

# FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE  
Ingeniería de Minas

“TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS CON  
HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA  
PRECIPITACIÓN DE METALES PESADOS EN LA  
MINA ARTESANAL EL TINGO DE HUALGAYOC,  
2025”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Etelvina Castrejon Huaman  
Raquel Araceli Ruiton Lopez

Asesor:

Ing. Danny Daniel Valderrama Gutierrez  
Código ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-6810-8910>

Cajamarca - Perú

**JURADO EVALUADOR**

Jurado 1 Presidente(a)	<b>JAIRO PINEDO TAQUIA</b>
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	<b>JUAN MIGUEL DE LA TORRE OSTOS</b>
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	<b>DANNY DANIEL VALDERRAMA GUTIERREZ</b>
	Nombre y Apellidos

## Informe de Similitud



Página 2 of 63 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3308806041




### 14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

#### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

#### Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

#### Marcas de integridad

##### N.º de alerta de integridad para revisión

- ▶ **Texto oculto**  
465 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Página 2 of 63 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3308806041

## DEDICATORIA

Dedico especialmente a mis queridos padres por haberme formado con buenos valores dándome palabras de aliento de amor y sabiduría para poder cumplir mis metas, este nuevo logro es gracias a ellos que estoy logrando concluir con éxito un proyecto que al principio pareció ser difícil, con el esfuerzo y responsabilidad se está logrando el deseo de triunfar y ser una buena profesional.

Etelvina Castrejon

Dedico de una manera muy especial a mis padres que con esfuerzo y dedicación me han brindado los valores para formarme con buenos hábitos y valores para hacer de mí una mejor persona, a mi pareja que me brindó su apoyo, amor, comprensión y a mi hija Aitana que fue la principal razón que me impulsó a seguir adelante para hacer realidad esta meta.

Raquel Ruiton

## **AGRADECIMIENTO**

El principal agradecimiento a Dios quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir adelante y darme sabiduría para mejorar día a día en mi vida profesional; a mis padres y mi hermano quienes me motivaron y me dieron su apoyo a lo largo de mi carrera profesional al mismo tiempo quiero agradecer a mi asesor por el gran esfuerzo y dedicación que me apoyó para poder lograr la realización de este trabajo.

Etelvina Castrejon

A mi padre y madre por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, gracias a ellos por apoyarme en mi educación y crecimiento profesional. También a mi compañero y padre de mi hija, tu amor, apoyo y paciencia han sido la base para seguir adelante y no rendirme, al resto de mi familia que de una u otra manera siempre me impulsaron a terminar mi carrera profesional, asimismo a mi asesor por la ayuda y orientación que me brindó para la realización de esta tesis.

Raquel Ruiton

## TABLA DE CONTENIDO

Jurado Evaluador .....	2
Dedicatoria .....	4
Agradecimiento .....	5
Tabla De Contenido .....	6
Índice De Tablas .....	7
Índice De Figuras .....	8
Resumen.....	9
Capítulo I: Introducción.....	10
Capítulo II: Metodología.....	28
Capítulo III: Resultados .....	37
Capítulo IV: Discusión Y Conclusiones .....	47
Referencias.....	52
Anexos .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineras.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. Matriz de consistencia.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua ácida y su comparación con los LMP....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4. Variación del pH en función de la distancia recorrida por el agua ácida en el humedal .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5. Variación de la concentración de Fe en función de la distancia recorrida por el agua ácida en el humedal.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6. Variación de la concentración de Mn en función de la distancia recorrida por el agua ácida en el humedal.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7. Valores promedios de pH y concentraciones de Fe y Mn.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 8. Eficiencia de la variación del pH.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 9. Eficiencia de la precipitación de Fe.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 10. Eficiencia de la precipitación de Mn.....</i>	<i>46</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura1. Diseño no experimental para el tratamiento del agua ácida con los humedales artificiales .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura2. Instalación de los sustratos en el humedal artificial.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura3. Esquema general del sistema de tratamiento con humedales artificiales.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura4. Diseño de las celdas para el tratamiento.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura5. Esquema del recorrido serpenteante del agua en las celdas .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura6. Diseño en 3D del sistema de tratamiento con humedales artificiales .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura7. Porcentaje de medición de pH .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura8. Porcentaje de medición de Fe. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura9. Porcentaje de medición de Mn.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 10. Valores promedios de pH, Fe, Mn .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura11. Eficiencia de variación de pH.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 12. Eficiencia de precipitación de Fe.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 13. Eficiencia de precipitación de Mn.....</i>	<i>46</i>

## RESUMEN

La presente investigación tuvo el objetivo de desarrollar un tratamiento de aguas ácidas con humedales artificiales para precipitar los metales pesados de la mina artesanal El Tingo de Hualgayoc. Según el enfoque, el estudio es cuantitativo. Es del tipo aplicada con diseño transversal. La población de investigación es el agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc. Para la muestra se tomaron 100 litros de agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, volumen calculado en función de la cantidad necesaria del caudal de tratamiento. Las técnicas utilizadas fueron la observación directa y el análisis documental. Se construyó un humedal artificial a nivel laboratorio tipo SAPS con un recorrido de 5.50 metros que permitió una mayor superficie de contacto entre el agua y el sustrato formado por roca caliza, sustrato orgánico (compost) y la planta totora. Los resultados obtenidos indican que los parámetros fisicoquímicos pH, Fe y Mn del agua ácida de la mina artesanal El Tingo, han excedido el límite máximo permisible (LMP) correspondiente a la descarga de efluentes líquidos de actividades mineros – metalúrgicas (DS N° 010-2010-MINAM). El tratamiento de aguas ácidas con humedal artificial con el Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS) precipita los metales Hierro y Manganeseo a un 99.86 % y 99.74% respectivamente, cuando el agua ácida recorre por el humedal artificial con un caudal de 1 litro/hora hasta los 5.52 m de recorrido del humedal. Con el SAPS se logró incrementar el pH del agua ácida desde 2.03 hasta 7.73, cumpliendo con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. N° 010-2010-MINAM.

**PALABRAS CLAVES:** Tratamiento pasivo, humedal, aerobio, anaerobio, SAPS, LMP.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Uno de los principales problemas de contaminación ambiental a nivel mundial en la actualidad, es el vertido de las aguas ácidas resultantes de la explotación de los recursos mineros por el método a tajo abierto y subterráneo. Estas aguas ácidas llamadas también aguas residuales ácidas son tóxicas por su bajo pH y porque contienen altas concentraciones de metales pesados disueltos, que pueden persistir durante varios años si no se tratan antes de ser vertidos a fuentes naturales como acequias, lagunas, ríos, canales naturales, etc. (Vargas, 2021).

China, Estados Unidos, Rusia, Sudáfrica y Australia, son los países donde se realizan la mayor parte de actividades mineras y es allí donde el agua es afectada gravemente por los procesos naturales y metalúrgicos. Varios procesos requieren gran cantidad de agua y los desechos mineros, como los relaves y el agua ácida de las minas, contribuyen a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Abinandan et al., 2018).

Tal es el caso lo ocurrido con el río Spree en Alemania, donde la oxidación de minerales sulfurados genera drenajes ácidos de mina, que contienen elementos altamente tóxicos, que contaminan el agua. La necesidad de realizar un tratamiento a estas aguas ácidas ha implicado el desarrollo de tecnologías de control, como el uso de medidas microbiológicas, porque es menos dañina para el medio ambiente, al estar presentes en el mismo y no conlleva la adición de agentes artificiales. Además, para el tratamiento de aguas ácidas, se pueden utilizar también los humedales artificiales para precipitar los metales pesados, que se pueden encontrar también en los pasivos ambientales mineros, cuando no se realiza una adecuada remediación (Pozo, et al. 2017).

Según (Chaparro, 2015), en su trabajo de investigación de la Universidad de Canadá, titulado “Formation and Management of Acid Mine Drainage”, su objetivo fue analizar el proceso de formación del DAM, ver medidas de control y preventivas, además de ver los tipos de tratamientos, señala que, uno de los principales impactos en la minería, es la esorrentía de aguas ácidas de mina resultante de la oxidación de los sulfuros metálicos que una vez formado el proceso de formación se vuelve cíclico. Así el problema del agua ácida de mina o drenaje ácido de mina (DAM), se ha estudiado recientemente y, debido a que las operaciones mineras han existido durante más de un siglo, el DAM contamina el agua en grandes áreas en países como Estados Unidos, Australia, y Canadá. Actualmente existen diversas tecnologías para el tratamiento de drenajes ácidos, que se dividen en activos y pasivos (pág. 55).

En el 2017, los datos demuestran que el Perú es un importante actor mundial en la producción de metales, sin embargo, las actividades mineras, en diferentes ciudades, han estado acompañadas de numerosas minas abandonadas, en dónde no hubo remediación inmediata y provocaron la aparición de Pasivos Ambientales Mineros PAM (Chappuis, 2019).

La minería moderna en el Perú produce agua ácida de mina, creando potenciales conflictos sociales y ecológicos. La fuente de esta agua proviene de depósitos con características geológicas y mineralógicas complejas, incluyendo a la piritita como el principal mineral de ganga formador de DAM.

Las aguas ácidas de mina se encuentran también en los pasivos ambientales mineros (PAM) y continúan dañando al medio ambiente porque no son remediados. La Dirección General de Minería (DGM) es el responsable de actualizar el inventario de estos pasivos. Según el inventario de PAM, que se publicó en el 2020, se identificaron 4831 PAM que se encuentran sin gestión, lo que representa el 60,7% del total de los PAM. (Castillo, et al. 2021, p.32).

En el distrito de Quiulacocha, departamento de Pasco en Perú, a partir de 1930, las empresas Cooper Corporation y Centromin comenzaron a operar en el lugar por largos períodos de tiempo, descargando sus residuos, sin tratamiento en las zonas aledañas a la Laguna de Quiulacocha, afectando la flora y fauna, así como a la población local. Los residuos de Quiulacocha cubren una superficie de 114 hectáreas, equivalente a un volumen de 79 toneladas, conteniendo 50% de pirita en peso. Con el paso de los años, estos residuos han ingresado a la laguna de Quiulacocha (actualmente pH 2.3) creando altas concentraciones de  $\text{Fe}^{+3}$  (Dold et al., 2009). El hierro (III) es uno de los principales contaminantes, caracterizado por su susceptibilidad a la oxidación y alta inestabilidad en ambientes oxigenados (Schippers, 2007). Asimismo, los sulfatos presentes en estas aguas ácidas tienen una alta solubilidad y estabilidad que dificulta su eliminación, convirtiéndose en una importante fuente de toxicidad para los organismos vivos (Mamelkina et al., 2017).

Hualgayoc es un pueblo minero en el Perú, tiene una de las heridas que faltan por sanar en la difícil relación entre la industria minera y los cajamarquinos. En esta provincia existen 1.237 residuos ambientales (presas de desechos, hidratantes, instalaciones abandonadas) que contienen oro y cobre que, aunque abandonados hace más de 20 años, continúan contaminando las pequeñas fuentes de agua que benefician a aproximadamente 16.000 habitantes y el impresionante paisaje circundante en la comunidad, ubicada a dos horas y media de Cajamarca (Diario El Comercio, 2012).

La agencia SERVINDI, el 15 de mayo de 2016, anunció que las organizaciones sociales de Bambamarca, en la provincia de Hualgayoc, iniciarán un paro indefinido el lunes 16 de mayo para exigir el resarcimiento de sus responsabilidades ambientales que existen en la cabecera de la cuenca para detener la expansión minera y descontaminar los ríos Tingo-Maygasbamba y Hualgayoc-Arascorgue (Noticias SER, 2015).

