



ARTICULO ORIGINAL

Evaluación de la remoción de plomo en agua a diferentes concentraciones mediante un sistema de fitorremediación bajo condiciones de laboratorio

Evaluation of lead removal from water at different concentrations using a phytoremediation system under laboratory conditions.

Maldonado Aquino Diana¹, Huaman Pariona Angely¹, Quinto Lavando Esmeralda Yomira¹, Aguilar Huaroc, Vilma Luisa¹

RESUMEN

El presente estudio evaluó la eficiencia de remoción de plomo (Pb) en agua a diferentes concentraciones iniciales mediante un sistema de fitorremediación con *Eichhornia crassipes*, bajo condiciones controladas de laboratorio. Se trabajó con concentraciones iniciales de 0.020, 0.060 y 0.100 mg/L, desarrollándose el experimento en dos fases consecutivas de siete días. Durante la primera fase se evaluaron las tres concentraciones, mientras que la segunda fase se aplicó únicamente a las soluciones con mayores concentraciones iniciales, incorporando la renovación de biomasa vegetal. Los resultados evidenciaron una disminución de la concentración de Pb en todos los tratamientos, observándose una mayor eficiencia de remoción asociada al incremento del tiempo de exposición y al manejo adecuado de la biomasa vegetal. El estudio permitió establecer que la eficiencia del proceso de fitorremediación depende no solo de la especie utilizada, sino también de las condiciones iniciales del sistema y del tiempo de tratamiento, aportando información relevante para la comprensión del comportamiento de la remoción de plomo en sistemas acuáticos bajo condiciones de laboratorio.

Palabras clave: Fitorremediación; plomo; *Eichhornia crassipes*; agua contaminada.

ABSTRACT

The present study evaluated the efficiency of lead (Pb) removal from water at different initial concentrations using a phytoremediation system with *Eichhornia crassipes* under controlled laboratory conditions. The experiment was conducted using initial concentrations of 0.020, 0.060, and 0.100 mg/L, and was carried out in two consecutive seven-day phases. During the first phase, all three concentrations were evaluated, while the second phase was applied only to the solutions with the highest initial concentrations, incorporating the renewal of plant biomass. The results showed a decrease in Pb concentration in all treatments, with higher removal efficiency observed as exposure time increased and plant biomass was properly managed. The study established that the efficiency of the phytoremediation process depends not only on the species used but also on the initial conditions of the system and the treatment duration, providing relevant information for understanding the behavior of lead removal in aquatic systems under laboratory conditions.

Keywords: Phytoremediation; lead; *Eichhornia crassipes*; contaminated water.

^{*1} Universidad Nacional
Intercultural de Selva Central
Juan Santos Atahualpa, La
Merced, Chanchamayo

*Autor de correspondencia.

E-mail:

maldonado10diana22@gmail.
com

Recibido: 30 de mayo de 2026
Aprobado: 26 de julio de 2026
Publicado: 30 de julio de 2026

Para citar este artículo:

Maldonado Aquino, D., Huaman Pariona, A., Quinto Lavando, E. Y., & Aguilar Huaroc, V. L. (2026). Evaluación de la remoción de plomo en agua a diferentes concentraciones mediante un sistema de fitorremediación bajo condiciones de laboratorio. *Yotantsipanko*, 6(1), 34–45. <https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v6i1.68>



Introducción

La polución de los recursos hídricos debido a metales pesados es un problema ambiental de carácter global y supone un riesgo importante para la salud pública y los ecosistemas. Entre los contaminantes, el plomo (Pb) sobresale por su naturaleza persistente y bioacumulativa, así como por su alta toxicidad, dado que a concentraciones bajas puede ocasionar efectos neurológicos y hematológicos graves en los organismos expuestos (Shahid et al., 2020).

