, the use of passive treatment systems because the cost of use is lower than that of an active treatment, therefore, it would be very beneficial for the company and the natural resource, reducing the pollution or impact that occurs. to the environment.

Keywords: methodologies, heavy metals, acid waters.



## **I. INTRODUCCIÓN:**

Las minas por excelencia, se han ejecutado desde la antigüedad, hasta nuestros días. Si bien es cierto, actualmente esta actividad es de gran apoyo para el desarrollo de un país, sin embargo, generan impactos negativos y positivos, siendo los más relevantes, los impactos negativos al ambiente, porque está altera y modifica la calidad de agua de los cuerpos receptores, poniendo en riesgo la integridad física de los moradores, así como la flora y fauna.

Aduvire (2019, p.55), nos explicó que la actividad minera genera una gran cantidad de residuos sólidos y materiales que se disponen adecuadamente en los depósitos de relaves mineros o tanques de relaves, por lo general estos desechos mineros contienen sulfuros que en contacto con el dióxido de oxígeno ( $O_2$ ) y el agua ( $H_2O$ ) empiezan a tener reacciones físicas, químicas y biológicas consecutivamente formando o generando las aguas ácidas.

Aduvire (2018, p.1), hizo referencia que, la mayoría de los efluentes que provienen del interior de las minas subterráneas son de carácter ácido, por tener un pH con valores mayores a los Límites Permisibles, con altos contenidos de sólidos totales en suspensión y elementos metálicos tales como el hierro, cobre, plomo, zinc, cadmio, arsénico; los cuales al no ser tratados en forma adecuada y ser vertidos al ambiente, estarían contaminando las aguas superficiales ubicadas aguas abajo, este problema puede durar muchos años desde que la actividad minera concluye; para revertir esta problemática en el sector minero en Perú se viene implementando medidas y normas para el control o regulación de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximo Permisibles (LMP).

Pese a su aparente simplicidad, estas metodologías de tratamiento activo y/o pasivo de remoción de los metales pesados en los efluentes mineros,

son un proceso relativamente reciente, al cual se le puede llamar como procesos recientes; aun cuando el problema de drenaje de mina existe desde el inicio de las actividades mineras en los países. Aduvire (2018, p. 2).

Tejada, Villabona y Garcés (2015, p.111), hicieron referencia que el daño e impacto que generan estos metales pesados al medio ambiente, es de suma importancia para el mundo, por este motivo diferentes investigadores tratan de desarrollar diversas metodologías para la remoción y tratamiento de los efluentes que expulsan las minas. Por ello, existen metodologías pasivas y activas, algunas de muy bajo presupuesto y otras de elevado presupuesto para la implementación y ejecución.

La tesis tuvo como problemática dar a conocer las metodologías para la remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina, para eso iniciamos formulándonos la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las metodologías de remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina?, con el fin de corroborar las metodologías existentes para la remoción de metales pesados.

Los drenajes de mina siguen siendo unos de los principales problemas de contaminación del agua para todo el mundo. Esto se debe por la existencia de los metales pesados como hierro (Fe), cobre (Co), zinc (Zn), plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), causando daños excesivos a la salud humana y ecosistema, por tanto, se necesita prevenir su formación del contaminante y aplicar el tratamiento más idóneo cuando ya se ha formado.

Esta tesis tuvo como justificación, el análisis de las metodologías existentes para la remoción de metales en aguas ácidas de mina, ya que estos generan impactos negativos en los ecosistemas existentes y contaminan las aguas, donde se afectan directamente la flora, fauna;

generando daños en la salud de los pobladores, por lo tanto, al realizar la revisión sistemática nos permitirá conocer los métodos de tratamiento que existen de las aguas ácidas de mina. Además, se realizaron aportes para la investigación científica, proporcionando las diferentes metodologías actuales.

El objetivo general de la tesis fue el analizar las metodologías utilizadas en la remoción de metales pesados de las aguas ácidas de mina mediante la revisión sistemática. Y los objetivos específicos fueron evaluar la eficiencia de las metodologías del tratamiento activo para la remoción de metales pesados de agua ácida de mina y evaluar la eficiencia de las metodologías del tratamiento pasivo para la remoción de metales pesados de agua ácida de mina.

## II. MARCO TEÓRICO:

A continuación, se describen los antecedentes que corresponden a este trabajo de investigación:

Cervantes (2018, p.49), concluyó que con la caracterización del DAM (drenaje ácido de mina) presenta valores ácidos de pH y concentración de metales pesados. El sistema que se tuvo que proponer deberá de elevar el pH del agua ácida, ya que, al elevarse el pH a un grado neutro-alcalino, la mayor cantidad de metales precipitaron como hidróxidos metálicos. Pero existen 2 metales pesados como el Cd y el Zn ya que estos pueden tardar más de lo normal en precipitar a un rango neutro, o de ser posible subir el pH a un grado alcalino como el 8.5 a 9.

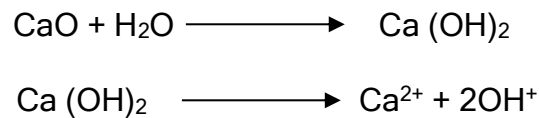
Romero et. al (2015, p.89); concluyó que la dolomita ( $\text{CaCO}_3$  y Mg), funciona como absorbente de agentes que generan acidez en las aguas de mina. Y a la vez, demostró resultados favorables para el tratamiento de estos efluentes contaminantes. Este sería uno de los métodos que dan mejores resultados al tratamiento de los efluentes de mina.

Craig (2015, p.248), nos indicó que el tratamiento activo se basa al agregado de sustancias o reactivos que ayuden a la regulación del efluente ácido que emite las actividades de minería, agregándoles floculantes tales como cal, piedra caliza, coagulantes inorgánicos y floculantes orgánicos, estos ayudan a elevar el pH de este modo los metales pesados existentes en el agua precipitan con la ayuda de los floculantes, esta produce un agua que cumple con los LMP y ECA, teniendo como objetivo el tratamiento de las aguas ácidas de mina, asimismo la eliminación de los metales pesados que se encuentran, utilizando tecnologías avanzadas para la correcta gestión de los contaminantes.

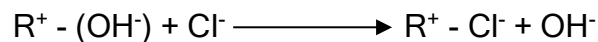
La Resolución Ministerial N° 010-210-MINAM, argumentó en el artículo 5 que las concentraciones promedio anuales de los LMP para aguas ácidas de mina, no excederían los niveles establecidos en la columna "Valor Promedio Anual". Ver el Anexo 06.

El Decreto Supremo 002-2008-MINAM, indicó en el Artículo 3, que para la aplicación de los ECA para el agua se debe considerar la Categoría 4, en donde nos explican la cantidad de metales pesados que debe haber por mg/L en el agua. Ver el Anexo 06.

Rodríguez y Delgado (2016, p.65), definieron que el tratamiento activo de agregado de cal, la primera reacción que se presenta es de la hidratación de la Cal, lo cual la Cal hidratada diluida hará reacción e incrementará el pH.

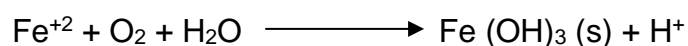


El incremento del pH ocasionará la precipitación de los metales, lo cual dentro se encuentra el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , por esta razón se le agregó el proceso de aireación para oxidar el hierro a la forma más estable, lo cual se representa mediante la siguiente ecuación:



Delgado (2016, p.66); hizo mención a otro tratamiento activo llamado osmosis inversa el cual nos comentó que este es un proceso donde el solvente pasó a través de una membrana semipermeable que sirvió como filtro para separar los metales pesados del agua, en donde el equipo se encargó de hacer el trabajo y no presentó ningún tipo de reacción.

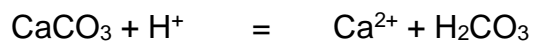
Pabon, et al. (2020, p.7); hicieron referencia que el método de remoción de metales mediante intercambio iónico fue un proceso de separación física en el cual los iones intercambiados presentaron la siguiente reacción:



Vera y García (2018, p. 97), indicaron que el tratamiento de absorción mediante el bagazo de caña de azúcar, actúo como biosorbente, que se

tuvo que lavar, secar y triturar para determinar las propiedades físicas y químicas de este mismo, viendo que los resultados dieron un pH de 5 generando mejores resultados de remoción en los valores de los plomo y cadmio, por lo que se trabaja a este valor.

Medina (2018, p.4), demostró que una de las alternativas de bajo costo que nos ayudará a cambiar las condiciones del agua ácida son los tratamientos pasivos como los humedales artificiales, en donde las bacterias y plantas que ayudaron a oxidar los metales, causando diferentes precipitaciones, se representaron en la siguiente ecuación:

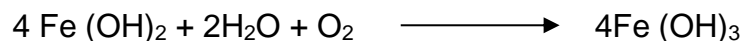


Entre otros, esta forma de tratar el drenaje ácido de mina, resultó ser económica y no necesitó mantenimiento como otros tratamientos, y esto sirvió como depurador de sustancias contaminantes y oxidante natural para este problema.

Sánchez y Ferreira (2016, p.25); hicieron mención al tratamiento mediante drenes anóxicos, en donde este tratamiento se puede llegar a elevar el pH a casi 7, esto se debe a que entra en contacto con la piedra caliza y es representada por la siguiente reacción:



Esta ecuación se presentó el equilibrio entre el  $\text{CO}_2$  disuelta en el agua y la siguiente reacción:



Montesino (2017, p.74), definió la importancia de la caracterización de los contaminantes en los cuerpos receptores, se tuvo que identificar en qué estado se encontraba el agua donde se va a verter los efluentes de mina, de este modo comprobar que aquello no altere o modifique los valores iniciales encontrados antes de verter el efluente. También nos indicó que cuando los efluentes tienen concentraciones elevadas sería

una ventaja implementar la neutralización secuencial ya que esto nos permitirá la recuperación de lodos ricos en metales.

(Villas, 2017, p. 33); explicó que el DAM se produce por causa de la minería, estos generan residuos mineros, estos contienen elevadas cantidades de sulfuros al tener contacto con el oxígeno y agua provocan la generación de las aguas ácida de mina.

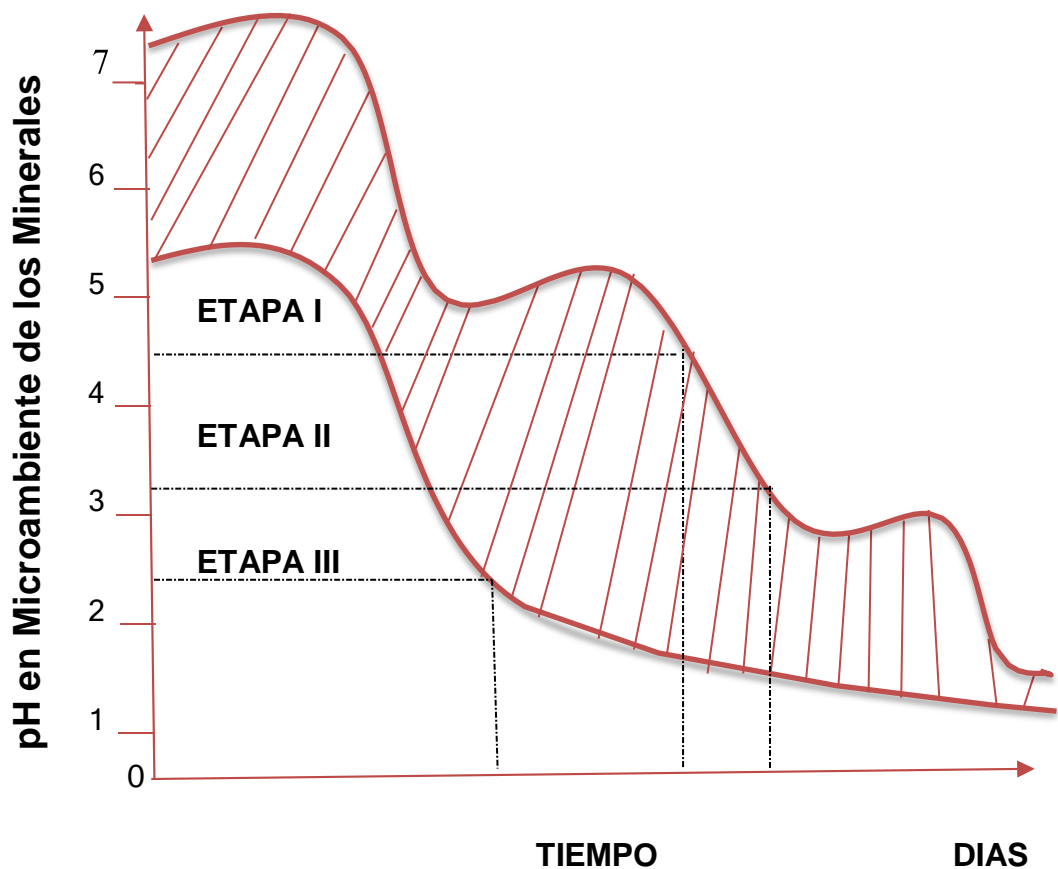
(Medina, 2018, p. 10); nos indicó que estos también contienen cantidades elevadas de sólidos en suspensión, y metales. Esto se debe a un conjunto de reacciones que se van formando a causa que el pH baje a rangos ácidos. El agua al encontrarse en pH ácido por causa de la unión de los 3 elementos básico de su formación, permite que los metales se disuelven con mucha facilidad contaminando el agua en altas concentraciones de metales que ya conocemos, a continuación, vamos a nombres los tratamientos activos y pasivos. La mayoría de sus efluentes de la industria minera son ácidas, de este modo, este proyecto de tesis, se va a enfocar a obtener las metodologías que existen para el tratamiento de aquello.

