

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

"Fitorremediación de sitios impactados por la minera Culquirrumi a partir del uso de carrizo (*Phragmites australis*) y totora (*Schoenoplectus californicus*), Hualgayoc - Cajamarca 2023"

Tesis para optar al título profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

**Autor:**

Francisco Arturo Alvarado Bueno

**Asesor:**

**Mg. Ing. Alfonso Ramírez Caján**

Código ORCID 0000-0002-7951-2142

Cajamarca - Perú

2024

### JURADO EVALUADOR

Jurado 1	<b>JAIRO PINEDO TAQUIA</b>	<b>44754057</b>
Presidente(a)	Nombre y Apellidos	Nº DNI




Jurado 2	<b>MIRIAM BRAVO ORELLANA</b>	<b>10468799</b>
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	<b>ALFONSO RAMÍREZ CAJÁN</b>	<b>44827933</b>
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

## INFORME DE SIMILITUD

# Francisco Arturo Alvarado Bueno

## Fitorremediación de sitios impactados por la minera Culquirrumi a partir del uso de carrizo (*Phragmites australis*) y...

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Asesores

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3107626237

Fecha de entrega

8 dic 2024, 10:23 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 dic 2024, 4:46 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

CORRECI\_N\_FINAL\_TESIS\_ALVARADO\_BUENO.docx

Tamaño de archivo

780.1 KB

42 Páginas

7,763 Palabras

41,830 Caracteres



Página 2 of 49 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3107626237




## 18% Similitud general

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

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Trabajos entregados

### Fuentes principales

- 18%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre, Martha, y a mi padre, Marcial, por brindarme las fuerzas para alcanzar el éxito, por sus sabios consejos y por el privilegio de tenerlos como padres. Siempre están a mi lado cuando más los necesito, y su apoyo ha sido fundamental en mi camino.

Asimismo, dedico este trabajo a mis abuelitos, quienes siempre me brindan valiosos consejos para seguir triunfando, avanzando y superando los retos que me impulsan a progresar. También a mis tíos y primos, ya que con sus palabras de aliento y gestos de cariño me han motivado a alcanzar mis sueños y continúan animándome a mantener la perseverancia.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por darme salud y bienestar, pues ha sido mi principal apoyo y fuente de motivación para enfrentar cada día con fuerza y seguir luchando frente a las adversidades. Asimismo, agradezco a mis hermanas, María Alejandra y Milena Kristell, por su constante apoyo en los momentos difíciles, por su alegría y sus ánimos, que me han impulsado a superar todo obstáculo y me han dado la fuerza para convertirme en una mejor persona.

## Tabla de contenido

Jurado calificador .....	2
Informe de similitud .....	3
AGRADECIMIENTO.....	5
TABLA DE CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	21
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	24
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	36
REFERENCIAS.....	39
ANEXOS.....	42

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Análisis de nitrato en los días de investigación.....	28
<b>Tabla 2:</b> Análisis de nitrato en los días de investigación.....	29
<b>Tabla 3:</b> Cantidad de cobre posterior a los 14 días .....	30
<b>Tabla 4:</b> Cantidad de zinc 14 días después .....	31
<b>Tabla 5:</b> Cantidad de plomo 14 días después.....	32
<b>Tabla 6:</b> Comparación de resultados con la Categoría 1-A2: Subcategoría A; A2 .....	33
<b>Tabla 7:</b> Comparación de resultados con la Categoría 1-B: Subcategoría B.....	34
<b>Tabla 8:</b> Comparación de resultados con la Categoría 3, subcategoría D1 y D2 .....	35

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Variabilidad de la temperatura en los días evaluados .....	24
<b>Figura 2:</b> Medición de pH en el carrizo .....	25
<b>Figura 3:</b> Medición de pH en Totora .....	25
<b>Figura 4:</b> Evaluación del DBO para carrizo .....	26
<b>Figura 5:</b> Evaluación del DBO para totora .....	26
<b>Figura 6:</b> Evaluación de la turbidez en el carrizo .....	27
<b>Figura 7:</b> Evaluación de la turbidez en la totora .....	27
<b>Figura 8:</b> Evaluación de absorción de cobre en el humedal .....	30
<b>Figura 9:</b> Evaluación de absorción de zinc en el humedal.....	31
<b>Figura 10:</b> Evaluación de absorción de plomo en el humedal .....	32

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la aplicación de la fitorremediación a partir del uso del carrizo (*Pragmites australis*) y la totora (*Schoenoplectus californicus*) para remediar sitios impactados por la minera Culquirrumi procedentes del vertimiento de sus relaves mineros. Metodología de investigación tipo mixto, con diseño no experimental de corte transversal, nivel descriptivo. Los resultados de la comparación de los metales totales en las muestras de Carrizo y Totora con los estándares de la Categoría 1-A2 del DS N° 004-2017 MINAM revela que, las concentraciones de cobre (0.011 mg/L en Carrizo y 0.006 mg/L en Totora) y zinc (0.0124 mg/L en Carrizo y 0.0127 mg/L en Totora) se encuentran muy por debajo de los límites permitidos (2 mg/L y 5 mg/L), superando el límite de 0.05 mg/L. Concluyendo que, el pH disminuyó a valores cercanos a la neutralidad, oscilando entre 7-7.3 con carrizo y 7.5-7.7 con totora. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) aumentó, con rangos de 41-47 en carrizo y 38-41 en totora, los nitratos se redujeron en un 90% en todas las celdas, excepto en la celda 1 con carrizo (83%), las concentraciones de amonio disminuyeron un 80%, llegando hasta el 99% en ambos casos, alcanzando niveles bajos.

**PALABRAS CLAVES:** Aguas residuales, fitorremediación, impacto ambiental, minería.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes teóricos de la investigación

#### 1.1.1. A nivel internacional

Según el estudio realizado por Fazlolahi, H. y Eslamian, S. (2014) en Irán sobre *El empleo de vegetación de zonas húmedas para la eliminación de nutrientes en efluentes urbanos*, el objetivo fue evaluar la eficacia en la remoción de nitrógeno total y fósforo total mediante el uso de especies *Phragmites australis*, *Typha* y *Rush*. La metodología consistió en plantar rizomas recolectados de áreas previamente identificadas en celdas a una profundidad de 20 cm y a una distancia de 20 cm entre ellas. Durante las primeras tres semanas, todas las celdas fueron irrigadas con agua normal y se dividieron en secciones para sembrar las diferentes especies. Los resultados mostraron que *Typha* alcanzó una remoción del 49.40 % de nitrógeno total y un 17.98 % de fósforo total; mientras que *Phragmites australis* (carrizo) eliminó un 44.62 % de nitrógeno total y un 13.22 % de fósforo total. Por su parte, la especie *Rush* removió un 27.62 % de nitrógeno total y un 9.46 % de fósforo total. En conclusión, las especies *Typha* y *Phragmites australis* demostraron ser efectivas en la eliminación de metales.

Por otro lado, Petelka, J. (2019), en su estudio titulado *Soil Heavy Metal (Loid) Pollution and Phytoremediation Potential of Native Plants on a Former Gold Mine in Ghana* publicado en *Water, Air, and Soil Pollution*, tuvo como objetivo evaluar nuevas técnicas de tratamiento utilizando plantas nativas en los relaves mineros de la mina. Los resultados encontraron que las plantas en los relaves tienen la capacidad de realizar super extracción de metales pesados, lo que sugiere un potencial significativo para la fitorremediación en estas áreas contaminadas.

El estudio realizado en Colombia por Velásquez, J. (2017), titulado *Contaminación de suelo y aguas contaminados por hidrocarburos en Colombia: Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de restauración, trata el problema de la contaminación en*

*aguas y aire, principalmente debido a actividades humanas.* El objetivo de la investigación fue sintetizar información sobre la contaminación por hidrocarburos y evaluar la fitorremediación como una estrategia biotecnológica para la recuperación ambiental. Además, ha recibido una buena acogida por parte de las comunidades debido a su bajo impacto invasivo y, a diferencia de otros métodos, genera menos residuos secundarios. Estos beneficios hacen de la fitorremediación una opción viable para su aplicación en cuerpos de agua contaminados por diversas fuentes, como residuos industriales, orgánicos, productos de la minería y desechos agrícolas, entre otros. Se concluyó que la fitorremediación es una técnica eficaz, especialmente para grandes áreas o zonas de difícil acceso o restringidas.

