

Evaluación de la capacidad rizofiltradora del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como alternativa para el tratamiento de agua contaminada con cobre, a escala de laboratorio.

Brenda Aimini ^{a*}, Erika Ríos ^a

^aUniversidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP Ingeniería Ambiental Lima, Peru.

Resumen

La rizofiltración, un proceso natural que implica la absorción de contaminantes del agua por las raíces de las plantas, ha surgido como una técnica prometedora para remediar la contaminación por metales pesados en aguas residuales. El uso de plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) ha despertado gran interés debido a su eficacia en la remoción de metales pesados y su capacidad para revitalizar ecosistemas acuáticos degradados. En este contexto, se evaluó el efecto del cobre en el crecimiento y fisiología de la *Eichhornia crassipes* en condiciones controladas. Se adquirieron 12 muestras de Jacinto de agua, de las cuales 10 se utilizaron en unidades experimentales y 2 se mantuvieron como control. Las plantas fueron seleccionadas por su buena pigmentación, ausencia de anomalías y espesor radicular adecuado, y luego se sometieron a un proceso de aclimatación.

El análisis de varios parámetros después de 21 días mostró que el pH varió entre 4.9 y 5.8, la conductividad entre 980 y 1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la temperatura se mantuvo constante entre 21.1°C y 21.9°C, el oxígeno disuelto varió entre 3.7 y 7.1 mg/L, y los sólidos suspendidos entre 480 y 670 mg/L. En general, se observó que la concentración influye en estos parámetros, con mayores concentraciones asociadas a mayores valores de conductividad y sólidos suspendidos, y menores valores de oxígeno disuelto. Además, se notó una reducción en la cantidad de hojas y un aumento en el crecimiento de raíces en la mayoría de las muestras, sugiriendo que el proceso de rizofiltración puede afectar la retención de hojas y fomentar el desarrollo de raíces.

Palabras clave: contaminación, metales pesados, aguas residuales, rizofiltración, plantas acuáticas, *Eichhornia crassipes*, cobre.

1. Introducción

La contaminación de las fuentes de agua con metales pesados es un problema global cada vez más urgente. Estos metales, altamente nocivos, representan una seria amenaza para las comunidades que dependen del agua, con efectos perjudiciales tanto para la salud humana como para los ecosistemas que sustentan la vida (Pabón, Benítez, Sarria Villa, & Gallo, 2020). La contaminación del agua con metales pesados es un problema ambiental de gran preocupación, ya que estos elementos químicos persisten en el entorno y entran en las cadenas alimentarias acuáticas, siendo tóxicos tanto para los organismos acuáticos como para los seres humanos (Mendoza, 2019). La presencia de metales pesados en los desechos industriales provoca alteraciones físicas, químicas y biológicas en el agua, lo que afecta la calidad del agua necesaria para el consumo humano (I., I., & A., 2018).

La creciente preocupación por la contaminación del agua a nivel global, especialmente por la presencia de metales pesados, es un desafío ambiental significativo que requiere soluciones innovadoras y efectivas. La persistencia de estos metales en el entorno acuático plantea serias amenazas para la salud humana y la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, especialmente en regiones como Perú, donde la presencia de metales pesados representa un desafío adicional (Montalban López & Olivares Ayaucan , 2022).

El volumen de aguas residuales producido diariamente en el Perú es de aproximadamente 2,217,946 metros cúbicos, los cuales son descargados en las redes de alcantarillado de las empresas prestadoras de servicios. Se estima que solo el 32% de estas aguas residuales recibe algún tipo de tratamiento. En el caso específico de la ciudad de Lima, la generación diaria de aguas residuales alcanza aproximadamente 1,202,286 metros cúbicos, de los cuales solo el 20.5% recibe tratamiento (INEI, 2014).

La rizofiltración, un proceso natural que implica la absorción de contaminantes del agua por las raíces de las plantas ha surgido como una técnica prometedora para remediar la contaminación por metales pesados en aguas residuales. En particular, el uso de plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) ha despertado un gran interés en la comunidad científica debido a su eficacia en la remoción de metales pesados y su capacidad para revitalizar ecosistemas acuáticos degradados (Marco Cano, 2023)

En este contexto, la rizofiltración de metales pesados en aguas residuales utilizando plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) emerge como una técnica de tratamiento potencialmente efectiva. Las plantas acuáticas, incluyendo las hiperacumuladoras o metalófitas, tienen la capacidad de acumular altas cantidades de metales pesados en sus raíces y transportarlos a diversas partes de la planta, lo que puede contribuir a la eliminación, disminución, transformación o estabilización de estos metales con tasas de eliminación de hasta el 100% (Caisachana Ramos, 2020). Es por eso que el objetivo del siguiente trabajo de investigación fue evaluar de manera integral el efecto del cobre en el crecimiento y fisiología de la planta *Eichhornia crassipes* en condiciones controladas.

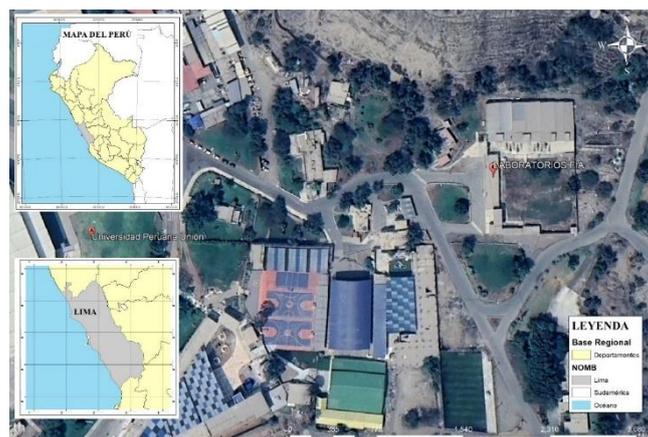
2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la Universidad Peruana Unión - Ñaña, que pertenece al distrito de Lurigancho – Chosica. El agua utilizada en esta investigación fue simulada en los laboratorios de la universidad a cinco diferentes concentraciones. La muestra se simuló el 15 de mayo del 2024 y se realizará un monitoreo cada 7 días. Los parámetros incluyeron potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura (T°) y oxígeno disuelto (OD).

Figura 1

Zona de estudio.



2.2. Fases del Proyecto

2.2.1. Fase 1: Etapa de Campo

2.2.1.1. Obtención de plantas macrófitas

Para esta investigación, se adquirieron 12 muestras de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) a través de un proveedor que cumplía con las características morfológicas adecuadas, siguiendo las condiciones mencionadas por (Jaramillo & Flores, 2012). De estos individuos, 10 fueron utilizados en las unidades experimentales (UE) y los otros 2 se mantuvieron como grupo de control. Las plantas cumplieron con los siguientes criterios:

- Tener una buena pigmentación.
- No presentar ninguna anomalía en ninguna de sus partes.
- Ser plantas jóvenes.

Además, era necesario que los individuos tuvieran un buen espesor radicular y no presentaran necrosis en las hojas. Según lo indicado por (Marco Cano, 2023) el Jacinto de agua se caracteriza por su resistencia a condiciones adversas. Sin embargo, siguiendo lo anteriormente mencionado, después de obtener las plantas con las mejores condiciones morfológicas, se sometieron a un proceso de aclimatación.

Durante este proceso, las plantas fueron introducidas en estanques y se dejaron en un lugar ventilado e iluminado durante 3 días, tal como lo afirma (Caisachana Ramos, 2020). Este proceso fue de gran importancia, ya que, según lo mencionado por (Mendoza, 2019) rango óptimo de temperatura para distintas especies oscila entre 25 y 31°C.