En la mina artesanal El Tingo de Hualgayoc, se extrae minerales sulfurados de cobre, plomo y zinc, que son transportados y comercializados en el Parque Industrial de la ciudad de Trujillo. Los mineros artesanales realizan en cancha, el escogido de estos minerales comerciales, separándolo de la pirita. Luego este mineral que no tiene valor comercial queda expuesto en las escombreras y cuando llueve en la zona, se genera agua ácida y también del interior de la mina se genera otro volumen significativo de agua ácida cuya única salida es hacia el río Tingo Maygasbamba; Por otro lado, al no existir un manejo y control adecuado desde el momento de la extracción, es de suma importancia realizar la caracterización fisicoquímica del agua que se genera de las actividades mineras para ver su grado de toxicidad y luego emplear un método de tratamiento pasivo con caliza y la flora existente en la zona, cuyos resultados se compararán con el límite máximo permisible (LMP) para confirmar el nivel de contaminación de estas aguas y proponer medidas de prevención antes de ser evacuadas al río Tingo Maygasbamba-Hualgayoc.

(Santos, 2015) menciona que hay dos tipos de tratamientos de aguas o drenaje ácidos de mina (DAM), los tratamientos activos y los tratamientos pasivos. Los métodos convencionales o activos tienen un alto costo por lo que demandan el uso de infraestructuras metálicas, motores, reactivos químicos y no se les puede dar un mantenimiento durante un largo período de tiempo una vez que se termine la vida de la mina. Entre los métodos pasivos más utilizados y de particular interés son los humedales aerobios y anaerobios, los drenajes anóxicos calizos (ALD) los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS) y las barreras reactivas permeables (PRB).

Para la clasificación de los sistemas de tratamiento pasivo, tenemos tratamientos en base química y base biológica, las dos bases se dan en condiciones anaeróbicas y aeróbicas, en la base química está el proceso de neutralización por disolución de caliza, donde la técnica es

“Drenaje anóxico calizo” (ALD), que intercepta y neutraliza los flujos del drenaje ácido de mina, las otras técnicas son los canales abiertos calizos, pozas calizas, etc. Y para la base biológica los procesos son oxidación e hidrólisis catalizada por bacterias, donde la técnica es Wetlands aeróbicos, para la reducción bacteriana del sulfato, la técnica es Wetlands anaeróbicos y pozas orgánicas biorreactores, en los sistemas mixtos se tiene la condición aeróbica, donde el proceso es la reducción bacteriana del sulfato y la neutralización/oxidación química con la técnica de sistemas de producción sucesiva de alcalinidad (Beltrán, 2018, pp. 1-2).

Los **tratamientos pasivos** no necesitan sustancias químicas, solo control y monitoreo, los que se encuentran son los humedales artificiales, los drenajes anóxicos en calizas, que ya han sido mencionados, los productores continuos de alcalinidad, las piletas de caliza, los canales de caliza, barreras reactivas permeables y el tratamiento de arena calcárea. Respecto a los humedales artificiales anaeróbicos se menciona que cerca de un 85 % del hierro ((Fe), proveniente de los drenajes ácidos de mina puede ser retenido en el fondo y a veces se puede observar en los tallos de las especies que se plantan (Sanchez y Ferreira, 2016).

Como **tratamiento de aguas ácidas y residuales** se encuentran los humedales artificiales, que en Ecuador se han utilizado para las aguas residuales de una refinería de petróleo, siendo eficiente este tratamiento para atrapar y procesar los agentes contaminantes que se vierten en los humedales, los cuales provenían de agua residual industrial, al aplicar este tratamiento se tiene una buena remoción de los contaminantes, siendo económicamente sostenible (Padilla, Ortiz y Estupiñán, 2021). Además, los humedales artificiales se diseñan con elementos naturales como plantas y rocas que están presentes en el medio ambiente.

Los **antecedentes** que se han considerado para la investigación a **nivel internacional**, en Colombia, Galván (2016) realizó un estudio con el objetivo de determinar las características óptimas de un humedal artificial para remover metales como el Zn y el Pb, con el fin de solucionar el problema del drenaje ácido de la minería en Colombia. Para tal fin empleó la especie vegetal "*Phragmites australis*", conocida como Carrizo e implementó en 3 tipos diferentes de flujos de agua ácida en el humedal: Los flujos subsuperficiales vertical y horizontal y un flujo superficial. Teniendo por resultados, la remoción de Pb en un 98% en el flujo subsuperficial vertical, un 82% en el flujo subsuperficial horizontal y del 94.33% en un flujo superficial. Y el Zn, alcanzan una remoción de 97% en el flujo subsuperficial vertical, 77.5% en el flujo subsuperficial horizontal y 82% en el flujo superficial. Se concluye que lo óptimo es utilizar un humedal artificial con un flujo subsuperficial vertical de agua ácida, donde se evidencia la gran capacidad de adsorción de metales de la planta carrizo.

En Indonesia, Sekarjannah et al. al (2019), ejecutaron un estudio cuyo objetivo fue determinar la mezcla ideal en materia orgánica y el tiempo de recorrido, al remediar el agua ácida de mina empleando el tratamiento pasivo con humedal artificial a través de plantas de "*Eichornia crassipes*" conocido como jacinto de agua. La investigación demostró que al adicionar la materia orgánica tuvo un aumento considerable del pH y se redujo la concentración de Mn y Fe, asimismo se logró obtener porcentajes de remoción de estos metales del 96.71% y 96.52% respectivamente; así de esta manera se concluye que al adicionar la materia orgánica ayuda notablemente en el tratamiento del agua ácida de mina con humedales artificiales.

En la India, Singh y Chakraborty (2020) realizaron una investigación con el propósito de demostrar la efectividad de un sistema de tratamiento artificial basado en humedales para remediar los sistemas de agua ácida de mina que contienen los siguientes metales pesados.

Utilizando métodos experimentales, el sistema de humedal artificial se construyó sobre suelo rico en materia orgánica (estiércol de vaca y humus de bambú); asimismo, se utilizó la especie vegetal *Typha latifolia* (totora común). La investigación se concluye que la remoción de metales pesados es: Cr (99.7%), Ni (97.8%), Co (93.7%), Fe (91.6%) y Al (59.7%), de los cuales la remoción de cromo metálico es la más efectiva. Asimismo, se concluye que el tratamiento del agua ácida con humedales artificiales desplegados con especies de *Typha latifolia*, combinados con sustratos ricos en materia orgánica, constituyen una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales que contienen trazas de metales pesados.

A **nivel nacional**, en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín; Sucari (2022), realizó una investigación cuyo objetivo fue evaluar la capacidad para remover los metales pesados en el agua ácida, mediante un tratamiento pasivo utilizando un humedal artificial tipo wetland con dos especies vegetales "*Scirpus californicus*" conocida como Tatora y "*Festuca dolichophylla*" conocida como Ichu. Para el enfoque de la prueba, se instalaron 2 humedales artificiales, los cuales contenía una especie de planta diferente; de igual forma se tomaron muestras de la poza de bombeo de la empresa minera Austria. Dichas muestras han sido analizadas en un laboratorio químico y sus resultados indicaron valores que superan al límite máximo permisible (LMP); para pH (4.6), As (1.5 mg/L.), Cd (0.27 mg/L.), Cu (3.49 mg/L.), Fe soluble (3.79 mg/L.), Pb (2.56 mg/L.), y Zn (6.21 mg/L.). Luego cada uno fue tratado por el humedal artificial que contenía Tatora; éste es el resultado obtenido; pH de 6.41, As Total (0,008 mg/L.), Cd Total (0,0035 mg/L.), Cu Total (0,1165 mg/L.), Fe disuelto (0,075 mg/L.), Pb Total (0,08 mg/L.) y Zn total (1,1805 mg/L.). Y para la planta de "Ichu", los resultados fueron los siguientes: pH (6.15), As (0.008 mg/L.), Cd Total (0.008 mg/L.), Cobre Total (0.1845 mg/L.), soluble Fe (1,85 mg/L.), Pb Total (0,15 mg/L.) y Zn Total (2,2665 mg/L.). La investigación concluye que ambas plantas tienen la capacidad de remover metales

pesados, siendo efectivas y por lo tanto es factible para ser implementada en el tratamiento de aguas ácidas que contienen trazas de metales pesados, logrando obtener resultados por debajo del valor máximo permisible (LMP) establecido por la Normativa Peruana.

En la ciudad de Lima, López (2018) en su investigación tuvo por objetivo conocer el efecto que causa la aplicación de métodos pasivos en el tratamiento de aguas ácidas de la mina Coricancha en Huarochirí, mediante humedales artificiales; siendo una opción económica y sostenible para el tratamiento de aguas ácidas. La metodología que utilizó, fue hacer pruebas experimentales, por esta razón se recolectaron muestras de agua ácida para tratar que fueron llevadas al Laboratorio Químico de Nyrstar Coricancha S.A. obteniéndose valores cuantitativos y cualitativos, obteniendo un efluente de una mejor calidad a un costo menor, con un efecto positivo en la empresa y en la ciudad, con valores que no exceden los límites máximos permisibles, en los que tenemos un pH de 6-9, para el Cu 0.5 mg/L, para el Pb 0.2 mg/L, para el Zn 1.5 mg/L, el As 0.1 mg/L y NaCN 1.0 mg/L, además se disminuyó el costo de operación en un 51.95 %.

Pulcha y Valencia (2019) en su tesis nos comentan que investigaron los humedales artificiales para comprobar si puede disminuir los niveles de concentración de los contaminantes eco tóxicos, en los que se encuentran los nitratos y el amonio de aguas residuales de una operación minera, para lo cual construyeron un sistema artificial de flujo sub superficial, en el cual se probaron especies vegetales como totora y carrizo, siendo parte del humedal artificial, utilizando materiales filtrantes como tierra, piedra, arena y grava. Después de que estas aguas residuales que contienen cobre, zinc y plomo fueran tratadas en estos humedales artificiales, sus niveles de concentración disminuyeron, siendo la especie vegetal carrizo la que depuró más el zinc, llegando a un 77.30% y la especie vegetal totora el cobre. El amonio

alcanzó una remoción de 90%, y en el último día de tratamiento el nitrato alcanzó 91.5% en ambas especies.

Los humedales artificiales han demostrado ser un buen tratamiento pasivo para el DAM, pero es importante tener en cuenta ciertas características como la dimensión, el diseño, y elegir la planta o de la bacteria y las condiciones del clima para aplicar este tratamiento pasivo, siendo el humedal anaerobio, el más eficiente para reducir la acidez del agua y de los metales pesados. Estos humedales artificiales o wetlands han sido usados en diferentes minas del mundo y del Perú, en donde se han visto resultados favorables respecto a que metales tóxicos han bajado su concentración en más de un 90% en metales como el As, Fe, Cu, entre otros y el pH se ha elevado de 3 hasta cerca de 8. En el Perú, entre las empresas mineras que emplean humedales construidos, tenemos a la empresa minera Antamina, que tiene un programa con el uso de humedales artificiales, la Compañía de Minas Buenaventura también tiene tratamientos pasivos de los efluentes de las unidades de producción de Orcopampa y de Uchucchacua ubicada en Arequipa y en el departamento de Lima, respectivamente (Denegri y Iannacone, 2020).

Otro ejemplo de aplicación en el que se implementó el humedal aerobio o wetland fue en el sector Bramadero de la unidad minera La Zanja, utilizando dos especies, las cuales son la *Carex spp* (junco) y las *Typhas spp*, debido a que se propagan rápidamente y se adaptan a los sistemas de tratamiento pasivo, posteriormente se debe seguir un plan de monitoreo para ver la calidad del agua al ingreso y salida, empleándose monitoreo biológico y de sedimentos, por último comprobar la cantidad de remoción de metales (Jurado, 2016).

Así también, en La Libertad, se menciona el uso de este tratamiento pasivo, en el artículo “Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la mina

Barrick”, en el cual se analizó la utilidad del humedal artificial para tratar las aguas residuales domésticas para aminorar el impacto en la empresa minera Barrick. Tomándose como muestra el efluente de entrada y salida del humedal, determinándose la concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Suspendedos Totales, Coliformes fecales y totales, pH, Temperatura y Oxígeno disuelto, y el tiempo de retención en días. De los cuales determinaron la remoción, y “se concluye que los humedales artificiales son eficientes en la remoción de contaminantes e incrementan el oxígeno disuelto” (Minchola y Gonzalez, 2013).