El estudio realizado por Kukoc (2020) en Bolivia, titulado *La técnica extractiva en la determinación social de la salud de las familias mineras de Potosí*, aborda como problemática el riesgo derivado del manejo inadecuado de los relaves mineros, que proviene tanto de la forma en que se gestionan (confinamiento, recolección, transporte y tratamiento) como de la alta toxicidad de sus componentes (As, Cd, Cu, Pb, Hg, Cr, Se, Zn, entre otros). Esta toxicidad incrementa la peligrosidad de los relaves y su capacidad para generar efectos contaminantes. Entre los problemas de salud críticos que afectan a las familias mineras se encuentran la silicosis, neumonía, cáncer, entre otras enfermedades. Estos problemas no deben ser analizados de manera aislada o como riesgos puntuales, sino que deben comprenderse como un fenómeno complejo y dinámico, relacionado con los modos de vida y las formas de reproducción social. Estos modos de vida están, a su vez, condicionados por las actividades cotidianas de la comunidad, que impactan directamente en los genotipos y fenotipos de los individuos. Un ejemplo de este impacto es la drástica transformación del paisaje urbano de la ciudad, consecuencia del cambio tecnológico actual.

Huaraca, L. (2020), en su estudio sobre la *Construcción de un embalse en una laguna para aumentar la disponibilidad de agua en la comunidad de Sarhua, Ayacucho*, tuvo como

objetivo construir un embalse y el recubrimiento con geomembrana de la laguna Pichuicocha, con el propósito de almacenar el agua de escorrentía proveniente de la temporada de lluvias y regular la disponibilidad de agua en los humedales. En este contexto, los procesos de fitorremediación ofrecen una serie de ventajas significativas. Una de ellas es la deflación de los costos asociados al manejo de aguas residuales, ya que estos procesos son más sencillos y requieren menos infraestructura para la remoción y captura de agentes contaminantes, que pueden incluir materia orgánica, metales pesados e incluso sustancias radioactivas. Además, estos procesos proporcionan resultados satisfactorios que permitieron optimizar el riego de 15 hectáreas de pastizales, beneficiando a 50 habitantes de la localidad, quienes se encuentran en situaciones de extrema pobreza.

El artículo presentado por Menéndez, J. y Muñoz, S. (2021), titulado *Contaminación del agua y del suelo debido a los residuos mineros*, cuyo objetivo fue Analizar y debatir los efectos contaminantes en el agua y el suelo ocasionados por la minería irresponsable, una actividad económica enfocada principalmente en la extracción de minerales como el oro y el uranio. La problemática abordada en el estudio destaca la deficiente capacidad para degradar desechos causados por relaves mineros, estos contienen elementos químicos altamente tóxicos que agravan su peligrosidad generando marcas perjudiciales en la salud y en el medio ambiente. La conclusión principal del artículo es que el impacto ambiental de los relaves mineros es inevitable, especialmente en los componentes ambientales, provocando la presencia de metales, minerales y metaloides que alteran los modos de vida de las comunidades afectadas. Por lo tanto, se resalta la necesidad urgente de promulgación de normativas que regulen y prevengan la contaminación derivada de los relaves, para mitigar su impacto en la población y el entorno. Finalmente, esta revisión subraya la necesidad de más estudios sobre el impacto de la contaminación de los relaves mineros en la salud humana y los ecosistemas.

Velianevska, R. (2021), en su estudio realizado en Perú sobre *Análisis del uso de humedales artificiales empleando plantas macrófitos para el tratamiento de aguas residuales en el ámbito rural, Apurímac 2021*, Tuvo como objetivo exponer que los humedales creados por el ser humano, con plantas acuáticas como *Schoenoplectus californicus* (totora) y *Phragmites australis* (carrizo), representan una opción eficaz para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Esto se debe a que estas plantas crecen de forma densa y se propagan rápidamente, actuando como especies colonizadoras activas. A través de sus extensas raíces y rizomas, contribuyen a la reducción de la materia orgánica mediante la acción de los microorganismos presentes en el medio.

En Colombia, el estudio realizado por Martínez, M. (2021), titulado *Metales pesados (Cd, Ni, Mn) en agua y tejidos de bocachico (Prochilodus reticulatus) y rampuche (Pimelodus grosskopfii) en el corregimiento de Tres Bocas, cuenca del Catatumbo, Norte de Santander*, cuyo objetivo buscó Determinar la concentración de metales tóxicos (Cd, Ni, Mn) en el agua y en los tejidos de los peces bocachico (*Prochilodus reticulatus*) y rampuche (*Pimelodus grosskopfii*) en la zona indicada, que alberga una de las mayores concentraciones de cuerpos hídricos del mundo, enfrenta una situación preocupante, ya que la población local presenta altos índices de desconocimiento y falta de interés en el cuidado y la preservación del recurso hídrico. Los metales pesados representan un grave contaminante que afecta tanto a los ecosistemas como a los seres vivos. Cuando estos metales son absorbidos por los peces, se bioacumulan, y al ser consumidos por la población, se transfieren a los seres humanos, generando, a largo plazo, problemas de salud.

Herrera, K. y Acuña, J. (2021), en su investigación *Identificación de especies vegetales utilizadas en la fitorremediación de aguas residuales y su comparación con otras tecnologías de descontaminación*, El objetivo se centró en resaltar la relevancia del estudio e implementación de tecnologías de descontaminación alternativas como una oportunidad para

contribuir directamente a la protección del medio ambiente y al fomento del desarrollo sostenible. El estudio y la caracterización de las especies vegetales empleadas en la fitorremediación de aguas residuales representan un tema de gran importancia tanto en el ámbito científico como ambiental, abarcando la efectividad en la eliminación de contaminantes. La información se obtuvo de diversas fuentes bibliográficas científicas, tanto nacionales como internacionales, permitiendo identificar 45 especies y un total de 83 muestras. En el estudio se evaluó la variación en el recurso hídrico antes y después de la implementación de las plantas de biorremediación, y se estableció un marco comparativo entre los resultados de la fitorremediación y otras metodologías de tratamiento. Finalmente, se identificó la opción más viable en términos de desarrollo sostenible, concluyendo que un sistema integrado por diversas tecnologías es el más adecuado para lograr una mayor depuración de contaminantes, con el objetivo de alcanzar un mayor nivel de potabilidad. Además, la fitorremediación se destacó como una estrategia efectiva y sostenible, ya que permite la incorporación de especies vegetales que llevan a cabo procesos de biorremediación de contaminantes, como metales pesados en el agua, mitigando los impactos ecológicos de manera más costo-efectiva en comparación con los tratamientos de remediación química.

### **1.1.2. A nivel nacional**

Bustamante, D. y Pérez, R. (2019), en su investigación *Evaluación de la efectividad de humedales artificiales en el tratamiento de efluentes urbanos utilizando las especies Junco (Typha sp.) y Vetiver (Chrysopogon zizanioides)*, tuvieron como objetivo evaluar la efectividad en la eliminación de contaminantes en efluentes urbanos utilizando las especies Typha sp. (junco) y Chrysopogon zizanioides (vetiver) en el distrito de Saposo. Las variables dependientes evaluadas comprenden los siguientes parámetros: aceites y lípidos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales en suspensión, potencial hidrógeno (pH) y temperatura. Estos parámetros se analizaron tanto en

la entrada como en la salida del humedal artificial, en dos periodos: a los 44 y 51 días de instalación. La comparación de los parámetros se realizó conforme a la DS. 003-2010-MINAM. A los 44 días el parámetro "aceites y grasas" aumentó para la especie *Typha sp*, mientras que, para el Vetiver, se mantuvo constante. A los 51 días, ambas especies de plantas fitorremediadoras lograron reducir la concentración de aceites y grasas en las aguas residuales. En cuanto a la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la eficiencia alcanzada fue del 78 % con *Typha sp* y del 89 % con Vetiver. En la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), la eficiencia fue del 78 % con *Typha sp* y del 90 % con Vetiver. Por otro lado, la remoción de sólidos totales en suspensión fue del 89 % con *Typha sp* y del 94 % con Vetiver. En cuanto al porcentaje de remoción de aceites y grasas, la eficiencia fue del 81 % con *Typha sp* y del 76 % con Vetiver. Asimismo, después de los 51 días de tratamiento, la temperatura del agua residual fue de 29 °C para ambas especies, mientras que el pH del agua residual fue de 7.0 para *Typha sp* y de 6.8 para Vetiver.

La investigación llevada a cabo por Pulcha, J. y Valencia, M. (2019), titulada *Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de aguas residuales de la industria minera mediante humedales artificiales*, tuvo como objetivo evaluar la disminución de las concentraciones de nitratos, amonio y metales tóxicos, como el cobre y el plomo, presentes en los efluentes generados por la actividad minera. Para ello, se construyeron humedales de flujo superficial complementados con las especies vegetales *Schoenoplectus californicus* (totora) y *Schoenoplectus lacustris* (carrizo), que formaron parte de los componentes de un humedal artificial. Los materiales utilizados como base para el humedal piloto incluyeron piedra, arena, grava y tierra, que actuaron como filtros. Se realizó un análisis químico de las aguas a tratar, encontrando la presencia de metales como cobre, zinc y plomo, que superaban los límites máximos permitidos (LMP). Los resultados mostraron que la planta *Schoenoplectus lacustris* (carrizo) mostró una mayor capacidad para depurar el zinc, mientras que *Schoenoplectus*

*californicus* (totora) fue más eficaz en la remoción de cobre. En cuanto a los nitratos, la remoción fue prácticamente similar en ambas especies en las cuatro celdas, con solo una diferencia del 0.25 % a favor de totora. Sin embargo, en la eliminación de amonio, la especie carrizo demostró una mayor eficiencia, logrando una remoción del 5 %. La depuración del cobre fue casi total con ambas especies, siendo totora la más efectiva (99.86 %) en comparación con carrizo (99.79 %). En la remoción de zinc, carrizo mostró una eficacia del 99.88 %, aunque la consistencia de su acción depuradora fue menor en comparación con la del cobre. Por otro lado, totora depuró el zinc en un 99.85 %, siendo más eficiente que con el cobre, aunque con menos consistencia al tratar concentraciones más bajas del metal.