(Montesinos, 2017, p.4), definió que las aguas ácidas principalmente se generan por 3 compuestos principales que son: los sulfuros, agua y un oxidante ( $O_2$ ), estas aguas tienen los rangos de pH 2 a 6 y tienen altas cantidades de sólidos en suspensión y metales disueltos, entonces la pirita o sulfuros son los responsables de la formación de las aguas ácidas, esto se forma al tener contacto con el  $O_2$  y  $H_2O$ , creando ácido sulfúrico que pueden durar varios siglos, al mismo tiempo las bacterias sirven como acelerantes y ayudan a que el proceso de oxidación sea mucho más rápido, de este modo el grado de acidez va aumentando, esto es un proceso continuo así este la mina en operación o no, ya que, si no se trata a tiempo, esto formará un drenaje de agua ácida y el costo de su tratamiento era mucho más elevado.

Los tratamientos pasivos se aplican, cuando responden mejor a un análisis de costo desde un punto de vista económico y ambiental.

Inga y Blancas (2017, p.255); explicaron que los tratamientos pasivos que se utilizan en los procesos naturales, químicos y biológicos. Estas hacen que mejoren la calidad del agua. Además, el tratamiento pasivo no es costoso porque no es necesario darle mantenimiento asimismo no requiere que se agregue algún reactivo. Por lo mencionado la intervención de la mano hombre es muy reducida, por ejemplo, con los humedales, drenajes anóxicos calizos, sistemas de producción de alcalinidad entre otros.

(Aduvire, 2018, p. 30); nos indicó que el objetivo principal del tratamiento pasivo de las aguas ácidas de mina, es en eliminar o reducir el pH, precipitar los metales y eliminar cualquier tipo de sustancias contaminantes, por ejemplo: sólidos en suspensión, arseniuros, antimoniueros, entre otros metales existentes. El drenaje ácido se origina en tres etapas:



Fuente: Gazeam, Adam (2017)

**Figura N° 01:** Etapas del DAM



Como primer proceso al oxidarse los minerales sulfurosos estos expulsan hierro ferroso que, al encontrarse con pH neutros o alcalinos, se oxidan y se transforman en hierro férrico y a la vez precipitado como hidróxido aportando acidez. En esta etapa el proceso con el que se oxida es de rangos bajos.

Como segundo proceso, los rangos de pH ya no se encuentran neutros o alcalinos, sino en un rango más bajo. Esto es causado para que los procesos de oxidación de la pirita sean más rápidos.

(Aduvire, 2018, p.10), concluyó que esta reacción da lugar al sulfato ferroso y el óxido formado se convierte en sulfato férrico, este, cuando está en contacto con el agua se convierte en ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, este da el color representativo de las aguas ácidas coloración amarilla-anaranjada de mina. En este proceso baja la eficacia del mecanismo directo por oxidación por el aire y aumenta mucho la del indirecto.



Fuente: Lourenco y Curtis (2021)



Fuente: Tuiro (2017)

**Figura N° 02:** Formación del DAM

(Aduvire, 2018, p. 11); informó que el pH está en rango menor a 4.5 en el agua este se ve afectado por los procesos de reducción-oxidación y este da lugar a los sulfatos, en esta etapa el grado de acidez varía en rangos bajos, si los rangos se encuentran en rangos de 2.5 se tiene que esperar que termine el proceso y se estabilice ya que llegó a su máximo desarrollo.

La clasificación de drenaje depende de varios factores en cómo se puede clasificar los drenajes de mina según (Morin y Hutt, 2017, 185-186), en su investigación relaciono al DAM con el nivel de pH y su posible nivel de acidez o alcalinidad de los minerales de acuerdo a la tabla N° 01.

**Tabla N° 01: La función del pH y el potencial de acidez/alcalinidad de los minerales**

CLASE	pH	DESCRIPCIÓN
Ácido	<6	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Acidez generada por oxidación de minerales</li> <li>➤ Nivel de metales disueltos es mayor que endrenajes neutros.</li> <li>➤ Ejemplos: minas metálicas, carbón y piritas</li> </ul>
Alcalino	>9 o 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos como óxidos, hidróxidos.</li> <li>➤ Niveles de metales como el Al son mayores que en los drenajes neutros.</li> <li>➤ Ejemplo: minería de diamantes.</li> </ul>
Neutro	6-9 o 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dependiendo de los minerales, en determinados periodos pueden ser ácidos o alcalinos.</li> <li>➤ Concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos</li> </ul>

Fuente: Morin y Hunt (2017)

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación:**

La tesis fue de tipo básica de enfoque cualitativo. Esta investigación también es llamada “investigación empírica”, debido a que estos conocimientos se adquieren en lo aprendido por medio de la reflexión y la sistematización de la investigación. Al reflexionar y ver los resultados de la investigación, esta se vuelve más rigurosa y sistemática para llegar a conocer el contexto (Vargas, 2009, p. 5).

El diseño de investigación de la tesis fue narrativo de tópicos porque recoge información, experiencias de autores de un tema específico. En este caso son las diferentes metodologías de remoción de metales pesados en las aguas ácidas de mina.

#### **3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística:**

La información de categoría y subcategoría apriorística, fue desarrollada por los investigadores antes de la recopilación de datos e información, también sirvió como un organizador de las acciones que se van a realizar y su finalidad es la relación de los objetivos con los criterios de búsqueda, de esta manera se puede garantizar que la investigación se realice correctamente. Se mostrará la matriz apriorística. Ver Anexo 02.

#### **3.3. Escenario de estudio:**

El escenario de estudio fueron todos los lugares en los cuales se ha recogido la información sobre el tratamiento de aguas ácidas de mina. Además, se obtuvieron como lugares de estudio o lugares de recopilación de datos ambientales a las plataformas como: Scopus, Sciencedirect, Redalyc, Scielo y tesis desde los años del 2016 al 2021.

### **3.4. Participantes:**

En nuestro caso, los participantes fueron el material recopilado por medio de la revisión sistemática, las revistas indexadas y/o científicas, estas se encontraron en las diferentes plataformas como: Scopus, Sciencedirect, Redalyc, Scielo y tesis desde los años del 2016 al 2021.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:**

Se realizó la técnica de recolección de datos o información de fuentes confiables los cuales son: Scielo, Sciencedirect, Redalyc, Scopus y repositorios universitarios. Los instrumentos para obtener los datos fueron mediante el análisis de documentos y/o revistas científicas indexadas siguiendo los criterios de inclusión: Tesis disponibles, Artículos científicos, artículos de los últimos 5 años, trabajos aplicados, Artículo disponibles. Los criterios de exclusión: Libros, foros, conferencia, Artículo de revistas no indexadas, artículos publicados antes del 2015, trabajos no aplicados, artículos no disponibles.

### **3.6. Procedimientos:**

Para realizar la tesis se realizó un diagnóstico de la problemática ambiental de las aguas ácidas de minas, en el cual se identificó las variables de estudio las cuales fueron, la variable independiente siendo las aguas ácidas de mina y la variable dependiente la revisión sistemática de la remoción de metales pesados.

Después se seleccionó la información para el procesamiento, en la cual, se consideró trabajos vinculados al lugar, línea de investigación, se utilizó la biblioteca virtual de la Universidad César Vallejo; tuvimos disponibilidad de las bases de datos de Ebsco, Scielo y Scopus los cuales nos permitieron realizar una búsqueda concisa de nuestro tema.

Con respecto al método de análisis de datos de la tesis se realizó un cuadro de resumen de artículos de investigación de los diferentes investigadores. En el cual se detallan los autores, tipos de estudio, media de resultados y conclusiones. Hecho ya esto seleccionamos a los autores con los cuales íbamos a realizar la discusión. Se incluyeron estudios identificados como reseñas de libros, reseñas de capítulos de libros y editoriales para la recopilación de datos del artículo de investigación.

Después de analizar los contenidos obtenidos de los artículos, permitió la clasificación de acuerdo a los criterios ya mencionados, para encontrar las tendencias de métodos de remoción de metales pesados y sus aplicaciones en las aguas ácidas de minería.

Después se recogió información de diferentes autores para realizar el análisis en la cual se analizó las variables de estudio independiente y dependiente, las cuales se hallan correlacionadas. Por último, se interpretaron los resultados con los diferentes autores investigados, para poder dar nuestras conclusiones con el tema propuesto.

### **3.7. Rigor científico:**

La investigación recogió los datos de diferentes autores y fuentes confiables sobre las metodologías de remoción de metales pesados existentes. Esta información estará respaldada porque se tomará de fuentes con base científicas, teniendo en cuenta la credibilidad de las investigaciones que se dispone.

### **3.8. Método de análisis de datos:**

Este proceso buscó analizar los documentos disponibles y ordenar datos coherentes, asimismo se tendrá que organizar los datos según criterios empleados. Este método utilizó fichas de los análisis, de las cuales se proporcionará la información relevante de

la revisión sistemática. Además, se utilizó una base de datos donde estará sintetizada la información que se obtuvo de las revistas indexadas para su posterior análisis.

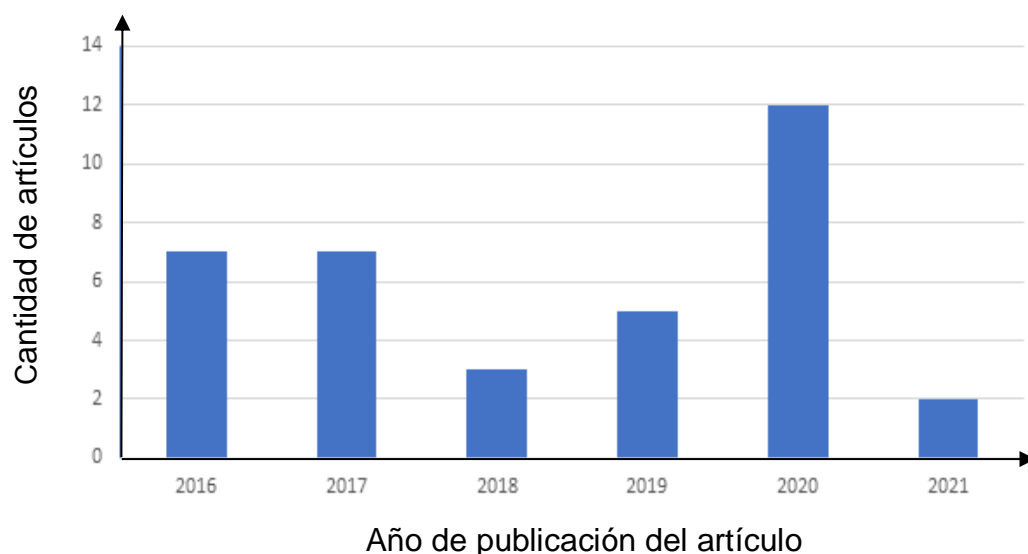
### **3.9. Aspectos éticos:**

La investigación se realizó siguiendo las pautas establecidas por el asesor y cumpliendo los principales criterios dados por la guía de productos observables 2021. Además, se cumplió las siguientes especificaciones:

- Todo artículo usado para la elaboración del producto final contará con el aval de una revista de renombre. (alguna fuente).
- Los datos son verídicos y cuentan con el fundamento impuesto por la investigación. (citar al reglamento de la ucv).
- Toda fuente de información fue citada y documentada según las normas de citación establecidas. (citar el documento de citación del fondo editorial de la ucv).

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haber realizado la búsqueda en las bases de datos Scopus, Redalyc, Science Direct, y los repositorios universitarios de las diferentes universidades, se obtuvo como resultado 72 documentos disponibles para realizar la sistematización. Sin embargo, solo 40 artículos cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión detallados en el procedimiento ya presentado en la matriz apriorística.



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 03:** Artículo de revisión por año

En la figura N° 03, se observa los 40 artículos de revisión referido a las metodologías de remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina, los cuales fueron seleccionados desde los años 2016 al 2021, teniendo como resultado 08 artículos en el año 2016, 08 artículos en el año 2017, 03 artículos en el año 2018, 06 artículos en el año 2019, 13 artículos en el año 2020 y 02 artículos en el año 2021.

Para el cumplimiento del principal objetivo, el analizar las metodologías utilizadas en la remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina, se identificaron en los 40 artículos los tipos de tratamientos existentes para la remoción de metales pesados, los cuales son tratamientos pasivos y tratamientos activos. Ver Tabla N° 02.

