

Velocidad de consumo y respuestas fisiológicas de la *Pistia stratiotes* L. ante el cobre

Alejandra E. Torres^{a1} , María Marciaga¹ , Laura Chavarria¹ 

Ana C. González Valoys² , Viccelda Domínguez^{b2} 

¹Licenciatura en Ingeniería Ambiental – Universidad Tecnológica de Panamá,

²Departamento de Hidráulica, Sanitaria y Ciencias Ambientales – Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, República de Panamá

^aalejandra.torres2@utp.ac.pa; ¹maria.marciaga@utp.ac.pa; ¹laura.chavarria@utp.ac.pa;

²ana.gonzalez1@utp.ac.pa; ²viccelda.dominguez@utp.ac.pa

DOI: 10.33412/pri.v17.1.4168



Resumen:

Más de 23 millones de personas en todo el mundo se han visto afectadas por la minería. Con el proceso de cierre de Minera Panamá, cabe mencionar a la mina de oro de Remance, pues estudios realizados más de veinte años después de su cierre, determinaron que continuaba representando un peligro para los pobladores de zonas aledañas y la biota local. La fitorremediación es una técnica *in situ* que utiliza plantas para disminuir las concentraciones de tóxicos en un sustrato contaminado. Esta evaluación tiene como objetivo determinar la velocidad de consumo y los cambios fisiológicos de la *Pistia stratiotes* L. al ser sometida en diluciones de 5mg/L y 15 mg/L de cobre en agua destilada. El ensayo se dio por cuatuplicado durante 10 días y se usaron controles bióticos y abióticos. Fueron registrados el tiempo; el pH y la concentración de cobre en el agua; y las alteraciones físicas y la pérdida de color verde oscuro en las plantas. La velocidad de consumo en la dilución de 5mg/L fue de 0.47mg/L/día y en la de 15mg/L fue de 1.02mg/L/día. La pérdida de clorofila fue de 59.72% en la dilución de 5mg/L para el séptimo día, no se obtuvieron datos concluyentes para la de 15mg/L. La velocidad de consumo de la *Pistia stratiotes* L. aumenta en correlación con la concentración en la cual se le evalúa y se refleja en su fisiología a través de la acelerada pérdida de color verde oscuro en la planta indicando necrosis. Estos datos pueden ser utilizados como base para otros proyectos de fitorremediación en cuerpos de agua afectados por actividades mineras. Se recomienda el Índice de Color Verde Oscuro como método indirecto para la evaluación fisiológica de una especie en la cual sea aplicable.

Palabras claves: Cobre, consumo, fitorremediación, *Pistia stratiotes* L.

Title: Consumption rate and physiological responses of *Pistia stratiotes* L. to copper.

Abstract: More than 23 million people worldwide have been affected by mining. With the closure of Minera Panama, it is worth mentioning the Remance gold mine, since studies carried out more than twenty years after its closure determined that it continued to represent a danger to the inhabitants of surrounding areas and the local biota. Phytoremediation is an *in-situ* technique that uses plants to reduce the concentrations of toxic substances in a contaminated substrate. This evaluation aims to determine the consumption rate and the physiological changes of *Pistia stratiotes* L.

when subjected to dilutions of 5 mg/L and 15 mg/L of copper in distilled water. The test was carried out in quadruplicate for 10 days and biotic and abiotic controls were used. The climatic conditions; the pH and concentration of copper in the water; and the physical alterations and loss of dark green color in the plants were recorded. The consumption rate at the 5 mg/L dilution was 0.47 mg/L/day and at the 15 mg/L dilution was 1.02 mg/L/day. The loss of chlorophyll was 59.72% at the 5 mg/L dilution for the seventh day, no conclusive data were obtained for the 15 mg/L dilution. The consumption rate of *Pistia stratiotes* L. increases in correlation with the concentration at which it is evaluated and is reflected in its physiology through the accelerated loss of dark green color in the plant, indicating necrosis. These data can be used as a basis for other phytoremediation projects in water bodies affected by mining activities. The Dark Green Color Index is recommended as an indirect method for the physiological evaluation of a species to which it is applicable.

Key words: Copper, consumption, phytoremediation, *Pistia stratiotes* L.

Tipo de artículo: investigación.

Fecha de recepción: 29 de abril de 2025.

Fecha de aceptación: 20 de febrero de 2026.