Según Chugden, N. y Verastegui, R. (2020) en su estudio *Evaluación de la efectividad de las plantas totora y carrizo en la absorción y eliminación de nutrientes en el tratamiento de efluentes domésticos en el distrito de Namora, Cajamarca*. El objetivo fue analizar la capacidad de absorción y eliminación de nutrientes de estas plantas acuáticas en el tratamiento de efluentes domésticos en dicho distrito. Los resultados indicaron que la planta carrizo presentó una mayor capacidad para depurar sulfatos, alcanzando una efectividad del 68.74%, en comparación con el 30.38% de totora. En cuanto a la eliminación de fosfatos, ambas especies mostraron la misma efectividad, con un promedio de 91.7%.

En el estudio de Delgado, S. y Rocha V. (2019) titulado *Eficacia en la eliminación de contaminantes de lixiviados generados en un vertedero, mediante un biodigestor y humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, utilizando la especie macrófito emergente carrizo (*Phragmites australis*)*, el objetivo fue evaluar el tratamiento de lixiviados mediante un biodigestor y humedales artificiales, utilizando *Phragmites australis* como tratamiento primario y secundario. El muestreo se realizó con tiempos de retención de 5, 10 y 15 días para dos concentraciones. Los parámetros analizados incluyeron temperatura, pH, conductividad, sólidos disueltos totales, turbidez, oxígeno, DBO, DQO, fósforo total y nitrógeno total. Los

resultados mostraron diferencias significativas entre los valores antes y después del tratamiento, con eficiencias de remoción de 79%, 59% y 57% para la DBO5, y 85%, 99% y 99.9% para coliformes termo tolerantes en los tiempos de 5, 10 y 15 días, respectivamente, a la concentración del 1%. En la concentración del 3%, las eficiencias fueron 86%, 81% y 39% para DBO5, y 99%, 99% y 85% para coliformes termo tolerantes. Concluyendo que, los análisis demostraron que el sistema con biodigestor y humedales artificiales es una opción viable y sostenible para la remoción de contaminantes.

### **1.1.3. A nivel local**

En su investigación, Bustamante y Pérez (2019) explican que, en el tratamiento de aguas residuales municipales mediante humedales artificiales utilizando las especies *Typha sp.* (junco) y *Chrysopogon zizanioides* (vetiver) en el distrito de Saposoa, los sólidos totales se dividen según su tamaño. Los sólidos suspendidos son partículas flotantes como restos de animales, basura o vegetales, los cuales son visibles a simple vista, lo que facilita su separación mediante métodos físicos sencillos. También existen sólidos sedimentables, que, debido a su peso y tamaño, se depositan en el fondo de los cuerpos receptores gracias a la acción de la gravedad.

En su estudio, Herrera y Acuña (2021) destacan que los vertimientos de metales pesados, junto con la falta de investigaciones sobre sus efectos, afectan gravemente los recursos hídricos, la salud y el bienestar de plantas, animales y seres humanos expuestos. En este contexto, la fitorremediación se presenta como una alternativa viable y sostenible, ya que utiliza plantas para remover contaminantes, como los metales pesados en el agua, reduciendo los impactos ambientales de manera más económica que los procesos de remediación química. Además, fomenta la protección ambiental, promueve la concientización sobre la preservación del agua y apoya el desarrollo sostenible.

En su investigación, Dávila y López (2020) realizaron un estudio sobre el *Tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando humedales construidos de flujo subsuperficial vertical y diferentes especies vegetales en Ecuador*. El objetivo fue analizar la adaptación de las plantas a diversas condiciones operativas y su capacidad para remover DBO y DQO en los humedales. Los resultados mostraron que los cambios en los tiempos de alimentación y descanso no tuvieron un impacto significativo en el crecimiento y reproducción de las especies, aunque el inicio del período de descanso afectó a *Cynodon dactylon* (grama). La eliminación de DBO5 varió entre el 30 % y el 70 %, mientras que la remoción de DQO alcanzó un 30 %, indicando una efectividad aceptable. En conclusión, las especies nativas demostraron ser apropiadas para mejorar los humedales de flujo subsuperficial vertical en el tratamiento de aguas residuales.

Según Rubio y Montenegro (2018), en su investigación de *Los microorganismos juegan un papel clave en el tratamiento biológico de las aguas residuales*. En la parte superior del humedal, donde predominan el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno atmosférico, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el lecho granular inferior, se favorecen los microorganismos anaerobios. Estos microorganismos son responsables de procesos como la degradación de materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza, así como la desinfección. Entre los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales se encuentran helmintos, bacterias, levaduras, hongos, virus y protozoos.

## **1.2 Realidad problemática**

Los metales pesados son contaminantes ubicuos, presentes en diversas formas alrededor del mundo. Las minas, tanto grandes como pequeñas, son las principales fuentes de contaminación, debido a los métodos empleados para extraer minerales de alto valor económico. Un ejemplo de esto es la minera Culquirrumi, cuyo impacto ambiental afecta

gravemente a los ríos, quebradas, áreas vegetativas y a las comunidades cercanas. Las personas vivientes en las cercanías de esta mina son las más afectadas por la minería irresponsable en la zona de Cajamarca. Se tuvo como finalidad mitigar este impacto, mediante el uso de plantas para capturar, atraer y regular el agua contaminada que fluye por los ríos o quebradas, reduciendo así la contaminación y restaurar los ecosistemas impactados por los metales pesados provenientes de la minería.

## **1.2 1. Formulación del problema**

### **Problema General**

¿De qué manera se puede remediar sitios impactados por la minera Culquirrumi a partir del vertimiento de sus relaves mineros?

### **Problemas Específicos**

¿Cuáles serán los sitios impactados en el área de influencia de la minera Culquirrumi a partir del vertimiento de sus relaves mineros?

¿Cuál será la concentración de metales pesados que contienen los efluentes de la minera Culquirrumi?

¿Cuál será la eficiencia de la fitorremediación aplicada en los sitios impactados de la minera Culquirrumi a partir del uso del carrizo (*Phragmites australis*) y la totora (*Schoenoplectus californicus*)?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar la aplicación de la fitorremediación a partir del uso del carrizo (*Phragmites australis*) y la totora (*Schoenoplectus californicus*) para remediar sitios impactados por la minera Culquirrumi procedentes del vertimiento de sus relaves mineros.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Identificar los sitios impactados en el área de influencia de la minera Culquirrumi a partir del vertimiento de sus relaves mineros.

Analizar la concentración de metales pesados que contienen los efluentes de la minera Culquirrumi.

Medir la eficiencia de la fitorremediación aplicada en los sitios impactados de la minera Culquirrumi a partir de la comparación entre el carrizo (*Phragmites australis*) y la totora (*Schoenoplectus californicus*).

## **1.4. Hipótesis**

### **1.4.1 Hipótesis General**

La implementación de humedales artificiales en las áreas de influencia de las mineras ayuda a remediar de manera significativa sitios impactados por el vertimiento de relaves mineros.

### **1.4.2 Hipótesis Específicas**

Los colchones acuíferos y los suelos agrícolas son los sitios más impactados por el vertimiento de los relaves mineros de la minera Culquirrumi.

La tasa de concentración de metales pesados que contienen los efluentes de la minera Culquirrumi es muy alta.

La aplicación del método de humedales artificiales empleando el carrizo (*Phragmites australis*) y la totora (*Schoenoplectus californicus*) es muy eficiente para la reducción de los metales pesados en sitios impactados por la minera Culquirrumi.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo y nivel de investigación

La investigación adoptó un enfoque de tipo mixto, ya que abarcó tanto la naturaleza documental como de campo (Novillo, 2016). Además, se clasifica como experimental, dado que no solo se identificaron las características objeto de estudio, sino también los factores que las controlan, alteran o manipulan, con el fin de observar los resultados a lo largo del tiempo, minimizando la intervención de otros agentes durante el proceso de observación. También es de tipo transversal, ya que se desarrolló en un tiempo y momento específicos. Por último, se considera una investigación de laboratorio, ya que se creará un ambiente artificial en el que se analizará la simulación de los eventos investigados.

Teniendo en cuenta que el enfoque de la investigación fue descriptivo, y considerando que este tipo de estudio analiza las características y manifestaciones del fenómeno y sus componentes, permite describir el fenómeno mediante la medición de uno o más atributos."