Previo a que las 12 plantas fueran expuestas a sus respectivos sistemas, creamos una base de datos en Microsoft Excel para asignar a cada planta un código, registrar su peso y hacer algunas observaciones sobre sus características morfológicas. Hicimos esto con el objetivo de recopilar datos que nos permitieran comparar el número de nacimientos o muertes de las plantas, así como también observar cómo variaban sus características morfológicas a lo largo del tiempo.

2.2.1.2. Macrófitas

Las plantas acuáticas grandes son fundamentales en los lagos, ya que juegan roles clave como la generación de materia orgánica, la creación de hábitats para diversas formas de vida, la reutilización de nutrientes y la prevención de la erosión del suelo (Vargas Perdomo, Oviedo Salazar, Montañez Velasquez, & Polonia Patiño, 2018). La *Eichhornia crassipes* se reconoce por el color azulado de sus raíces, según mencionan (Jaramillo & Flores, 2012).

2.2.1.2.1. Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)

El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) es una planta acuática flotante con importantes implicaciones ecológicas y socioeconómicas, capaz de reproducirse tanto sexual como asexualmente (Villamagna & Murphy, 2010). Caracterizado por tallos largos de aproximadamente 15 a 20 cm, con nudos y entrenudos de unos 3 cm de longitud, presenta hojas sésiles dispuestas en rosetas en la base y hojas flotantes con pecíolos. Las hojas son de textura membranosa, hinchadas y bulbosas, y posee un sistema radicular abundante de coloración que varía de café claro a oscuro (Castillo Nuñez, 2013). Originaria de Brasil, esta especie ornamental para estanques se destaca por su alta capacidad reproductiva y adaptativa, lo que la ha llevado a figurar entre las diez malezas más invasivas del mundo (Ramírez Cando & Guevara Granja, 2015).

El jacinto de agua crece de manera abundante en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, incluyendo el sudoeste de Japón. Recientemente, ha atraído atención por su potencial para eliminar contaminantes cuando se emplea como sistema de filtración biológica (Muramoto & Oki, 1983).

Figura 2

Macrófita (Jacinto de agua).



Tabla 1

Taxonomía del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Commelinales
Familia	Pontederiaceae
Género	Eichhornia
Especie	E. Crassipes

Figura 3

Desinfección de las macrófitas.



Las 12 muestras de las plantas macrófitas fueron desinfectadas tres veces con agua destilada previo a su uso para evitar que cualquier residuo alteren los resultados. Asimismo, las 12 plantas fueron pesadas para su comparación final y análisis de resultados.

Tabla 2

Características físicas iniciales de *Eichhornia crassipes*

Macrófita	Vasos de precipitado (cantidad)	Cantidad de macrófitas x vaso	Color de hoja	Número de hojas (unidad)	Tamaño de raíz (cm)
Jacinto de Agua (<i>Eichhornia Crassipes</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 muestras • 5 replicados 	1	Al inicio del trabajo de investigación, las hojas de las macrófitas tanto como los peciolo tendían a tener un color verdoso.	El número de hojas fueron de 4 a 11 en promedio por muestra.	El tamaño inicial de las raíces fue de 6 a 18 en promedio.

Tabla 3Características físicas iniciales de *Eichhornia crassipes*

Muestra	Concentración (gr)	Número de hojas (unidad)	Tamaño de raíz (cm)
J1		10	13.9
	0.125		
RJ1		8	9
J2		6	16
	0.25		
RJ2		8	8
J3		10	12.6
	0.375		
RJ3		8	7.5
J4		7	10
	0.5		
RJ4		9	9.3
J5		6	6.3
	0.625		
RJ5		4	7.8
J6		11	13.4
	GC		
RJ6		9	18.5

Interpretación:

Al inicio del trabajo de investigación, las características físicas iniciales de las 12 muestras de *Eichhornia crassipes* expuestas a 5 diferentes concentraciones (0.125, 0.250, 0.375, 0.500 y 0.625) mostraron que tanto las hojas como los peciolo de las macrófitas tendían a presentar un color verdoso. Cada muestra, en promedio, contaba con 8 hojas y el tamaño medio de las raíces fue de aproximadamente 11 cm.

Figura 4

Peso inicial de las macrófitas.



Tabla 4

Peso inicial de las macrófitas.

Codificación	Peso	Unidad	Concentración	Unidad
J1	67.102	gr.	0.125	gr.
J2	51.648	gr.	0.250	gr.
J3	89.193	gr.	0.375	gr.
J4	77.990	gr.	0.500	gr.
J5	51.530	gr.	0.625	gr.

Figura 5

Peso inicial de las réplicas de las macrófitas.



Tabla 5

Peso inicial de las réplicas de las macrófitas.

Codificación	Peso	Unidad	Concentración	Unidad
J6	62.310	gr.	0.125	gr.
J7	73.585	gr.	0.250	gr.
J8	89.430	gr.	0.375	gr.
J9	63.610	gr.	0.500	gr.
J10	24.390	gr.	0.625	gr.

Figura 6

Pesaje inicial: Grupo control



Tabla 6

Peso inicial de las macófitas pertenecientes al grupo control.

Codificación	Peso	Unidad
J11	33.210	gr.
J12	28.896	gr.

2.2.1.3. Simulación del agua residual

Se usaron cinco concentraciones diferentes de sulfato de cobre (CuSO_4), las cuales fueron diluidas con agua destilada para preparar las soluciones. Las concentraciones se calcularon siguiendo el Decreto Supremo N° 004-2017- MINAM como referencia.

Tabla 7

Reactivo usado en la simulación del agua contaminada con cobre

Sulfato de cobre	
------------------	--

Para preparar la simulación del agua contaminada con cobre, se utilizó una balanza para pesar 0.125, 0.250, 0.375, 0.500 y 0.625 gramos de sulfato de cobre, se tomaron 6 vasos de precipitados y se agregó 1 litro de agua destilada en cada uno de ellos, de los 5 vasos de precipitados, se agregaron las concentraciones respectivas de sulfato de cobre, mientras que 1 solo contenía agua destilada, luego se agitó cada vaso de precipitados hasta que el sulfato de cobre se disolviera por completo, este procedimiento se repitió para tener duplicados de las muestras.

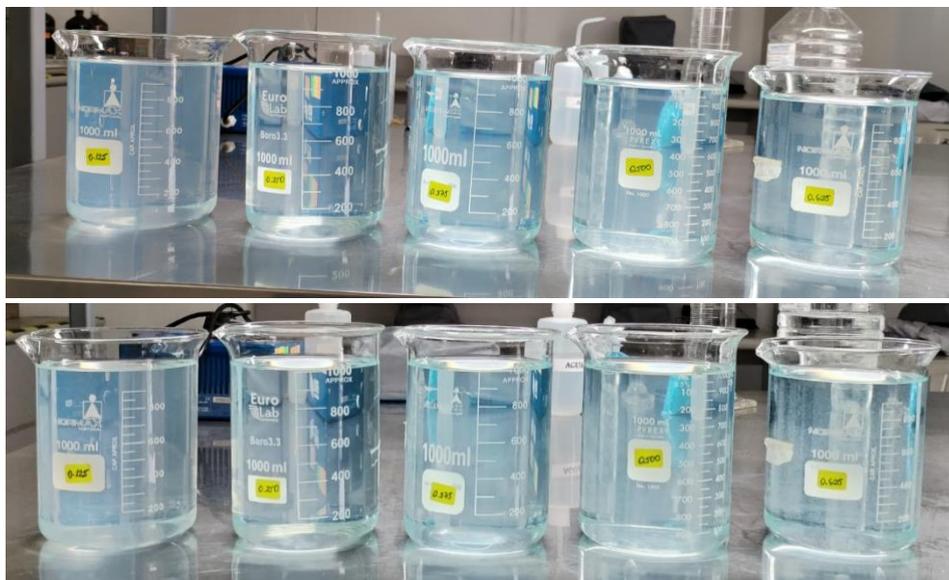
Figura 7

Pesaje de distintas concentraciones de sulfato de cobre.