**Tabla N° 02: Metodologías de tratamiento de agua acida de mina**

N°	AUTORES	METODOLOGÍAS	CANTIDAD DE REMOCIÓN DE METALES	ÁREA REQUERIDA	CAUDAL DE TRATAMIENTO	COSTO DE TRATAMIENTO
1	Agboola, Oluranti	<b>Activo:</b> Filtración por Membrana	Arsénico 89.26% Plomo 85.36%	16.61 Ha	93,286.08 m <sup>3</sup>	3.555.006,74 \$
2	Aguirre Cieza, Wilmer Huamán Flores, Rogelio	<b>Activo:</b> Tratamiento con Cal	Arsénico 99.53% Cobre 99.99% Hierro 99.98% Plomo 95.78% Zinc 99.64%	13.85 Ha	23,894.10 m <sup>3</sup>	8.500 \$
3	Amabilis, Leonel	<b>Pasivo:</b> Humedales artificiales	Cobre 78.36% Hierro 78.65%	44.92 Ha	26,245.08 m <sup>3</sup>	4.263.598,8 \$



4	Bolaños Guerrón, Darío	<b>Pasivo:</b> Mediante tecnosoles (suelos nativos y nanopartículas)	Arsénico 85.36% Hierro 87.63% Plomo 96.85%	15.63 Ha	16,258.02 m <sup>3</sup>	3.125.369.23 \$
5	Brandao Pereira, T., Batista dos Santos, K.	<b>Activo:</b> Por neutralización	Arsénico 85.23% Plomo 86.23% Zinc 87.26%	25.36 Ha	12,235.05 m <sup>3</sup>	2347,700 \$
6	Bwapwa, T. Jaiyeola	<b>Pasivo:</b> Fitorremediación con algas	Hierro 99.99% Plomo 95.99% Zinc 99.86%	15.85 Ha	19,758.02 m <sup>3</sup>	3.258.369,12 \$

7	Caviedes Rubio	<b>Pasivo:</b> Mediante macrófitas neotropicales	Arsénico 95.63% Hierro 93.62% Zinc 94.36%	23.58 Ha	14,258 m <sup>3</sup>	3,256.20 \$
8	Denegry Muñoz, Jerry Iannacone, José	<b>Pasivo:</b> Humedales artificiales Humedales aerobios Humedales anaerobios	Plomo 95.78% Zinc 99.64%	13.25 Ha	15,256 m <sup>3</sup>	9,256.36 \$
9	Devia Torres Darkys, Cáceres Sepúlveda Sindy	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante microalgas.	Arsénico 92.36% Hierro 92.56% Zinc 95.63%	11.23 Ha	2,236.01 m <sup>3</sup>	-----

10	Edzai Webters, Shedirán Craig, et all	<b>Activo:</b> Filtración por Membrana Intercambio de Hierro <b>Pasivo:</b> humedales artificiales, biorreactores drenajes de piedra caliza.	Arsénico 98.92% Cobre 98.63% Zinc 92.62%	10.98 Ha	10,890.98 m <sup>3</sup>	8,256.36 \$
11	Fernández Rojo, M. Hery, P. Le Pape, C. Braungardt c	<b>Activo:</b> Biorreactor de flujo continuo	Arsénico 82.36% Plomo 81.89% Zinc 81.85%	16.89 Ha	15,256.20 m <sup>3</sup>	9,125.31 \$
12	Gamonal Pajares, Priscila	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante humedales	Cobre 84.36% Hierro 86.32% Zinc 84.23%	10.36 Ha	10,236.00 m <sup>3</sup>	-----

13	Hidalgo Natalia	<b>Pasivo:</b> Mediante Biomasa	Plomo 95.78% Zinc 95.46%	15.36 Ha	10,125.02 m <sup>3</sup>	-----
14	Kefeny, Kenede	<b>Activo:</b> Biorreactor de flujo continuo	Arsénico 86.53% Hierro 86.98% Zinc 85.64%	10.65 Ha	-----	-----
15	K. Rambabu, Banat Fawzi, et all.	<b>Biológica pasivo:</b> Inyección de sustrato orgánico Barreras reactivas Permeables. Camas de infiltración  <b>Biológicos activos:</b> Biorreactores Tecnologías de membrana Biorremediación a base de algas	Hierro 99.98% Plomo 95.78%	10.96 Ha	12,235.23 m <sup>3</sup>	324052,6 \$

16	Larraguibel Alfonso, Navarrete Alvalo, et all	<b>Activo:</b> Reemplazo de piedra caliza, con cáscaras de huevo y las conchas marinas	Hierro 99.93% Zinc 99.64%	15.23 Ha	2,100.01 m <sup>3</sup>	5,235.32 \$
17	Luis, Ramón	<b>Activo</b> Tratamiento mediante membranas	Arsénico 78.36% Cobre 78.56% Hierro 79.56% Plomo 78.23% Zinc 78.96%	15.63 Ha	82,258.08 m <sup>3</sup>	3.555.002,74 \$
18	Medina Quispe, Ricardo	<b>Activo:</b> Tratamiento con cal Tratamiento con soda cáustica	Arsénico 99.53% Cobre 99.99% Hierro 99.98% Plomo 95.78% Zinc 99.64%	16.36 Ha	75,286.23 m <sup>3</sup>	4.266.595,8 \$
19	Mohammed, Ramy	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica	Arsénico 85.53% Cobre 75.99% Zinc 82.64%	12.56 Ha	-----	-----

20	Montesinos León, Mayra	<b>Activo:</b> Tratamiento con cal	Hierro 99.98% Cadmio 95.78% Zinc 99.64%	13.23 Ha	2,100, 023 m <sup>3</sup>	5,563.56 \$
21	Núñez Damaris	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica	Arsénico 99.53% Cobre 99.99% Zinc 99.64%	10.32 Ha	71,282.23 m <sup>3</sup>	3.256.632 \$
22	Oré, Jiménez	<b>Pasivo:</b> Mediante bioadsorción	Hierro 99.98% Plomo 95.78% Cadmio 99.64%	12.56 Ha	56,231 m <sup>3</sup>	3.256.125 \$
23	Pabon S.E, Benítez R, et al.	<b>Pasivo:</b> Filtración por membrana  <b>Activo:</b> Intercambio iónico Adsorción Precipitación química	Cobre 90.99% Hierro 90.68% Zinc 90.86%	10.23 Ha	10,256.02 m <sup>3</sup>	-----

24	Pérez, Rocío; et al.	<b>Activo</b> Tratamiento mediante ramnolípidos	Hierro 86.98% Cadmio 86.78%	13.25 Ha	11.236.236 m <sup>3</sup>	4,563.56 \$
25	Postila, Heini	<b>Activo:</b> Mediante Filtración	Arsénico 98.53% Hierro 98.98% Cadmio 98.56% Zinc 98.72%	12.36 Ha	56,235.45 m <sup>3</sup>	-----
26	Pozo, Puente Iván Laguela Susana Veiga María	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica Inhibición bacteriana por medio del uso de detergentes aniónicos Inhibición bacteriana por medio de la aplicación de vegetación	Hierro 97.56% Plomo 96.23% Zinc 97.23%	15.36 Ha	45.263.562 m <sup>3</sup>	3.345,78 \$

27	Rezaie Behnaz, Austin Anderson	<p><b>Activo:</b> piedra caliza/ cal hidróxido de sodio, carbonato de sodio magnesia</p> <p><b>Pasivo:</b> Humedales Aerobios y Anaerobios desagües anóxicos de piedra caliza</p>	<p>Arsénico 99.85% Cobre 99.23% Hierro 99.12% Plomo 95.45% Zinc 99.26% Cadmio 99.12%</p>	15.63 Ha	56.326 m <sup>3</sup>	3.123.632 \$
28	Rimarachín Varas, Paolo	<p><b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante humus Tratamiento mediante compost Tratamiento mediante membrana semipermeable natural</p>	<p>Arsénico 98.13% Cobre 98.20% Hierro 98.15% Plomo 98.26% Zinc 97.99%</p>	12.36 Ha	15,256,456 m <sup>3</sup>	2.562.32 \$



29	Rodríguez, Adriana	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante microalgas	Arsénico 95.53% Cobre 95.99% Zinc 95.64%	10.23 Ha	82,878 m <sup>3</sup>	3.253.658 \$
30	Rodríguez, Delgado y Millan	<b>Activo:</b> Neutralización convencional (lechada de cal o cal viva) Intercambio Iónico Osmosis Inversa Proceso de Lodo de alta densidad	Arsénico 96.53% Plomo 96.78% Zinc 96.64%	16.56 Ha	72,258.08 m <sup>3</sup>	3.256.006,74 \$
31	Rodríguez, Lizeth, et al.	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante microorganismos	Arsénico 99.53% Hierro 99.98% Plomo 95.78% Zinc 99.64%	11.25 Ha	80,256 m <sup>3</sup>	2.555,12 \$

32	Sánchez José Ferreira Juan	<b>Pasivo:</b> Humedales Artificiales Aeróbicos Humedales Artificiales Anaeróbicos Drenajes anóxicos con calcáreos	Arsénico 95.53% Cobre 95.74% Zinc 95.50%	10.23 Ha	50.326 m <sup>3</sup>	3.120,23 \$
33	Singh, Shweta	<b>Pasivo:</b> Humedales Artificiales	Hierro 99.98% Zinc 99.64%	11.56 Ha	50.105,23 m <sup>3</sup>	-----

34	Skousen Jeff, Zipper Carl, et all	<p><b>Pasivo biológico:</b> Humedales aeróbicos, anaeróbicos y flujo vertical Biorreactores</p> <p><b>Pasivo geoquímico:</b> Drenajes de piedra caliza anóxica Canales de piedra caliza abiertos</p>	Plomo 95.78% Zinc 95.64%	10.78 Ha	53.563 m <sup>3</sup>	3.130,23 \$
35	Tejada, Candelaria	<p><b>Activo:</b> Bioadsorción mediante material biológico</p>	Cadmio 96.52% Hierro 96.56%	16.56 Ha	50.105,23 m <sup>3</sup>	-----
36	Vásquez Y Escobar M.	<p><b>Pasivo:</b> Reactores bioquímicos pasivos.</p>	Hierro 99.98% Plomo 95.78% Zinc 99.64%	12.78 Ha	72,2576.08 m <sup>3</sup>	2.595,10 \$

37	Vecino X, Reig M, et all	<b>Activo:</b> Precipitación selectiva Intercambio Iónico	Arsénico 99.53% Zinc 99.64% Cadmio	16.53 Ha	50.105,23 m <sup>3</sup>	4.263.598,8 \$
38	Vera Luisa Nancy García	<b>Activo:</b> Tratamiento mediante membranas (Osmosis y Nanofiltración) Tratamiento mediante absorción (bagazo de caña)	Arsénico 99.53% Cobre 99.99% Hierro 99.98% Plomo 95.78% Zinc 99.64%	15.61 Ha	10,256.02 m <sup>3</sup>	-----
39	Yigit Ece	<b>Activo:</b> biorreactor de membrana anaeróbica	Hierro 99.98% Plomo 95.78% Zinc 99.64%	14.61 Ha	43.196,23 m <sup>3</sup>	4.200.598,3 \$
40	Zamora Echenique, Gerardo	<b>Pasivo:</b> Tratamiento de drenes anóxicos calizos	Arsénico 99.53% Cobre 99.99% Hierro 99.98%	10.34 Ha	70,298.08 m <sup>3</sup>	2.555,12 \$

Fuente: Elaboración propia

Vásquez y Escobar (2020, p.55); Rambabu, Banat, Minh, Hsin, Qi, Loke (2020, p.1); Denegri y Iannacone (2020, p.346); Larraguibel, Navarrete, García, Armijos, Caraballo (2020, p.1) hicieron referencia que dentro de las metodologías empleadas para la remoción de los metales pesados en aguas ácidas de mina, existen dos formas del tratamiento siendo los pasivos y activos, ambos tratamientos sirvieron para la remoción de los metales pesados, pero teniendo en cuenta algunos factores naturales o tratamientos químicos.

Desde el punto de vista de Montesinos (2018, p.21); Kefeni, Msagati, Mamba (2020, p.479); Larraguibel et al (2020, p.1), Rambabu et al (2020, p.1), nos aclararon que los tratamientos activos suelen ser continuos, requiriendo constante operación y mantenimiento para su uso. Fue necesario el uso continuo de reactivos químicos (cal, sosa cáustica, carbonato de sodio, etc), personal altamente calificado y uso excesivo de la energía. Este tratamiento fue utilizado frecuentemente en minas operativas y se aplicó para tratar grandes caudales a cualquier grado de acidez. Adicionalmente se requirió energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos y parte mecánica móviles para el proceso. Si bien para su funcionamiento no se requirió grandes áreas para la infraestructura, sus costos para mantenerlo son elevados.