Introducción

La minería se considera como una de las fuentes principales de materia prima para las tecnologías que se han convertido en facilitadores de la vida diaria como los teléfonos celulares, la televisión, las computadoras, e incluso minerales como el litio, son utilizados como alternativa para el uso de combustibles fósiles en los automóviles eléctricos [1]. Pero, también puede representar un peligro latente para el medio ambiente debido a que deteriora la calidad del agua, aire y suelo debido a diversos factores como el mal manejo de residuos, el uso de elementos tóxicos para la extracción de metales pesados o un proceso de cierre minero deficiente [2] [3] [4]. En el 2023, se publicó una investigación en la que se determinó que la actividad minera ha contaminado un área aproximada de 480,700km² de canales fluviales y 164,400km² de llanuras aluviales, las cuales afectan a más de 23 millones de personas en todo el mundo [5].

Con el proceso de cierre de Minera Panamá, es necesario mencionar la poca precaución que se tuvo con la mina de oro de Remance, provincia de Veraguas, la cual dejó de operar en 1999, pues estudios realizados más de veinte años después de su cierre determinaron que continuaba representando un peligro para los pobladores en zonas aledañas (por ingesta accidental o contacto dérmico) y para la biota local [3] [1].

La fitorremediación es una técnica *in situ* de biorremediación la cual utiliza tanto plantas como microorganismos para disminuir las concentraciones de tóxicos hallados en un sustrato contaminado [6]. Ha sido ampliamente estudiada a nivel global como una forma de remover las altas concentraciones de metales pesados en los desechos de la minería en China, donde se ha demostrado su efectividad al prevenir la migración y difusión de estos metales para recuperar los suelos; en Australia, Polonia, Omán, México, India, Indonesia y Reino Unido se ha utilizado en zonas en las que se han encontrado residuos de la actividad minera para propósitos culturales como: el recreacional y educacional; para ayudar al ecosistema con: el ciclo de nutrientes, la mejora de la calidad del suelo y la fitoestabilización; y para la producción de aceites y alimentos, entre muchos otros [4] [2].

Los humedales artificiales se utilizan como métodos secundarios o terciarios para el tratamiento de aguas residuales, estos se diseñan y construyen en base a los procesos fisicoquímicos y biológicos que ocurren

en los humedales reales. Estos no representan un peligro para los seres vivos nativos o migratorios. Se les considera una alternativa de bajo costo y son tan efectivos como otros tratamientos convencionales como la laguna facultativa o los lodos activados [7] [8].

En Panamá, se han realizado algunas revisiones de carácter bibliográfico en las cuales se ha concluido que sería conveniente adaptar la fitorremediación para depurar tanto suelos como cuerpos de agua que se han visto contaminados por metales pesados, siendo uno de estos el cobre [9] [7].

El cobre es un micronutriente esencial en las plantas que al estar en exceso provoca síntomas por intoxicación como: clorosis, alteraciones en el proceso de la fotosíntesis, senescencia de las hojas, crecimiento retardado y reducción en la longitud de raíces. La clorosis es la pérdida de clorofila en las plantas, esta se puede dar al estar sometidas tanto a estrés biótico como abiótico, y es diferente al daño que sucede por el envejecimiento natural de la misma [10] [2].

Los seres humanos reaccionan de diferentes maneras ante este metal dentro de su organismo, lo que ocasiona varias enfermedades tanto por insuficiencia (síndrome metabólico, anemia, cardioencefalomiopatía fatal infantil, enfermedad de Menkes), como por exceso (hipertensión, aterosclerosis, cáncer, enfermedad de Wilson) o por una mala distribución (diabetes, deterioro de la memoria, cognición y capacidad de movimiento) [11]. Actualmente, no se cuenta con datos estadísticos en los que se reporten casos directos de intoxicación por cobre tanto a nivel nacional como internacional.

El Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 35-2019, emitido por la Dirección General de Normas y Tecnología Industrial (DGNTI) y la Comisión Panameña de Normas Industriales y Técnicas (COPANIT) del Ministerio de Comercio e Industrias, establece que, para prevenir la contaminación de cuerpos de agua, los efluentes líquidos provenientes de actividades humanas deben cumplir con los límites máximos permisibles (LMP). En el caso del cobre, este límite es de 1mg/L [12].

La *Pistia stratiotes* L., conocida también como lechuga de agua, es una macrofita acuática perenne que se encuentra ampliamente en aguas dulces tropicales y subtropicales, sus raíces se extienden por debajo del agua desde su parte flotante y elimina una amplia gama de metales pesados en los que se incluye el cobre [13] [9]. A pesar de su potencial para la fitorremediación, aún existen limitaciones en la comprensión del comportamiento fisiológico de la *Pistia stratiotes* L. frente a distintas concentraciones de cobre. El estrés inducido por este material puede acelerar o ralentizar la velocidad de absorción, afectando su capacidad y eficiencia de remoción. Esto dificulta predecir su desempeño y límites en aplicaciones reales para el diseño de sistemas de remediación efectivos y confiables.