Figura 8

Sulfato de cobre diluido



2.2.2. Fase 2: ETAPA EXPERIMENTAL

En esta etapa del estudio duró 21 días. Cada semana se realizó el monitoreo de las macrófitas utilizando las metodologías presentadas en la tabla 6: pH-multiparámetro.

Tabla 8

Análisis fisicoquímicos del agua simulada.

Jacinto de agua (<i>Eichhornia Crassipes</i>)								
Concentración	Sulfato de Cobre (CuSO_4)					Unidad	DS N° 001-2017-MINAM	
	0.125 g	0.250 g	0.375 g	0.500 g	0.625 g		Riego de vegetales	Bebida de animales
Parámetros								
pH	6.2	6.1	6.1	6.0	6.0	1 - 14	6.5- 8.5	6.5-8.4
Temperatura	24.5	24.5	24.6	24.5	24.4	°C	$\Delta 3$	$\Delta 3$
Oxígeno Disuelto	2.5	1.7	1.5	1.2	1.2	mg/L	≥ 4	≥ 5
CE	330	390	500	590	660	$\mu\text{s/cm}$	2500	5000

Esta tabla presenta datos sobre los efectos de diferentes concentraciones de Sulfato de Cobre (CuSO_4) sobre los parámetros de calidad del agua, específicamente en relación con el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). La tabla está dividida en varias columnas y filas, con la siguiente información

- **Agua**

La primera columna enumera los parámetros de calidad del agua que se están midiendo: pH, temperatura, oxígeno disuelto (Oxígeno Disuelto) y conductividad eléctrica (CE).

- **Cobre**

Las siguientes cinco columnas representan diferentes concentraciones de sulfato de cobre (CuSO_4) utilizadas en el estudio: 0,125 g, 0,250 g, 0,375 g, 0,500 g y 0.625 g.

Efectos sobre los parámetros de calidad del agua:

Para cada concentración de Sulfato de Cobre se enumeran los efectos correspondientes sobre los parámetros de calidad del agua:

- Los niveles de pH disminuyen ligeramente.
- La temperatura se mantiene relativamente
- El oxígeno disuelto disminuye significativamente a medida que aumenta la conductividad eléctrica.

Valores de referencia:

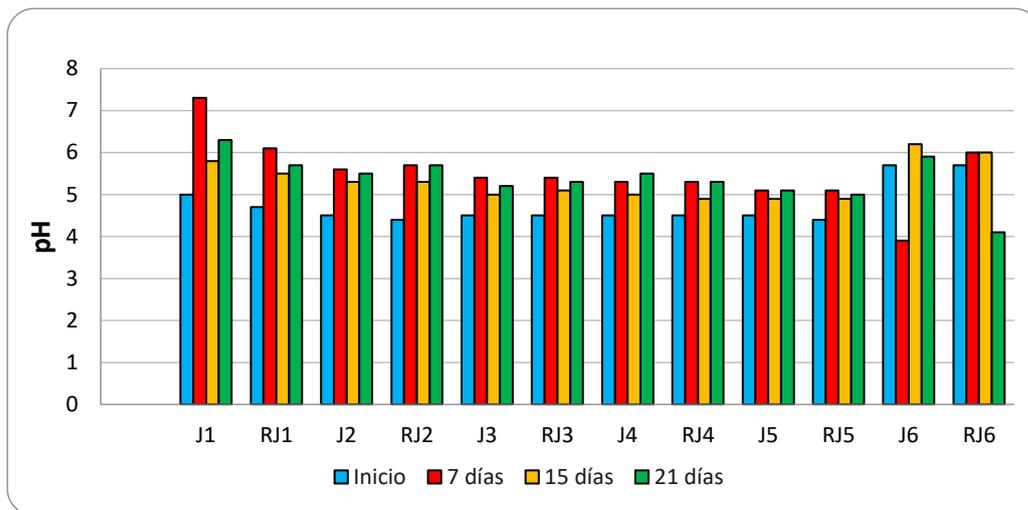
La tabla también incluye valores del DS N° 001-2017-MINAM, los valores de referencia se dan para el riesgo para los vegetales (Riesgo de vegetales) y para el agua de bebida de los animales (Bebida de animales). Para las verduras, el rango de pH aceptable es de 6,5 a 8,5, y para el agua potable de los animales, es de 6,5 a 8,4. Los niveles aceptables de oxígeno disuelto son ≥ 4 mg/L para vegetales y ≥ 5 mg/L para animales. La conductividad eléctrica aceptable es ≤ 2500 $\mu\text{s/cm}$ para vegetales y ≤ 5000 $\mu\text{s/cm}$ para animales.

2.3. Análisis de datos

En el siguiente análisis de datos se presentarán gráficos que hacen referencia a la comparación inicial y final de las propiedades físico-químicas de las muestras. Estos gráficos permitirán visualizar y entender mejor cómo han variado parámetros como el pH, la conductividad, la temperatura y el oxígeno disuelto lo largo del experimento. A través de esta representación gráfica, se podrá analizar de manera más clara las tendencias y efectos de los diferentes tratamientos aplicados a las muestras, facilitando una interpretación más detallada y precisa de los resultados obtenidos.

Figura 9

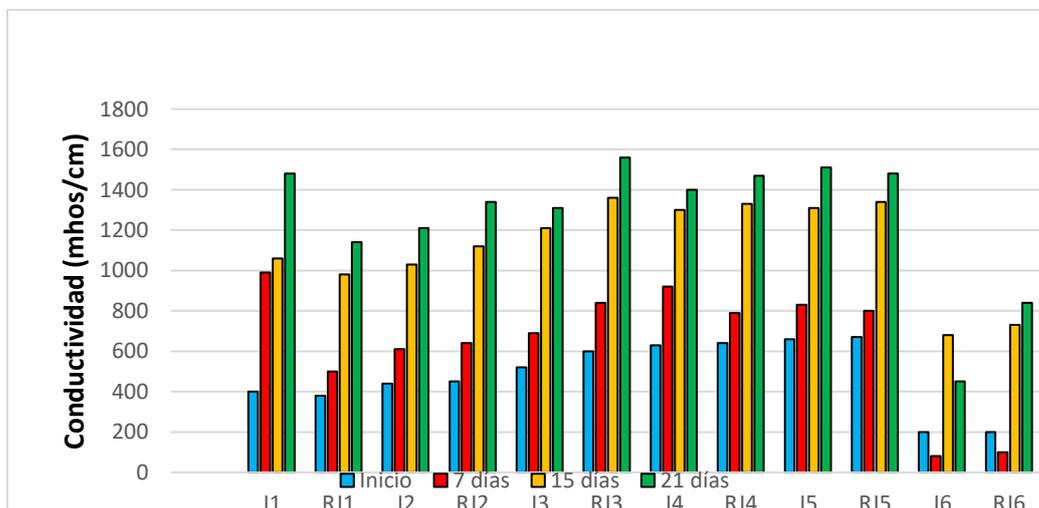
Comparación de pH (Inicio, 7, 15 y 21 días)



- **Patrones de pH:**
 - En la mayoría de las muestras, se observa un aumento inicial del pH en los primeros 7 días, seguido de fluctuaciones en los días 15 y 21.
 - Algunas muestras como J1 y RJ6 muestran cambios más drásticos en los valores de pH.
- **Efecto de la Concentración:**
 - A medida que aumenta la concentración (de J1 a J5), el pH tiende a estabilizarse después de los aumentos iniciales.
 - Las muestras con concentraciones más bajas (J1, J2) tienden a mostrar mayores variaciones en el pH comparadas con las de concentraciones más altas (J4, J5).