En cambio; Edzai, Sheridan, Rumbold (2020, p.2); Larraguibel et. al (2020, p.1); Rambabu (2020, p.1) comentaron que los tratamientos pasivos son los que requieren poca o mínima intervención del hombre ya sea para el monitoreo, mantenimiento o parte operativa; por esta razón este tratamiento requiere bajo presupuesto y costo, siendo sumamente ventajoso a diferencia de los métodos activos. Y también nos explicaron que no requiere ningún aporte de adición de sustancias que sirven para reducir la acidez, generalmente no requiere ningún tipo de intervención.

A continuación, se describieron las características de cada metodología:

Tejada (2016, p.45) hizo referencia al tratamiento activo cal el cual nos comenta que principalmente se basa en el agregado de cal, cal hidratada, soda caustica. Siendo su único fin conseguir aumentar el pH del agua acida a valores neutros o alcalinos, esto se realiza para llegar a condiciones que se requiere para la precipitación de los metales. Adicionalmente se requiere la técnica de aireación o agitación para poder oxidar los metales y volverlos hidróxidos para que la remoción de los metales sea mucha más afectiva. Los lodos que se obtiene al final del proceso son depositados en balsas de almacenamiento cubiertos con geomembrana para evitar la filtración al suelo.

Agboola (2019, p.89) nos describió el tratamiento de osmosis inversa, siendo un proceso donde el solvente ingresa a través de una membrana impermeable, pasando de una solución diluida a una concentrada. Esto se debió a una especie de filtro que tienen las membranas, no dejando pasar los metales o solidos suspendidos. Este proceso tuvo 3 etapas las cuales fueron:

- Filtro de sedimento: Este fue el comienzo del tratamiento, lo cual el agua a tratar pasa por el filtro de sedimentos, teniendo la mayoría de microporos abiertos y permite la absorción de los metales.
- Filtro de carbón activado: En esta etapa de contó con gránulos de carbón activado y su superficie es bien porosa, esto sirve para la eliminación olores, sabores.
- Membrana semipermeable: Esta membrana fue capaz de eliminar el 97 de todos los sólidos disueltos en el agua.

El solvente principal de este tratamiento fue la membrana que sirvió como filtro para la separación de los metales y el agua.

Pabon (2016, p.56) nos explicó el tratamiento de intercambio iónico, el cual se utilizó para remover los iones disueltos en el DAM, para que este proceso fuera efectivo debe de contener iones propios, ser solubles en el agua y ser porosos para dejar pasar la molécula del agua. Generalmente la resina se encarga de la retención de iones metálicos en solución y expulsa iones diferente con la misma carga. Este fue una técnica de separación física lo cual los iones no sufren ninguna alteración. Este proceso la formación de iones es muy baja a comparación de otros procesos.

Fernández (2017, p.67) nos comentó que el tratamiento mediante absorción fue una técnica que se empleó para la remoción de metales pesados, teniendo una alta capacidad de absorción y se tiene que saber elegir un buen absorbente para que no afecte su rendimiento. Este tipo de técnica fue muy amigable con el ambiente, además permite recuperar el absorbente para poder reutilizarlo con diversos propósitos, adicionalmente este no emite sustancias toxicas o dañinas, es de fácil uso y su precio de operación es de bajo costo.

Los principales absorbentes fueron:

- Carbón activado: Este fue uno de los absorbentes más utilizados por su gran eficiencia en absorber una amplia variedad de contaminantes orgánico e inorgánico. Esto se debió a su gran área de porosidad de 500 m<sup>2</sup>/g y llegando hasta 1500 m<sup>2</sup>/g y una amplia superficie que puede ser accesible para diferentes reactivos. Este absorbente fue originado de materiales carbonados los cuales fueron: biomasa, lignitos y el propio carbón.
  
- Nanotubos de carbono: Este despertó atención como una nueva alternativa de solución, esto se debe a que funciona perfectamente en la eliminación de contaminantes en agua residuales, clasificándose en dos tipos, el primer tipo fue de pared simple, lo cual indicaron que tiene una sola hoja de pared

de grafito; el segundo tipo fue el de pared múltiple el cual tiene diversas hojas de pared de grafito. Su mecanismo de interacción fue a causa de la atracción electrostática que hace interacción los nanotubos con los iones metálicos. Este es una técnica innovadora por su alta química y estabilidad térmica.

Amabilis (2016, p.37) hizo referencia al tratamiento pasivo mediante humedales artificiales, teniendo como principal característica los suelos saturados de líquidos contaminados o sedimentos, adaptándose a variados tipos de vegetación para el tratamiento y adaptación en las zonas a tratar. Existieron varios procesos a tomar en consideración los cuales se mencionará en orden de importancia:

- Formación y precipitación de hidróxidos metálicos
- Formación de sulfuros metálicos
- Reacciones de formación de complejos orgánicos
- Toma directa de metales por las plantas.

Brandao (2020, p.102) caracterizó al tratamiento de humedales artificiales Aeróbicos por tener una amplia área, cubierta con materia orgánica no mayor de 1 m de fondo y agua no mayor de 30 cm. Adicionalmente se agregó las plantas (Rizoma), dentro del humedal o alrededores, esto sirvió para que le brinde materia orgánica y mejor visión paisajística. Los factores más influyentes para que el humedal sea exitoso son los siguientes:

- La concentración de metal
- Contenido de oxígeno disuelto
- pH y alcalinidad del agua
- Presencia de biomasa activa
- Tiempo de retención y paso del agua.



Bolaños (2021, p.25) nos comentó que el tratamiento de humedales artificiales anaerobios se caracterizó por tener de la parte profunda no mayor a 25 carbonato o caliza, seguido de 60 cm de materia orgánica y no mayor de 30 cm de agua a tratar. También se explicó que el 80 o 85% de Fe puede ser retenido en el fondo del humedal, se encontró bastante bibliográfica sobre humedales, pero no se encontró evidencia que la remoción de Mn, pero si hay sobre el Al.

Bwapwa (2017, p.23) dio como resultados que el tratamiento mediante drenes anoxicos se caracterizó principalmente por la cantidad de caliza que necesita este tratamiento, este tratamiento pasivo empezó como tratamiento agregado para apoyar a los humedales artificiales brindado alcalinidad para acelerar su proceso de precipitación de los metales pesados. En este proceso se tuvo que tomar en cuenta la cantidad de Fe y Al ya que si existe estos dos metales en abundancia puede tapar los poros de la cama caliza quedando el drenaje anulado.

Se determinaron de las concentraciones del agua acida de mina y el caudal tratado por cada metodología de tratamiento.

Según la tesis de Sánchez y Ferreira (2019, p.29), las concentraciones que encontraron en el DAM de la bocamina la Prosperidad, mediante el tratamiento activo con cal, se compararon con los LMP y los resultados de las concentraciones fueron las siguientes:

**Tabla N° 03: Análisis químico del drenaje de mina**

ANÁLISIS QUÍMICO DEL DRENAJE DE MINA			D.S. N° 010-2010-MINAM	
Localización de la Muestra		Agua de drenaje ácido de mina a la salida del socavón Prosperidad	Límite Máximo Permisible Para descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas	
			Parámetro	Límite en cualquier momento
Arsénico (As)	mg/L	17.045	Arsénico (As)	0.10
Cobre (Cu)	mg/L	41.110	Cobre (Cu)	0.50
Hierro (Fe)	mg/L	763.100	Hierro (Fe)	2.00
Plomo (Pb)	mg/L	0.327	Plomo (Pb)	0.20
Zinc (Zn)	mg/L	89.520	Zinc (Zn)	1.50
° pH a 25°C	pH	3.14	° pH a 25°C	6-9

Fuente: Sánchez y Ferreira (2019)

Se determinó que para remover el 95% de los metales pesados se necesitó cal al 98% de pureza 0.197 kg de cal/m<sup>3</sup> de agua acida para llegar a un pH de 10.5 y así poder cumplir con los LMP. Lo cual se muestra en la siguiente Tabla N° 04.

**Tabla N° 04: Neutralización del DAM con lechada de cal**

*Neutralización del DAM con lechada de cal al 10%*

Reactivo:	lechada de cal al 10 % peso/volumen	
Volumen de solución:	1000	ml
Peso de cal:	100000	Mg
Neutralización con lechada de cal al 10%		
Volumen añadido de cal (ml)	Peso de cal añadido (mg)	pH
0	0	3.14
0.50	50	5.40
1.00	100	5.62
1.50	150	7.24
2.00	200	10.66
2.50	250	10.96
3.00	300	11.14
3.50	350	11.40
4.00	400	11.47
4.50	450	11.55
5.10	510	11.69
5.50	550	11.74
6.10	610	11.76
6.40	640	11.80
7.00	700	11.89
7.90	790	11.95
8.20	820	11.97
8.50	850	11.99
8.80	880	12.02
pH		Peso de cal añadido (mg)
10.66	200	
10.50	197	
Kg CaO/m <sup>3</sup> agua ácida		0.197

Fuente: Sánchez y Ferreira (2019)

Para este proceso de filtración por membrana (ultrafiltración y osmosis inversa), se tuvo que tomar en cuenta el tamaño de equipo y las concentraciones de los metales. Esto se realizó previamente para saber que membrana sería la más adecuada. Obteniendo las siguientes concentraciones:

**Tabla N° 05: Caracterización de agua de ingreso**

Descripción	Und	Caracterización agua de ingreso		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Al total	mg/l	1,1860	0,3490	0,2000
As total	mg/l	0,0150	0,0120	0,0080
Ba total	mg/l	0,0280	0,0360	0,0410
Cd total	mg/l	0,0150	0,2710	0,0140
Co total	mg/l	0,0060	0,2010	0,0590
Cu total	mg/l	0,3680	0,5190	0,0280
Cr total	mg/l	0,0060	0,0060	0,0060
Fe total	mg/l	3,0870	2,1260	1,9630
Li total	mg/l	0,0250	0,1010	0,0520
Mg total	mg/l	13,8210	47,7620	14,2070
Mn total	mg/l	0,6880	17,0390	5,0300
Hg total	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002
Ag total	mg/l	0,0010	0,0000	0,0000
Pb total	mg/l	0,1190	0,0870	0,0340
Se total	mg/l	0,0140	0,0260	0,0270
Zn total	mg/l	1,8730	152,3190	22,2580
TSS	mg/l	40,0000	14,0000	8,0000

Fuente: Castañeda (2015)

Después de caracterizar los metales pesados en el agua, se procedió a realizar los tratamientos de ultrafiltración y osmosis inversa. Mostrando los siguientes resultados.

**Tabla N° 06: Comparación de resultados**

Descripción	Und	Prueba 1		Descripción	Und	Prueba 2		Descripción	Und	Prueba 3	
		Salida UF	Salida permeado OI			Salida UF	Salida permeado OI			Salida UF	Salida permeado OI
Al total	mg/l	0,521	0,20000	Al total	mg/l	0,2000	0,2000	Al total	mg/l	0,2000	0,2000
As total	mg/l	0,005	0,00300	As total	mg/l	0,0070	0,0030	As total	mg/l	0,0050	0,0030
Ba total	mg/l	0,027	0,00250	Ba total	mg/l	0,0360	0,0025	Ba total	mg/l	0,0390	0,0025
Cd total	mg/l	0,001	0,00040	Cd total	mg/l	0,1930	0,0010	Cd total	mg/l	0,0240	0,0004
Co total	mg/l	0,004	0,00007	Co total	mg/l	0,1740	0,0010	Co total	mg/l	0,0590	0,4400
Cu total	mg/l	0,0090	0,0060	Cu total	mg/l	0,0110	0,0060	Cu total	mg/l	0,0070	0,0060
Cr total	mg/l	0,0060	0,0060	Cr total	mg/l	0,0060	0,0060	Cr total	mg/l	0,0060	0,0060
Fe total	mg/l	2,3120	0,2000	Fe total	mg/l	1,6520	0,2000	Fe total	mg/l	1,6940	0,2000
Li total	mg/l	0,0230	0,0009	Li total	mg/l	0,0910	0,0009	Li total	mg/l	0,0500	0,0009
Mg total	mg/l	13,0480	0,0600	Mg total	mg/l	44,2050	0,2400	Mg total	mg/l	14,2440	0,1070
Mn total	mg/l	0,4350	0,0020	Mn total	mg/l	14,6250	0,0920	Mn total	mg/l	5,0130	0,0390
Hg total	mg/l	0,0002	0,0002	Hg total	mg/l	0,0002	0,0002	Hg total	mg/l	0,0002	0,0002
Ag total	mg/l	0,0002	0,0002	Ag total	mg/l	0,0002	0,0002	Ag total	mg/l	0,0002	0,0002
Pb total	mg/l	0,0040	0,0012	Pb total	mg/l	0,0040	0,0012	Pb total	mg/l	0,0040	0,0012
Se total	mg/l	0,0120	0,0098	Se total	mg/l	0,0200	0,0098	Se total	mg/l	0,0220	0,0098
Zn total	mg/l	0,0150	0,0090	Zn total	mg/l	128,1810	0,7680	Zn total	mg/l	19,9970	0,2110
TSS	mg/l	4,0000	0,0000	TSS	mg/l	6,0000	<1,0000	TSS	mg/l	6,0000	4,0000

Fuente: Castañeda (2015)

Al mostrar los resultados se mostró una gran eficiencia en el tratamiento de Osmosis inversa, cumpliendo con los LMP y ECAs, los caudales tratados para estos tipos de tratamiento fueron:

- Caudal de agua de Ultrafiltración: 100 m<sup>3</sup>/h, con un costo de 0.035 \$/m<sup>3</sup>.
- Caudal de agua de Osmosis Inversa: 75 m<sup>3</sup>/h, con un costo de 0.143 \$/m

Con respecto Caján y Villegas (2020, p.50) mostró un cuadro comparando los diferentes tipos de resina que se utilizaron en el tratamiento de intercambio iónico, indicando que los metales a remover, concentración inicial y final, caudales expresados por minuto y % de remoción de los metales.