En Cajamarca se investigó sobre un sistema piloto de fitorremediación empleando especies vegetales como “*Typha spp*” conocida como Totora, “*Cortaderia selloana*” conocida como Pasto de pampas y “*Eichhornia crassipes*” conocida como Jacinto de agua, de las cuales su aplicación ha demostrado la capacidad para absorber que tienen dichas especies para disminuir la toxicidad del agua ácida de los PAM, indicando que la especie vegetal *cortaderia selloana*, es la especie que más absorbe los metales tóxicos en 19 días de tratamiento del agua ácida con un flujo continuo, se redujo la concentración en 97% de Al, 100 % de As, 81% de Cd, 100% de Cu, 100% Cr Total, 99% de Fe, 71% de Mn, 29% de Na, 83% de Ni, 99% Pb, 38% de Si, 78% de Tl, 77% de V y 56% de Zn, concluyendo que con un tiempo de residencia hidráulica equivalente a 2 días se eleva el pH en el orden de 4.79 a 7.16 (Aguilar y Aguilar, 2017).

En Cajamarca, Marín (2020) en su investigación, tuvo por objetivo evaluar cómo influye el tiempo de remoción en una capa de caliza para remover metales pesados, a través de un humedal artificial en el DAM, determinando los efectos de un sistema de humedales Wetland en el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) en una mina de Hualgayoc. Para llevar a cabo este trabajo de investigación se implementó un humedal artificial a escala de laboratorio donde se realizaron pruebas de alcalinidad y remoción de metales

pesados a muestras de drenaje ácido de mina de Hualgayoc. Para realizar las pruebas experimentales se construyeron 4 celdas de metal de 1 1/16” de espesor para el tratamiento del agua ácida en orden secuencial, con capacidades de 24.5 litros, 22.90 litros, 23.35 litros y 20.90 litros respectivamente y se habilitó el corte de un cilindro por la mitad para obtener un recipiente de alimentación a las celdas y otro para la colección del agua tratada. El agua ácida se colocó en el cilindro de la parte superior y en la parte baja tuvo una válvula que controló el flujo de agua ácida a través de una manguera de 1/2” que estuvo conectada a la primera celda. Cada celda estuvo conectada a la siguiente a través de un sistema de flujo de abajo para arriba (vertical ascendente).

Las pruebas se realizaron en cuatro etapas: en la primera etapa el agua ácida avanzó por las cuatro celdas que contenían canto rodeado de roca caliza a malla -2” para que cumplan con la función de neutralización, cada celda tuvo un contenido de caliza de aproximadamente 20 kg. Después del recorrido del agua ácida, el agua de la celda 4 se recolectó en el cilindro de colección y aquí se tomaron muestras para su análisis físico químico. El caudal se mantuvo constante y fue de 1 litro/hora. El objetivo de esta etapa fue incrementar el pH del agua ácida desde 2.71 hasta 3.9 – 4.0 que son los rangos de pH en los cuáles se precipitan los iones  $Fe^{3+}$  y otros metales disueltos en el agua ácida. En la etapa 2 se hizo recircular el agua ácida de la etapa 1 y que fluya por las celdas 1 y 2 con contenidos de caliza, pero que circule el agua en las celdas 3 y 4 sin caliza; el pH obtenido al final la etapa fue de 5. En la etapa 3 se hizo recircular el agua ácida de la etapa 2 y que fluya por la celda 1, con contenido de caliza y que circule el agua en las celdas 2, 3 y 4 sin caliza; el objetivo de esta etapa es incrementar el pH desde 4.6 hasta 5.5, que es el pH en el cual se realiza la precipitación de otros metales pesados disueltos en el agua ácida. El pH obtenido al final de la etapa fue de 5.50

En la cuarta etapa el agua fluyó por las cuatro celdas que contenían estiércol de ovino, topsoil y la totora. El objetivo de esta etapa es incrementar el pH desde 5.5 hasta 6.5 – 7.5, que es el pH en el cual se realiza la precipitación de otros metales pesados disueltos en el agua ácida y la adsorción en la pared celular de la planta propiamente en el wetland. El pH obtenido al final de la etapa fue de 7.08

Después del recorrido del agua ácida en cada etapa, el agua de la celda 4 se colectó en el cilindro de colección y aquí se tomaron muestras para su análisis físico químico. Con el tratamiento el pH del agua ácida aumentó de 2.75 a 7.08 con un incremento del 61.6% en alcalinidad. La remoción de la concentración de Cadmio y Cobre alcanzó el 96.51% y 99.90% respectivamente y en el Hierro y Zinc, la remoción alcanzó valores de 99.67% y 95.60%.

El **marco teórico** contiene las definiciones de los términos principales que se mencionan en esta investigación. **El agua ácida** es un tipo de efluente producida por la oxidación natural de minerales sulfurados, principalmente la pirita, cuando es expuesta a la acción del oxígeno, el agua y las bacterias acidófilas como la *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Este proceso ocurre en forma natural y se genera más agua ácida porque las actividades mineras aumentan la exposición de los minerales sulfurados con los tres elementos mencionados (Ali, 2011).

Según Fowler et al (2011) indica que el **mecanismo por el cual las bacterias oxidan a los sulfuros** sucede por tres mecanismos. En el primero que es mecanismo directo, las bacterias se adhieren a la superficie de las partículas sulfuradas y oxidan directamente el hierro y el azufre en el mineral por reacciones biológicas para liberar los iones metálicos en solución. En el segundo que es el mecanismo indirecto hace participar a las bacterias en el ión Ferroso oxidante ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en solución al hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) y al azufre elemental ( $\text{S}^0$ ) a los iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Luego el hierro férrico producido ( $\text{Fe}^{3+}$ ) lixivía el mineral sulfurado.

Existen dos categorías de **tratamiento de las aguas o drenajes ácidos** de mina (DAM), los tratamientos activos (utilizan productos químicos) y los tratamientos pasivos (se fundamentan en procesos físicos, químicos y biológicos). Los tratamientos pasivos consisten en tratamientos biológicos con humedales artificiales construidos y es muy apropiado en minas abandonadas que tienen un drenaje permanente, para remover metales pesados ya que brindan beneficios de bajo costo operativo y de mantenimiento (Lukacs & Ortolano, 2015).

Los canales o drenes abiertos de caliza son zanjas superficiales que son cubiertas de caliza cuyo objetivo es incrementar la alcalinidad mediante la disolución de los carbonatos de la caliza. El hidróxido de hierro del agua ácida forma una coraza en las calizas, lo cual lleva a la necesidad de tener más caliza en el tratamiento porque se pierde masa en la disolución de los carbonatos (Pearson & Mc Donnel, 2015).

Los tratamientos pasivos bióticos se realizan a través de los **humedales aerobios, los anaerobios y tratamientos mixtos**.

Según Skousen et al (2018), mencionan que los **sistemas aeróbicos** promueven el contacto entre el aire de la atmósfera y el agua contaminada mediante el uso de plantas acuáticas, las plantas liberan oxígeno a través de sus rizomas y raíces. Para que la planta actúe de esta forma, el espesor de la capa de agua no debe superar los 30 cm. La matriz del humedal ya rica en oxígeno actúa como catalizador en las reacciones de oxidación de los contaminantes presentes en el humedal, favoreciendo la formación de un ambiente favorable para el desarrollo de algunas colonias bacterianas que sirven de catalizadoras en la oxidación de los metales disueltos contaminantes localizados en el humedal. En el caso del hierro, las bacterias oxidan el  $Fe^{+2}$  a  $Fe^{+3}$  y lo precipitan en forma de hidróxidos. Se han desarrollado sistemas que incluyen estanques serpenteantes, cascadas, grandes piscinas poco profundas, etc. para oxigenar el agua y optimizar la eficacia del tratamiento.

Kadlec y Knight (2016) afirman que un **humedal aeróbico** es un sistema que reproduce los procesos y fenómenos que ocurren en los humedales naturales (pantanos, turberas, etc.) y por tanto pretende proporcionar un ambiente favorable para el desarrollo de algunas plantas (juncos, carrizo, tipha, cola de caballo, etc.), también musgos (*musgo sphagnum*) y grupos de organismos (protozoos, algas, bacterias), los cuáles intervienen en la precipitación de los metales disueltos y en la purificación del agua. Estos humedales ocupan grandes superficies y cuentan con cuerpos de agua poco profundos, que inundan el sustrato sobre el que se desarrolla la vegetación. El lento flujo de agua dentro del humedal logra el tiempo de residencia fundamental y crítico para el lento proceso de purificación del agua.

Los **humedales anaeróbicos** son ambientes con un espesor de capa de agua y un sustrato rico en materia orgánica que promueve las condiciones anóxicas necesarias para su correcto funcionamiento; por lo tanto, este espesor debe ser de al menos 30 cm. Este espesor de capa de agua cubre el sustrato permeable que tiene un espesor de 30-60 cm, compuesto principalmente por materiales orgánicos mezclados o bien preparados (70 - 90% heno, aserrín, compost, turba, estiércol, etc.). La capa de sustrato orgánico tiene la función de eliminar el oxígeno disuelto, generar alcalinidad mediante procesos químicos o acción microbiana y reducir el  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$ . Es sobre este sustrato donde ocurre el desarrollo de la vegetación emergente, la cual es una peculiaridad de los humedales que contribuye a la estabilidad del sustrato y además agrega materia orgánica libre (Skousen et al. 2018).

Skousen et al. (2018) señalan que el **tratamiento mixto** (Sistema de producción sucesiva de alcalinidad SAPS), es un sistema de tratamiento de agua ácida de mina que fue introducido por Kepler y McCreary en 1994 con el objetivo de encontrar una solución al problema de las grandes áreas de superficie requerida para la precipitación de los hidróxidos de Al y Fe en sistemas de Drenajes anóxicos de caliza (ALD) y los humedales que trabajan en

ausencia de aire (anaeróbicos). Es por esto que un tratamiento mixto SAPS persigue los objetivos de ALD (para el aumento de la alcalinidad) y de un depósito orgánico (para la reducción de sulfatos y retención de metales).

SAPS es un pantano artificial que contiene dos sustratos, uno de compuestos orgánicos y otro de sustancias alcalinas (caliza, dolomita), colocado a una profundidad de 1 a 3 m. Se drena desde abajo a través de un sistema de tuberías, en la parte inferior se coloca el sustrato de piedra caliza (de 50 a 100 cm de espesor) y tiene la finalidad de neutralizar el pH del agua ácida. Sobre la caliza se coloca una capa de materia orgánica (de 10 a 50 cm de espesor) que tiene el objetivo de eliminar el oxígeno disuelto en el agua, disminuye la concentración del sulfato, y reduce el  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ , previniendo así la precipitación  $\text{Fe}^{3+}$  sobre la cubierta de piedra caliza (Skoousen et al. 2018).

Neculita et al. (2017) y Champagne (2017) han demostrado que, en los humedales, **la precipitación** es el mecanismo fundamental para la **remoción de metales** en forma de sulfuros ( $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ), en carbonatos ( $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) e hidróxidos ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ). Se sabe que la solubilidad de los metales depende principalmente del pH, el potencial redox y el estado de oxidación del agua. Además, hay que tener en cuenta que el valor del pH es de gran importancia, ya que afecta a la velocidad de reacción y a la velocidad de los procesos de precipitación e hidrólisis, y tiene una fuerte influencia en la solubilidad de hidróxidos, sulfuros y carbonatos.

Uno de los procesos de inmovilización de metales más importantes y críticos que ocurren en los **humedales wetland aeróbicos** es la **oxidación biológica de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$** . Es muy insoluble a valores de pH superiores a 2,5. Por lo tanto, cuando el pH es neutro y el hierro entra naturalmente en contacto con el aire; Se oxida rápidamente, produciendo óxidos e

hidróxidos de hierro, que son bastante insolubles y precipitan para formar un precipitado marrón (Madigal et al. 2016).