Figura 10

Comparación de la conductividad eléctrica (Inicio, 7, 15 y 21 días)



- **Incremento de Conductividad:**

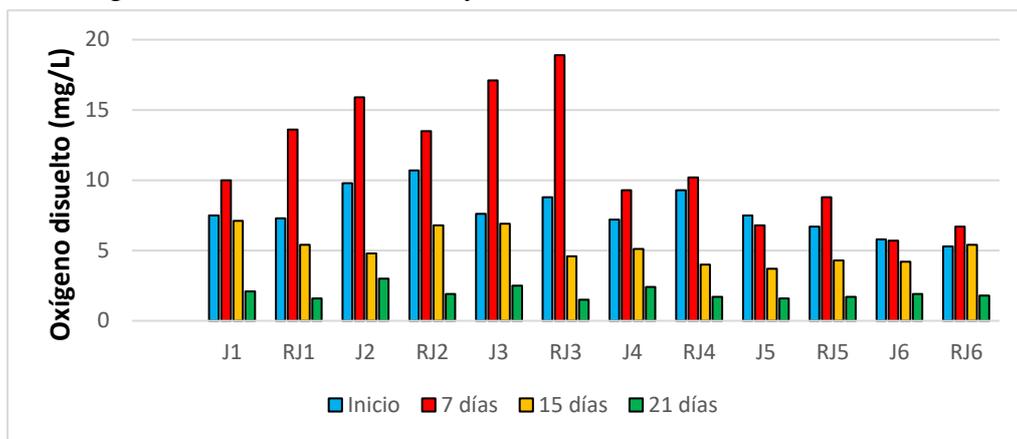
- La mayoría de las muestras muestran un aumento de la conductividad a lo largo del tiempo, lo cual sugiere que la disolución de iones o la adición de solutos es un proceso continuo durante el experimento.
- Las muestras RJ, en general, tienden a tener incrementos de conductividad más pronunciados que sus contrapartes J, indicando posibles diferencias en las composiciones o tratamientos que podrían estar afectando la tasa de disolución de iones.

- **Variaciones en el Control de Grupo (GC):**

- Las muestras de control (J6 y RJ6) muestran una disminución inicial en la conductividad, seguida de un aumento significativo en los días posteriores. Esto podría indicar que, inicialmente, hay una reducción en la concentración de iones, seguida por una posible liberación de solutos o aumento de actividad iónica en los días posteriores.

Figura 11

Comparación de oxígeno disuelto (Inicio, 7, 15 y 21 días)



- **Disminución del OD:**

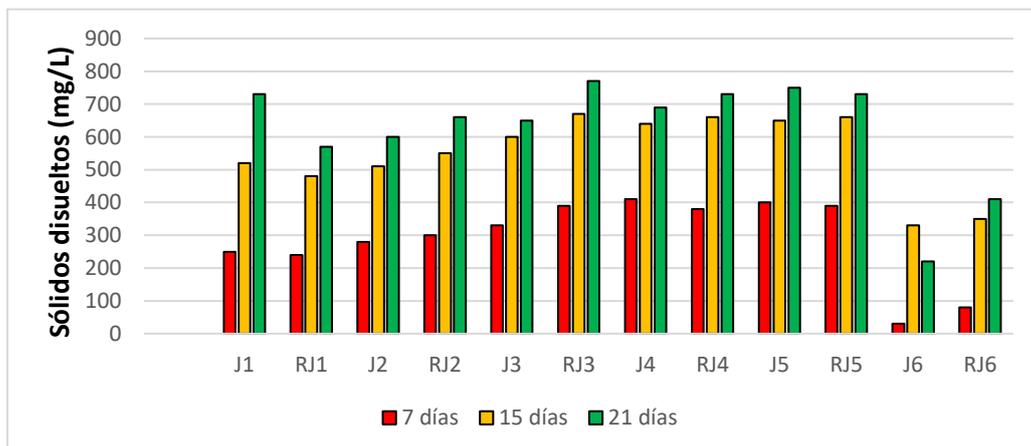
- La mayoría de las muestras muestran una disminución del OD a lo largo del tiempo, lo cual puede ser indicativo de procesos biológicos o químicos que consumen oxígeno, tales como la respiración microbiana o la degradación de materia orgánica.
- Algunas muestras muestran un aumento inicial del OD seguido de una disminución significativa, lo que podría ser indicativo de una fase inicial de mayor actividad fotosintética o introducción de oxígeno seguido de un consumo progresivo.

- **Variaciones en el Control de Grupo (GC):**

- Las muestras de control (J6 y RJ6) también muestran una tendencia a la disminución del OD, aunque con variaciones menores en comparación con las muestras tratadas.

Figura 12

Comparación de sólidos disueltos (7, 15 y 21 días)



- **Incremento de Sólidos Suspendidos:**
 - La mayoría de las muestras muestran un aumento en la concentración de sólidos suspendidos a lo largo del tiempo.
 - Este incremento podría ser debido a procesos de descomposición o introducción de partículas en las muestras.

- **Comparación entre Tratadas y No Tratadas:**
 - Las muestras no tratadas (RJ) a menudo muestran incrementos en sólidos suspendidos similares o ligeramente mayores que las tratadas (J).
 - Esto sugiere que el tratamiento podría tener un efecto moderado en la reducción de la cantidad de sólidos suspendidos en algunas muestras.

- **Variabilidad en el Control de Grupo (GC):**
 - Las muestras de control (J6 y RJ6) muestran una variabilidad significativa, con un aumento notable de sólidos suspendidos en RJ6 a los 21 días.
 - Esto indica que incluso en las condiciones de control, pueden ocurrir fluctuaciones significativas en los sólidos suspendidos.

3. Resultados y Discusión

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos al observar los parámetros físico-químicos de la planta acuática jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*) después de 7, 15 y 21 días de haber estado expuesta a diferentes concentraciones de cobre. Además, se realizará un análisis fisiológico de las macrófitas. Estos resultados nos permitirán comprender cómo la planta responde a las distintas condiciones ambientales y cómo estos factores pueden afectar su desarrollo y funcionamiento.

3.1. Resultados

Tabla 9

Resultados de los parámetros luego de 7 días de absorción de la planta.

Codificación	Concentración	pH	Conductividad	Temperatura	OD
J1	0.125	5	400	24.2	7.5
RJ1		4.7	380	24.3	7.3
J2	0.25	4.5	440	24.4	9.8
RJ2		4.4	450	24.5	10.7
J3	0.375	4.5	520	24.7	7.6
RJ3		4.5	600	24.3	8.8
J4	0.5	4.5	630	24.2	7.2
RJ4		4.5	640	25.2	9.3
J5	0.625	4.5	660	24.2	7.5
RJ5		4.4	670	24.1	6.7

Interpretación:

La tabla contiene datos sobre varios parámetros medidos después de 7 días de absorción por la planta. Los parámetros incluyen pH, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto (OD).