**Tabla N° 07: Resultados de los valores iniciales y finales del caudal***Resultados de los valores iniciales y finales de los metales estudiados, caudal y porcentaje de remoción, en base a 25 estudios realizados, como datos secundarios.*

N°	RESINA UTILIZADA	METAL A REMOVER	CONCENTRACIÓN INICIAL DE LOS METALES (mg/L)	CAUDAL (L/min)	PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE LOS METALES (%)	CONCENTRACIÓN FINAL DE LOS METALES (mg/L)
1	IRA-900 (Aniónica) y Dowex Mac-3 (Catiónica)	Cr (III)-Cr (VI)	100	1367.4	50 - 99	40 - 14.9
2	Lewatit TP-207 y Amberlite IR-120	Ni - Cu - Zn	14.5 - 18 - 21.25	1860	100 - 99.81 - 99.80	0 - 0.0342 - 0.0425
3	Amberlite IRA-400	Zn	10 - 30 - 75	0.004243	90.60	2.82 - 7.05
4	Resina Catiónica	Cu	200	0.086	62.50	75
5	D730, 213, D314 y 312	Cr (VI)	500	0.0104	19.8 - 21.7 - 13.4 - 15.3	401 - 391.5 - 433 - 423.5
6	Puroлита A -400 y A-850	Cr (VI)	104	0.023	92.5 - 90.02	7.8 - 10.38
7	Amberjet 1200H	Cd	40	166.67	95	2
8	Amberjet 1200H	Ni - Pb	40000	0.005	98 - 99	800 - 400
9	AuRIX® 100	Au	159.49	1.02	94.50	0.82
10	Resina estireno divinilbenceno.	Au	80	1570.8	98.94	0.069
11	Resina Iónica	Fe	1253.2	0.2545	99.10	112.788

Fuente: Caján y Villegas (2020)

Como se observó en la tabla, las concentraciones de metales existentes en el agua tratada siguen sobrepasando los niveles de LMP, según los autores esto el % de efectividad tiene que ver por la intensidad del caudal a tratar y también la resina utilizada, en otras palabras, a menor caudal mejores resultados.

Según Sánchez y Ferreira (2016, p. 23) afirmó que la oficina de minas del servicio Geológico de EE. UU, definió que esta entidad promovió ciertos criterios para determinar la superficie del humedal artificial; de esta manera, los m<sup>2</sup> a tomar en cuenta para este proceso es el resultado de dividir entre 0.7 la carga acida, esto se expresa en galones por día. Adicionalmente no recomendó para aguas acidas que superen los 300mg/L.

Entre los tratamientos activos y tratamientos pasivos existen diferentes métodos de remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina, los cuales son de importancia para el cumplimiento del primer objetivo específico que fue el evaluar la eficiencia de las metodologías del tratamiento activo para la remoción de metales pesados de agua ácida de mina.

De acuerdo a los diversos autores descritos en la Tabla N° 02, considerando su numeración original, los métodos más destacados para una correcta remoción de metales mediante tratamiento activo fueron los siguientes:

**Tabla N° 08: Tratamiento activo con cal**

N°	AUTORES	METODOLOGÍAS	CAUDAL DE TRATAMIENTO
2	Aguirre Cieza, Wilmer Huamán Flores, Rogelio	<b>Activo:</b> Tratamiento con Cal	23,894.10 m <sup>3</sup>
18	Medina Quispe, Ricardo	<b>Activo:</b> Tratamiento con cal Tratamiento con soda cáustica	75,286.23 m <sup>3</sup>
20	Montesinos León, Mayra	<b>Activo:</b> Tratamiento con cal	2,100, 023 m <sup>3</sup>
30	Rodríguez, Delgado y Millan	<b>Activo:</b> Neutralización convencional (lechada de cal o cal viva) Intercambio Iónico Osmosis Inversa Proceso de Lodo de alta densidad	72,258.08 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N° 08, los autores Aguirre Cieza et. All (2019, p. 16) Medina (2018, p.29), Montesinos (2017, p.22), Rodríguez (2016, p.34), con numeración 2, 18, 20, 29; describieron el sistema de tratamiento activo mediante la utilización de cal, el cual nos explicaron que se requiere de grandes áreas para su infraestructura, Así mismo, su presupuesto para la operación y mantenimiento es elevado, esto se debe a que es operación continua, pero se discute que su inversión es elevada pues esto implica el montaje de una planta de tratamiento químico con diversos equipos como tanques, clarificadores, bombas entre otros.

Y, por último, se pudo apreciar el los caudales de tratamiento se encuentra aproximadamente entre 2,100, 023 m<sup>3</sup> a 75,286.23 m<sup>3</sup>. Este tipo de tratamiento es muy utilizado en Sudamérica, por sus buenos resultados este tipo de tratamiento tiene una gran desventaja el cual es la generación de lodos que se presentan en el proceso ya que son almacenados en grandes pilas o balsas mineras cubiertas con geomembrana para evitar la filtración de los lodos al suelo.

**Tabla N° 09: Tratamiento activo mediante osmosis inversa**

N°	AUTORES	METODOLOGÍAS	CAUDAL DE TRATAMIENTO
30	Rodríguez, Delgado y Millan	<b>Activo:</b> Neutralización convencional Intercambio Iónico Osmosis Inversa	72,258.08 m <sup>3</sup>
38	Vera Luisa Nancy García	<b>Activo:</b> Tratamiento mediante membranas (Osmosis y Nanofiltración) Tratamiento mediante absorción (bagazo de caña)	10,256.02 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

Los autores que se describieron en la Tabla N° 09 como Rodríguez, Delgado, Millan (2016, p.66); con numeración 30; nos hicieron mención a otro tratamiento activo llamado osmosis inversa, en donde nos aclararon que este tratamiento se lleva utilizando hace bastante tiempo y es de eficacia para el tratamiento de aguas acidas de mina, a la vez nos definieron que el tratamiento se realiza mediante membranas semipermeables (permeable al disolvente y no a los solutos) y solventes de solución. En cambio; Vera Luisa, García Nancy (2018, p. 99); con numeración 38; describieron este tratamiento como un proceso de bioadsorción que tiene un costo inicial elevado con una duración de 10 años en la dureza de las membranas. Sin embargo, se discutió que el tratamiento mediante osmosis inversa tiene una deficiencia con las membranas durante el proceso de concentraciones, teniendo como desventaja que, al finalizar su vida útil estas generan un residuo el cual trae como consecuencia el ensuciamiento de las mismas durante la operación. En este sentido, este tratamiento es un proceso complicado y costoso comparado con otros métodos de tratamiento Y, por último, se pudo observar que el caudal tratado en este tratamiento oscila entre los 10,256.02 m<sup>3</sup> hasta los 72,258.08 m<sup>3</sup>.

**Tabla N° 10: Tratamiento activo mediante intercambio iónico**

N°	AUTORES	METODOLOGÍAS	CAUDAL DE TRATAMIENTO
23	Pabon S.E, Benítez R, et.	<b>Pasivo:</b> Filtración por membrana <b>Activo:</b> Intercambio iónico Adsorción Precipitación química	10,256.02 m <sup>3</sup>

30	Rodríguez, Delgado y Millan	<b>Activo:</b> Neutralización convencional (lechada de cal o cal viva) Intercambio Iónico Osmosis Inversa Proceso de Lodo de alta densidad	72,258.08 m <sup>3</sup>
37	Vecino X, Reig M, et all	<b>Activo:</b> Precipitación selectiva Intercambio Iónico	50.105,23 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N° 10 los autores Pabon S.E, Benítez R, et (2020, p.7); con numeración 23; hicieron referencia que el método de remoción de metales mediante el tratamiento de intercambio iónico es un proceso de separación física en el cual los iones intercambiados no tienen alguna modificación química, se observó que el caudal tratado de este tratamiento fue de 10,256.02 m<sup>3</sup>.

En cambio, Vecino X, Reig M, et all (2021, p.3,11); con numeración 37, nos indicaron que la separación de iones del metal fue mediante resinas macroporosas tales como Lewatit VP OC 1026 y Lewatit 207, realizándose experimentos por lotes para determinar la resina de extracción óptima para cada metal, tratando un caudal de 50.105,23 m<sup>3</sup>. Por ende, Rodríguez y Millan (2016, p.67-68); numeración 30; aplicó los sistemas de intercambio iónico para el tratamiento del DAM, explicando sobre los procesos desarrollados como el proceso Sul- bisul, el proceso modificado Desal y el proceso de dos Resinas, teniendo como caudal tratado 72,258.08 m<sup>3</sup>.



Sin embargo, a manera de discusión, si lo comparamos con el tratamiento con cal o el tratamiento de osmosis inversa; este presenta mayores ventajas debido a que la producción de lodos por intercambio iónico es mucho más baja, tendiendo a ser más selectivo y de una alta eficiencia en la remoción de iones metálicos en aguas acidas de mina, considerándose el más óptimo para la remoción de metales pesados en aguas acidas de mina.

**Tabla N° 11: Tratamiento activo mediante absorción**

<b>N°</b>	<b>AUTORES</b>	<b>METODOLOGÍAS</b>	<b>CAUDAL DE TRATAMIENTO</b>
16	Larraguibel Alfonso, Navarrete Alvalo, et all	<b>Activo:</b> Reemplazo de piedra caliza, con cáscaras de huevo y las conchas marinas	2,100.01 m <sup>3</sup>
21	Núñez Damaris	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica	71,282.23 m <sup>3</sup>
38	Vera Luisa Nancy García	<b>. Activo:</b> Tratamiento mediante membranas (Osmosis y Nanofiltración) Tratamiento mediante absorción (bagazo de caña)	10,256.02 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

Los autores que se mencionan en la Tabla N° 11 como Vera y García (2018, p. 97-100); numeración 38, hicieron referencia al tratamiento de absorción mediante el bagazo de caña de azúcar, en donde este actúa como bioadsorbente, siendo su procedimiento utilizar el lavado, secado y trituración del bagazo, en donde se determinaron las propiedades físicas y químicas de este mismo, teniendo como resultados en la remoción de metales un pH de 5 siendo los mejores valores de remoción para el plomo y cadmio, por lo que se trabaja a este valor.

Por el contrario; Larraguibel, Navarrete, et al. (2020, p.5-6); cuya numeración fue 16, reemplazó la piedra caliza, con cáscaras de huevo y conchas marinas (almejas y mejillones) debido a que estos poseen el carbonato de sodio, siendo un compuesto químico para la remoción de metales pesados, teniendo como resultado un rendimiento similar al de la piedra caliza, logrando así una eliminación casi completa de los metales como Fe, Al, Cu y Zn. Siendo la diferencia entre estos dos métodos el pH final del agua, obteniendo la piedra caliza 6.8 mientras que el tratamiento mediante la cascara de huevo y conchas marinas entre 7,1 a 7,3. Encontrándose dentro de los límites permitidos propuestos por la OMS (Organismo Mundial de la Salud). Por último, Núñez, Rodríguez et al. (2019, p.2-4); con numeración 21; nos explicó que se desarrollaron dos experimentos para las adsorciones de iones metálicos, reemplazando la piedra caliza con cascara de camarón, en donde la primera prueba con solución sintética, se obtuvo como resultado el pH 7, mientras que, en la segunda prueba con DAM natural, dio como resultado un pH entre 2 – 4.

Desde el punto de vista técnico estos tratamientos tales como osmosis inversa y el tratamiento de absorción dan buenos resultados de eliminación, pero con las membranas de ósmosis inversa se obtiene como resultados de rechazo elevados al 91%, lo que es muy

efectivo en la remoción de los metales en aguas acidas de mina.