A pH 5, **la solubilidad del hierro y el manganeso** en estado de oxidación (II) tiene un valor muy alto, superior a 1000 mg/L; pero se ha evaluado que el  $\text{Fe}^{3+}$  y el  $\text{Mn}^{4+}$  son extremadamente difíciles de disolver, llegándose a determinar su solubilidad en hidróxido es inferior a 1 mg/L, esto es debido a que químicamente el ion  $\text{Fe}^{2+}$  se presenta en la solución a  $\text{pH} < 5$ , por otro lado, a  $\text{pH} > 6$  predominan los iones  $\text{Fe}^{3+}$  en la solución. Por otro lado, cuando el potencial de reducción del óxido es inferior a 0.2 V, la mayor parte del hierro existe como  $\text{Fe}^{2+}$  y, a potenciales superiores a 0,3 V, se convierte en  $\text{Fe}^{3+}$ .

La solubilidad de las dos formas iónicas principales del manganeso también depende del pH. Cuando el pH está entre 5 y 8,0, la forma Mn (II) es inestable y se oxida para formar óxidos de manganeso. Por otro lado, la reducción de sulfatos y la oxidación de metales son procesos mutuamente excluyentes, uno requiere condiciones aeróbicas y las otras condiciones anaeróbicas (Wildeman, 2013).

Para nuestra investigación, tendremos en cuenta los parámetros de **Límites Máximos Permisibles (LMP)**, con los que vamos a realizar la comparación con los resultados que obtengamos. Los LMP se aplican en aguas residuales donde se produce descarga, mezcla o contacto directo en el cuerpo receptor y de acuerdo con el Sistema Nacional de Información Ambiental existen 11 categorías de LMP dependiendo del ambiente que se necesita analizar o evaluar. Según el DS N° 010-2010-MINAM los Límites Máximos Permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas tienen como parámetros al Arsénico (0.10 mg/L), cobre (0.50 mg/L), hierro (2.00 mg/L) plomo (0.20 mg/L), zinc (1.50 mg/L) y el pH a 25°C (entre 6 – 9) (SINIA, 2022).

La investigación se **justifica** ya que en primer lugar se busca caracterizar con un análisis fisicoquímico de pH, Fe y Mn, el agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, cuyos resultados determinarán la necesidad de precipitar los metales mediante un tratamiento de humedal artificial. Este estudio es razonable porque del informe final de esta investigación se van a proporcionar parámetros y criterios de diseño propuestos para el tratamiento de las aguas ácidas. Asimismo, el desarrollo de este trabajo es muy importante desde el punto de vista tecnológico, ya que permitirá la aplicación de un nuevo proceso relacionado con el tratamiento de aguas ácidas, siempre que sea favorable la evaluación económica.

## 1.2. Formulación del problema

En base a lo antes mencionado se plantea la siguiente **pregunta de investigación** ¿Cuál es el tratamiento de aguas ácidas con humedales artificiales para precipitar los metales pesados de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc?

## 1.3. Objetivos

El **objetivo general** de la investigación es desarrollar un tratamiento de aguas ácidas con humedales artificiales para precipitar los metales pesados de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc. Del cual se extraen los siguientes **objetivos específicos**: Caracterizar con un análisis físico químico de pH, Fe y Mn, el agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc. Diseñar e instalar los sustratos en el humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS). Determinar la eficiencia del cambio de pH, precipitación de Fe y Mn.

#### 1.4. Hipótesis

La **hipótesis general** planteada es que, el tratamiento de aguas ácidas con humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS), precipita los metales cumpliendo con los establecido por el DS N° 010-2010-MINAM respecto a la concentración de Fe, Mn y pH para descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. Del cual se desglosan las siguientes **hipótesis específicas**: Si se caracteriza la fisicoquímica del agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, se diseñaría su tratamiento con el método humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS). Se diseñó e instaló los sustratos en el humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS), logrando conseguir mayor recorrido y tiempo de residencia del agua, permitiendo formar un laberinto que facilite el serpenteo del agua con un flujo tipo pistón, y por último se determinó la eficiencia de cambio de pH, así como la eficiencia de precipitación de Fe y Mn.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Según el enfoque, el estudio es cuantitativo ya que se utilizarán cantidades en base al porcentaje de precipitación de los metales pesados, lo cual se comparará estadísticamente para tabular o graficar los resultados obtenidos de las muestras, es de tipo aplicada “cuando se orienta a conseguir un nuevo conocimiento destinado que permita soluciones de problemas prácticos” (Alvarez, 2020, p. 3). Luego esta investigación también es de tipo aplicada, ya que queremos tener nuevos conocimientos al aplicar los humedales artificiales y ver su eficacia en la remoción de metales pesados.

Esta investigación es prospectiva porque se proyecta hacia el futuro, ya que al hacer el diseño de los humedales artificiales y aplicarlos se podrá realizar el análisis de las muestras que se recolecten y se podría evidenciar si es de utilidad para prevenir una futura contaminación en el agua de los ríos cercanos al agua ácida que se pretende tratar.

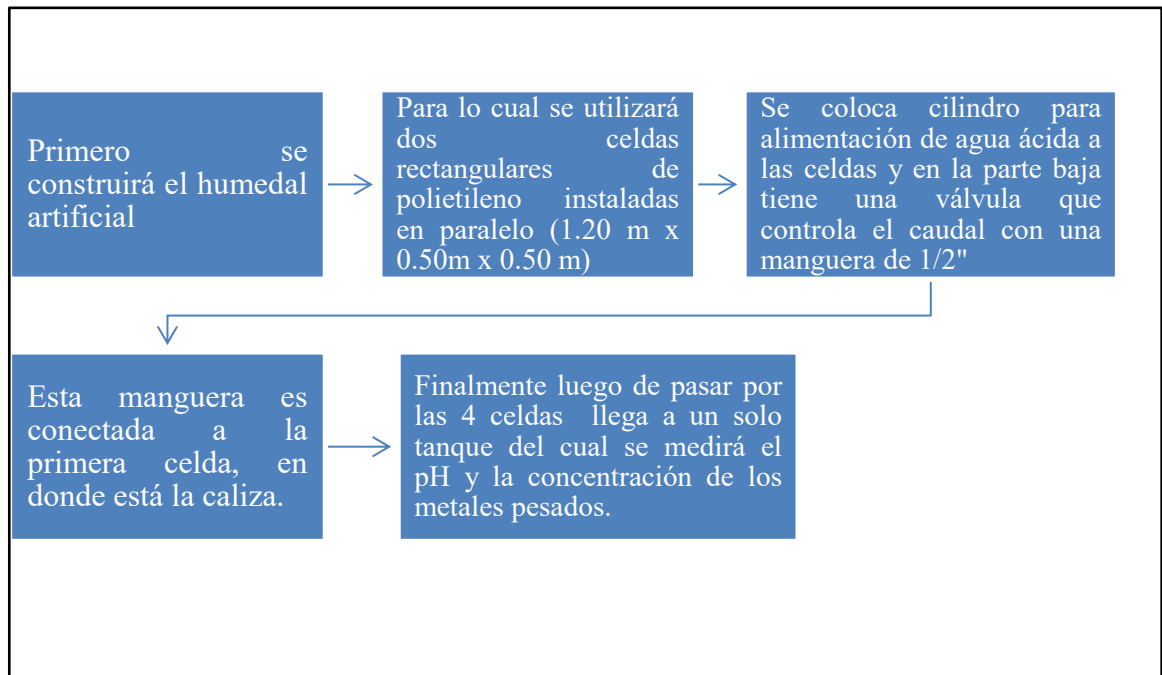
El estudio es transversal, ya que la muestra se recoge en un punto específico en el tiempo.

El diseño es la investigación que obtiene datos a través de la experimentación llevando a cabo diferentes procesos comparando las variables a fin de determinar las causas y/o efectos de los fenómenos que están orientados a resolver problemas. Siendo el diseño no experimental porque solo se hizo a nivel de laboratorio.

En la figura 1, se muestran los 5 pasos de nuestro diseño no experimental para lograr los resultados de la presente investigación.

**Figura 1.**

*Diseño no experimental para el tratamiento del agua ácida con los humedales artificiales*



Nota: Datos de la investigación, 2023.

La variable independiente es “Tratamiento de aguas ácidas” pues este tratamiento es el que se aplicará a través de los humedales artificiales para precipitar los metales pesados.

La variable dependiente es “Precipitación de metales pesados del agua ácida de la mina artesanal El Tingo, porque es el resultado que se espera tener a través de la aplicación de los humedales artificiales.

Ambas variables tanto la independiente y la dependiente son numéricas, puesto que se especificará la cantidad de caliza y las plantas que se emplearán en las pruebas, y también se determinará en porcentaje la cantidad removida de los metales pesados del agua ácida del pasivo ambiental.

La población de investigación es: El agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc.

Para la muestra se tomaron 100 litros del agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, volumen calculado en función de la cantidad necesaria del caudal de tratamiento.

Los materiales que se utilizaron son: GPS, pH-metro, cámara fotográfica, baldes de plástico, celdas de plástico, un cilindro de plástico, manguera plástica de ¼", llaves de plástico, cronómetro y accesorios para regular el caudal.

Las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos son los siguientes: La primera técnica es la observación directa en campo, para el reconocimiento del área dónde se evidencia la presencia del agua ácida del pasivo ambiental, el cual produce daños ambientales y contaminación, luego se procedió a tomar las coordenadas in situ de los lugares en donde se sacaron las muestras utilizando un GPS. Antes de tomar la muestra se realizó la medición del pH, utilizando un pH-metro tipo potenciómetro, para verificar el grado de acidez del agua ácida del pasivo ambiental.

La otra técnica es el análisis documental en el cual investigamos estudios relacionados a humedales artificiales para analizar cómo es la precipitación de metales pesados, por ello revisamos en los repositorios de universidades y revistas científicas, para que esta información sea de utilidad para los antecedentes de este trabajo de investigación. También se incluyeron los parámetros del LMP para efluentes en este caso mineros, utilizándose la tabla de parámetros, como instrumento para realizar la comparación con los resultados del análisis de laboratorio.

**Tabla 1.**

*LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineras*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite en cualquier momento</b>	<b>Límite para el promedio anual</b>
pH		6 a 9	6 a 9
Sólidos totales en suspensión	en mg/l	50	25
Aceites y grasas	mg/l	20	16
Cianuro total	mg/l	1	0.8
Arsénico total	mg/l	0.1	0.08
Cadmio total	mg/l	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/l	0.1	0.08
Cobre total	mg/l	0.5	0.4
Hierro (Disuelto)	mg/l	2	1.6
Plomo Total	mg/l	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/l	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/l	1.5	1.2

Nota: D.S. N°010-2010-MINAM

Los instrumentos de recolección, que se detallan más adelante, son el primero para conocer que metales pesados se encuentran en alta concentración en agua ácida, y el segundo instrumento para saber cuáles son los resultados al tratar esta agua del pasivo ambiental, los cuales nos va entregar el laboratorio y en el tercer instrumento se hará una comparación de como varió después del tratamiento y el tiempo de este, así también el porcentaje de precipitación, esto se logró al construir un pequeño humedal de laboratorio, en la que se llevaron a cabo las pruebas de alcalinidad y precipitación de metales pesados con la muestra del agua ácida del pasivo ambiental. Se realizaron 4 etapas de pruebas con caudales que se esperan tener un valor mínimo estimado de 0.50 L/s y un valor máximo estimado de 4.80 L/s (valores referenciales de precipitaciones fluviales en la zona). Ambos instrumentos se localizan en el anexo 1, pagina 55.

Los instrumentos de recolección de datos son:

Instrumento 01: Ficha de recolección de los resultados del análisis químico de ICP del agua ácida del pasivo ambiental minero.

Instrumento 02: Ficha de recolección de los resultados del análisis químico de ICP del agua tratada.

Instrumento 03: Ficha con detalles del porcentaje de precipitación de los metales pesados.

La técnica instrumental utilizada para los análisis de la muestra se llevó al Laboratorio Químico Polimetals para el análisis químico, este laboratorio cumplió con la norma de análisis químico en el agua ASTM 1193:2001, estando certificado con el ISO 17305.