- **pH:**
 - Los valores de pH de las muestras oscilan entre 4,4 y 5,0. Esto indica el nivel de acidez de la solución en la que se cultivaron las plantas.
 - La mayoría de las muestras tienen un pH en torno a 4,5, con ligeras variaciones.
 - Los niveles de pH son ligeramente ácidos en todas las muestras, con una consistencia general de alrededor de 4,5.
 - La muestra J1 tiene el pH más alto (5,0), mientras que RJ2 y RJ5 tienen el más bajo (4,4).
- **Conductividad eléctrica:**
 - Los valores de conductividad oscilan entre 380 y 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductividad es una medida de la capacidad de la solución para conducir electricidad, que se relaciona con la concentración de iones en la solución.
 - Las concentraciones más altas tienden a tener valores de conductividad más altos, como RJ4 y RJ5.
 - La conductividad generalmente aumenta con la concentración. Por ejemplo, J5 y RJ5 con la concentración más alta (0,625 g) tienen los valores de conductividad más altos (660 y 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente). Esto indica una mayor concentración de iones en soluciones con concentraciones de tratamiento más altas.
- **Temperatura:**
 - Los valores de temperatura son bastante consistentes, oscilando entre 24,1°C y 25,2°C. Esto sugiere que los experimentos se realizaron en condiciones de temperatura controlada.
 - La temperatura permanece relativamente estable, lo que sugiere que no hay variaciones significativas de temperatura que afecten a las muestras.
- **Oxígeno disuelto (OD):**
 - Los valores de oxígeno disuelto (OD) oscilan entre 6,7 y 10,7 mg/L. El OD es crucial para la respiración y la salud de las plantas.
 - Existe una variación notable en los niveles de OD entre diferentes muestras, siendo RJ2 el que tiene el OD más alto (10,7 mg/L) y RJ5 el más bajo (6,7 mg/L).
 - Existe variabilidad en los niveles de OD, con algunas muestras como RJ2 mostrando OD alta (10,7 mg/L) y otras como RJ5 mostrando OD más baja (6,7 mg/L).
 - Los niveles más altos de OD son generalmente beneficiosos para la salud de las plantas, lo que indica una mejor disponibilidad de oxígeno.

3.2. Resultados 2

Tabla 10

Resultados de los parámetros luego de 15 días de absorción de la planta.

Codificación	Concentración	pH	Conductividad	T°	OD	Sólidos Suspendidos
J1		7.3	990	20.8	10	250
	0.125					
RJ1		6.1	500	20.7	13.6	240
J2		5.6	610	20.4	15.9	280
	0.25					
RJ2		5.7	640	20.4	13.5	300
J3		5.4	690	20.5	17.1	330
	0.375					
RJ3		5.4	840	20.3	18.9	390
J4		5.3	920	21.7	9.3	410
	0.5					
RJ4		5.3	790	21.4	10.2	380
J5		5.1	830	21.3	6.8	400
	0.625					
RJ5		5.1	800	21.2	8.8	390

Interpretación:

La tabla presenta datos de varios parámetros medidos en diferentes muestras después de 15 días de absorción. Los parámetros incluyen pH, conductividad, temperatura (T°), oxígeno disuelto (OD) y sólidos suspendidos.

- **pH:**
 - Los valores de pH oscilan entre 5.1 y 7.3.
 - La muestra J1 tiene el pH más alto (7.3), mientras que las muestras J5 y RJ5 tienen el pH más bajo (5.1).
 - Las muestras RJ tienen pH generalmente más bajos en comparación con sus correspondientes muestras J.

- El pH tiende a ser más bajo en las muestras RJ, lo que podría indicar un efecto distinto de las condiciones experimentales.
- **Conductividad:**
 - La conductividad varía entre 500 y 990 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
 - La muestra J1 tiene la conductividad más alta (990 $\mu\text{S}/\text{cm}$), y RJ1 la más baja (500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
 - La conductividad tiende a aumentar con la concentración en las muestras RJ, aunque hay excepciones.
 - La conductividad generalmente aumenta con la concentración en las muestras RJ, indicando una mayor presencia de iones disueltos en soluciones más concentradas.
- **Temperatura:**
 - La temperatura se mantiene relativamente constante, oscilando entre 20.3°C y 21.7°C.
 - No hay una tendencia clara de la temperatura en relación con la concentración de las muestras.
 - La temperatura es bastante constante y no parece estar influenciada por la concentración de las muestras.
- **Oxígeno Disuelto (OD):**
 - Los valores de OD varían entre 6.8 y 18.9 mg/L.
 - Las muestras RJ3 tienen el OD más alto (18.9 mg/L), mientras que J5 tiene el OD más bajo (6.8 mg/L).
 - Generalmente, las muestras RJ tienen valores de OD más altos comparados con las muestras J correspondientes.
 - Las muestras RJ tienden a tener valores más altos de OD, lo que podría indicar mejor disponibilidad de oxígeno en esas condiciones.
- **Sólidos Suspendidos:**
 - Los sólidos suspendidos varían entre 240 y 410 mg/L.
 - La muestra J4 tiene el valor más alto (410 mg/L) y RJ1 el más bajo (240 mg/L).
 - Los valores de sólidos suspendidos tienden a ser más altos en las muestras RJ a medida que aumenta la concentración.
 - Los sólidos suspendidos tienden a aumentar con la concentración en las muestras RJ, lo que puede indicar una mayor cantidad de partículas en suspensión en soluciones más concentradas.

3.3. Resultados 3

Tabla 11

Resultados de los parámetros luego de 21 días de absorción de la planta.

Codificación	Concentración	pH	Conductividad	T°	OD	Sólidos Suspendidos
J1	0.125	5.8	1060	21.5	7.1	520
RJ1		5.5	980	21.4	5.4	480
J2	0.25	5.3	1030	21.1	4.8	510
RJ2		5.3	1120	21.2	6.8	550
J3	0.375	5	1210	21.1	6.9	600
RJ3		5.1	1360	21.4	4.6	670
J4	0.5	5	1300	21.9	5.1	640
RJ4		4.9	1330	21.8	4	660
J5	0.625	4.9	1310	21.6	3.7	650
RJ5		4.9	1340	21.8	4.3	660

Interpretación:

La tabla presenta datos de varios parámetros medidos en diferentes muestras después de 21 días de absorción. Los parámetros incluyen pH, conductividad, temperatura (T°), oxígeno disuelto (OD) y sólidos suspendidos. Aquí se muestra una interpretación detallada:

- **pH:**
 - Los valores de pH oscilan entre 4.9 y 5.8.
 - La muestra J1 tiene el pH más alto (5.8), mientras que las muestras J5 y RJ5 tienen el pH más bajo (4.9).
 - El pH tiende a disminuir ligeramente con concentraciones más altas. Las muestras RJ generalmente tienen un pH similar a las muestras J correspondientes.
- **Conductividad:**
 - La conductividad varía entre 980 y 1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
 - La muestra RJ3 tiene la conductividad más alta (1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$), y RJ1 la más baja (980 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

- En general, las muestras con concentraciones más altas tienden a tener conductividades más altas.
- La conductividad tiende a aumentar con la concentración, indicando una mayor presencia de iones disueltos en soluciones más concentradas.

- **Temperatura:**

- La temperatura se mantiene relativamente constante, oscilando entre 21.1°C y 21.9°C.
- No hay una tendencia clara de la temperatura en relación con la concentración o el tipo de muestra.
- La temperatura es bastante constante y no parece estar influenciada por la concentración o el tipo de muestra.

- **Oxígeno Disuelto (OD):**

- Los valores de OD varían entre 3.7 y 7.1 mg/L.
- La muestra J1 tiene el OD más alto (7.1 mg/L), mientras que J5 tiene el OD más bajo (3.7 mg/L).
- Los valores de OD tienden a ser más altos en las muestras J de menor concentración y más bajos en las de mayor concentración.

- **Sólidos Suspendedos:**

- Los sólidos suspendidos varían entre 480 y 670 mg/L.
- La muestra RJ3 tiene el valor más alto (670 mg/L) y RJ1 el más bajo (480 mg/L).
- Los valores de sólidos suspendidos tienden a ser más altos en las muestras J a medida que aumenta la concentración.
- Los sólidos suspendidos tienden a aumentar con la concentración en las muestras J, lo que puede indicar una mayor cantidad de partículas en suspensión en soluciones más concentradas.