### 2.2. Variables de investigación

De esta manera, el tipo de investigación del estudio es descriptiva, ya que busca analizar la efectividad del tratamiento de aguas residuales generadas por la industria minera subterránea Culquirrumi mediante humedales artificiales, teniendo las siguientes variables:

- ✓ Variable independiente: Fitorremediación de sitios impactados por la minería Culquirrumi
- ✓ Variable dependiente: Uso del carrizo (*Phragmites australis*) y tutora (*Schoenoplectus californicus*)

### 2.3. Población y muestra

Como participantes se tiene a la población que vendría a ser las aguas residuales de las mineras subterráneas de la región de Cajamarca. De igual forma se planteó la Muestra: Aguas residuales de la minera subterránea Culquirrumi.

## 2.4. Técnicas e instrumentos

### 2.4.1. Técnicas

La investigación utilizó diferentes metodologías para la recolección de información y datos, empleando una ficha de toma de información para obtener la cantidad de descarga de agua y los parámetros climáticos. A continuación, se realizó una observación directa, durante la cual se efectuó un muestreo de aguas con el fin de analizar los parámetros fisicoquímicos, biológicos y bacteriológicos del agua. Finalmente, se construyó un pozo para muestrear las propiedades del terreno, lo cual fue clave para el diseño del humedal artificial

### 2.4.1. Instrumentos

En la recolección de datos, se empleó una ficha de toma de información con el objetivo de obtener los parámetros fisicoquímicos del agua residual proveniente de la mina subterránea Culquirrumi. Posteriormente, se realizaron tomas de muestras para evaluar la concentración de metales pesados presentes en el agua, con el fin de compararlos con los estándares de calidad del agua establecidos en la Norma N.T.P. 214.042 – 2012, OS.090, para plantas de tratamiento de aguas residuales y ECA para agua.

## 2.5. Procedimientos

Las etapas realizadas para realizar obtener todos los datos y posterior análisis se programaron lo siguiente:

**Etapas pre-campo:** Esta etapa consistió en la búsqueda de información documental importante a la investigación de los buscadores académicos relevantes como ScienceDirect, Redalyc, Google Académico, Scielo y Springer Link, con la finalidad de elaborar el marco teórico, antecedentes y metodología de estudio.

**Etapas de campo:** Primero se realizó la toma de puntos con GPS para poder ubicar el punto de muestreo; luego, se procedió a la recolección de muestreo de agua en campo para evaluar la temperatura, pH, BDO, Turbidez, nitrato, amonio, así mismo, se toma muestras para

analizar los niveles de metales captados en el agua, todo ello, basados en muestreos de aguas residuales NTP 214.042-2012.

### **Etapa de análisis de datos**

El análisis de los datos obtenidos se organizó de manera sistemática y se procesa en el software Microsoft Excel.

Respecto a los ensayos de calidad del agua son analizados teniendo en cuenta las Normas Técnicas Peruanas y los ECA para el agua.

El agua se clasifica en relación de los parámetros establecidos por las concentraciones de metales pesados, con el fin de categorizarlo para su posterior uso.

### **2.6. Aspectos Éticos**

Esta investigación respeta la propiedad intelectual de cada uno de los autores en relación con sus teorías y conocimientos, citándolos correctamente y especificando las fuentes bibliográficas de acuerdo con las normas APA.

Asimismo, es estrictamente confidencial con el manejo de la información dirigida al estudio, además que los datos no serán ni adulterados ni manipulados, con el fin de ser objetivos y que pueda ser usado en posteriores estudios.

Con el fin de garantizar la validez de la tesis, se emplearán técnicas de análisis apropiadas para generar datos confiables, todo conforme al reglamento de muestras de aguas residuales NTP 214.042-2012 y la mecánica de suelos y cimientos NTP R-50.

El diseño metodológico estuvo alineado con el propósito presentado, los cuales se seleccionaron pertinentemente, considerando contextos e informes interpretados adecuadamente con los resultados.

El trabajo de investigación, dispone de los consentimientos pertinentes de los participantes involucrados y las autorizaciones reglamentarias para su difusión en las plataformas digitales establecidas.

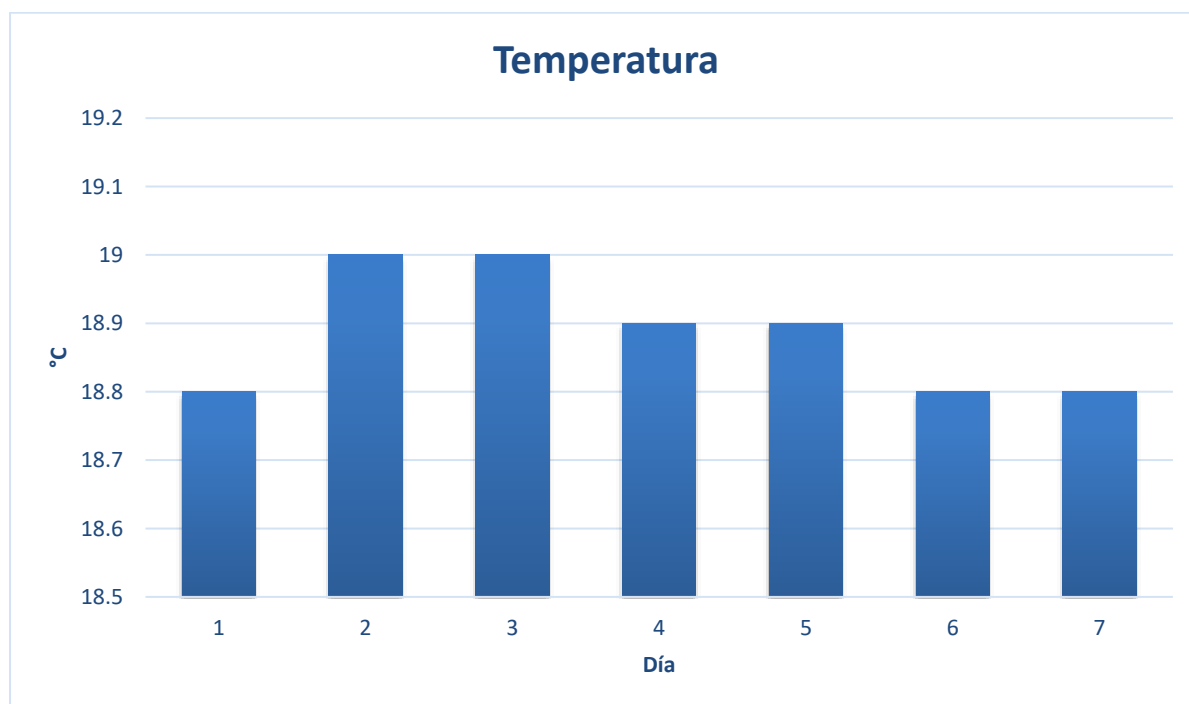
## CAPÍTULO III: RESULTADOS

### 3.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua

Seguidamente, se presentó información estadística evaluados del agua que drena por medio del sustrato y la vegetación de totora y carrizo en función del tiempo; siendo estos la temperatura, la turbidez, el pH, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, el nitrato de amonio, tal como se observa en las Figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

**Figura 1**

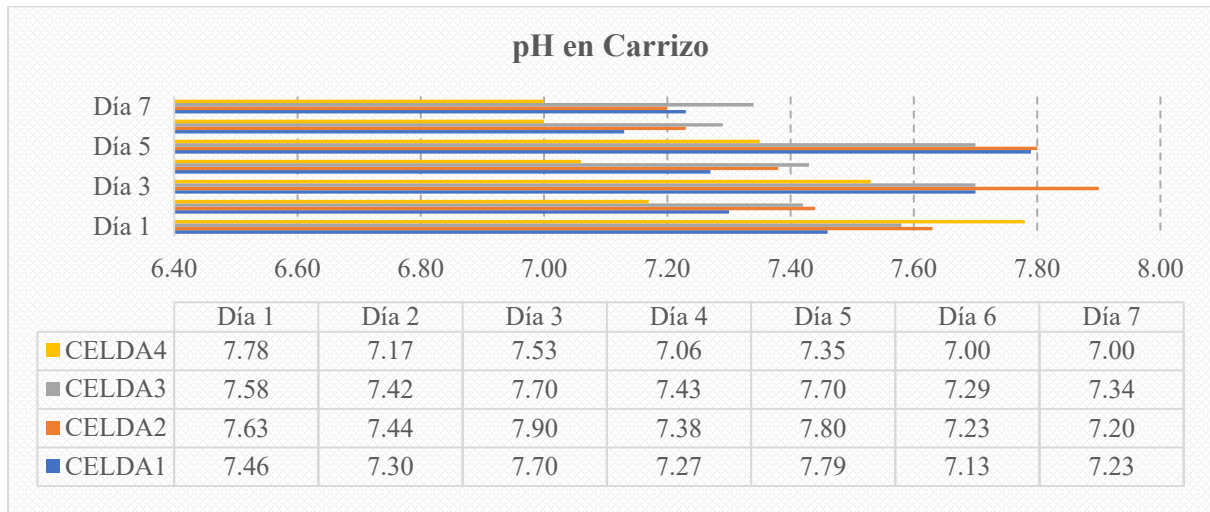
*Variabilidad de la temperatura en los días evaluados*



**Nota.** La temperatura se midió directamente mediante un termómetro, pudiéndose apreciar que las temperaturas oscilan entre los 18.8 a 19 °C, siendo los días 2 y 3 los que mayor temperatura alcanzan, mientras los más bajos valores se tienen los dos últimos días evaluados.