Para el análisis de los datos, correspondiente a los resultados obtenidos, se pudo tabular para ser interpretados, y luego se realizaron gráficos estadísticos, utilizando el software Microsoft Excel para el análisis de los datos cuantitativos obtenidos de las muestras.

El **procedimiento** de la investigación constó de 03 etapas, etapa I: Pre campo, en la cual se recopiló información bibliográfica de la zona de estudio, comunicación telefónica con familiares para confirmar el problema, búsqueda de bibliografía para antecedentes internacionales, nacionales y locales; revisión bibliográfica en libros, tesis y revistas sobre los sistemas de tratamiento de aguas ácidas, búsqueda de la normativa nacional vigente de los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades mineras. Con esta información se fue avanzando el capítulo 1 y 2 de la tesis, agregando también las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

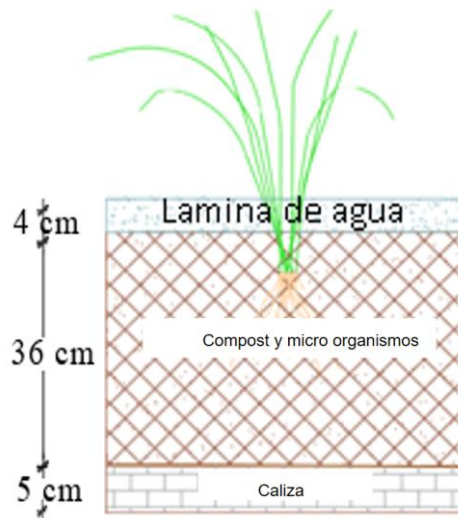
En la II etapa: Campo, se buscó los materiales para la investigación como los sustratos, la roca caliza, la totora, diseño y construcción del humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS). Luego se realizó el recojo del drenaje ácido tomando muestras líquidas para el análisis de pH, Fe y Mn. Estos análisis de metales en la

cabeza y de las aguas tratadas se realizaron en el laboratorio Polimetals de la ciudad de Trujillo. Para la medición del pH se utilizó un pHmetro digital de campo marca HACH modelo H130. Para el análisis de Fe y Mn el laboratorio utilizó un espectrofotómetro UV marca Thermo Scientific.

Se utilizó un cilindro de plástico (tipo depósito de aceitunas), de 150 litros de capacidad para traer agua ácida, que se colocó sobre una mesa de madera de 60 cm de alto. En la parte baja del cilindro se colocó un cañito de plástico y una manguera de polietileno transparente de ¼” en la cual se instaló una válvula plástica de control de caudales para monitorear el caudal constante de ingreso al humedal de 1 litro/hora. Para el control del caudal se utilizó un cronómetro y una probeta de 500 ml. El ingreso del agua se realizó en la celda 1 y la salida del agua tratada en la celda 12. Luego se instaló la unidad experimental que estuvo constituida por dos humedales artificiales con un sustrato constituido por roca caliza, compost, microorganismos caseros y plantas de totora. Fueron utilizadas 15 kg de roca caliza, 135 kg de compost y 150 ml/kg de microorganismos caseros. Luego se sembraron las plantas de totora distribuidos en tres lotes: un primer lote cerca al ingreso de agua, el segundo grupo en el centro del humedal y el tercer lote cercano al punto de descarga del humedal. Luego se dejó por un lapso de 15 días el humedal en reposo para su estabilización de la caliza, sustratos y la adaptación de las plantas de totora, tal como se muestra en la siguiente figura:

## Figura2.

### *Instalación de los sustratos en el humedal artificial*



- *Nota:* El humedal conformado por una delgada capa de 5 cm de espesor de caliza, seguido de una capa de 36 cm constituida por compost y microorganismos y por último una delgada capa de agua de 4 cm. Se observa también la presencia de zonas aeróbicas y anaeróbicas, donde el agua va discurriendo por el humedal con un sistema subsuperficial de flujo horizontal.

La toma de muestras se realizó a 25 cm del fondo en la celda 1 (ingreso), celda 3, celda 6, celda 9, y celda 12 (salida); asimismo la repetición del muestreo fue cada siete días, efectuándose tres muestreos de agua en cada punto de muestreo indicado líneas arriba. Todas las muestras de agua se tomaron en frascos plásticos de 50 ml con cierre hermético, codificados y preservados con HNO<sub>3</sub> concentrado, tal como indica el protocolo de la DIGESA del año 2006.

En esta etapa se emplearon algunos formatos como instrumentos adaptados para recabar información específica la cual se detallaron anteriormente.

Por último, en la etapa III: Gabinete se realizaron cálculos en Excel para la determinación de la eficiencia de la precipitación expresada en porcentaje. Este procedimiento consistió en emplear la siguiente ecuación:

$$E = \frac{(Ci - Cf)}{Ci} \times 100$$

Donde:

E: Eficiencia de precipitación de metal (%).

Ci: Concentración inicial del metal al ingreso a la celda 1.

Cf: Concentración final del metal a la salida de la celda 12.

Toda la información de los reportes de laboratorio químico se colocó de forma digital para lo cual se hizo uso del programa Excel, mediante el cual se presentaron los resultados de los hallazgos mediante tablas y gráficos para una mejor interpretación.

La presente investigación tendrá por aspectos éticos, el correcto uso del APA 7<sup>ma</sup> ed. el cual usa como formato la Universidad Privada del Norte, cumpliendo las normativas para reservar los derechos de autor y coautores como las citas respectivas para cada investigación. No vamos a necesitar de algún permiso ya que la mina artesanal el Tingo se encuentra abandonada por lo que se aplicaría como un pasivo ambiental minero, el cual hasta la fecha no ha sido remediado.

**Tabla 2.**

*Matriz de consistencia*

<b>Problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables</b>	<b>Diseño metodológico</b>	<b>Población y muestra</b>
<p>General: ¿Cuál es el tratamiento de aguas ácidas con humedal artificial para precipitar los metales pesados de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, 2023?</p> <p>Específicos: ¿Cómo se va a caracterizar con un análisis físico químico el agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc?</p> <p>¿Cómo se diseña e instala los sustratos en el humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS)?</p> <p>¿Cuánto es el pH y las concentraciones de metales pesados Fe y Mn para determinar su eficiencia de precipitación?</p>	<p>General: Desarrollar un tratamiento de aguas ácidas con humedales artificiales para precipitar los metales pesados de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, 2023.</p> <p>Específicos: Caracterizar con un análisis físico químico de pH, Fe y Mn, el agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc. Diseñar e instalar los sustratos en el humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS). Determinar la eficiencia del cambio de pH, precipitación de Fe y Mn.</p>	<p>General: El tratamiento de aguas ácidas con humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS), precipita los metales.</p> <p>Específicas: Si se caracteriza la fisicoquímica del agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc, se diseñaría su tratamiento con el método humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS). Se diseñó e instaló los sustratos en el humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS). Y se determinó la eficiencia de cambio de pH, así como la eficiencia de precipitación de Fe y Mn.</p>	<p>Variable independiente: Tratamiento de aguas ácidas</p> <p>Variable dependiente: Precipitación de metales pesados del agua ácida de la mina artesanal El Tingo.</p>	<p>Tipo de investigación: El tipo es aplicada, prospectiva y transversal. Nivel de investigación: Descriptivo explicativo</p> <p>Diseño de la investigación: El diseño de la investigación es no experimental.</p>	<p>Población: El agua ácida del pasivo ambiental de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc. Muestra: Se tomaron 100 litros del agua ácida del pasivo ambiental de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc.</p>

Nota: Datos de la investigación, 2023.

### CAPÍTULO III: RESULTADOS

#### Caracterización fisicoquímica de pH, Fe y Mn del agua ácida de la mina artesanal el Tingo de Hualgayoc

Tabla 3.

*Caracterización fisicoquímica del agua ácida y su comparación con los LMP*

Parámetros	Agua acida a la salida del socavón				LMP (D.S. N° 010-2010-MINAM)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	
Hierro (Fe) <i>mg/L</i>	104.50	104.60	102.00	103.70	2.00
Manganeso <i>mg/L</i>	48.90	48.40	50.60	49.30	0.50
pH a 25°C	2.10	2.00	2.00	2.03	6 - 9

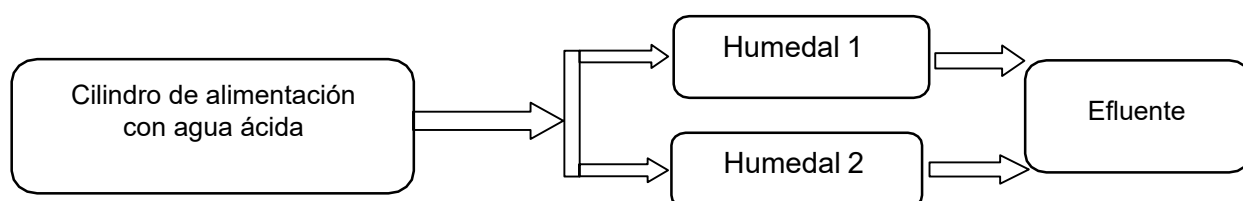
Nota: Resultados de laboratorio químico POLIMETALS de la ciudad de Trujillo.

Los parámetros físico-químicos pH, Fe y Mn del agua ácida de la mina artesanal El Tingo, han excedido el límite máximo permisible (LMP) correspondiente a la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas (DS N° 010-2010-MINAM).

#### Diseño e instalación de los sustratos en el humedal artificial con el sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS).

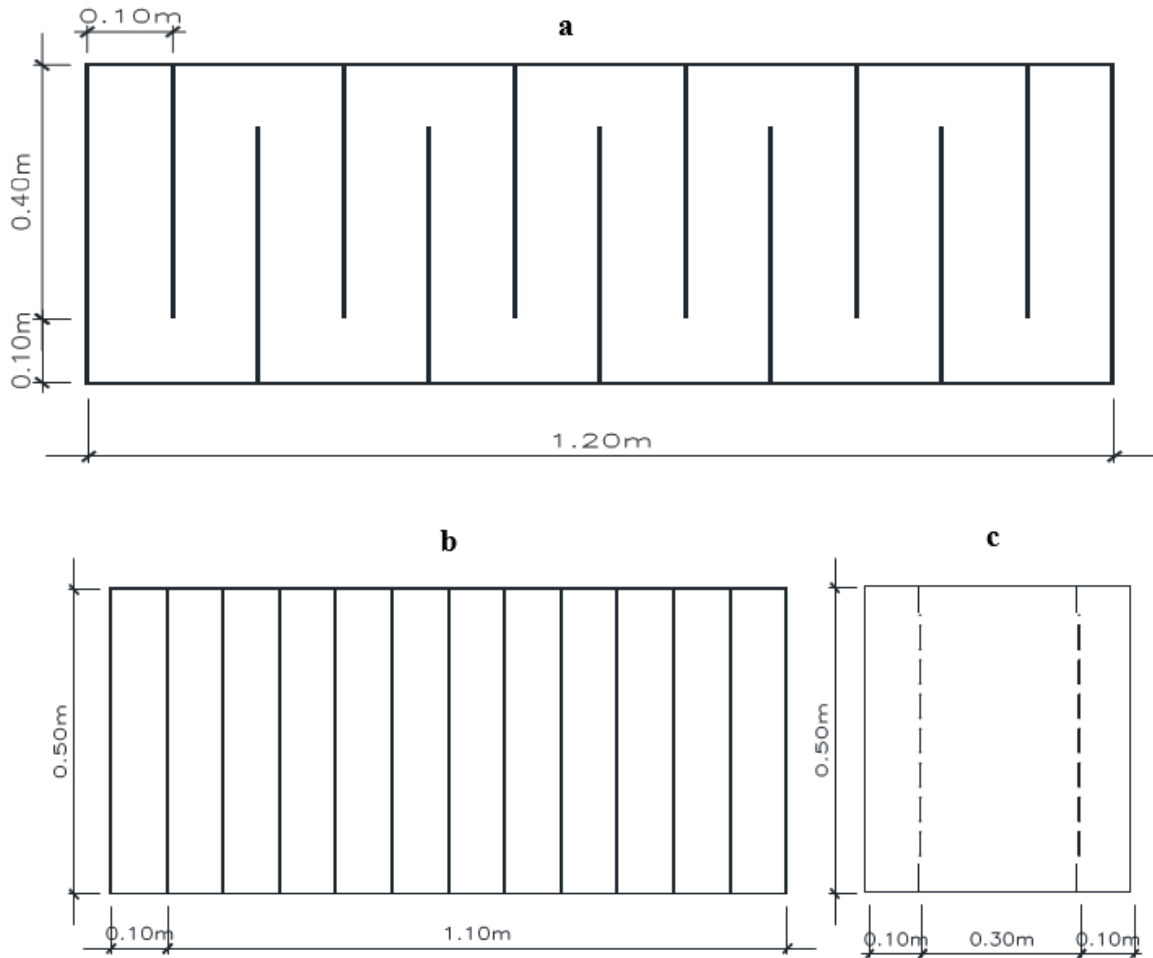
Figura3.