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico, el cual fue, evaluar la eficiencia de las metodologías del tratamiento pasivo para la remoción de metales pesados de agua ácida de mina; considerando la numeración original de los autores descritos en la Tabla N° 02; fueron los siguientes:

**Tabla N° 12: Tratamiento pasivo mediante humedales artificiales**

N°	AUTORES	METODOLOGÍAS	CAUDAL DE TRATAMIENTO
8	Denegry Muñoz, Jerry Iannacone, José	<b>Pasivo:</b> Humedales artificiales Humedales aerobios Humedales anaerobios	15,256 m <sup>3</sup>
32	Sánchez José Ferreira Juan	<b>Pasivo:</b> Humedales Artificiales Aeróbicos Humedales Artificiales Anaeróbicos Drenajes anóxicos con calcáreos	50.326 m <sup>3</sup>
34	Skousen Jeff, Zipper Carl, et all	<b>Pasivo biológico:</b> Humedales aeróbicos, anaeróbicos y flujo vertical Biorreactores  <b>Pasivo geoquímico:</b> Drenajes de piedra caliza anóxica Canales de piedra caliza abiertos	53.563 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 12 los autores Denegri y Iannacone (2020, p.363); con numeración 8; nos explicaron que los tratamientos pasivos mediante humedales artificiales fueron muy eficaces para tratar el agua ácida de mina. Estos humedales se dividieron en anaerobio y aerobio, teniendo mejores resultados los anaerobios por la reducción de acidez y metales pesados. Este tratamiento fue utilizado en las empresas mineras Antamina, Yanacocha y Orcopampa, las cuales utilizan un caudal de 15,256 m<sup>3</sup> para su tratamiento.

Así mismo, Sánchez y Ferreyra (2016, p.33); con numeración 32; hicieron mención que los tratamientos pasivos fueron una gran opción para Sudamérica ya que dio solución a los problemas de agua ácida y no exigieron demasiado presupuesto para la operación, debido a que el caudal que utilizan es poco siendo de 50.326 m<sup>3</sup>. Este autor indicó que los humedales artificiales pueden funcionar óptimamente por mucho tiempo, sin embargo, existieron casos reportados que estos humedales pueden llegar a saturarse en 7 meses a causa de la continua precipitación de los metales.

Y, por último, Skousen, Cremallera, Rose, Ziemkiewicz, Nairn, McDonald y Kleinmann (2016, p.135-136); teniendo numeración 34; explicaron que los humedales artificiales (aerobio y anaerobio) fueron considerados como tratamientos pasivos, debido a que en estos se crearon ecosistemas diseñados para la precipitación de metales pesados y reducción de acidez. En los humedales aeróbicos si el agua no es alcalina se tiene que agregar piedra caliza para que no exista deficiencia en este tratamiento.

En consecuencia, en este tratamiento los hidróxidos de Fe y Mn se eliminan secuencialmente, pero la precipitación del Mn se da después de que todo el Fe se haya eliminado, principalmente este tratamiento se utiliza como parte final después de haber pasado por otros tipos de tratamientos. Este tratamiento funcionó correctamente

cuando el flujo y carga ácida es adecuado, a medida que este está funcionando se puede consumir el sustrato y llenar de (OH) generando deficiencia en el tratamiento, dando lugar a un mantenimiento y utilizando un caudal de 53.563 m<sup>3</sup>. En otras palabras, a manera de discusión, los humedales aerobios fueron adecuados para tratar netamente el agua alcalina, donde los metales como el Fe y Mn se oxidan y precipitan. Sin embargo, los humedales anaerobios pudieron tratar netamente el agua ácida por sus componentes y adiciones de piedra caliza, esto sirve para generar alcalinidad en las aguas.

**Tabla N° 13: Tratamiento pasivo mediante drenes anóxicos**

<b>N°</b>	<b>AUTORES</b>	<b>METODOLOGÍAS</b>	<b>CAUDAL DE TRATAMIENTO</b>
32	Sánchez José Ferreira Juan	<b>Pasivo:</b> Humedales Artificiales Aeróbicos Humedales Artificiales Anaeróbicos	50.326 m <sup>3</sup>
40	Zamora Echenique, Gerardo	<b>Pasivo:</b> Tratamiento de drenes anóxicos calizos	70,298.08 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

Los autores que se mencionaron en la Tabla N° 13 fueron Sánchez y Ferreira (2016, p.25); con numeración 32; estos nos explicaron que el tratamiento mediante drenes anoxicos se inició como un agregado a los humedales naturales y artificiales a medida de añadir alcalinidad debido a que el Fe precipita en condiciones aeróbicas. Este tratamiento sería de gran aporte en la investigación debido a que su costo es barato y pueden ser construidos en el interior de una mina aprovechando la salida del DAM, y a la vez la utilización de caudal es de 50.326 m<sup>3</sup>.

Entonces, Zamora Echenique, Gerardo (2017, p.59 - 60); con numeración 40; hace mención que el drenaje anóxico consiste en un lecho de piedra caliza enterrada, por la cual pasa una corriente de drenaje ácido en condiciones anóxicas, generando alcalinidad mediante la piedra caliza.

Por ende, se discute que este tratamiento es factible ya que el yeso que se forma en el DAC puede disminuir o bloquear la piedra caliza a la vez es de ventaja debido a que es sencillo de construir, mantener, sus impactos paisajísticas o visuales son escasos, muy resistente al clima severos. Y por último se utilizó un caudal de 70,298.08 m<sup>3</sup> para su tratamiento, siendo este muy óptimo y eficaz para minerías exploradas.

Y, por último, las diferencias que se pueden destacar entre los tratamientos pasivos y activos serían:

**Tabla N° 14: Comparación entre tratamiento activo y tratamiento pasivo**

<b>Características</b>	<b>Tratamiento pasivo</b>	<b>Tratamiento activo</b>
Costo de operación	Relativamente bajo	Relativamente alto
Requisito de mano de obra	Menos	Más
Área de tratamiento	Pequeño	Grande
Recuperación de metales	Difícil	Fácil
Control de sistema	Pobre	Bien
Previsibilidad de efluentes	Pobre	Bien

Se pudo analizar que el tratamiento pasivo en su costo de operación es relativamente bajo al tratamiento activo, ya que este, demanda más presupuesto a la empresa al tratar el caudal ácido de mina. También se puede decir, que el área a tratar en los tratamientos pasivos es pequeña debido a que no requieren mucho espacio las minas recién exploradas a diferencia del tratamiento activo que requieren un área grande a tratar ya que son utilizadas en las grandes minas. Y, por último, el caudal utilizado en los tratamientos pasivos es bajo, teniendo un aproximado de 2,100.01 m<sup>3</sup> a 10,345 m<sup>3</sup>, a comparación de los tratamientos activos que tienen un caudal estimado entre los 28,567.09 m<sup>3</sup> hasta aproximadamente 93,286.08 m<sup>3</sup>.

## V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la tesis son las siguientes:

- Después de analizar las metodologías de remoción de metales pesados en aguas acidas de mina, concluimos que existen dos tipos de tratamientos (tratamiento pasivo y tratamiento activo), estos son de importancia debido a que ayudan a mitigar los metales pesados existentes en las aguas acidas de mina.
- Los tratamientos activos idóneos de acuerdo al análisis de esta tesis son: mediante cal, mediante osmosis inversa, mediante intercambio iónico y mediante absorción.
- Los tratamientos pasivos idóneos para la remoción de metales pesados de agua acida de mina de acuerdo al análisis de la tesis son: el tratamiento pasivo mediante humedales artificiales, el tratamiento pasivo mediante humedales aeróbicos, el tratamiento pasivo mediante humedales anaeróbicos y el tratamiento pasivo mediante drenes anoxicos.
- El tratamiento más adecuado es el pasivo debido a que su costo de operación y mantenimiento son mínimos, por ende, este tratamiento es más eficaz ya que se utiliza en poco caudal y ayuda a minimizar el drenaje acido de mina.



## **VI. RECOMENDACIONES**

Las recomendaciones de la tesis son las siguientes:

- Se recomienda considerar el tratamiento pasivo para minería de pequeña escala, porque este tipo de tratamiento es el adecuado por la baja cantidad de caudal que generan este tipo de minería.
- En la minería de mediana y grande escala es recomendable optar por combinar estos dos tipos de tratamientos (pasivo y activo) para obtener mejores resultados en la remoción de metales pesados en las aguas acidas de mina.
- En sectores de las minas ya explotadas se recomienda tratar con humedales artificiales para evitar la filtración de residuos contaminantes a las aguas de mina y que estos generen residuos en el tratamiento del drenaje ácido de mina.

## REFERENCIAS

AGBOOLA, Oluranti. The role of membrane technology in acid mine water treatment: a review. Korean Journal of Chemical Engineering volúmen [en línea] vol.8, n.9, septiembre 2019. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.ebsco.com/article/10.1007/s11814-019-0302-2>  
ISSN 1389–1400

AGUIRRE, Wilmer; HUAMAN, Rogelio. Eficiencia del tratamiento del drenaje ácido de mina en la bocamina prosperidad con método químico empleando cal a nivel de laboratorio. Tesis (Bachiller en Ingeniería). Trujillo. Universidad Privada del Norte -2019 Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/15018>

AMABILIS, Leonel. Removal of mercury, chrome and lead by artificial wetlands inoculated with tolerant strains. Tecnología y Ciencias del agua [en línea] vol. 6, n.2, abril 2016. [Fecha de consulta: octubre del 2021]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000200002)  
ISSN 2007-2422

BOLAÑOS, Darío. Retention of heavy metals from mine tailings using Technosols prepared with native soils and nanoparticles. Heliyon [en línea] vol.24, n.2, julio 2021. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021017345>  
ISSN 5673-2340

BRANDAO, Talita et al. Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (Danio rerio) development. Chemosphere [en línea] vol.27, n.2, abril 2020. [Fecha de consulta: setiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.scopus.ncbi.nlm.nih.gov/32278191/>  
ISSN 0045-6535

BWAPWA. J.K. Bioremediation of acid mine drainage using algae strains: A review. South African Journal of Chemical Engineering [en línea] vol.24, n.2, diciembre 2017. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S102691851630035X>  
ISSN 5673-2340

CAVIEDES, Diego. Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad minera, empleando macrófitos neotropicales. Producción Limpia [en línea], vol.11, n 2, julio - diciembre 2016. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.ebsco.com/science/article/pii/S2666498420300168>  
ISSN 8765-4523

DENEGRY, Jerry, et al. Tratamiento de drenaje ácido de minas mediante humedales artificiales. Biotempo. [en línea], vol. 17, n. 2; agosto 2021. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.scielo/10.31381/biotempo.v17i2.3349>  
ISSN 1992-2159

DEVIA, Darkys et al. Utilización de microalgas de la división Chlorophyta en el tratamiento biológico de drenajes ácidos de minas de carbón. Revista colombiana biotecnología [en línea] vol.19, n.2, setiembre 2016. [Fecha de consulta: octubre de 2021]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012334752017000200095&script=sci\\_abstract&tIng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012334752017000200095&script=sci_abstract&tIng=es)  
ISSN 0123-3475.

EDZAI, Webster et al. Global Co-occurrence of Acid Mine Drainage and Organic Rich Industrial and Domestic Effluent: Biological sulfate reduction as a co-treatment-option. Journal of Water Process Engineering Production [en línea], vol.38, diciembre 2020. [Fecha de consulta: setiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2>  
ISSN 1016 -3450

FERNANDEZ, L. et al. Biological attenuation of arsenic and iron in a continuous flow bioreactor treating acid mine drainage (AMD). Water Research [en línea] vol.35, n.2, julio 2017. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.scopus.ncbi.nlm.nih.gov/28709104/>  
ISSN 0043-1354

GAMONAL, Priscilla. Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos Water Research [en línea] vol.35, n.2, julio 2017. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.pe/redlieds/recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/DAMhumedales.pdf>  
ISSN 0043-1354

HIDALGO, Natalia. Biosorción de plomo por biomasa de origen fúngico aislada a partir de desechos mineros de la Mina Hualilán, Argentina. Serie Correlación biológica [en línea], vol.36, n 1-2, junio 2020. [Fecha de consulta: octubre de 2021]. Disponible en: <https://www.scielo.com/science/article/pii/Sndjshbcjd66498jdhfubd168>  
ISSN 2389-4560

KEFENY, Kenede. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. Journal of Cleaner Production en línea], vol.151, n 4, mayo 2017. [Fecha de consulta: octubre de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617305164>  
ISSN 0959-6526

K. RAMBABU, FAWZI BANAT, Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. Environmental Science and Ecotechnology [en línea], vol.2, agosto - diciembre 2020. [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266648> ISSN 2666-4984

LARRAGUIBEL, Alfonso et al. Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO<sub>3</sub>-rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO<sub>3</sub>). Journal of Cleaner Production [en línea], vol.2, agosto - diciembre 2020. [Fecha de consulta: setiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.uchile.cl/handle/2250/179126>  
ISSN 0959-6526

LUIS, Ramón. Tratamiento físico-químico de aguas ácidas procedentes de dos minas de carbón: lobatera, estado Táchira, Venezuela. Revista Facultad de Ingeniería. [en línea], vol.283, n.3, noviembre del 2021 [Fecha de consulta: octubre del 2021]. Disponible en:  
[http://www.repositorioinstitucional.org.co/.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009](http://www.repositorioinstitucional.org.co/.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009)  
ISSN 7654-987X