**Figura 2**

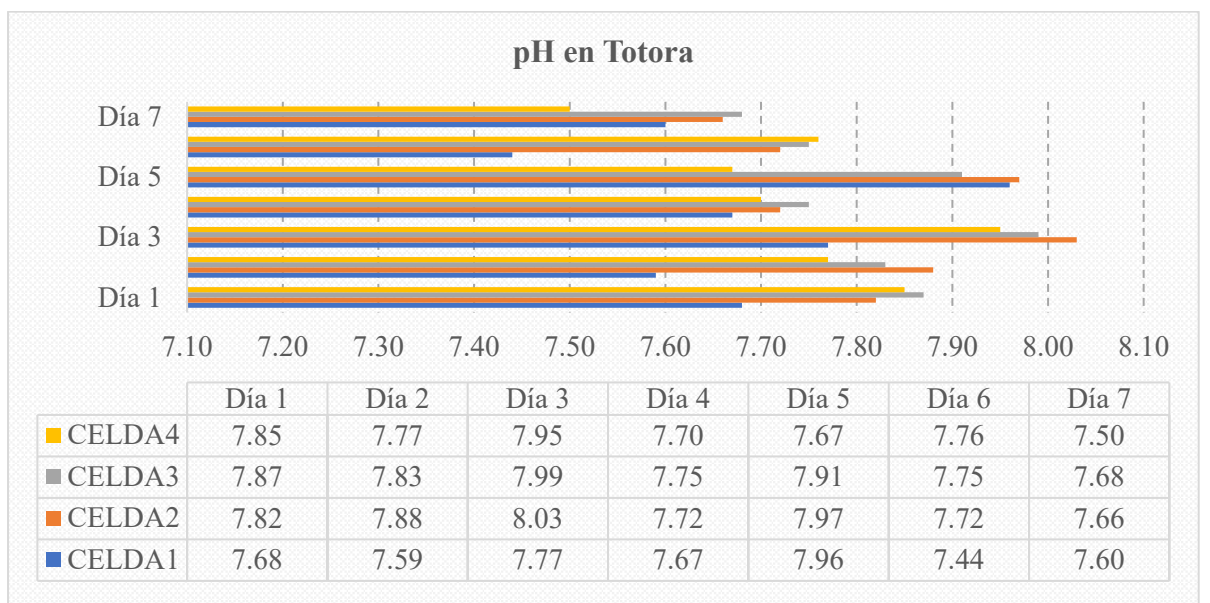
*Medición de pH en el carrizo*



**Nota.** Se muestra que el comportamiento del pH en el carrizo no es uniforme, debido a que este aumenta y disminuye como sucede en todos los días, además se aprecia que en el tercer día de la celda 2 se tiene el pico más alto con un valor de 7.90, mientras que el pH más bajo se aprecia en el sexto y séptimo día con un valor de 7.

**Figura 3**

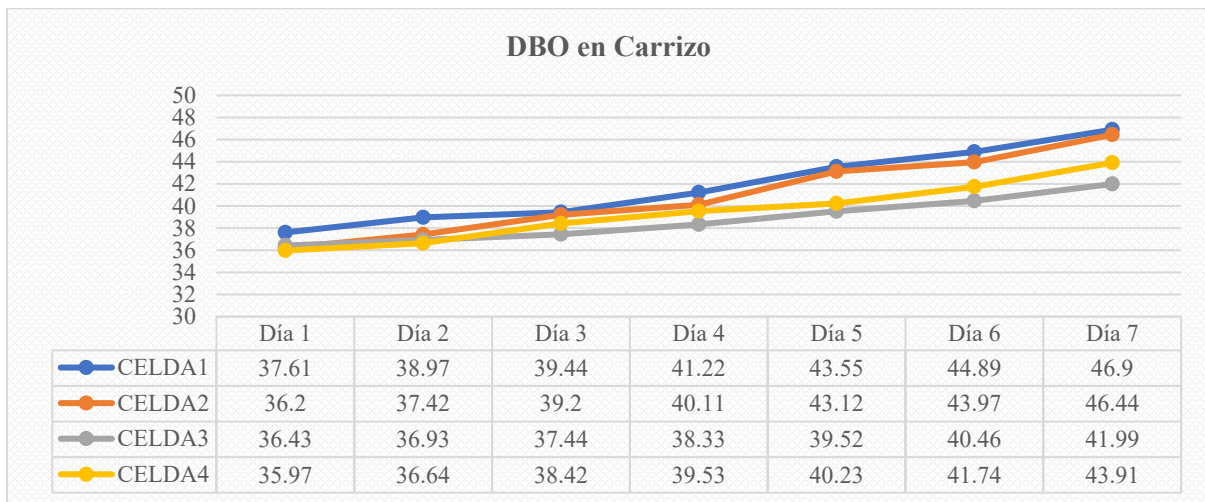
*Medición de pH en Totora*



*Nota.* Se puede observar que los pH tampoco tienen una tendencia definida a crecer o decrecer conforme pasa los días; así mismo, se puede apreciar que en el tercer día en la celda 2, se tiene el pH más elevado con 8.03.

**Figura 4**

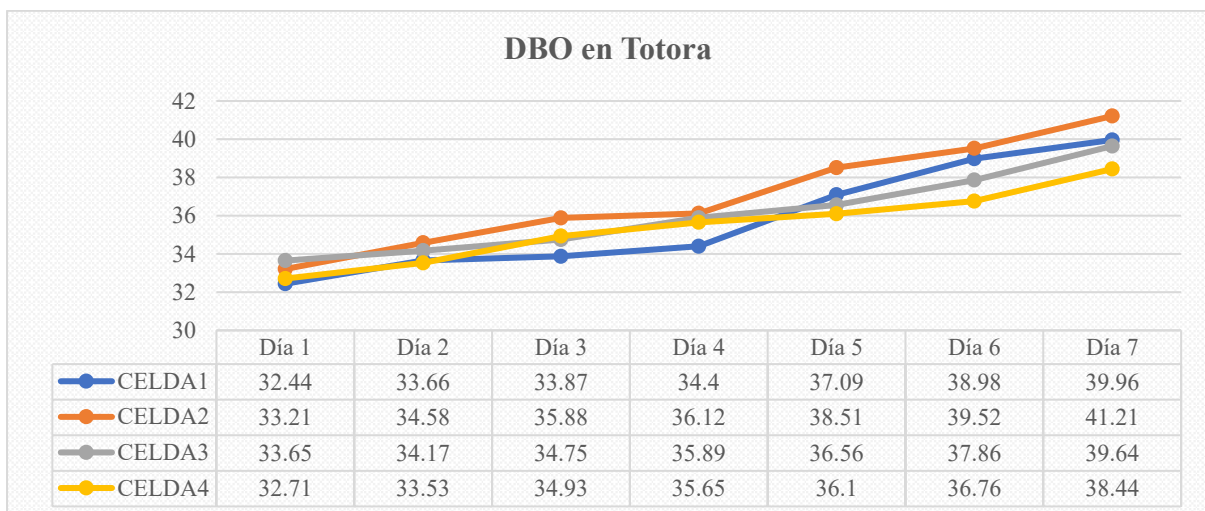
*Evaluación del DBO para carrizo*



*Nota.* Se aprecia que el crecimiento de la demanda bioquímica de oxígeno va de forma creciente cada día, por ende, llega al pico más alto el último día.