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento de la *Pistia stratiotes* L. al ser sometida a concentraciones de 5mg/L y 15 mg/L de cobre, su capacidad y velocidad de consumo del contaminante y sus cambios fisiológicos, en particular, el color verde oscuro perdido durante el proceso de depuración. A través de este análisis, se pretende sustentar el uso de macrofitas en estrategias de fitorremediación, contribuyendo de forma indirecta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) relacionados con la protección de la salud, el saneamiento del agua y la preservación de la biodiversidad acuática y terrestre.

2. Materiales y métodos

El espacio dispuesto para llevar a cabo el experimento fue dentro de Áreas Verdes en el campus de la UTP. Se siguió el modelo metodológico presentado en la figura 1, dividiéndose el proceso en tres: 1) la disposición del espacio y la preparación de *Pistia stratiotes* L., 2) la preparación de las diluciones de 5mg/L y 15mg/L de cobre y 3) los controles tanto de niveles de concentración del cobre como del pH del agua, así como el registro del tiempo y las alteraciones físicas que se fueron presentando en las plantas a lo largo de 10 días.

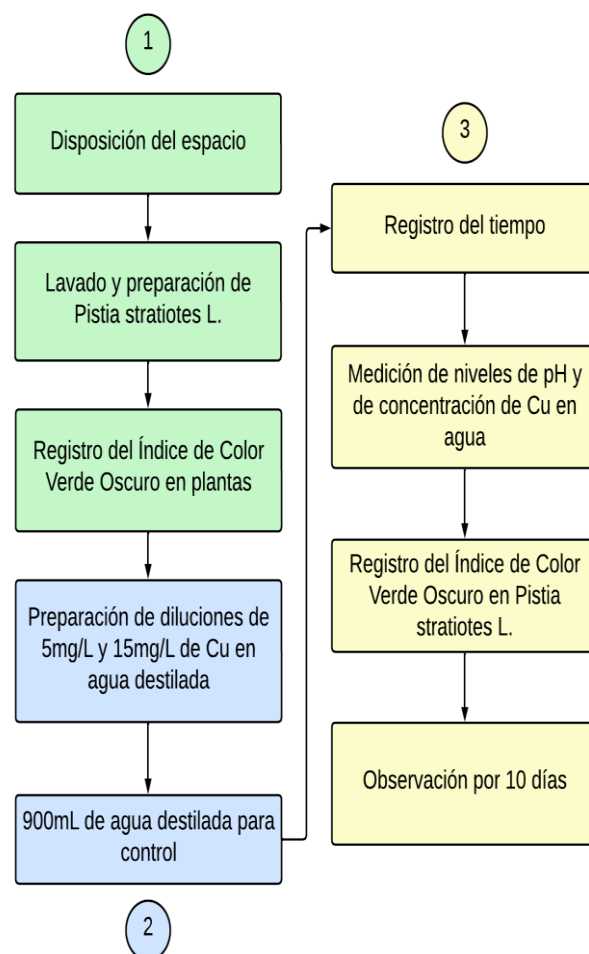


Figura 1. Modelo metodológico para el análisis del consumo de cobre de la *Pistia stratiotes* L.

Además, se siguió el modelo experimental de la figura 2, basándose en lo seguido por Tang y colaboradores [13], reduciéndose la cantidad de cuatro a dos concentraciones por cuatriplicado para los ensayos. Las diluciones fueron seleccionadas en base a lo observado por Kumar y colaboradores [14], pues la reducción máxima realizada por la *Pistia stratiotes* L. se dio en una dilución de 5mg/L y la mínima reducción en una dilución de 15mg/L en un periodo de 32 días.

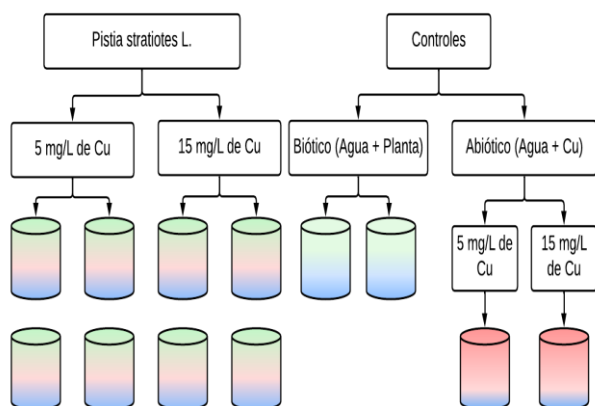


Figura 2. Modelo experimental de la *Pistia stratiotes L.* con diluciones de cobre.