El plomo es visto como un contaminante clave en ecosistemas acuáticos por su gran persistencia en el medio ambiente y su habilidad para acumularse en organismos vivos, causando efectos tóxicos a largo plazo (Ali et al., 2021). Como respuesta a estos peligros, entidades internacionales como la Organización Mundial de la Salud han determinado límites máximos permisibles muy rigurosos para la cantidad de Pb en agua potable, estableciendo un límite de 0.01 mg/L (OMS, 2017). A escala regional y nacional, múltiples estudios han indicado que las actividades humanas, especialmente la minería y los procesos industriales, aportan de manera notable a la emisión de Pb en aguas superficiales, provocando impactos ambientales duraderos (Alloway, 2013; Tchounwou et al., 2012). Según los Estándares de Calidad Ambiental para el agua en Perú, el límite máximo permitido de plomo en fuentes de agua para consumo humano es de 0.01 mg/L, con el propósito de evitar riesgos a la

salud y al medio ambiente (MINAM, 2017). En este marco, la fitorremediación ha emergido como una opción ecológica y económica para el tratamiento de suelos y cuerpos de agua contaminados, aprovechando la habilidad innata de algunas especies vegetales para eliminar o estabilizar metales pesados. Este método se fundamenta en procesos biológicos tales como la fitoextracción y la fitofiltración (Yang et al., 2020). Los métodos tradicionales para tratar aguas contaminadas con metales pesados tienden a ser caros y producen residuos secundarios, lo que ha fomentado la búsqueda de tecnologías alternativas más sostenibles (Rezania et al., 2022). Entre las especies acuáticas más investigadas, el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) ha mostrado una capacidad notable para eliminar varios metales pesados en ecosistemas acuáticos (Ayme & Ramos, 2020). Investigaciones experimentales recientes han documentado la eliminación eficiente de Pb utilizando *E. crassipes* en condiciones controladas (Coronel, 2023); no obstante, la variabilidad observada en los hallazgos indica una notable dependencia de las condiciones fisicoquímicas del entorno, como se ha mostrado en estudios que examinan la cinética del proceso y el impacto de la biomasa vegetal (Sarmah, 2025).

A pesar de la cantidad de estudios existentes, aún hay lagunas en la comprensión de cómo ciertas variables fisicoquímicas afectan la biodisponibilidad del Pb para las plantas en

condiciones de laboratorio controladas (Khalid et al., 2023). Entre estas variables, el pH del medio juega un papel crucial, puesto que afecta directamente la especiación y solubilidad del metal; en condiciones alcalinas, el Pb suele generar compuestos de baja solubilidad, lo que disminuye su disponibilidad para la remoción biológica (Alloway, 2013). Igualmente, la concentración inicial del contaminante es un elemento crucial que puede influir en la efectividad del proceso de fitorremediación, dado que altas concentraciones pueden provocar efectos tóxicos en las plantas y reducir la capacidad de eliminación (Tchounwou et al., 2012).

La fitorremediación se señala como una estrategia ecológica, económicamente sostenible y efectiva para la eliminación de metales pesados en ecosistemas acuáticos (Mishra & Dubey, 2021). En este contexto, el propósito del presente estudio fue evaluar el impacto de la concentración inicial de Pb en la efectividad de eliminación del metal a través de un sistema de fitorremediación en agua, en condiciones controladas de laboratorio, analizando su efectividad a diferentes concentraciones iniciales de Pb y tomando en cuenta la influencia del tiempo de exposición y la renovación de la biomasa vegetal en aquellos tratamientos donde la remoción inicial es restringida.

Materiales y métodos

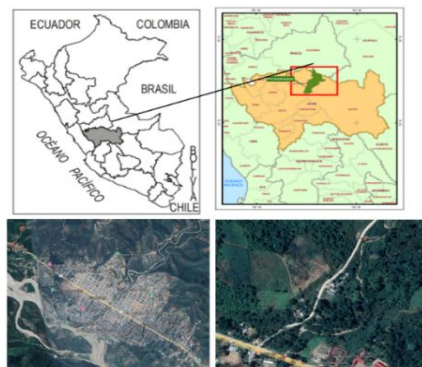
Tipo y diseño del estudio

El presente trabajo corresponde a un estudio experimental de laboratorio, controlado, con enfoque cuantitativo, cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia de re-moción de Pb mediante un sistema de fitorremediación en agua. El diseño experimental consideró como variable independiente la concentración inicial de Pb y como variable dependiente la eficiencia de remoción del metal, determinada a partir de la variación de su concentración en el medio acuoso.