**Figura 5**

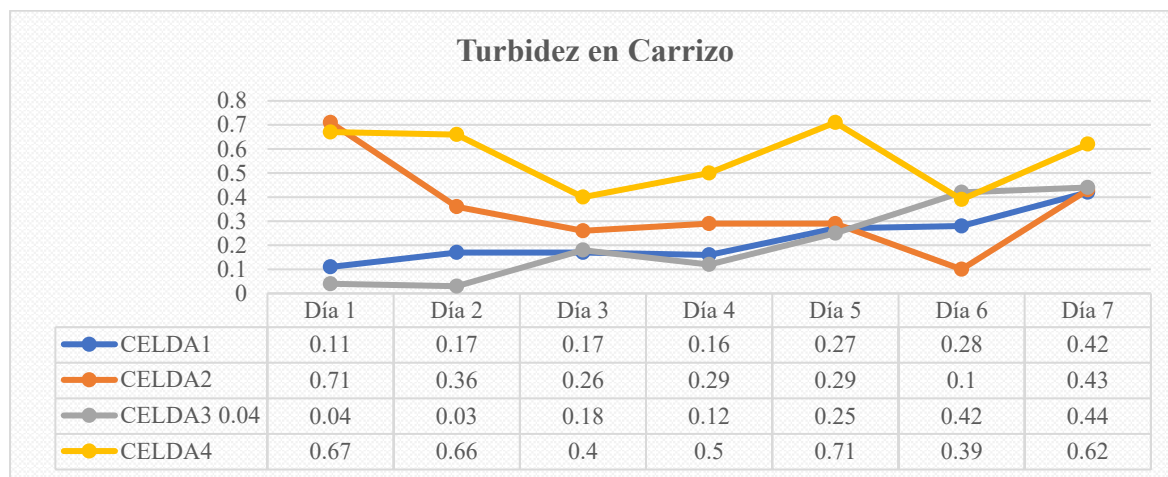
*Evaluación del DBO para totora*



*Nota.* Se aprecia que en cada día la celda va aumentando periódicamente la demanda bioquímica de oxígeno en la totora.

**Figura 6**

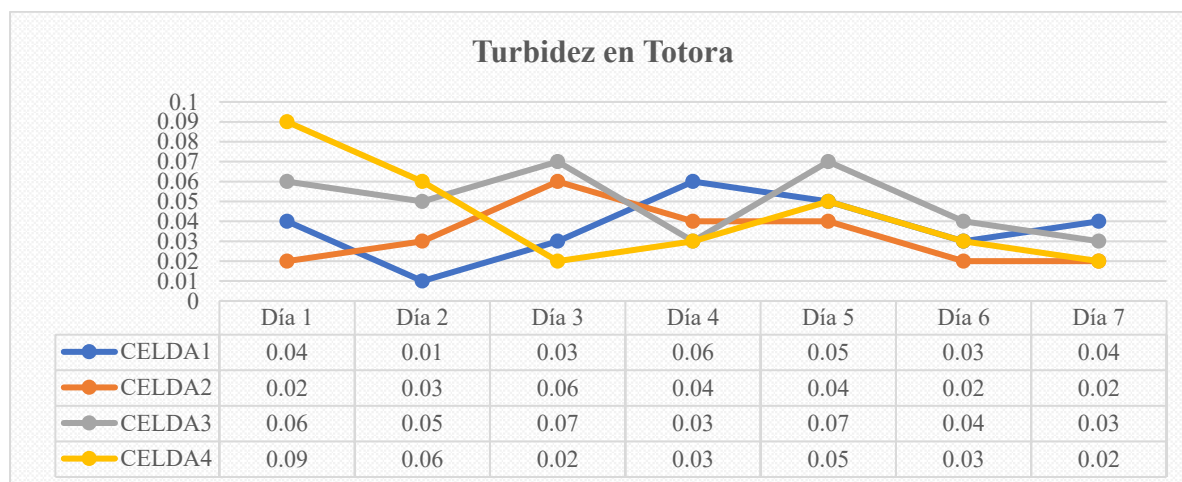
*Evaluación de la turbidez en el carrizo*



*Nota.* Se muestra que, durante los días de evaluación, las celdas 1 y 3 presentan una tendencia ascendente, mientras que las celdas 2 y 4, tienen un comportamiento más irregular, pero de forma decreciente.

**Figura 7**

*Evaluación de la turbidez en la totora*



*Nota.* Se muestra una tendencia muy irregular, pero las celdas 1 y 2 después de los días de evaluación, regresa nuevamente al punto de inicio. Por su parte, las celdas 3 y 4 decrecen con respecto a cómo ingresaron al tratamiento. Asimismo, los días empleados para realizar la investigación de recojo de muestras y análisis del agua fueron 7.

**Tabla 1**

*Análisis de nitrato en los días de investigación*

Contaminante	Celda	Planta	Día 0	Día	Día	Variación/	Variación/
				1	7	Día 1	Día 7
Nitrato	Celda 1	carrizo	15	3.5	2.5	77 %	83 %
		tatora	15	0.45	0.1	97 %	99 %
2 Cu	Celda 2	carrizo	15	3	0.1	80 %	99 %
		tatora	15	2.5	0.7	83 %	95 %
3 Zn	Celda 3	carrizo	15	3.7	0.2	75 %	99 %
		tatora	15	2.4	1.1	84 %	93 %
4 Pb	Celda 4	carrizo	15	3	0.6	80 %	96 %
		tatora	15	2	1.3	87 %	91 %

*Nota.* La Tabla mostró que en todos los datos recolectados durante el periodo de evaluación han disminuido la cantidad de nitrato; teniendo para el carrizo en las cuatro celdas una variación en el séptimo día de 83 %, 99 %, 99 %, 96 % respectivamente, con respecto al día que se inició el análisis. Así mismo, para la totora en las cuatro celdas se observa una variación de 99 %, 95 %, 93 % y 91 % con respecto al día cero.

**Tabla 2**
*Análisis de nitrato en los días de investigación*

Contaminante	Celda	Planta	Día	Día	Variación/ Día 1	Variación/ Día 7	
			0	1			7
<b>Amonio</b>	Celda	carrizo	15	0.04	0.18	100 %	99 %
	1	tatora	15	0.58	1.5	96 %	90 %
	Celda	carrizo	15	0.52	3	97 %	80 %
	2 Cu	tatora	15	0.4	0.77	97 %	95 %
	Celda	carrizo	15	2.5	3	83 %	80 %
	3 Zn	tatora	15	0.08	2.45	99 %	84 %
	Celda	carrizo	15	0.03	0.09	100 %	99 %
	4 Pb	tatora	15	0.12	1.25	99 %	92 %

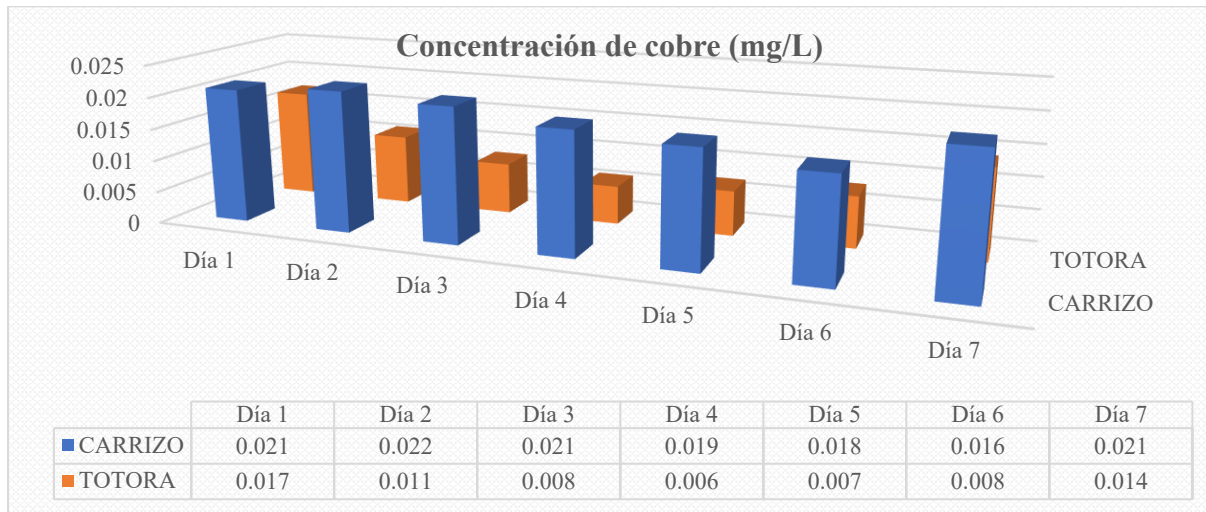
**Nota.** En la Tabla, se apreció que la cantidad de amonio en las cuatro celdas de carrizo ha decrecido considerablemente, esto con una variación del 99 %, 80 %, 80 % y 99 %; igualmente, en las cuatro celdas de totora se nota la disminución en la concentración de cobre con una variación del 90 %, 95 %, 84 %; 92 %, respectivamente.

### 3.2. Evaluación de concentraciones de metales pesados

A continuación, se presentan las concentraciones de metales pesados contenidos en las aguas servidas absorbidos por los humedales artificiales.

**Figura 8**

*Evaluación de absorción de cobre en el humedal*



**Nota.** La figura presentó, las concentraciones más altas de cobre se pueden apreciar, el segundo día para el carrizo con 0.22 mg/L y el que menor cantidad presenta en el sexto día con 0.016 mg/L; en cambio para la totora el primer día se tiene la concentración más alta con 0.017 mg/L y el de menor cantidad de concentración es el cuarto día con 0.006 mg/L.