MEDINA, Ricardo. Diseño y operatividad de la planta de neutralización de agua acidas de mina Paragsha Cerro de Pasco en Minera Volcán S.A.A. Tesis (Titulación en Ingeniería). Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín 2018. Disponible en:  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5907/IMmequrj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MOHAMMED, Ramy et al. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. Clean Water [en línea] vol. 36, n.2, julio 2021. [Fecha de consulta: setiembre de 2021]. Disponible en:  
<https://www.scielo.com/articles/s41545-021-00127-0>  
ISSN 0043-1354

MONTESINOS, Mayra. Caracterización de efluentes de mina para elección de la alternativa óptima de tratamiento. Tesis (Titulación en Ingeniería). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú 2017. Disponible en: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20500.12404/7885>

NUÑEZ, Damaris et al. Adsorption of heavy metals from coal acid mine drainage by shrimp Shell waste: Isotherm and continuous-flow studies. Journal of Environmental Chemical Engineering. [en línea], vol.7, n.3, agosto del 2018 [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343718307139>

ISSN 2213-3437

ORE, Franklin et al. Biosorción de pb (ii) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (zea mays). Revista de la Sociedad Química del Perú [en línea], vol.81, n.2, junio del 2016 [Fecha de consulta: octubre de 2021]. Disponible en:

[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2015000200005](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2015000200005)

ISSN 1810-634X

PABON, S.E. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción: Una revisión. Entre Ciencia e Ingeniería [en línea], vol.283, n.3, marzo del 2021 [Fecha de consulta: octubre del 2021]. Disponible en:

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009)

ISSN 6506-6108

PEREZ, Rocío. Remoción de cobre de aguas contaminadas empleando ramnolípidos. Revista Cubana de Química [en línea] vol. 32, n.3, septiembre a diciembre del 2020 [Fecha de consulta: noviembre del 2021]. Disponible en:

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S222454212020000300511](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222454212020000300511)

ISSN 2224-5421

POSTILA, Heini. Removal of metals from mine drainage waters by in situ mineral sorbent- based pilot filter systems. Journal of Environmental Management [en línea], vol.15, n.3, febrero del 2019 [Fecha de consulta:

octubre del 2021]. Disponible en:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03043864173077220/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03043864173077220)

ISSN 0301-4797

POZO, Antonio; PUENTE, Iván; LAGUELA, Susana. Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. Tecnología y ciencias del agua [en línea], vol.8, n.3, pp.75-91, marzo del 2017 [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en:

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2007-2422017000300075&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-2422017000300075&lng=es&nrm=iso)

ISSN 2007-2422

REZAI, Behnaz. Sustainable resolutions for environmental threat of the acid mine drainage. Science of the Total Environment [en línea], vol. 717, mayo 2020. [Fecha de consulta: setiembre de 2021]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972030721X>

ISSN 2345-9876

RIMARACHIN, Paolo. Tratamiento de aguas de efluentes mineros – metalúrgicos, utilizando métodos pasivos y activos en sistemas experimentales. Tesis (Titulación en Ingeniería). Trujillo. Universidad Nacional de Trujillo-2016 Disponible en:

<https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/4505>

RODRIGUEZ, Adriana, PACHECO, Nancy y CARDENAS, Juan. Bioadsorción de cromo (VI) en solución acuosa por la biomasa de amaranto. Avances en Ciencia e Ingeniería [en línea], vol.8, n°2, abril-junio 2017. [Fecha de consulta: mayo de 2021]. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652282002>

ISSN 0718-8706

RODRÍGUEZ, Lizeth, et al. Biorremediation of arsenic mediated by genetically modified microorganisms. Terra Latinoamérica [en línea], vol 35, n°4, octubre - diciembre 2017. [Fecha de consulta: noviembre del 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v35n4/2395-8030-tl-35-04-00353.pdf>  
ISSN 2395-8030

RODRÍGUEZ, M, HIDALGO, A y DELGADO, R. Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS). Ingeniería [en línea], vol 20, n°2, 27 de noviembre 2016. [Fecha de consulta: mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750928001.pdf>  
ISSN 1665-529x

SANCHEZ, José y FERREIRA, Juan. Drenajes ácidos de mina, alternativas de tratamiento. Medio Ambiente y Minería [en línea], n°1, octubre 2016.[Fecha de consulta: mayo de 2021]. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522016000100003&lang=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522016000100003&lang=es)  
ISSN 2519-5352

SIGNH, Shweta et al. Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India. Journal of Hazardous Materials. [en línea], vol.397, n.3, octubre 2020 [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420307081>  
ISSN 2340-2345

SKOUSEN, Jeff. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. Mine Water Environ. [en línea], vol.283, n.3, agosto del 2016 [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-016-0417-1>  
ISSN 6506-6108



TEJADA, Candelaria. Adsorption of heavy metals in wastewater using materials of biological origin. Revista Tecnológicas. [en línea] Vol. 8 Núm. 9 (2016): noviembre-diciembre. [Fecha de consulta: octubre de 2021]. Disponible en: <http://www.redalyc.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1998>  
ISSN 3456-1245

VASQUEZ, Escobar. Reactores Bioquímicos Pasivos: Una alternativa biotecnológica para la remediación de drenajes ácidos de mina. Colombiana de biotecnología [en línea] vol 22, n°2, julio-diciembre 2020. [Fecha de consulta: mayo de 2021]. Disponible en:  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-34752020000200053&lang=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752020000200053&lang=es)  
ISSN 0123-3475

VECINO, X. et al. Valorisation options for Zn and Cu recovery from metal influenced acid mine waters through selective precipitation and ion-exchange processes: promotion of on-site/off-site management options. Journal of Environmental Management. [en línea], vol.283, n.3, abril del 2021 [Fecha de consulta: agosto de 2021]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721000669>  
ISSN 2345-9873

VERA, Luisa, GARCÍA, Nancy; UGUÑA, María et al. Tecnologías de biosorción y membranas en la eliminación de metales pesados - Biosorption technologies and membranes in the removal of heavy metals. Tecnología y Ciencias del Agua [en línea] Vol. 9 Núm. 6 (2018): noviembre-diciembre. [Fecha de consulta: octubre de 2021]. Disponible en:  
<http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1998>  
ISSN 3456-1245

YIGIT, Exe et al. Optimization of arsenic removal from an acid mine drainage in an anaerobic membrane bioreactor. Environmental Technology & Innovation [en línea], vol.9, n.3, abril del 2021 [Fecha de consulta: octubre de 2021].

Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721000669>

ISSN 2345-9873

ZAMORA, Gerardo y MATA, Jenny. Estudio técnico de la recuperación de un producto comerciable de zinc mediante de sulfatación, drenaje anóxicocalizo y precipitación de las aguas ácidas de la mina de porco. Revista de Medio Ambiente y Minería [en línea], N° 2, junio 2017 [Fecha de consulta: abril del 2021]. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522017000100005&lang=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522017000100005&lang=es)

ISSN 2519-5352

**ANEXOS**

**ANEXO 01: Matriz de variables de estudio**

<b>MATRIZ DE VARIABLES DE ESTUDIO</b>					
<b>VARIABLE DE ESTUDIO</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>ESCALA DE NUMERACIÓN</b>
<b>Variable dependiente:</b> Métodos para la remoción de metales pesados	Son procedimientos para la eliminación de metales pesados en un cuerpo de agua	Tratamientos para la remoción de metales pesados	Monitoreo	Ambiental	Razón (valor numérico)
				Clasificación	Razón (agua)
				Resultados	Razón (magnitudes)
<b>Variable independiente:</b> Aguas ácidas de Mina	Las aguas ácidas son aquellas que se originan mediante la oxidación química y biológica del DAM	Contaminación de agua	Monitoreo	Ambiental	Razón (valor numérico)

**ANEXO 02:** Matriz de recolección de datos

<b>MATRIZ DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b>						
<b>Nº</b>	<b>AUTORES</b>	<b>TITULO</b>	<b>METODOLOGÍAS</b>	<b>REVISTA</b>	<b>BASE DE DATOS</b>	<b>AÑO</b>
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
.						
.						
40						

ANEXO 03: Matriz de Categorización Apriorística

**MATRIZ DE CATEGORIZACIÓN APRIORÍSTICA**

**Objetivo General: ¿Cuáles son los métodos de remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina?**

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CRITERIOS DE INCLUSIÓN	CRITERIOS DE EXCLUSIÓN
Identificar los metales pesados que existen en las aguas ácidas de mina	¿cuáles son los metales pesados que se encuentran en las aguas ácidas de mina?	Teoría	Caracterización de agua ácida de mina. Metales pesados en aguas ácidas de mina. Como se forma el agua ácida de mina	Solo artículos científicos. Artículos de revistas indexadas. Artículos de los últimos 5 años.	Libros, foros, conferencias, etc Artículos de revistas no indexadas Artículos publicados antes del 2015.
Identificar la ventaja y desventajas que pueden presentar las metodologías de remoción de metales pesados en agua ácida de mina.	¿cuáles son las ventajas y desventajas de las metodologías existentes para la remoción de tratamiento de agua ácida de mina?	Metodologías	Métodos pasivos, Métodos activos	Trabajos aplicados. Artículos disponibles.	Trabajos no aplicados Artículos no disponibles

**ANEXO 04:** Matriz de consistencia del diseño de ejecución

<b>MATRIZ DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO DE EJECUCIÓN</b>			
<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>POBLACIÓN - MUESTRA</b>	<b>TECNICAS E INSTRUMENTO</b>
<p>La investigación será de tipo básica de enfoque cualitativo. Esta investigación también es llamada “investigación empírica”, lo cual estos conocimientos se adquieren en lo aprendido por medio de la reflexión y la sistematización de la investigación. Al reflexionar y ver los resultados de la investigación, esta investigación se vuelve más rigurosa y sistemática para llegar a conocer el contexto. (Vargas, 2009, p. 5)</p>	<p>El diseño de investigación del trabajo de investigación será narrativo de tópicos porque recoge información, experiencias de autores de un tema específico. En este caso son las diferentes metodologías de remoción de metales pesados en las aguas ácidas de mina.</p>	<p>Son los que participaron en el proyecto de investigación. En nuestro caso, será el material recopilado por medio de la revisión sistemática, las revistas indexadas y/o científicas, estas se encuentran en diferentes plataformas como: SCOPUS, SCIEDIRECT, REDALYC, SCIELO desde el 2016 al 2021.</p>	<p>Las técnicas son procedimientos que permiten generar datos confiables y estos pueden ser utilizados como datos científicos. Los instrumentos para obtener los datos científicos son mediante la recopilación de datos de fuentes confiables, como las revistas científicas, indexadas siguientes criterios de inclusión y exclusión mencionados anteriormente.</p>

**ANEXO 05:** Metodologías de tratamiento en aguas acidas de mina

N°	AUTORES	TÍTULO	METODOLOGÍAS	REVISTA CIENTÍFICA	BASE DE DATOS	AÑO
1	Agboola, Oluranti	THE ROLE OF MEMBRANE TECHNOLOGY IN ACID MINE WATER TREATMENT: A REVIEW	<b>Activo:</b> Filtración por Membrana	Gale Academic OneFile	Ebsco	2019
2	Aguirre Cieza, Wilmer Huamán Flores, Rogelio	EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA BOCAMINA PROSPERIDAD CON MÉTODO QUÍMICO EMPLEANDO CAL A NIVEL DE LABORATORIO	<b>Activo:</b> Tratamiento con Cal	Repositorio de la UPN	Universidad Privada del Norte	2019

3	Amabilis, Leonel	REMOVAL OF MERCURY, CHROME AND LEAD BY ARTIFICIAL WETLANDS INOCULATED WITH TOLERANT STRAINS	<b>Pasivo:</b> Humedales artificiales	Tecnología y ciencias del agua	Scielo	2016
4	Bolaños Guerrón, Darío	RETENTION OF HEAVY METALS FROM MINE TAILINGS USING TECHNOSOLS PREPARED WITH NATIVE SOILS AND NANOPARTICLE	<b>Pasivo:</b> Mediante tecnosoles (suelos nativos y nanopartículas)	Heliyon	Science Direct	2021



5	Brandao Pereira, T., Batista dos Santos, K.	ACID MINE DRAINAGE (AMD) TREATMENT BY NEUTRALIZATION: EVALUATION OF PHYSICAL-CHEMICAL PERFORMANCE AND ECOTOXICOLOGICAL EFFECTS ON ZEBRAFISH (DANIO RERIO) DEVELOPMENT	<b>Activo:</b> Por neutralización	Quimiosfera	Scopus	2020
6	Bwapwa, T. Jaiyeola	BIOREMEDIATION OF ACID MINE DRAINAGE USING ALGAE STRAINS: A REVIEW	<b>Pasivo:</b> Fitorremediación con algas	South African Journal of Chemical Engineering	Science Direct	2017

7	Caviedes Rubio	REMOCIÓN DE METALES PESADOS COMÚNMENTE GENERADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA, EMPLEANDO MACRÓFITAS NEOTROPICALES	<b>Pasivo:</b> Mediante macrófitas neotropicales	Academic Search Complete	Ebsco	2016
8	Denegry Muñoz, Jerry Iannacone, José	TRATAMIENTO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES	<b>Pasivo:</b> Humedales artificiales Humedales aerobios Humedales anaerobios	Revista Biotiempo	Scielo	2020