3.3.1. Análisis fisiológicos de las macrófitas

Se utilizó la técnica de la observación para llevar a cabo el análisis fisiológico de las macrófitas. Cuando las macrófitas fueron expuestas al sulfato de cobre, se observó que su comportamiento fisiológico se vio afectado, manifestándose en un cambio en el color de sus hojas y daños en sus raíces. Además, se registró el peso de las macrófitas antes y después del experimento

Tabla 12

Características físicas finales de *Eichhornia crassipes*.

Macrófita	Vasos de precipitado (cantidad)	Cantidad de macrófitas por vaso	Color de hoja	Número de hojas (unidad)	Tamaño de raíz (cm)
Jacinto de Agua (<i>Eichhornia Crassipes</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 muestras • 5 replicados 	1	Las hojas más externas cambiaron su tonalidad a marrón a medida que transcurrió el tiempo y después se extendieron hacia los peciolos.	El número de hojas fueron de 1 a 2 hojas	El crecimiento de las raíces varió entre 1 a 3 cm

Tabla 13

Características físicas finales de *Eichhornia crassipes*.

Muestra	Concentración (gr)	Número de hojas inicial (unidad)	Tamaño de raíz inicial (cm)	Número de hojas final (unidad)	Tamaño de raíz final (cm)
J1	0.125	10	13.9	2	15.9
RJ1		8	9	8	11
J2	0.25	6	16	6	18
RJ2		8	8	3	10
J3	0.375	10	12.6	10	14.6
RJ3		8	7.5	6	9.5
J4	0.5	7	10	7	12
RJ4		9	9.3	9	11.3
J5	0.625	6	6.3	6	8.3
RJ5		4	7.8	4	9.8
J6	GC	11	13.4	11	15.4
RJ6		9	18.5	9	20.5

Interpretación:

La tabla contiene datos adicionales sobre el mismo conjunto de muestras (Muestra) con información sobre el número de hojas (Número de hojas) y el tamaño de raíz (Tamaño de raíz) tanto en la etapa inicial como en la final.

- **Número de Hojas:**

Para la mayoría de las muestras, hay una disminución en el número de hojas desde el recuento inicial hasta el final. Por ejemplo, J1 comienza con 10 hojas y termina con 2 hojas. Algunas muestras muestran estabilidad o ligeros aumentos en el número de hojas, como RJ1 y RJ6.

- **Tamaño de raíz:**
 - El tamaño de la raíz tiende a aumentar desde las mediciones iniciales hasta las finales para la mayoría de las muestras. Por ejemplo, el tamaño de la raíz de J1 aumenta de 13,9 cm a 15,9 cm.
 - Hay algunas excepciones, como el RJ4, donde el tamaño de la raíz disminuye de 13 cm a 11,3 cm.
- **Impacto de concentración:**
 - Las muestras de menor concentración (p. ej., J1, RJ1) muestran una reducción significativa en el número de hojas.
 - Las muestras de mayor concentración (p. ej., J5, RJ5) también muestran una reducción en el número de hojas, pero hay variabilidad en los cambios en el tamaño de las raíces.
 - Las muestras del grupo de control (GC), J6 y RJ6, muestran diferentes comportamientos en los cambios de tamaño de raíz, teniendo RJ6 un tamaño de raíz final mayor en comparación con su tamaño inicial.

La mayoría de las muestras experimentan una reducción en la cantidad de hojas, lo que sugiere que el proceso podría afectar negativamente la retención de hojas. Hay una tendencia general de crecimiento de las raíces en todas las muestras, lo que indica que el proceso podría fomentar el desarrollo de las raíces a pesar de la pérdida de hojas. La concentración del tratamiento influye tanto en el número de hojas como en el tamaño de las raíces. Concentraciones más bajas pueden dar como resultado menos hojas y un crecimiento variable de las raíces, mientras que concentraciones más altas muestran resultados mixtos. Las muestras de control (J6 y RJ6) muestran resultados diferentes, con J6 ganando hojas y RJ6 mostrando un crecimiento significativo de raíces, lo que podría resaltar el efecto del tratamiento en comparación con una condición inicial o estándar.

Figura 13

Comparación de cantidad de hojas de las macrófitas al inicio y final.

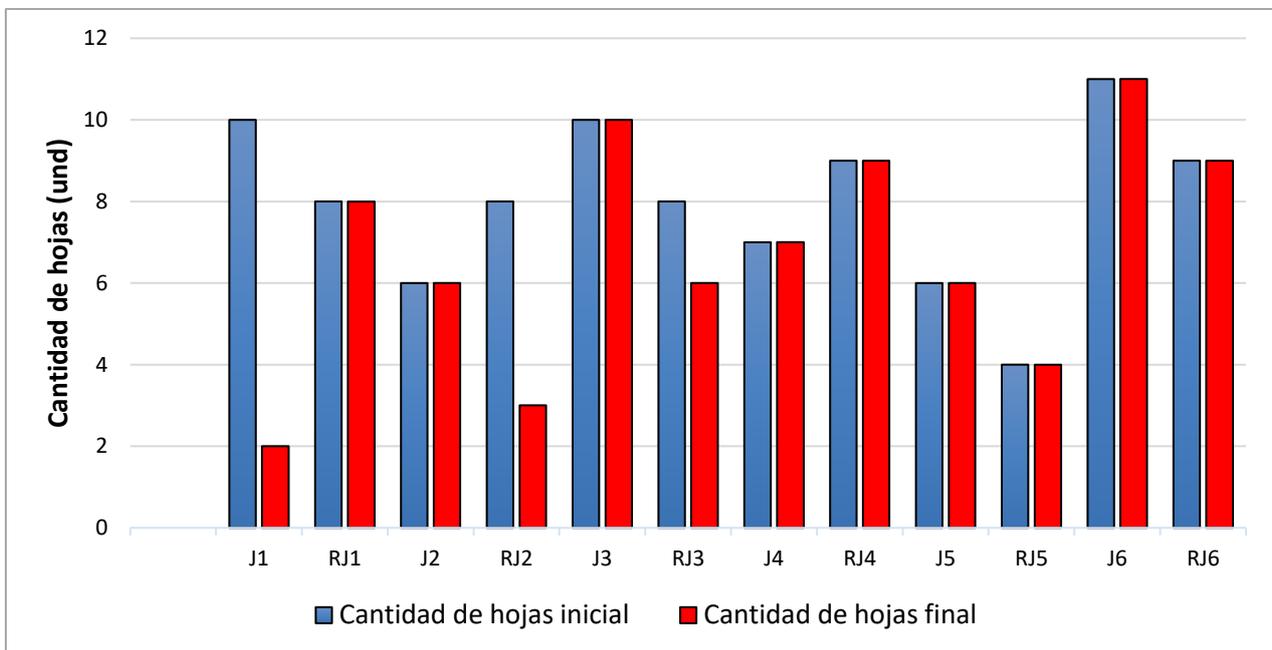


Tabla 14

Pesaje inicial y final de las macrófitas

Muestra	Concentración (gr)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)
J1		67.102	43.297
	0.125		
RJ1		62.31	43.043
J2		51.648	44.739
	0.25		
RJ2		73.858	56.07
J3		89.193	55.776
	0.375		
RJ3		89.43	53.193
J4		77.99	64.415
	0.5		
RJ4		63.61	45.346
J5		51.53	40.345
	0.625		
RJ5		24.39	21.814
J6		33.21	50.639
	GC		
RJ6		28.896	26.918

Interpretación:

J1: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 67,102 gramos. Después de tres semanas, el peso disminuyó a 43,297 gramos. Y RJ1: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 62,31 gramos. Sin embargo, el peso final al cabo de tres semanas fue de 43.043 gramos. La concentración del sulfato de cobre fue de 0,125 gramos.