Muestreo del agua

La muestra de agua utilizada en el experimento fue recolectada en Storani con una latitud de 10°56'44.61'' seleccionado por presentar características representativas de contaminación por metales pesados por los diversos fertilizantes utilizados en la agricultura. El muestreo se realizó mediante la recolección directa de agua en recipientes plásticos limpios, previamente acondicionados para evitar contaminación cruzada. Las muestras fueron transportadas al laboratorio para su posterior acondicionamiento y análisis.

Figura 1. Ubicación del lugar donde se obtuvo las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

A partir del agua recolectada se prepararon **tres soluciones de prueba**, ajustando las concentraciones iniciales de Pb a **0.020, 0.060 y 0.100 mg/L**, respectivamente. Estas concentraciones fueron seleccionadas con el fin de simular diferentes niveles de contaminación y analizar el comportamiento del sistema de fitorremediación frente a un gradiente de carga metálica. Cada solución fue preparada en un recipiente independiente y homogeneizada antes del inicio del experimento.

Figura 2. Simulación para obtener distintas concentraciones de contaminante



Fuente: Elaboración propia

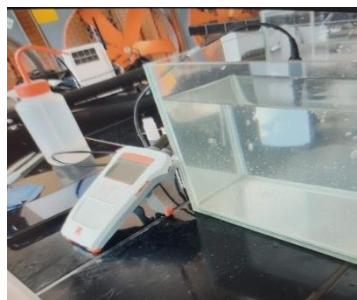
Ajuste y control del pH del medio

El agua recolectada presentó un pH inicial alcalino de aproximadamente 9.5, condición que limita la solubilidad y biodisponibilidad del plomo en solución acuosa. Con el objetivo de maximizar la disponibilidad del metal para su

absorción por las raíces de las plantas y asegurar condiciones homogéneas entre los tratamientos, el pH de las soluciones experimentales fue ajustado a un valor de 6.50. El pH del agua es uno de los factores más influyentes en la movilidad y biodisponibilidad del plomo, condicionando su absorción por las plantas acuáticas (Zhang et al., 2021)

El ajuste se realizó antes del inicio del proceso de fitorremediación, mediante la adición gradual de ácido clorhídrico (HCl) al 5 %. El pH fue monitoreado con pH-metro, previamente calibrado hasta alcanzar el valor deseado y fue verificado periódicamente durante el desarrollo del experimento para asegurar su estabilidad. El control del pH en sistemas de fitorremediación acuática es esencial, ya que regula la movilidad del plomo en solución y condiciona su absorción eficiente por las raíces de las plantas (Gupta & Sinha, 2022).

Figura 3. Regulación del pH.



. Fuente: Elaboración propia

Sistema experimental de fitorremediación

Los ensayos de fitorremediación se desarrollaron en recipientes de vidrio tipo acuario, utilizados como unidades experimentales individuales.

Cada recipiente fue acondicionado con un volumen determinado de solución contaminada y dispuesto en condiciones de laboratorio, permitiendo el libre desarrollo del sistema radicular de *Eichhornia crassipes* en contacto directo con el medio acuoso. Los recipientes se mantuvieron abiertos durante todo el periodo experimental y se dispusieron de forma independiente para cada tratamiento.

Figura 4. Fitorremediación



Fuente: Elaboración propia

Material vegetal

Para el proceso de fitorremediación se empleó jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), seleccionado por su capacidad reportada para la remoción de metales pesados en sistemas acuáticos. Antes de su utilización, las plantas fueron sometidas a un proceso de aclimatación en agua limpia con el fin de reducir el estrés fisiológico previo al inicio del experimento. En cada tratamiento se empleó una cantidad similar de biomasa vegetal, a fin de mantener condiciones comparables entre las soluciones evaluadas. La eficiencia de la fitorremediación depende significativamente de la concentración inicial del metal, ya que niveles elevados pueden

inducir estrés fisiológico en las plantas (Liu et al., 2020). La cantidad y el estado fisiológico de la biomasa vegetal influyen directamente en la capacidad de remoción de metales pesados en sistemas de fitorremediación (Kumar et al., 2022).

Figura 5. Aclimatación de los jacintos de agua.