**Tabla 3**

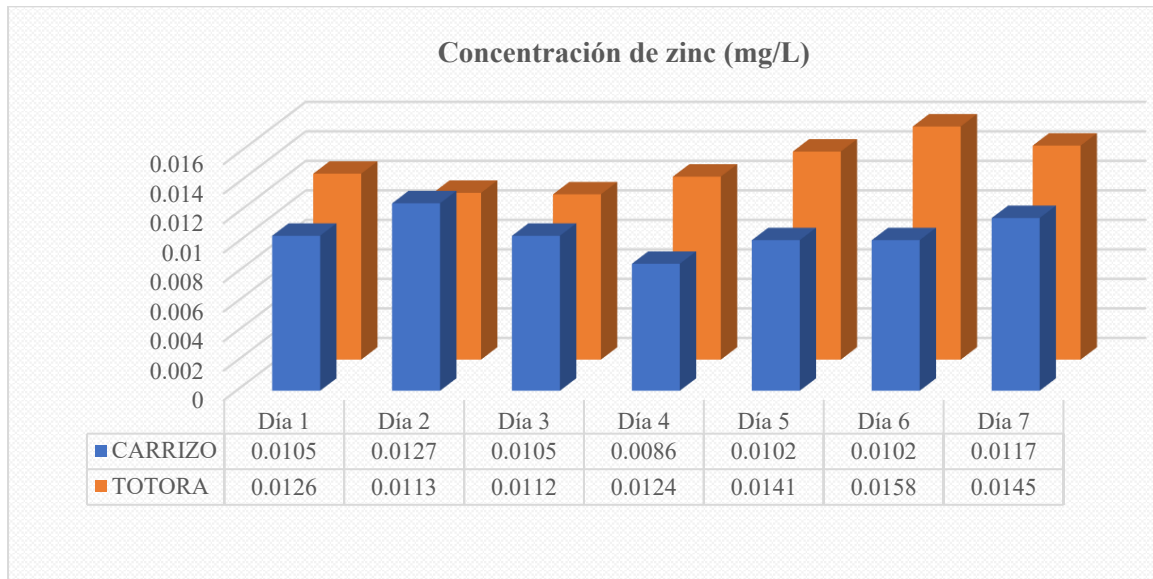
*Cantidad de cobre posterior a los 14 días*

Concentración de Cu (mg/L)	
Carrizo	0.011
Totora	0.006

**Nota.** En la tabla se evidenció que la especie que menor cantidad de cobre presenta es la totora con 0.006 mg/L, seguido por el carrizo con 0.011 mg/L.

**Figura 9**

*Evaluación de absorción de zinc en el humedal*



**Nota.** En la gráfica de barras se observó que la concentración más baja de zinc en *Phragmites australis* se presenta en el cuarto día con 0.0086 mg/L, mientras que la mayor concentración corresponde al segundo día con 0.0127 mg/L. En contraste, para *Schoenoplectus californicus*, la menor concentración se registra en el segundo día con 0.0113 mg/L, y la mayor cantidad se encuentra en el sexto día con 0.0158 mg/L.

**Tabla 4**

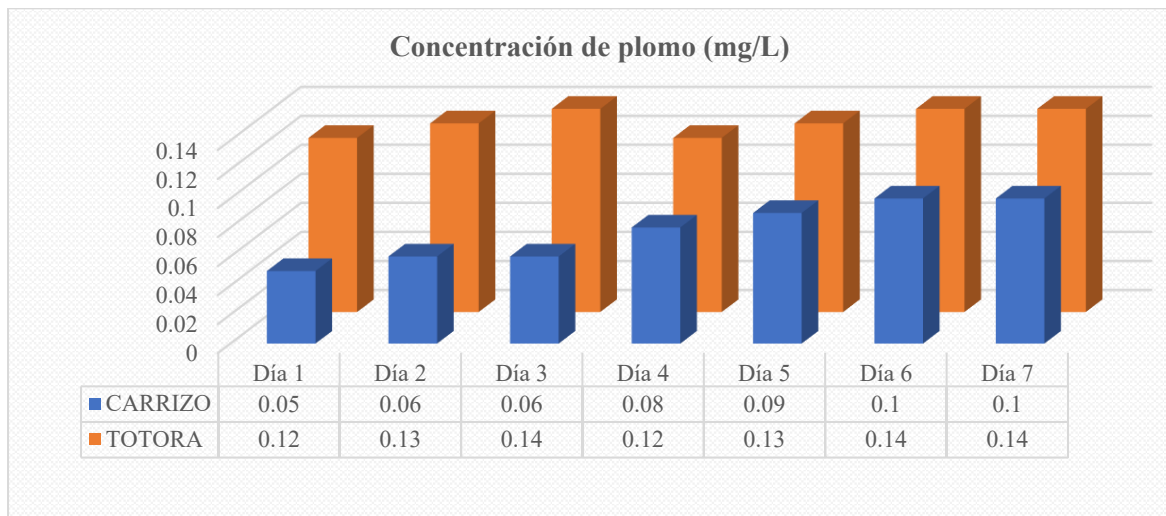
*Cantidad de zinc 14 días después*

<b>Concentración de Zn (mg/L)</b>	
Carrizo	0.0124
Totora	0.0127

**Nota.** En tabla se detectó que la especie que menor cantidad de zinc presenta es el carrizo con una concentración de 0.0124 mg/L, y la que mayor cantidad de concentración tiene es la totora con 0.0127 mg/L.

**Figura 10**

*Evaluación de absorción de plomo en el humedal*



**Nota.** La figura, se observó que la concentración más baja de plomo en *Phragmites australis* se presenta en el primer día con 0.05 mg/L, y la mayor concentración se registra en el sexto y séptimo día con 0.1 mg/L. En contraste, para *Schoenoplectus californicus*, la menor concentración se encuentra en el primer y cuarto día con 0.12 mg/L, y la mayor cantidad se detecta en el tercero, sexto y séptimo día con 0.14 mg/L.

**Tabla 5**

*Cantidad de plomo 14 días después*

Concentración de Pb (mg/L)	
Carrizo	0.12
Totora	0.14

**Nota.** La tabla mostró que la menor concentración de plomo se encuentra en la especie *Phragmites australis* con 0.12 mg/L, mientras que la mayor concentración corresponde a *Schoenoplectus californicus* con 0.14 mg/L.

### 3.3. Comparación de resultados con estándares de calidad de agua

Seguidamente, se exhibe un cuadro comparativo de los resultados obtenidos para los elementos traza con los criterios normativos de calidad hídrica.

**Tabla 6**

*Comparación de resultados con la Categoría 1-A2: Subcategoría A; A2*

DS N° 004-2017MINAM				
Parámetro	Unidad	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Resultados por puntos de monitoreo	
			Carrizo	totora
PARÁMETROS DE LABORATORIO				
METALES TOTALES POR ICP-MS				
COBRE (Cu)	mg/L	2	0.011	0.006
PLOMO (Pb)	mg/L	0.05	0.12	0.14
ZINC (Zn)	mg/L	5	0.0124	0.0127

**Nota.** Se analizó la comparación de resultados con la Categoría 1-A2: Subcategoría A; A2: Aguas que son aptas para ser potabilizadas mediante un tratamiento convencional., evidenciándose que tanto el cobre como el zinc están por debajo de los límites, pero la concentración de plomo esta sobre el límite en 0.07 mg/L para el carrizo y 0.09 mg/L para la totora.

**Tabla 7**
*Comparación de resultados con la Categoría 1-B: Subcategoría B*

		DS N° 004-2017MINAM Resultados por puntos de categoría 1-B:Subcategoría monitoreo			
Parámetro	Unidad	B: aguas destinadas para recreación			
		B1 contacto primario	B2 contacto secundario	Carrizo	Totora
PARÁMETROS DE LABORATORIO					
METALES TOTALES POR ICP-MS					
COBRE (Cu)	mg/L	2	**	0.011	0.006
PLOMO (Pb)	mg/L	0.01	**	0.12	0.14
ZINC (Zn)	mg/L	3	**	0.0124	0.0127

**Nota.** La tabla presentó comparación de resultados con Categoría 1-B: Subcategoría B: Aguas destinadas para recreación, se aprecia que tanto cobre como zinc están por debajo de los límites, pero la concentración de plomo esta sobre el límite en 0.11 mg/L para el carrizo y 0.13 mg/L para la totora.