*Esquema general del sistema de tratamiento con humedales artificiales*



**Figura4.**

*Diseño de las celdas para el tratamiento.*

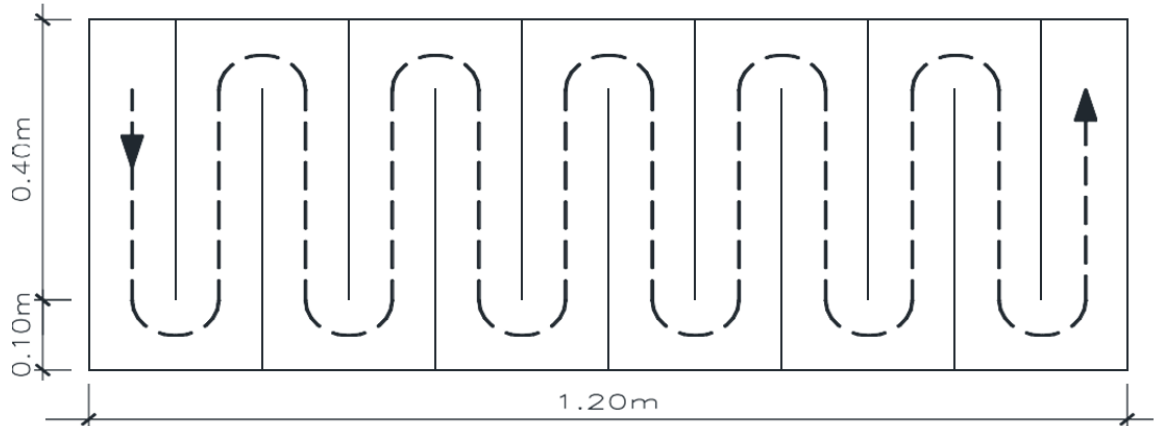


Nota: Se diseñó 02 celdas con las mismas características para el tratamiento.

En la figura en (a) se observa la perspectiva en planta, en (b) la perspectiva en frontal y en (c) la perspectiva en perfil. Para lograr una mayor distancia del agua y tiempo de residencia, se colocaron 11 escolleras a intervalos de 0,10 metros, creando un laberinto que facilitaba el serpenteo del agua en un flujo tipo pistón. El agua ingresó por la celda 01 de la cámara a través de mangueritas plásticas y fue evacuada por la celda 12.

**Figura5.**

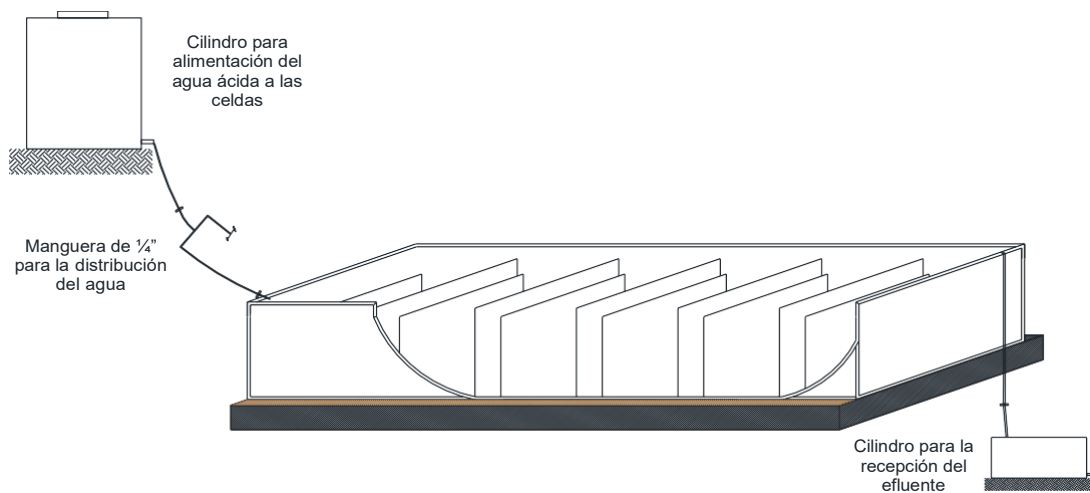
*Esquema del recorrido serpenteante del agua en las celdas*



Nota: Fomentando el serpenteo del agua ácida, se creó un recorrido de 5.50 metros que permitió una mayor superficie de contacto entre el agua y el sustrato, pero no siempre todo el recorrido tiene un caudal ideal, lo que puede deberse a los cortocircuitos resultantes por el humedal.

**Figura6.**

*Diseño en 3D del sistema de tratamiento con humedales artificiales*



**Determinación de la eficiencia de la variación de pH, eficiencia de precipitación de Fe y Mn.**

**Tabla 4.**

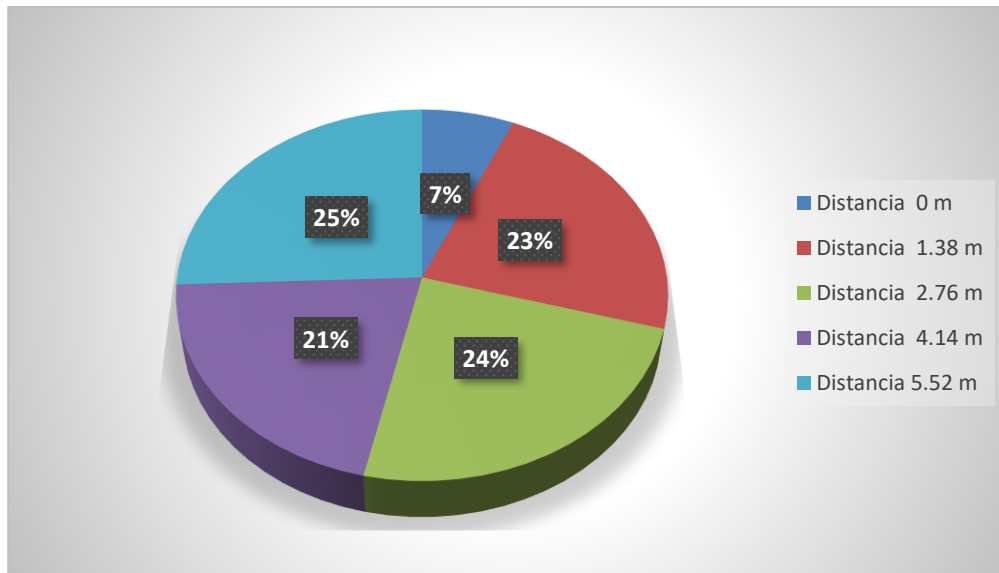
*Variación del pH en función de la distancia recorrida por el agua ácida en el humedal*

Monitoreo	Medición de pH				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
1	1.93	6.61	7.00	6.08	7.44
2	2.06	5.84	6.70	6.48	7.99
3	2.10	6.53	7.00	6.95	7.76
<b>Promedio</b>	<b>2.03</b>	<b>6.33</b>	<b>6.90</b>	<b>6.50</b>	<b>7.73</b>

**Nota:** La tabla nos indica el promedio de la medición de pH según la distancia recorrida por el agua ácida.

**Figura7.**

*Porcentaje de medición de pH*



**Nota:** En la figura se puede observar el porcentaje de la medición de pH en función de la distancia recorrida por el agua en el humedal.

**Tabla 5.**

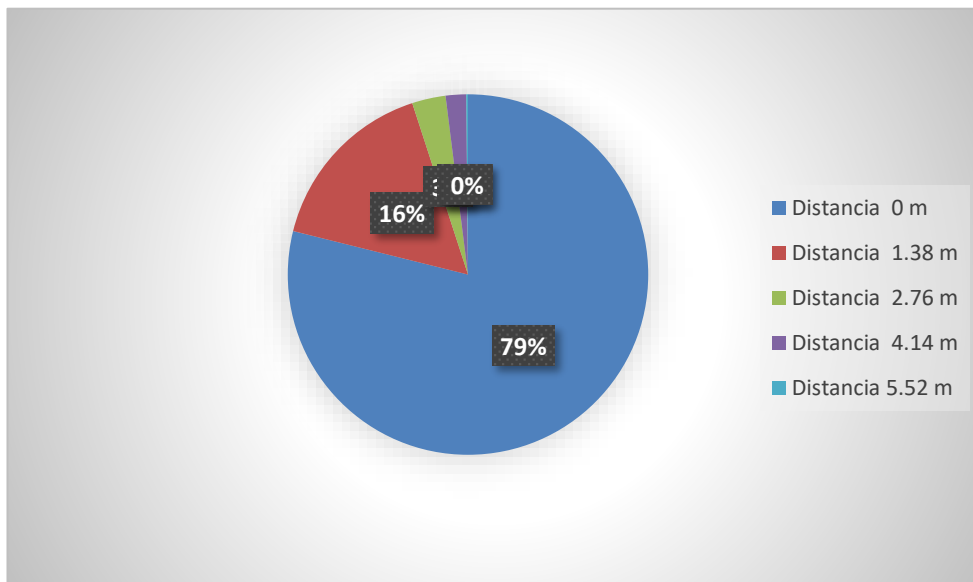
*Variación de la concentración de Fe en función de la distancia recorrida por el agua ácida en el humedal*

Monitoreo	Medición de Fe (mg/l)				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
1	100.21	20.47	3.83	2.33	0.20
2	101.72	12.27	4.58	1.73	0.10
3	101.09	19.81	3.70	2.26	0.15
Promedio	101.01	17.52	4.04	2.11	0.15

**Nota:** La tabla nos indica el promedio de la medición de Fe según la distancia recorrida por el agua ácida.

**Figura8.**

*Porcentaje de medición de Fe.*



**Nota:** En la figura se puede observar el porcentaje de la medición de Fe en función de la distancia recorrida por el agua en el humedal.