Fuente: Elaboración propia

Tiempo de exposición y fases experimentales

El experimento tuvo una duración total de dos semanas, organizadas en dos fases consecutivas. Durante la primera fase, con una duración de siete días, se evaluó la remoción de Pb en las tres soluciones experimentales (0.020, 0.060 y 0.100 mg/L).

Tabla 1. Seguimiento de primera fase

Día	Temperatura (°C)	pH Muestra1	pH Muestra2	pH Muestra3	Observaciones (salud de las plantas)
0	22.0	6.50	6.50	6.50	pH ajustado. Plantas vigorosas, agua transparente.
1	21.5	6.51	6.50	6.49	Crecimiento radicular visible en las tres muestras.
2	22.1	6.48	6.52	6.51	Muestra3: inicio de ligera clorosis (amarillamiento) en las hojas.
3	22.5	6.50	6.50	6.49	Clorosis en Muestra3 es mas notoria, Muestra1 y 2 sin cambios.
4	22.0	6.49	6.51	6.50	Muestra3: ligeros signos de marchitamiento.
5	21.8	6.50	6.50	6.50	Muestra3: mayor amarillamiento. Muestra1 y 2 mantienen buen aspecto.
6	22.2	6.51	6.49	6.51	Muestra 3: signos de toxicidad evidentes, pero el pH se mantiene estable.
7	22.0	6.50	6.50	6.50	Muestras1 y 2 completan el tratamiento en buen estado.

Nota: Para el seguimiento de la muestra y observaciones sobre la salud de la planta se analizó la temperatura y el pH del medio

Al finalizar la primera semana, se retiró la biomasa vegetal inicial y se inició una segunda fase experimental, también de siete días de duración, aplicada únicamente a las soluciones con concentraciones iniciales de 0.060 y 0.100 mg/L. En esta fase se incorporaron nuevamente las plantas, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema de fitorremediación frente a una exposición prolongada y la renovación de biomasa vegetal.

Tabla 2. Seguimiento de segunda fase

Día	Temperatura (°C)	pH Muestra2	pH Muestra3	Observaciones (salud de las plantas)
1	22.1	6.50	6.50	Inicio del ciclo: plantas frescas introducidas en ambas muestras.
2	22.0	6.49	6.50	Sin signos de toxicidad iniciales
3	22.3	6.51	6.48	Crecimiento radicular inicial visible en ambas muestras.
4	22.5	6.50	6.51	Salud de las plantas es visiblemente mejor que en el ciclo previo.
5	22.4	6.50	6.49	---
6	22.1	6.51	6.50	---
7	22.0	6.50	6.50	Fin del buffer. Recolección para análisis final de Plomo

Nota: Las plantas mostraron buena salud en esta segunda fase.

Durante ambas fases se mantuvieron constantes las condiciones de laboratorio. Un mayor tiempo de contacto entre la planta y el contaminante favorece la acumulación progresiva de metales pesados en los tejidos vegetales (Rahman et al., 2023).

La solución con concentración inicial de 0.020 mg/L no fue incluida en la segunda fase experimental debido a que, tras la primera semana de tratamiento, presentó una remoción

suficiente de Pb, considerándose innecesaria la prolongación del ensayo.

Determinación de la concentración de plomo

La concentración de Pb en las soluciones experimentales fue determinada mediante análisis realizados en un laboratorio externo acreditado, tanto antes como después del proceso de ajuste de pH y del tratamiento de fitorremediación. Para ello, se recolectaron muestras representativas de cada tratamiento, las cuales fueron conservadas y enviadas al laboratorio para su análisis conforme a los procedimientos analíticos establecidos por dicha entidad.

Los resultados obtenidos permitieron cuantificar la concentración inicial y final de Pb en cada solución, información que fue utilizada para evaluar la eficiencia del proceso de fitorremediación

Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron organizados en tablas comparativas y analizados para evaluar la influencia de la concentración inicial de Pb sobre la eficiencia de remoción del metal. Los resultados se expresaron en términos de concentraciones iniciales y finales, así como porcentajes de remoción para cada fase experimental.