J2: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 51,648 gramos. Después de tres semanas, el peso disminuyó a 44,739 gramos. Y RJ2: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua

en esta muestra fue de 73,858 gramos. Sin embargo, el peso final al cabo de tres semanas fue de 56.07 gramos. La concentración del sulfato de cobre fue de 0,250 gramos.

J3: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 89,193 gramos. Después de tres semanas, el peso disminuyó a 55,776 gramos. Y RJ3: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 89,43 gramos. Sin embargo, el peso final al cabo de tres semanas fue de 53.193 gramos. La concentración del sulfato de cobre fue de 0,375 gramos.

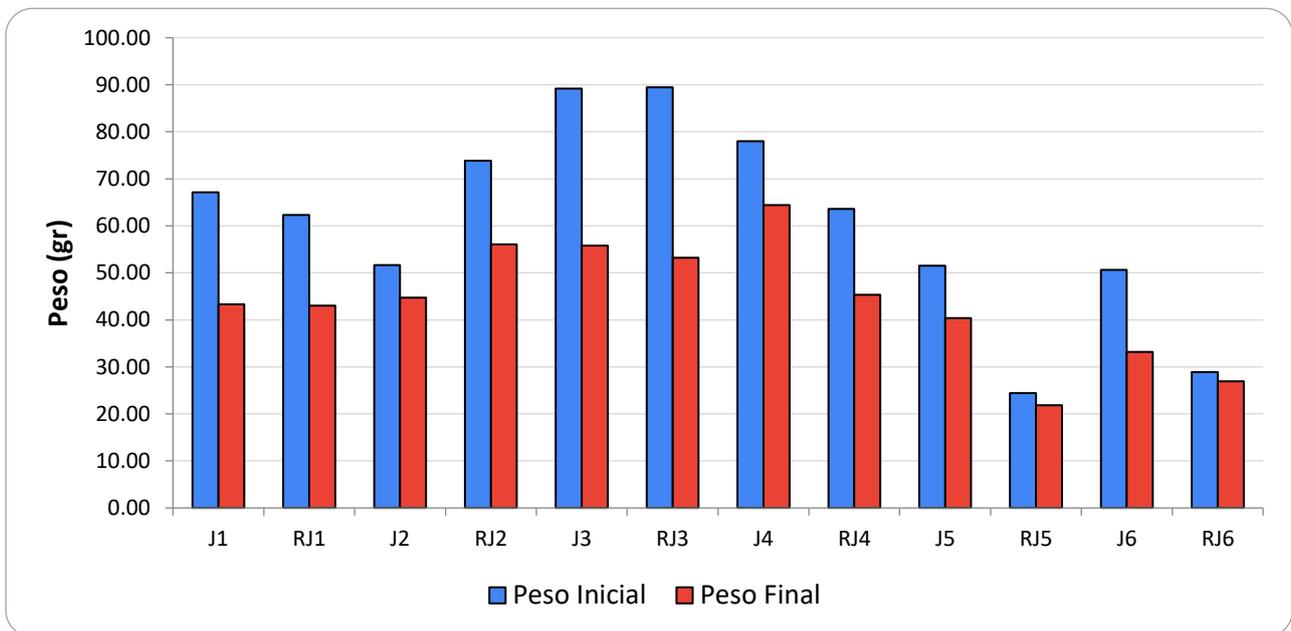
J4: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 77,99 gramos. Después de tres semanas, el peso disminuyó a 63,61 gramos. Y RJ4: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 63,61 gramos. Sin embargo, el peso final al cabo de tres semanas fue de 45.346 gramos. La concentración del sulfato de cobre fue de 0,500 gramos.

J5: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 51,53 gramos. Después de tres semanas, el peso disminuyó a 40,345 gramos. Y RJ5: El peso inicial de los macrófitos de jacinto de agua en esta muestra fue de 24,39 gramos. Sin embargo, el peso final al cabo de tres semanas fue de 21.814 gramos. La concentración del sulfato de cobre fue de 0,625 gramos.

Según podemos observar, la concentración del sulfato de cobre tiene un efecto sobre el crecimiento o el peso de los macrófitos del jacinto de agua. Un análisis y una comparación más detallados de los datos pueden revelar más conocimientos sobre la relación entre la concentración y el crecimiento de las macrófitas del jacinto de agua.

Figura 14

Comparación de peso inicial y final de las muestras de Eichhornia crassipes.



Interpretación:

La tabla contiene datos de diferentes muestras (Muestra) con sus correspondientes concentraciones (Concentración en gramos), pesos iniciales (Peso inicial en gramos) y pesos finales (Peso final en gramos). Aquí hay una interpretación detallada:

Hay 12 muestras, etiquetadas de J1 a J6 y de RJ1 a RJ6. "J" y "RJ" se refieren a las muestras y sus replicados. Las concentraciones se dan en gramos y cuyos valores proporcionados son 0,125, 0,25, 0,375, 0,5 y 0,625 gramos.

Los pesos inicial y final difieren para cada muestra, indicando un cambio debido a algún tratamiento o condición experimental. Para las muestras J1 a J5 y RJ1 a RJ5 se presenta una reducción notoria de peso, sugiriendo una pérdida de material o masa durante el proceso.

La mayoría de las muestras, excepto J6, muestran una reducción de peso desde las mediciones iniciales hasta las finales, lo que indica que podrían haber pasado por un proceso que resultó en una pérdida de masa. El cambio de peso puede estar relacionado con los valores de concentración. Por ejemplo, las muestras de mayor concentración (p. ej., J5, RJ5) pueden mostrar diferentes patrones de pérdida de peso en comparación con las muestras de menor concentración (p. ej., J1, RJ1). Las muestras de concentración de GC (J6 y RJ6) pueden ser grupos de control para comparar con las muestras tratadas. J6 gana peso, mientras que RJ6 pierde peso, lo que podría sugerir diferentes reacciones o procesos que ocurren bajo las condiciones de control.

4. Conclusiones

En el análisis de datos, se observó que las macrófitas expuestas al sulfato de cobre experimentaron cambios fisiológicos, como un cambio en el color de las hojas y daños en las raíces. Además, se registró el peso de las macrófitas antes y después del experimento.

En conclusión, la rizofiltración utilizando plantas acuáticas como el Jacinto de agua es una técnica prometedora para remediar la contaminación por metales pesados en aguas residuales. Estas plantas tienen la capacidad de acumular y transportar metales pesados, lo que contribuye a su eliminación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar dependiendo de las condiciones ambientales y las concentraciones de contaminantes.

5. Recomendaciones

Basado en las conclusiones del estudio sobre rizofiltración utilizando el Jacinto de agua para remediar la contaminación por metales pesados en aguas residuales, se pueden formular las siguientes recomendaciones:

1. **Optimización de Condiciones de Crecimiento:** Es crucial investigar y optimizar las condiciones ambientales ideales para el crecimiento del Jacinto de agua. Esto incluye variables como la temperatura del agua, pH, nutrientes disponibles y niveles de luz. Ajustar estas condiciones puede mejorar la eficiencia del proceso de rizofiltración y la capacidad de las plantas para acumular metales pesados.
2. **Monitoreo Continuo de Parámetros de Calidad del Agua:** Implementar un monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua es esencial para evaluar la efectividad del tratamiento. Esto incluye pH, conductividad eléctrica, temperatura y oxígeno disuelto, que pueden influir en la capacidad de las plantas para realizar la rizofiltración.
3. **Estudios de Toxicidad y Efectos a Largo Plazo:** Realizar estudios adicionales para evaluar los efectos a largo plazo del proceso de rizofiltración en las plantas acuáticas y en el ecosistema circundante. Esto ayudará a comprender mejor la capacidad de las plantas para manejar altas concentraciones de metales pesados y los posibles efectos secundarios sobre la biodiversidad acuática.