**Tabla 6.**

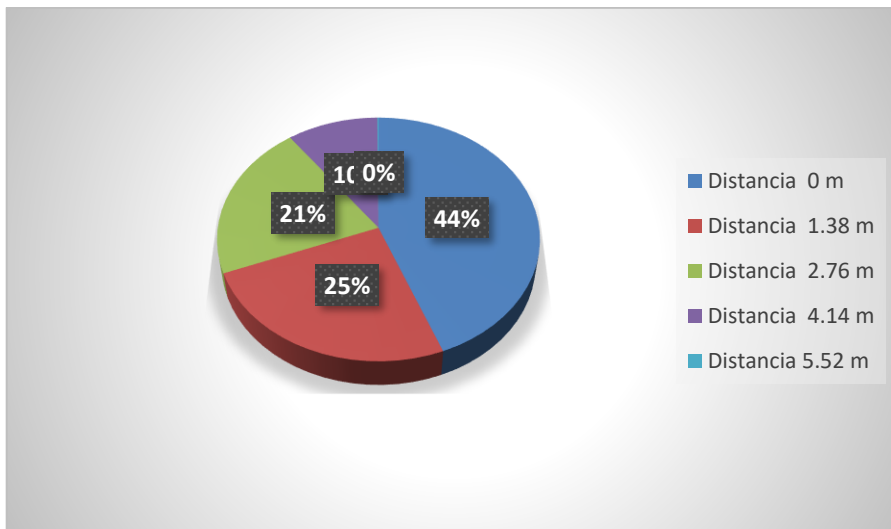
*Variación de la concentración de Mn en función de la distancia recorrida por el agua ácida en el humedal*

Monitoreo	Medición de Mn (mg/l)				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
1	50.18	28.52	23.74	11.38	0.14
2	53.22	15.89	19.70	11.25	0.12
3	50.33	19.51	13.88	12.32	0.13
Promedio	51.24	21.31	19.11	11.65	0.13

**Nota:** La tabla nos indica el promedio de la medición de Mn según la distancia recorrida por el agua ácida.

**Figura9.**

*Porcentaje de medición de Mn*



**Nota:** En la figura se puede observar el porcentaje de la medición de Mn en función de la distancia recorrida por el agua en el humedal

**Tabla 7.**

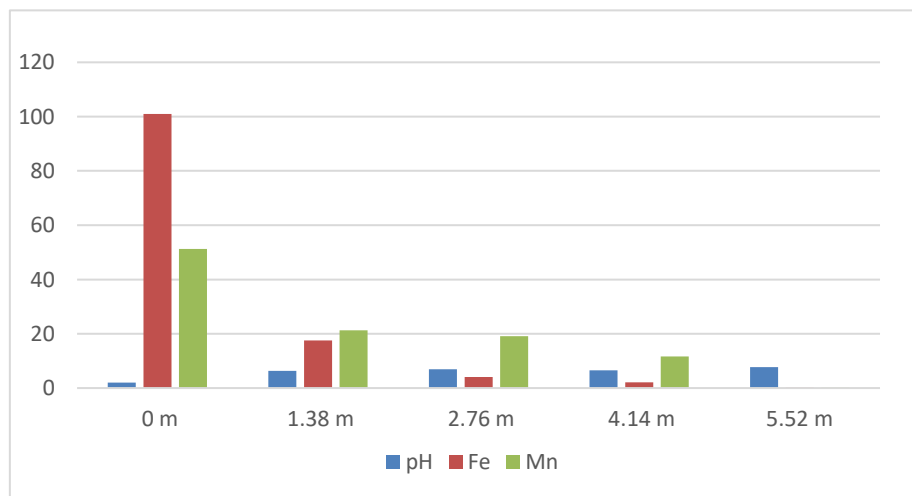
*Valores promedios de pH y concentraciones de Fe y Mn*

Parámetros	Valores Promedios de pH, Fe (mg/l), Mn (mg/l)				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
pH	2.03	6.33	6.90	6.50	7.73
Fe	101.01	17.52	4.04	2.11	0.15
Mn	51.24	21.31	19.11	11.65	0.13

**Nota:** La tabla representa los valores promedios de pH, Fe, Mn según su distancia recorrida.

**Figura 10.**

*Valores promedios de pH, Fe, Mn*



*Nota:* La Normatividad Ambiental amparado en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM establece un rango de pH de 6-9 en los LMP para la disposición de aguas residuales generadas durante las operaciones minero-metalúrgicas. Nuestros resultados de la investigación cumplen con lo solicitado en el sustrato solamente a una distancia de 1.38 m con un pH de 6.33.

Asimismo, para el Fe el LMP es de 2 mg/l. Este valor cumple con la legislación al final a una distancia de 5.52m.

**Tabla 8.**

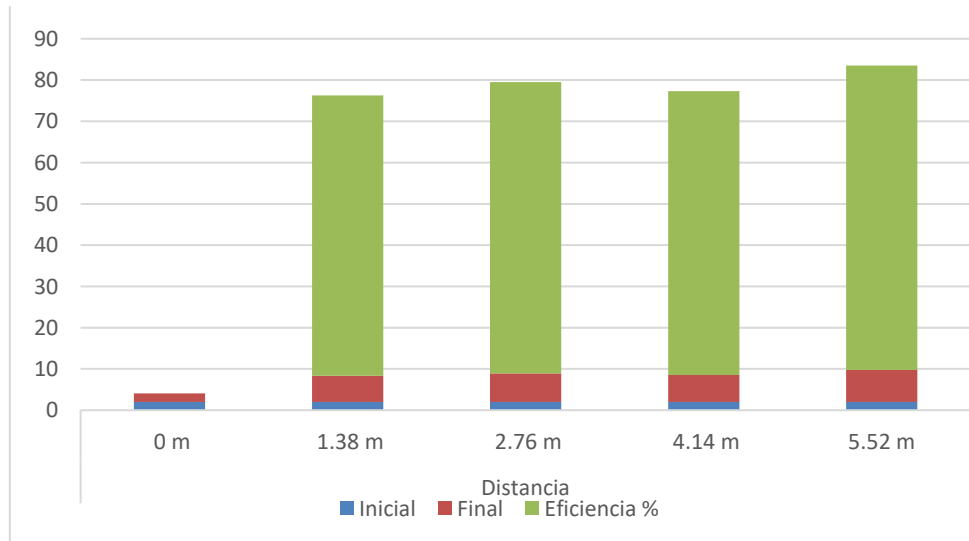
*Eficiencia de la variación del pH*

	Eficiencia de la variación del pH				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
Inicial	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03
Final	2.03	6.33	6.90	6.50	7.73
Eficiencia %	0.00	67.91	70.58	68.79	73.74

**Nota:** La tabla nos indica la eficiencia en porcentaje de la variación inicial y final del Ph según la distancia recorrida.

**Figura 11.**

*Eficiencia de variación de pH*



**Nota:** En la figura se puede observar el gráfico de barras que representa la eficiencia inicial y final de pH según la distancia recorrida en el humedal.

**Tabla 9.**

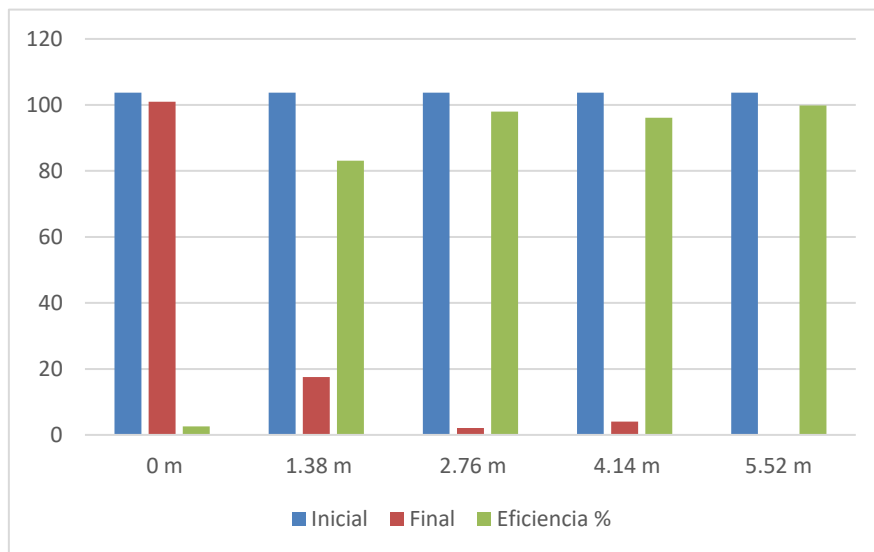
*Eficiencia de la precipitación de Fe*

Concentración (mg/l)	Eficiencia de la precipitación de Fe				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
Inicial	103.70	103.70	103.70	103.70	103.70
Final	101.01	17.52	4.04	2.11	0.15
Eficiencia %	2.60	83.11	96.11	97.97	99.86

**Nota:** En la tabla nos indica la eficiencia de precipitación de Fe según la distancia recorrida.

**Figura12.**

*Eficiencia de precipitación de Fe*



**Nota:** En la figura se puede observar que el gráfico de barras representa la eficiencia inicial y final de precipitación de Fe según su distancia recorrida en el humedal.

**Tabla 10.**

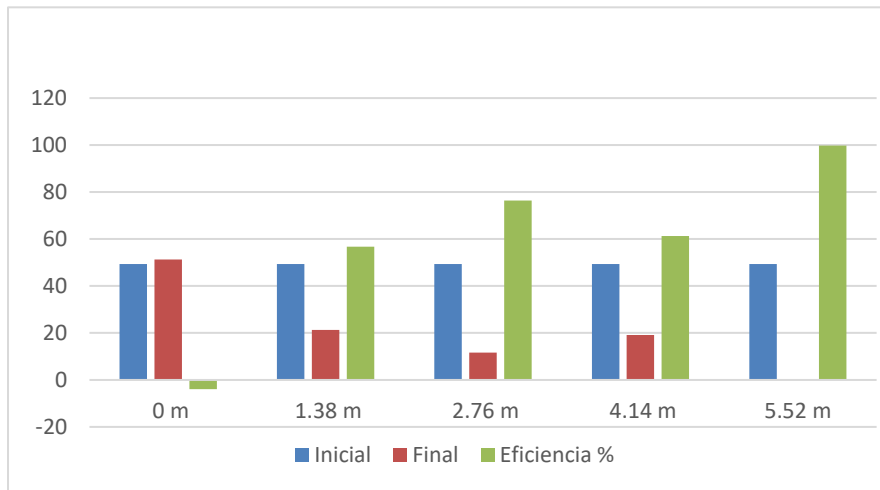
*Eficiencia de la precipitación de Mn*

Concentración (mg/l)	Eficiencia de la precipitación de Mn				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
Inicial	49.30	49.30	49.30	49.30	49.30
Final	51.24	21.31	11.65	19.11	0.13
Eficiencia %	-3.94	56.78	76.37	61.24	99.74

**Nota:** La tabla representa la eficiencia en porcentaje de la precipitación de Mn.

**Figura13.**

*Eficiencia de precipitación de Mn*



**Nota:** En la figura se puede apreciar la eficiencia inicial y final de la precipitación de Mn según la distancia recorrida en el humedal.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### DISCUSIÓN

De los resultados del monitoreo del agua ácida de la mina artesanal El Tingo, se puede deducir que el pH es ácido y la concentración de Fe y Mn, exceden el LMP. Nuestros resultados de la investigación concuerdan con los de Hinojosas (2002), quien reveló signos de contaminación parcial en el vertedero de San Quintín Este y sus alrededores. Los valores más altos de metales pesados se encontraron en muestras de agua de vertedero (pH más bajo), excepto Pb que fue mayor en muestras de pH más alto; y los valores más bajos se obtuvieron en muestras de agua de zonas más alejadas del vertedero (a mayor distancia, menor concentración de metales).

La tabla 2 muestra que a medida que aumenta la distancia entre el muestreo y el análisis, el pH del efluente ácido se vuelve más básico. Por lo tanto, el valor de pH más bajo se registra a 0,0 m, que es extremadamente ácido. Se obtuvieron resultados similares a distancias de 1.38 y 4.14 m, pero entre estos dos valores (2,76 m) se obtuvo un valor mayor en el sentido de que el valor máximo de pH se registró a 5.52 m, lo que indica que independientemente del sustrato, el valor del pH se incrementa a mayores recorridos del agua.

En este estudio el agua ácida se hizo circular por las capas del sustrato, lo que provocó que la piedra caliza se disolviera, creando alcalinidad ( $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$ ) y elevando el pH del agua, debido a que este fenómeno sucede en un ambiente aeróbico. Donde sucede la hidrólisis y precipitación de oxihidróxidos metálicos (Watzlaf y Hyman 1995; Fripp et al. 2000).

El Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM establece un rango de pH de 6 a 9 para efluentes de la actividad minero-metalúrgica, este rango incluye resultados obtenidos en el sustrato trabajado a partir de una distancia de recorrido del agua de 1,38 metros con un pH de 6.2 a 7.9. Asimismo, nuestros resultados concuerdan con el experimento realizado en la Universidad de Oviedo con un sistema combinado de SAPS y un humedal con compost, caliza y determinadas plantas (*Tipha latifolia*), donde el pH aumentó de 3 a 7 con el sistema (Ordóñez et al. 1999). El sustrato seleccionado trabajando con un caudal de 1 Litro/hora solo necesitó una distancia de 1.38 m en el recorrido del agua para cumplir con la normatividad peruana. Por otro lado, nuestros resultados también son corroborados por Ordoñez (1999), que utilizó un sistema combinado de cascadas de aireación seguido de un SAPS, con un caudal de 10 L/día, logrando incrementar el pH de 3 a 7.2. Por su parte, Hellier (1996) utilizó un sistema SAPS para tratar drenaje ácido de mina, pudiendo incrementar el pH de 4.3 a 7.1 en el efluente.