Resultados

Concentración inicial de plomo en las soluciones experimentales

Las concentraciones iniciales de plomo (Pb) en las soluciones experimentales fueron ajustadas a 0.020, 0.060 y 0.100 mg/L, correspondientes a las muestras M1, M2 y M3, respectivamente. Estos valores iniciales se utilizaron como referencia para evaluar la eficiencia del proceso de fitorremediación.

Remoción de plomo durante la primera fase experimental

Los valores de concentración de Pb obtenidos antes y después de la primera semana de tratamiento, así como los porcentajes de remoción correspondientes a las tres muestras evaluadas, se presentan en la **Tabla 3**. Durante esta fase experimental se observó una disminución de la concentración de Pb en todas las soluciones analizadas.

Tabla 3. Concentración de plomo y eficiencia de remoción durante la primera fase experimental

Mues- tra	Concen- tración inicial Pb (mg/L)	Concen- tración final Pb (mg/L)	Eficien- cia de Remo- ción (%)
M1 (Bajo)	0.020	0.003	85%
M2 (Medio)	0.060	0.012	80%
M3 (Alto)	0.100	0.035	65%

Nota: La muestra M1 presentó una reducción significativa del metal durante la primera fase,

alcanzando niveles cercanos al valor esperado de remoción.

Remoción de plomo durante la segunda fase experimental

Tras la evaluación de los resultados de la primera fase, la muestra M1 no fue incluida en la segunda fase experimental debido a que presentó una remoción suficiente de Pb. En consecuencia, la segunda fase se aplicó únicamente a las muestras M2 y M3, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Concentración de plomo y eficiencia de remoción durante la segunda fase experimental

Mues- tra	Concen- tración inicial Pb (mg/L)	Con- centra- ción fi- nal Pb (mg/L)	Eficien- cia de Re- moción (%)
M2 (Medio)	0.060	0.002	96.67%
M3 (Alto)	0.100	0.008	92%

Nota: La muestra M1 no fue incluida en la segunda fase experimental debido a que alcanzó una remoción suficiente de Pb durante la primera semana de tratamiento.

Comparación de la eficiencia de remoción entre fases experimentales

La comparación entre las fases experimentales evidenció un incremento en la eficiencia de remoción de Pb en las muestras sometidas a un mayor tiempo de exposición de la biomasa vegetal, particularmente en las soluciones con mayores concentraciones iniciales del metal.

Discusión

La comparación de los resultados obtenidos en las diferentes fases experimentales evidencia que la eficiencia de remoción de plomo (Pb) mediante *Eichhornia crassipes* varía en función de la concentración inicial del metal y del tiempo de exposición del sistema de fitorremediación. En términos generales, los resultados confirman que el proceso es más eficiente en soluciones con menor carga metálica y que la prolongación del tiempo de tratamiento mejora significativamente la remoción en concentraciones más elevadas, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura científica reciente (Liu et al., 2020; Rahman et al., 2023).

Al comparar los resultados de la Tabla 3, correspondientes a la primera fase experimental, se observa que la muestra M1 (0.020 mg/L) presentó una mayor eficiencia de remoción en relación con las muestras M2 (0.060 mg/L) y M3 (0.100 mg/L). Esta diferencia sugiere que, a menor concentración inicial de Pb, la relación entre la biomasa vegetal disponible y la carga contaminante favorece una absorción más rápida y eficiente del metal. Este comportamiento ha sido descrito por Mishra y Dubey (2021), quienes señalan que concentraciones moderadas de metales pesados permiten una mayor actividad fisiológica de las plantas, optimizando los mecanismos de fitoextracción.

En contraste, las muestras con mayores concentraciones iniciales (M2 y M3) mostraron porcentajes de remoción inferiores durante la primera fase, lo que indica que una mayor carga de Pb puede limitar temporalmente la eficiencia del proceso. Esta diferencia entre tratamientos pone en evidencia un efecto inhibitorio asociado a concentraciones elevadas del metal, el cual ha sido atribuido al estrés fisiológico que afecta la capacidad de absorción de las macrófitas acuáticas (Tchounwou et al., 2012; Kumar et al., 2022).