9	Devia Torres Darkys, Cáceres Sepúlveda Sindy	UTILIZACIÓN DE MICROALGAS DE LA DIVISIÓN CHLOROPHYTA EN EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINAS DE CARBÓN	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante microalgas.	Revista Colombiana de Biotecnología	Scielo	2017
10	Edzai Websters, Shediran Craig, et all	GLOBAL CO- OCCURRENCE OF ACID MINE DRAINAGE AND ORGANIC RICH INDUSTRIAL AND DOMESTIC EFFLUENT: BIOLOGICAL SULFATE REDUCTION AS A CO- TREATMENT-OPTION	<b>Activo:</b> Filtración por Membrana Intercambio de Hierro <b>Pasivo:</b> humedales artificiales, biorreactores drenajes de piedra caliza.	Journal of Water Process Engineering	Science Direct	2020

11	Fernández Rojo, M. Hery, P. Le Pape, C. Braungardt c	BIOLOGICAL ATTENUATION OF ARSENIC AND IRON IN A CONTINUOUS FLOW BIOREACTOR TREATING ACID MINE DRAINAGE (AMD)	<b>Activo:</b> Biorreactor de flujo continuo	Water Research	Scopus	2017
12	Gamonal Pajares, Priscila	TRATAMIENTO DE DRENAJE DE ÁCIDOS DE MINAS EN HUMEDALES CONSTRUIDOS	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante humedales	Revista Biotiempo	Scielo	2018
13	Hidalgo Natalia	BIOSORCIÓN DE PLOMO POR BIOMASA DE ORIGEN FÚNGICO AISLADA A PARTIR DE DESECHOS MINEROS DE LA MINA HUALILAN, ARGENTINA	<b>Pasivo:</b> Mediante Biomasa	Serie correlación geológica	Scielo	2020

14	Kefeny, Kenede	ACID MINE DRAINAGE: PREVENTION, TREATMENT OPTIONS, AND RESOURCE RECOVERY: A REVIEW	<b>Activo:</b> Biorreactor de flujo continuo	Journal of Cleaner Production	Sciencedirect	2017
15	K. Rambabu, Banat Fawzi, et all.	BIOLOGICAL REMEDICATION OF ACID MINE DRAINAGE: REVIEW OF PAST TRENDS AND CURRENT OUTLOOK	<b>Biológica pasivo:</b> Inyección de sustrato orgánico Barreras reactivas Permeables. Camas de infiltración  <b>Biológicos activos:</b> Biorreactores Tecnologías de membrana Biorremediación a base de algas	Revista de Ciencias ambientales y ecotecnología	Sciencedirect	2020

16	Larraguibel Alfonso, Navarrete Alvalo, et all	EXPLORING SULFATE AND METALS REMOVAL FROM ANDEAN ACID MINE DRAINAGE USING CaCO <sub>3</sub> -RICH RESIDUES FROM AGRI-FOOD INDUSTRIES AND WITHERITE (BaCO <sub>3</sub> )	<b>Activo:</b> Reemplazo de piedra caliza, con cáscaras de huevo y las conchas marinas	Journal of cleaner Production	Science Direct	2020
17	Luis, Ramón	TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DE AGUAS ÁCIDAS PROCEDENTES DE DOS MINAS DE CARBÓN: LOBATERA, ESTADO TÁCHIRA, VENEZUELA	<b>Activo</b> Tratamiento mediante membranas	Revista Facultad de Ingeniería	Repositorio Institucional	2016
18	Medina Quispe, Ricardo	DISEÑO Y OPERATIVIDAD DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA PARAGSHA CERRO DE PASCO EN MINERA VOLCAN S.A.A.	<b>Activo:</b> Tratamiento con cal Tratamiento con soda cáustica	Repositorio Institucional UNSA	Universidad Nacional de San Agustín	2018

19	Mohammed, Ramy	REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM WASTEWATER: A COMPREHENSIVE AND CRITICAL REVIEW	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica	Clean Water	Scielo	2021
20	Montesinos León, Mayra	CARACTERIZACIÓN DE EFLUENTES DE MINA PARA ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA DE TRATAMIENTO	<b>Activo:</b> Tratamiento con cal	Repositorio Institucional PUCP	Pontificia Universidad Católica del Perú	2017
21	Núñez Damaris	ADSORPTION OF HEAVY METALS FROM COAL ACID MINE DRAINAGE BY SHRIMP SHELL WASTE: ISOTHERM AND CONTINUOUS-FLOW STUDIES	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica	Journal of Environmental Chemical Engineering	Sciencedirect	2019

22	Oré, Jiménez	BIOSORCIÓN DE PB (II) DE AGUAS RESIDUALES DE MINA USANDO EL MARLO DE MAÍZ (ZEA MAYS)	<b>Pasivo:</b> Mediante bioadsorción	Revista de la Sociedad Química del Perú	Scielo	2016
23	Pabon S.E, Benítez R, et al.	CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS, MÉTODOS DE ANÁLISIS Y TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN. UNA REVISIÓN	<b>Pasivo:</b> Filtración por membrana  <b>Activo:</b> Intercambio iónico Adsorción Precipitación química	Entre Ciencia e Ingeniería	Scielo	2020
24	Pérez, Rocío; et al.	REMOCIÓN DE COBRE DE AGUAS CONTAMINADAS EMPLEANDO RAMNOLÍPIDOS	<b>Activo</b> Tratamiento mediante ramnolípidos	Revista Cubana de Química	Scielo	2020



25	Postila, Heini	REMOVAL OF METALS FROM MINE DRAINAGE WATERS BY IN SITU MINERAL SORBENT-BASED PILOTFILTER SYSTEMS	<b>Activo:</b> Mediante Filtración	Journal of Environmental Management	Science Direct	2019
26	Pozo, Puente Iván Lagueta Susana Veiga María	TRATAMIENTO MICROBIANO DE AGUAS ÁCIDAS RESULTANTES DE LA ACTIVIDAD MINERA: UNA REVISIÓN	<b>Pasivo:</b> Inhibición bacteriana biológica Inhibición bacteriana por medio del uso de detergentes aniónicos Inhibición bacteriana por medio de la aplicación de vegetación	Revista de Tecnologías y Ciencias del Agua	Scielo	2017

27	Rezaie Behnaz, Austin Anderson	SUSTAINABLE RESOLUTIONS FOR ENVIRONMENTAL THREAT OF THE ACIDMINE DRAINAGE	<p><b>Activo:</b> piedra caliza/ cal hidróxido de sodio, carbonato de sodio magnesita</p> <p><b>Pasivo:</b> Humedales Aerobios y Anaerobios desagües anóxicos de piedra caliza</p>	Science of the Total Environment	Science Direct	2020
28	Rimarachín Varas, Paolo	TRATAMIENTO DE AGUAS DE EFLUENTES MINERO – METALÚRGICOS UTILIZANDO MÉTODOS PASIVOS EN SISTEMAS EXPERIMENTALES	<p><b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante humus Tratamiento mediante compost Tratamiento mediante membrana semipermeable natural</p>	Repositorio de la UNT	Universidad Nacional de Trujillo	2016

29	Rodríguez, Adriana	BIOADSORCIÓN DE CROMO (VI) EN SOLUCIÓN ACUOSA POR LA BIOMASA DE AMARANTO	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante microalgas	Avances en Ciencia y Tecnología	Redalyc	2017
30	Rodríguez, Delgado y Millan	DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA BASADO EN EL PROCESO DE LODOS DE ALTA DENSIDAD (HDS)	<b>Activo:</b> Neutralización convencional (lechada de cal o cal viva) Intercambio iónico Osmosis Inversa Proceso de Lodo de alta densidad	Revista Académica Ingeniería	Redalyc	2016
31	Rodríguez, Lizeth, et al.	BIORREMEDIATION OF ARSENIC MEDIATED BY GENETICALLY MODIFIED MICROORGANISMS	<b>Pasivo:</b> Tratamiento mediante microorganismos	Terra Latinoamérica	Scielo	2017

32	Sánchez José Ferreira Juan.	DRENAJES ÁCIDOS DE MINA: ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	<b>Pasivo:</b> Humedales Artificiales Aeróbicos Humedales Artificiales Anaeróbicos Drenajes anóxicos con calcáreos	Revista de Medio Ambiente y Minería	Scielo	2016
33	Singh	PERFORMANCE OF ORGANIC SUBSTRATE AMENDED CONSTRUCTED WETLAND TREATING ACID MINE DRAINAGE (AMD) OF NORTH- EASTERN INDIA	<b>Pasivo:</b> Humedales Artificiales	Journal of Hazardous Materials	Science Direct	2020

34	Skousen Jeff, Zipper Carl, et all	REVIEW OF PASSIVE SYSTEMS FOR ACID MINE DRAINAGE TREATMENT	<b>Pasivo biológico:</b> Humedales aeróbicos, anaeróbicos y flujo vertical Biorreactores  <b>Pasivo  geoquímico:</b> Drenajes de piedra caliza anóxica  Canales de piedra caliza abiertos	Mine Water and the Environment	Springerlink	2016
35	Tejada, Candelaria	ADSORPTION OF HEAVY METALS IN WASTEWATER USING MATERIALS OF BIOLOGICAL ORIGIN	<b>Activo:</b> Bioadsorción mediante material biológico	Revista Tecnológicas	Redalyc	2016
36	Vásquez Y Escobar M.	REACTORES BIOQUÍMICOS PASIVOS: UNA ALTERNATIVA BIOTECNOLÓGICA PARA LA REMEDIACIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA	<b>Pasivo:</b> Reactores bioquímicos pasivos.	Revista Colombiana de Biotecnología	Scielo	2020

37	Vecino X, Reig M, et all	VALORISATION OPTIONS FOR ZN AND CU RECOVERY FROM METAL INFLUENCED ACID MINE WATERS THROUGH SELECTIVE PRECIPITATION AND ION-EXCHANGE PROCESSES: PROMOTION OF ON-SITE/OFF-SITE MANAGEMENT OPTIONS	<b>Activo:</b> Precipitación selectiva Intercambio iónico	Journal of Environmental Management	Science Direct	2021
38	Vera Luisa Nancy García	TECNOLOGÍAS DE BIOSORCIÓN Y MEMBRANAS EN LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS	<b>Activo:</b> Tratamiento mediante membranas (Osmosis y Nanofiltración) Tratamiento mediante absorción (bagazo de caña)	Revista de Tecnologías y Ciencias del Agua	IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)	2018

39	Yigit Ece	OPTIMIZATION OF ARSENIC REMOVAL FROM AN ACID MINE DRAINAGE IN AN ANAEROBIC MEMBRANE BIOREACTOR	<b>Activo:</b> biorreactor de membrana anaeróbica	Sciencedirect Environmental Technology & Innovation Journal	Science Direct	2020
40	Zamora Echenique, Gerardo	ESTUDIO TÉCNICO DE LA RECUPERACIÓN DE UN PRODUCTO COMERCIALIZABLE DE ZINC MEDIANTE DESULFATACIÓN, DREN ANÓXICO CALIZO Y PRECIPITACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE LA MINA DE PORCO	<b>Pasivo:</b> Tratamiento de drenes anóxicos calizos	Revista de Medio Ambiente y Minería	Scielo	2017

## ANEXO 06: ECA y LMP para aguas acidas de mina

### NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS

PARAMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
ph	Mayor que 6 y Menor que 9	Mayor que 6 y Menor que 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25
Plomo (mg/l)	0.4	0.2
Cobre (mg/l)	1.0	0.3
Zinc (mg/l)	3.0	1.0
Fierro (mg/l)	2.0	1.0
Arsénico (mg/l)	1.0	0.5
Cianuro total (mg/l) *	1.0	1.0

### Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Rios		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(µS/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>2</sub> )	mg/L	5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L	2,56	2,56	2,56	5,8	5,8
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO <sub>3</sub> ) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoniaco Total (NH <sub>4</sub> )	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
<b>INORGÁNICOS</b>						
Antimonio	mg/L	0,64	0,64	0,64	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,036	0,036
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0088	0,0088
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0082	0,0082
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0081	0,0081
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081





**Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, CELIS VELASQUEZ ESTEFANY GERALDINE, MEDINA PINILLOS JOSE ORLANDO estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "REVISIÓN SISTEMÁTICA DE METODOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS ÁCIDAS DE MINA", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

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

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

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
CELIS VELASQUEZ ESTEFANY GERALDINE <b>DNI:</b> 70248192 <b>ORCID</b> 0000-0003-0757-0500	Firmado digitalmente por: ECELISV el 18-12-2021 14:34:45
MEDINA PINILLOS JOSE ORLANDO <b>DNI:</b> 71510301 <b>ORCID</b> 0000-0001-9077-017X	Firmado digitalmente por: JMEDINAP el 17-12-2021 21:10:13

Código documento Trilce: INV - 0568308