**Tabla 8**

*Comparación de resultados con la Categoría 3, subcategoría D1 y D2*

		DS N° 004-2017 MINAM Resultados por puntos de categoría 3 monitoreo			
Parámetro	Unidad	D1 riesgos	D2 bebidas	Carrizo	Totora
		de vegetales	de animales		
PARÁMETROS DE LABORATORIO					
METALES TOTALES POR ICP-MS					
COBRE (Cu)	mg/L	0.2	0.5	0.011	0.006
PLOMO (Pb)	mg/L	0.05	0.05	0.12	0.14
ZINC (Zn)	mg/L	2	24	0.0124	0.0127

**Nota.** La tabla compara los resultados con la Categoría 3, subcategoría D1 y D2 para riego y bebida de animales, en donde tanto cobre como zinc están por debajo de los límites, pero la concentración de plomo esta sobre el límite en 0.07 mg/L para el carrizo y 0.09 mg/L para la totora.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 DISCUSIONES

Las limitantes encontradas fueron: uno es con el humedal, esto debido a que, si el agua tiene un contenido de metales demasiado alto, esta puede ser tóxica para el carrizo y la totora causando su muerte rápidamente, lo que resulta en la degradación de la biomasa que devuelve los contaminantes al agua; otro fue el traslado de las muestras de agua, debido a que se contaba con poco tiempo para poder llevarlas a laboratorio sin que estas cambien su composición química, esto en conjunto con la movilidad puesto que era necesario ser trasladadas las muestras hasta los laboratorios a Cajamarca ya que en los distritos cercanos no se cuenta con este tipo de laboratorios especializado en agua.

El tratamiento de efluentes mediante humedales artificiales demuestra la eficacia en el tratamiento de aguas ácidas de minería o de cualquier otra industria se puede realizar mediante tratamientos convencionales (humedales artificiales) no tan costosos, pero que son eficientes y cumplen con los estándares de calidad; generando de este modo una minería responsable y sostenible en el tiempo.

En su estudio, Pulcha & Valencia (2019), menciona que humedales artificiales disminuyen los niveles de contaminantes eco-tóxicos de efluentes de una operación minera, obteniendo la reducción de contaminantes de la concentración inicial ingresante del agua, además, las concentraciones finales de los elementos trazan se encontraban por debajo de los valores máximos permitidos. Parecido a su investigación, en nuestras muestras se tiene que los parámetros fisicoquímicos al inicio del análisis son elevados, que van disminuyendo paulatinamente conforme pasan los días, tanto en pH, nitrato y amonio, mientras que el (BDO) fue en aumento; así mismo, sucede con las concentraciones de elementos como el cobre y el zinc cumplieron con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua. en sus diferentes categorías y subcategorías, pero en el caso del plomo esta pasado los 21 días no cumplen con

el estándar mínimo, esto probablemente dado por la liberación de plomo que realiza la totora pasado el primer día de análisis.

Por otra parte, es importante tener en cuenta antes de usar los humedales artificiales la concentración de contaminantes que presenta el lugar de estudio, debido a que si estos son muy elevados se debe realizar un pretratamiento con el fin aportar una mayor degradación de los elementos contaminantes.

Así mismo, se recomienda para reducir la acumulación de metales tóxicos para el carrizo y la totora, y poder aumentar la tolerancia de contaminantes, fertilizar las especies de plantas con nutrientes, debido a que la eliminación contaminante del agua se mejora mediante el enriquecimiento nutricional a través de un aumento la producción.

Conjuntamente, es importante realizar la siega y sacado periódico de las plantas del humedal con el fin de que los contaminantes retenidos no vuelvan a las aguas a través de la descomposición de la biomasa vegetal.

## 4.2 CONCLUSIONES

El análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua muestra la disminución de contaminantes, esto evidenciado en el pH que al tener contacto con las especies vegetales (carrizo y totora) esta disminuye hasta casi estar en un pH neutro oscilando entre los 7 a 7.3 en el caso del carrizo y de 7.5 a 7.7 en el caso de la totora. Así mismo, en el caso de (BDO) esta incrementó la cantidad de oxígeno dentro del agua entre un rango de 41 a 47 en el caso del carrizo y de 38 a 41 en el caso de la totora. Igualmente, en el nitrato en las cuatro celdas la variación de concentración de nitrato cambia casi en todas a mayor del 90 %, menos en la celda 1 en la planta de carrizo solo alcanza al 83 %, pero todas teniendo una concentración muy baja. Del mismo modo, las variaciones de concentración de amonio son mayores al 80 %, inclusive alcanzan el 99 %, es decir que en ambas especies las concentraciones son mínimas.

Las concentraciones iniciales de metales pesados en el agua de 5.8 mg/L a 4.2 mg/L disminuyeron considerablemente en todos, esto evidenciado en que la concentración de cobre se redujo a un 0.011 mg/L en el caso del carrizo y en la totora una reducción al 0.006 mg/L; mientras que el zinc se redujo aun 0.0124 mg/L en el caso del carrizo y en la totora a un 0.0127 mg/L; para el plomo se disminuye a un 0.12 mg/L en el carrizo y en la totora a un 0.14 mg/L.

En el caso del plomo sucede algo particular, debido a que, en el primer día la concentración reduce a 0.05 mg/L para el carrizo y 0.12 mg/L para la totora, pero estos en vez de disminuir conforme avanzan los días, estos aumentan la concentración en pocas cantidades, por ello, se deduce que las plantas empiezan a liberar plomo conforme avanzan los días porque son tóxicos para su desarrollo.

La comparación de la concentración de metales pesados con los estándares de calidad establecidos en los ECA para agua y disposiciones complementarias resulta positiva, debido a que estas cumplen con los estándares para ser empleados para aguas potables con previo tratamiento de potabilización convencional, destinadas para la recreación, y uso en el riego vegetal y bebidas de animales.

## REFERENCIAS

- Bustamante, E., & Pérez, W. (2019). Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales municipales utilizando las especies junco *Typha sp* y vetiver *Chrysopogon zizanioides* en el distrito de Saposoa (*Tesis de pregrado*). *Universidad Peruana Unión. Perú*.
- Broche, M., Pérez, L., García, R., & González, J. (2022). Caracterización de residuos agroindustriales y su aplicación en la remoción de azul de metileno de soluciones acuosas por adsorción. *Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central Marta Abreu De Las Villas*, 467-473.
- Cardona, P. (2018). Humedales artificiales: Una alternativa para tratamiento de aguas de producción (*Tesis de grado*). *Fundación Universidad de América*.  
<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7132/1/091369-2018-I-GA.pdf>
- Chugden, N., & Verastegui, R. (2020). Evaluación de la eficacia de las plantas acuáticas de aguas residuales domésticas del distrito de Namora - Cajamarca. *Tesis*
- Dávila, M., & López, E. (2020). Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas mediante Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical utilizando diferentes Plantas Emergentes. *Ecuador: Universidad del Azuay*.
- Gabriel, A., Jenkins, P., & Smith, J. (2020). Contamination and oxidative stress biomarkers in estuarine fish following a mine tailing disaster. *PeerJ*, 8, e10266.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.10266>.
- Herrera, K., & Acuña, J. (2021). Determinación de especies vegetales empleadas en la Fitorremediación de aguas residuales y su comparación con otras tecnologías de remediación. *Tesis de maestría*.
- Kukoc, I. (2020). La técnica extractiva en la determinación social de la salud de las familias mineras de Potosí (Bolivia). *Revista Ciencias de la Salud*, 18(1), 1-1.

- Martínez, M. (2021). Metales pesados (cd, ni, mn) en agua y tejidos de Bocachico (*Prochilodus reticulatus*) y Rampuche (*Pimelodus grosskopfii*), en el corregimiento de tres bocas, cuenca del Catatumbo, norte de Santander, *Colombia*.
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *PAIDEIA XXI*, 11(1), 141-154. <https://doi.org/10.31381/paideia%20xxi.v11i1.3622>
- Obenaus-Emler, R., Falah, M., & Illikainen, M. (2020). Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. *Construction and Building Materials*, 246, 118470. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118470>
- Petelka, K., Somani, S., & Molla, R. (2019). Soil heavy metal(loid) pollution and phytoremediation potential of native plants on a former gold mine in Ghana. *Water, Air, and Soil Pollution*, 230, 267. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4242-5>
- Pulcha, J., & Valencia, M. (2019). Evaluación de la degradación de contaminantes eco tóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales (Tesis de ingeniería de minas). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/14458>
- Rubio, L., & Montenegro, A. (2018). Humedal Artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la 3ra Brigada de Fuerzas Especiales, batallón de servicios N° 300, Distrito de Rioja, Provincia de Rioja, Departamento de San Martín. (*Tesis de pregrado*). *Universidad Nacional De San Martín-Tarapoto*. Perú.
- Segura, P., & Rocha, W. (2019). Eficiencia de remoción de contaminantes de lixiviados generado en un relleno sanitario, mediante un biodigestor y humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a través de la especie macrófita emergente carrizo (*Phragmites australis*). *Tesis, Universidad Peruana Unión, Lima, Lima*. Recuperado de <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1942>

Fazlolah, H., & Eslamian, S. (2014). Using wetland plants in nutrient removal from municipal wastewater. *Hydrology Science and Technology*, 4, 68-80. <https://doi.org/10.1080/2042-7816.2014.890951>

Velásquez, J. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167.

## ANEXOS

### Acondicionamiento de pozas de cultivo



### Preparación de medios de cultivo



### Toma de muestras de parámetros ambientales



### Recolección de datos con equipos y materiales



### Verificación de crecimiento de Totora



### Verificación de crecimiento de carrizo



### Recolección de muestras de agua de totora



### Recolección de muestras de agua de carrizo