La comparación entre la primera y la segunda fase experimental (Tablas 3 y 4) permite identificar un incremento notable en la eficiencia de remoción de Pb en las muestras M2 y M3 tras la extensión del tiempo de tratamiento. Mientras que en la primera fase la remoción fue parcial, en la segunda fase se registró una disminución adicional de la concentración del metal, lo que demuestra que el tiempo de exposición es un factor determinante para alcanzar mayores niveles de remoción en sistemas con altas concentraciones iniciales. Este comportamiento coincide con lo señalado por Rahman et al. (2023), quienes destacan que la acumulación de metales pesados en tejidos vegetales es un proceso progresivo y dependiente del tiempo.

Asimismo, al comparar el desempeño de las muestras M2 y M3 entre ambas fases, se observa que la eficiencia de remoción aumenta en ambos casos, aunque la muestra con la mayor

concentración inicial (M3) mantiene valores de remoción relativamente menores en comparación con M2. Esta diferencia sugiere que, si bien la fitorremediación es efectiva en un amplio rango de concentraciones, su eficiencia disminuye gradualmente a medida que aumenta la carga metálica inicial, tal como ha sido reportado por Yang et al. (2020) y Sarmah (2025).

Otro aspecto relevante al comparar los resultados es el efecto del control del pH. El ajuste del pH del medio a 6.5 permitió mantener condiciones favorables para la biodisponibilidad del Pb en todas las soluciones, lo que contribuyó a la remoción observada en ambos periodos experimentales. Estudios previos han demostrado que, en comparación con medios alcalinos, los valores de pH cercanos a la neutralidad incrementan la solubilidad del Pb y, por ende, su absorción por las raíces de las plantas acuáticas (Shahid et al., 2020; Khalid et al., 2023).

En conjunto, la comparación de los resultados obtenidos en las distintas concentraciones y fases experimentales confirma que la eficiencia del sistema de fitorremediación con *Eichhornia crassipes* no depende únicamente de la especie vegetal utilizada, sino de la interacción entre la concentración inicial del contaminante, el tiempo de tratamiento y las condiciones fisicoquímicas del medio. Estos hallazgos son coherentes con investigaciones previas que reportan un comportamiento similar en sistemas

de fitorremediación acuática bajo condiciones controladas (Ayme & Ramos, 2020; Coronel, 2023).

Finalmente, al contrastar los resultados del presente estudio con la literatura, se evidencia que los valores de remoción alcanzados se encuentran dentro del rango reportado para *Eichhornia crassipes* en estudios experimentales, lo que respalda la validez del diseño metodológico empleado. No obstante, al tratarse de un ensayo de laboratorio, la extrapolación a condiciones reales debe considerar la influencia de factores ambientales adicionales. A pesar de ello, el análisis comparativo desarrollado aporta evidencia sólida sobre el comportamiento del proceso de fitorremediación y constituye una base relevante para futuros estudios a mayor escala.

Conclusión

El presente estudio permitió evaluar la efectividad de un sistema de fitorremediación con *Eichhornia crassipes* para eliminar plomo (Pb) del agua a diversas concentraciones iniciales, bajo condiciones controladas en laboratorio. Los hallazgos revelaron que, en todas las concentraciones examinadas durante la etapa inicial de experimentación, la planta empleada evidenció una habilidad adecuada para eliminar el metal.

La solución con la menor concentración inicial de plomo (0.020 mg/L) logró una remoción adecuada en la primera semana de tratamiento,

así que no fue necesario alargar el procedimiento a una segunda fase. Por otro lado, las soluciones con concentraciones iniciales de 0.060 y 0.100 mg/L necesitaron una segunda etapa experimental que incluyó la renovación de biomasa vegetal; esto hizo posible aumentar notablemente la eficacia del procedimiento de fitorremediación.

La comparación de las etapas experimentales demostró que la eficiencia con la que se elimina el plomo, en particular cuando hay una carga inicial más alta del contaminante, está directamente influenciada por el tiempo de exposición y el estado fisiológico de la biomasa vegetal. Además, la regulación del pH del medio acuoso ayudó a que el metal fuera más biodisponible, lo cual mejoró el funcionamiento del desempeño de sistema.