4. **Implementación de Sistemas a Escala Piloto y Comercial:** Pasar de los estudios de laboratorio a la implementación a escala piloto y comercial es fundamental para validar la viabilidad técnica y económica de la rizofiltración con Jacinto de agua. Esto permitirá evaluar la eficiencia bajo condiciones reales y adaptar el diseño del sistema según sea necesario.
5. **Educación y Sensibilización Comunitaria:** Promover la educación y la sensibilización entre las comunidades locales sobre la importancia de la gestión sostenible del agua y las tecnologías de tratamiento como la rizofiltración. Involucrar a las comunidades en la protección y restauración de cuerpos de agua puede fortalecer el apoyo a estas soluciones ambientales.

Implementar estas recomendaciones ayudará a maximizar los beneficios de la rizofiltración con Jacinto de agua, mitigando eficazmente la contaminación por metales pesados en aguas residuales y contribuyendo a la recuperación de ecosistemas acuáticos degradados.

6. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, agradecemos sinceramente a nuestra profesora de tesis por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Sus consejos y comentarios han sido fundamentales para dar forma a este estudio y alcanzar los resultados presentados.

Agradecemos también a nuestros compañeros de clase y amigos, quienes brindaron su apoyo moral y comprensión en los momentos de mayor carga académica.

Por último, dedico un agradecimiento especial a nuestras familias. Su amor, paciencia y constante ánimo fueron la fuente de mi motivación y fuerza durante todo este proceso.

Sin la ayuda y colaboración de todos ustedes, esta investigación no habría sido posible.

¡Gracias!

7. Referencias

- Caisachana Ramos, I. E. (2020). EVALUACIÓN DE UN PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN MEDIANTE LENTEJA DE AGUA (*Lemna minor*) PARA AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE UNA EMPRESA AZUCARERA. Guayaquil: Repositorio Agraria Ecuador. Obtenido de <http://181.198.35.98/Archivos/CAISACHANA%20RAMOS%20ISAAC%20EZEQUIEL.pdf>
- Castillo Nuñez, R. A. (2013). *Valores agregados de la biodigestión anaerobia del Jacinto de agua*. Cuenca: Repositorio Institucional de UCuenca. doi:<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5052>
- I., M. Y., I., P. J., & A., G. A. (2018). *Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. La Guajira: Información Tecnológica. Obtenido de <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v29n2/0718-0764-infotec-29-02-00205.pdf>
- INEI. (2014). *Informe Nacional sobre el Estado del Medio Ambiente*. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Obtenido de <https://proyectos.inei.gob.pe/microdatos/>
- Jaramillo, & Flores. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua) y Eichhornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*. Universidad Politécnica Salesiana. Salesiana: Dspace. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2939/1/UPS-CT002482.pdf>
- Marco Cano, N. A. (2023). *Influencia del jacinto de agua (Eichhornia crassipes) en la concentración de metales de aguas superficiales del río Coralaque, Moquegua 2021*. Moquegua: Repositorio Institucional Continental.
- Mendoza, A. M. (2019). EVALUACIÓN DE LA RIZOFILTRACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DEL CANAL EL MACHO EN LA CIUDAD DE MACHALA. *REPOSITORIO ECUADOR*, 93. Obtenido de <http://181.198.35.98/Archivos/CANTU%C3%91A%20ELIZALDE%20ALEX%20MICHAEL.pdf>
- Montalban López, G. M., & Olivares Ayauca, M. A. (2022). *Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales con Metales Pesados*. Lima: Calidad y Gestión de los Recursos Naturales. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/21173/Montalban_LGM-Olivares_AMA-SD.pdf?sequence=4
- Muramoto, S., & Oki, Y. (1983). Eliminación de algunos metales pesados del agua contaminada mediante jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). *Boletín de Contaminación Ambiental y Toxicología*, 170-177. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01610117>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo, J. A. (2020). *Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión*. Popayán: Entre Ciencia e Ingeniería. doi:<https://doi.org/>
- Ramírez Cando, L. J., & Guevara Granja, M. F. (2015). *Eichhornia crassipes, SU INVASIVIDAD Y POTENCIAL FITORREMEDIAADOR*. *Revista de Ciencias de la Vida*. doi:<https://doi.org/10.17163/lgr.n22.2015.01>
- Vargas Perdomo, C. M., Oviedo Salazar, A., Montañez Velasquez, M. N., & Polonia Patiño, A. (2018). *DEL USO DE LA EICHHORNIA CRASSIPES EN LA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES*. ESTADO DEL ARTE.
- Villamagna, A. M., & Murphy, B. R. (2010). Impactos ecológicos y socioeconómicos del agua invasiva jacinto (*Eichhornia crassipes*): una revisión. Blacksburg: Freshwater Biology. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x>

8. Anexos

Anexo 1

Desinfección de las muestras



Anexo 2

Peso inicial de las doce muestras.



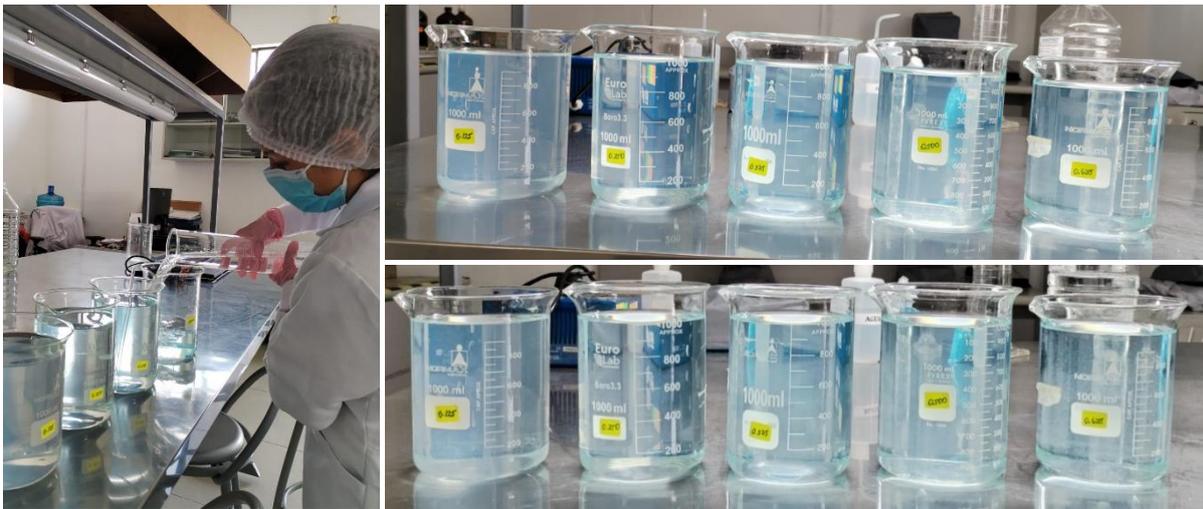
Anexo 3

Peso de las distintas concentraciones del Sulfato de cobre.



Anexo 4

Dilución de las distintas concentraciones del Sulfato de cobre con 1L de agua destilada



Anexo 5

Análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua diluida.



Anexo 6

Macrófitas puestas en el agua contaminada con cobre para su absorción.



Anexo 7

Se añadió nutrientes (A, B y C) al agua para que las macrófitas puedan mantenerse.



Anexo 8

Macrófitas luego de 14 días de absorción.



Anexo 9

Macrófitas luego de 21 días de absorción.



Anexo 10

Peso de las Macrófitas luego de 21 días de absorción.