Los cambios en la concentración de Fe en todo el sistema de tratamiento en el sustrato seleccionado se muestran en la tabla 3. Se puede ver que las concentraciones de Fe en el efluente fueron relativamente más bajas en comparación con el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM, Asimismo, para el Mn el LMP es de 0.50 mg/l. Este valor cumple con la legislación al final a una distancia de 5.52m.

En términos de desempeño, la mayor eficiencia de precipitación de Fe y Mn sucedió en la salida del sistema de tratamiento (5,52 m) del humedal, se logró con 99.66 % para el Fe y 99.74% para el Mn%. Resultados similares los tuvo Younger (1998) quién consiguió eliminar entre el 72 y el 99% del Fe en un SAPS construido en Pelenna (Gales) con un TRH de 14 horas. Además, estos resultados son similares a estudios realizados en la Universidad de Oviedo, donde un sistema combinado de SAPS a escala de laboratorio y un humedal con caliza, compost

y plantas (*Tipha latifolia*) lograron una eficiencia de eliminación de 99,5. % Fe (Ordóñez et al. 1999).

Las **limitaciones** de la investigación se dieron primero por la falta de tiempo para poder realizar todas las pruebas necesarias para responder a nuestros objetivos, sin embargo, se realizaron, y que de las muestras tomadas del socavón de la mina abandonada no se altere su composición y poder obtener datos fiables.

La **implicancia práctica** de la investigación es que con este estudio se pueden dar solución al tratamiento de aguas ácidas en minas abandonadas o pasivos ambientales mineros que no han sido remediados, siendo una solución que no altera el medio ambiente ya que los humedales artificiales emplean especies naturales como las plantas mencionadas en esta investigación.

La **implicancia teórica** es que en esta investigación se van a proporcionar parámetros y criterios de diseño propuestos para tratar las aguas ácidas que van a servir para otras investigaciones, siendo importante también desde el punto de vista tecnológico, debido a la aplicación de un nuevo proceso relacionado con el tratamiento pasivo de los DAM, evaluando que sea favorable económicamente.

## CONCLUSIONES

El tratamiento de aguas ácidas con humedal artificial con el Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS) precipita los metales Hierro y Manganeseo a un 99.86 % y 99.74% respectivamente, cuando el agua ácida recorre por el humedal artificial con un caudal de 1 litro/hora hasta los 5.52 m de recorrido del humedal. Con el SAPS se logró incrementar el pH del agua ácida desde 2.03 hasta 7.73, cumpliendo con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. N° 010-2010-MINAM. De acuerdo con lo mencionado, se concluye que la hipótesis planteada, se cumple, puesto que se logró precipitar los metales pesados Fe y Mn con el SAPS.

Con el análisis fisicoquímico se determinó que en el agua ácida de la mina artesanal El Tingo, la concentración promedio de Hierro es 103.70 mg/L y en Manganeseo es de 49.30 mg/L. Asimismo se determinó que en promedio el valor del pH es de 2.03. Con estos resultados se concluye que el agua ácida de la mina artesanal El Tingo supera los LMP establecidos, para lo cual se diseñó un tratamiento del agua ácida con el Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS) con el objetivo de cumplir con los LMP, obtener altos porcentajes de precipitación del Fe y Mn, así como neutralizar el pH.

Se diseñó e instaló los sustratos en el humedal artificial con el Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS). El humedal estuvo conformado por una delgada capa de 5 cm de espesor de caliza, seguido de una capa de 36 cm constituida por compost y microorganismos y por último una delgada capa de agua de 4 cm. Para lograr una mayor distancia del agua y tiempo de residencia, se colocaron 11 escolleras a intervalos de 0,10 metros, creando un laberinto que facilitaba el serpenteo del agua en un flujo tipo pistón. Fomentando el serpenteo del agua ácida, se creó un recorrido de 5.50 metros que permitió una mayor superficie de contacto entre el agua y el sustrato. El agua ingresó por la celda 01 de la cámara a través de mangueritas plásticas y fue evacuada por la celda 12.

Se determinó la eficiencia de cambio del pH, así como la eficiencia de precipitación de Fe y Mn. Se concluye que los resultados de la investigación cumplen con lo solicitado con el caudal de 1 litro/hora, solamente a una distancia de 1.38 m alcanzando un pH de 6.33.

La Normatividad Ambiental amparado en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM establece un rango de pH de 6-9 en los LMP para la disposición de aguas residuales generadas durante las operaciones minero-metalúrgicas. Con respecto a la precipitación de Fe y Mn se alcanzó un 99.86 % y 99.74% de precipitación respectivamente.

## REFERENCIAS

- Aguilar Díaz, A., & Aguilar Díaz, H. (2017). *Sistema piloto de fitorremediación para el tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros de la quebrada mesa de Plata-Hualgayoc [Tesis de título profesional, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]*. Repositorio Institucional, Cajamarca, Perú.  
<http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/363>
- Beltrán Añaños, V. (2018). Bioremediación de aguas ácidas por tratamientos pasivos. *Ingemmet*(14), 5. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG14-253.pdf>
- Castillo, L., Satalaya, C., Paredes, Ú., Encalada, M., Zamora, J., & Cuadros, M. (2021). *Pasivos ambientales mineros en el Perú: Resultados de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAM*. Documento de política en control de Gubernamental. Contraloría General de la República del Perú:  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2135978/Pasivos%20ambientales%20mineros%20en%20el%20Per%C3%BA.pdf.pdf?v=1629917547>
- Chappuis, M. (2019). Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*(168).  
[https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45068/1/S1901182\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45068/1/S1901182_es.pdf)
- Denegri Muñoz, J. E., & Iannacone, J. (2020). Tratamiento de drenaje ácido de minas mediante humedales artificiales. *Biotempo*, 17(2), 345-369.  
doi:<https://doi.org/10.31381/biotempo.v17i2.3349>

Dold, B., Wade, C., & Fontboté, L. (2009). *Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru*. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2–3), 133–141.

<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.05.002>

Jurado Garayar, D. D. (2016). *Diseño piloto del sistema del tratamiento pasivo de infiltraciones provenientes del depósito de material inadecuado de Minera La Zanja, Perú [Trabajo de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]*. Repositorio institucional, Barcelona. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/90913>

López Marcos, A. E. (2018). *Administración estratégica para el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante humedales artificiales en Nyrstar Coricancha S.A. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Centro del Perú]*. Repositorio Institucional, Huancayo, Perú.  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5018/T010\\_20016455\\_D.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5018/T010_20016455_D.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Mamelkina, M. A., Cotillas, S., Lacasa, E., Sáez, C., Tuunila, R., Sillanpää, M., Häkkinen, A., & Rodrigo, M. A. (2017). *Removal of sulfate from mining waters by electrocoagulation*. *Separation and Purification Technology*, 182, 87–93.

MINAM. (2021). *Info aire Perú*. Límite Máximo Permisible (LMP):

<https://infoaireperu.minam.gob.pe/limite-maximo-permisible-lmp/>

Marín Abanto C. N. (2020). *Influencia de un sistema de humedal artificial tipo wetland en el tratamiento de drenaje ácido de mina, de una Unidad Minera de Hualgayoc -*

*cajamrca 2018*. [Tesis título profesional de Ingeniero de Minas, Universidad Alas Peruanas, Cajamarca, Perú.

Minchola Gallardo, J. L., & Gonzalez Veintimilla, F. (2013). Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la mina Barrick. *biblat*, 20(2), 433-444. <https://biblat.unam.mx/es/revista/arnaldoa/articulo/humedales-artificiales-en-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales-domesticas-de-la-mina-barrick>

Noticias Ser (2015). *Minera San Nicolás sigue vertiendo aguas presuntamente ácidas*. Nota del 22 de Julio.

Ordóñez, A., Loredó, J & Pendás, F. 1999. *A successive alkalinity producing system (RAPS) as operational unit in a hybrid passive treatment system for acid mine drainage*. IMWA Congress, Mine, Water & Environment, Sevilla, 2, 575-581.

Padilla Santillan, N. G., Ortiz Díaz, E. G., & Estupiñán Rodríguez, L. D. (5 de Mayo de 2021). Sistema de humedales artificiales en procesos de tratamiento de aguas en la refinería del cantón Esmeraldas, Ecuador. *Dialnet*, 6(5), 677-692. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8016922>

Pozo Antonio, J. S., Puente, I., Laguela, S., & Veiga, M. (2017). Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. *Scielo*, 8(3), 75-91. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-05>

Pulcha Villalobos , J. R., & Valencia Narva, M. P. (2019). *Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales [Tesis de título profesional, Pontificia Universidad Católica del Perú]*. Repositorio Institucional, Lima, Perú.

[https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14458/PULCHA%20VILLALOBOS\\_VALENCIA%20NARVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14458/PULCHA%20VILLALOBOS_VALENCIA%20NARVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sanchez Rial, J., & Ferreira Centeno, J. (octubre de 2016). Drenajes ácidos de Mina, alternativas de tratamiento. *Revista de Medio Ambiente y minería*(1).

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522016000100003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522016000100003&script=sci_arttext)

Schippers, A. (2007). *Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification. In Microbial processing of metal sulfides* (pp. 3–33). Springer.

Servindi (2016). *Hartos de la contaminación minera inician paro en Bambamarca*. Nota del 15 de mayo.

SINIA(2022). *Sistema Nacional de Información Ambiental*. Portal web del Ministerio del Ambiente de la Republica del Perú.<https://sinia.minam.gob.pe/>

Sucari Laura, A. (2022). *Evaluación de la eficiencia de remoción de metales pesados de efluentes mineros a través de humedales artificiales empleando scirpus californicus (totora) y festuca dolichophylla (ichu), en el Distrito de Morococha, Yauli, Junín. [Tesis de título, UNDAC]*. Repositorio Institucional, Cerro de Pasco, Perú.  
[http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2445/1/T026\\_70923226\\_T.pdf](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2445/1/T026_70923226_T.pdf)

Watzlaf, G & Hyman, D. 1995. *Limitations of passive systems for the treatment of mine drainage*. 17th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana, 186-199.

Younger, L. 1998. *Design, construction and initial operation of full-scale compost-based passive systems for treatment of coal mine drainage and spoil leachate in the UK.*

IMWA Symposium, Johannesburg, 413-424.

Zamora Echenique, G., & Trujillo Lunario, E. (2016). Viabilidad del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José - Oruro – Bolivia. *Redalyc*, 3(2), 142-153. doi:

<https://doi.org/10.17648/rsd-v3i2.48>

## ANEXOS

### Anexo 1.

Ficha de recolección de datos

#### *Instrumento 1*

*Ficha de recolección de los resultados del análisis químico de ICP del agua ácida del pasivo ambiental minero.*

Parámetros	Agua ácida a la salida del socavón				LMP (D.S.N° 010-2010- MINAM)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	
Hierro (Fe) mg/L					2.00
Manganeso mg/L					0.50
pH a 25°C pH					6.9

#### *Instrumento 2*

*Ficha de recolección de los resultados del análisis químico de ICP del agua tratada*

Parametros	Valores promedios de pH, Fe (mg/l), Mn (mg/l)				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
pH					
Fe					
Mn					

***Instrumento 3***

*Ficha con detalles del porcentaje de precipitación de los metales pesados*

Concentración (mg/l)	Eficiencia de la precipitación de Fe				
	Distancia				
	0 m	1.38 m	2.76 m	4.14 m	5.52 m
Inicial					
Final					
Eficiencia%					

## Anexo 2. Fotos



Foto 1 Foto de la izquierda, la roca caliza utilizada. Foto de la derecha, planta de totora.



Foto 2. Celdas de experimentación empleando humedales artificiales tipo SAPS