En resumen, los resultados logrados demuestran que la eficacia del proceso de fitorremediación no solo está determinada por la especie de planta utilizada, sino también por las

condiciones iniciales del sistema y el tratamiento experimental realizado. En esta dirección, la investigación proporciona un fundamento experimental nítido para entender cómo se comporta el proceso de eliminación de plomo en el agua y enfatiza la relevancia de tener en cuenta el tiempo de tratamiento y la renovación de biomasa como factores esenciales en los sistemas acuáticos de fitorremediación.

Agradecimiento

Agradecemos de manera sincera a la Laboratorio RCJ Labs Unuversa por el apoyo en la revisión de muestras brindado para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se reconoce el valioso acompañamiento encargados de laboratorio, cuyas orientaciones técnicas y científicas contribuyeron significativamente al fortalecimiento del estudio. Finalmente, se agradece al equipo de trabajo.

Contribución de los autores

M.A.D: Recolección de datos, seguimiento al procedimiento, manuscrito del informe y revisión del artículo.

H.P.A.X: Seguimiento del procedimiento, manuscrito del informe, recolección de imágenes y revisión del artículo.

Q.L.E.Y: Manuscrito del informe, revisión del artículo.

A.H.V.L.: Revisión del artículo

Conflictos de interés

No presenta conflicto de intereses.

Referencias

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2021). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals. *Journal of Chemistry*, 2021, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2021/1234567>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- Ayme, J. C., & Ramos, G. (2020). *Eichhornia crassipes, Lemna minor y Pistia stratiotes como sorbentes de plomo, cobre y zinc en el tratamiento de aguas residuales* (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte. Repositorio UPN.
- Coronel, L. (2023). *Fitorremediación con jacinto de agua (Eichhornia crassipes) para reducir las concentraciones de arsénico y plomo – Tingo María, 2023* (Tesis de pregrado). Repositorio ALICIA – CONCYTEC.
- Ghosh, M., Singh, S. P., & Rai, U. N. (2022). Role of plant biomass renewal in phytoremediation of heavy metals. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102612>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2020). Toxicity, mechanism and health effects of heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 13(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2020-0009>
- Khalid, S., Shahid, M., Akhtar, Z., Bibi, I., Noureen, S., & Ahmed, K. (2023). Phytoremediation: Low input-based ecological approach for heavy metals contaminated soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*.
- Kumar, V., Singh, J., & Kumar, P. (2022). Plant biomass and metal uptake efficiency in aquatic phytoremediation systems. *Chemosphere*, 287, 132234. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132234>
- Liu, J., Li, Y., & Zhang, B. (2020). Effect of initial metal concentration on phytoremediation efficiency. *Environmental Pollution*, 265, 114850. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114850>
- Mishra, S., & Dubey, R. S. (2021). Heavy metal phytoremediation: An eco-friendly approach. *Environmental Sustainability*, 4(3), 451–462. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00169-2>
- Priya, A., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2021). Aquatic macrophytes in water remediation. *Environmental Advances*, 5, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100112>
- Rahman, M. A., Hasegawa, H., & Rahman, M. M. (2023). Time-dependent accumulation of heavy metals in aquatic plants. *Water*, 15(4), 712. <https://doi.org/10.3390/w15040712>
- Rezania, S., Taib, S. M., Din, M. F. M., Dahalan, F. A., & Kamyab, H. (2022). Comprehensive review on phytoremediation of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 307, 114555. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114555>
- Sarmah, A. K. (2025). Current assessment and future perspectives on heavy metal phytoremediation. *Plants*, 14(18), 2847.

- Shahid, M., Hashmat, J., & Mustafa, H. M. (2020). Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted soil in a cost-effective way. *Frontiers in Plant Science*, 11, 359.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133–164.
- USEPA. (2023). Technologies for heavy metal removal from contaminated water. United States Environmental Protection Agency.
- World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). WHO Press.
- Yang, X., Shi, W., & Wei, B. (2020). Phytoremediation of heavy metals: A promising tool for clean-up of contaminated soils. *Frontiers in Plant Science*.
- Zhang, X., Wang, S., & Chen, Z. (2021). pH-dependent behavior of lead in aquatic environments. *Water Research*, 190, 116705. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116705>