Se usaron dos tipos de control: uno biótico con la *Pistia stratiotes L.* en agua destilada y otro abiótico con las diluciones de cobre para comparar los resultados.

2.1 Primer paso – *Pistia stratiotes L.*

Se seleccionaron diez plantas de tamaños similares las cuales fueron limpiadas utilizando agua destilada para remover cualquier impureza u organismo ajeno a estas que pudiera afectar el experimento, se determinó de manera indirecta que estaban sanas utilizando una aplicación (Petiole Pro) para celular a través del Índice de Color Verde Oscuro (DCGI, por sus siglas en inglés) presente en fotografías, su promedio fue de 0.439 antes de ser sometidas a las diluciones como se observa en la figura 3.



Figura 3. *Pistia stratiotes L.* utilizadas en el experimento.

2.2 Segundo paso – Diluciones de cobre

Para las diluciones de cobre se utilizó sulfato de cobre (II) pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), se realizaron los cálculos que permitiera la obtención de 5 mg/L y 15 mg/L de cobre presente en agua destilada. Primero, se pesó la sal necesaria con ayuda de un vaso precipitado como se muestra en la figura 4, este proceso se realizó dos veces con vasos distintos para las dos diluciones.



Figura 4. Uso de la balanza para pesar el sulfato de cobre pentahidratado.

Con la ayuda de una probeta, se fue añadiendo la sal al agua destilada para luego ser vertida en un matraz aforado y manualmente se mezcló hasta que se obtuvo 3L de cada dilución, estas fueron almacenadas en varias botellas plásticas que fueron lavadas y esterilizadas con anterioridad. En vasos de plástico se vertieron 450mL de las diluciones y 450mL de agua destilada para colocar finalmente las plantas como se muestra en la figura 5.

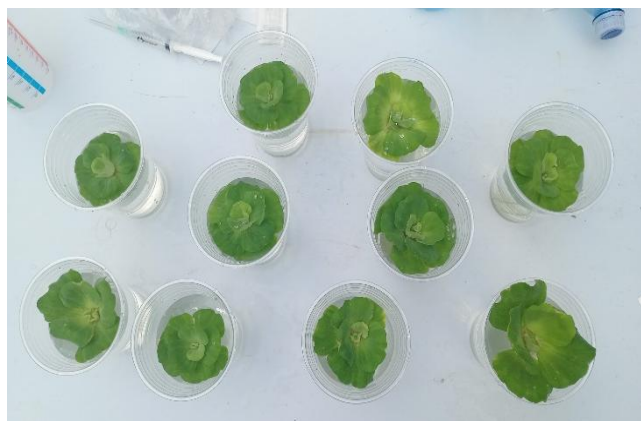


Figura 5. Lechugas de agua en diluciones y en agua destilada.

2.3 Tercer paso – Observación

Para esta investigación se llevó un registro del tiempo con ayuda de una aplicación de celular, al igual que los niveles de pH con un pHmetro y los niveles de concentración de cobre con un espectrofotómetro, en horarios similares con un día de por medio entre mediciones, a excepción de los fines de semana. Puesto que se han encontrado aguas que han sido contaminadas por derrames de tinas de lavado de las mineras [1], se siguieron los parámetros del Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 35-2019 para los límites máximos permisibles del pH y la concentración de cobre, debido a que el Decreto Ejecutivo No. 75 de 2008, que dicta la norma de calidad ambiental para las aguas continentales de uso recreativo con y sin contacto directo, no contempla un parámetro para la concentración de cobre permisible. Se descarta que la concentración de SO_4 utilizada afecte la fisiología de la planta pues está muy por debajo del LMP, el cual es de 1000mg/L. [15].

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los hallazgos del estudio, centrados en el pH del agua contaminada y las variaciones en las concentraciones de cobre, así como los efectos fisiológicos inducidos por el metal en la *Pistia stratiotes* L., evidenciados en el índice de color verde oscuro (DCGI), incluyendo el tiempo que incidió en el comportamiento del sistema.

3.1 Tiempo

La temperatura ambiente durante el estudio osciló entre los 34°C y los 29°C, los primeros días se mantuvieron despejados, mientras que en los días de por medio las lluvias fueron constantes lo que provocó que se dieran imprevistos que pudieron haber afectado los resultados de pH y concentración obtenidos. En el final de la toma de datos, el cielo se mantuvo parcialmente soleado.

3.2 Niveles de pH - Promedio

Los ensayos marcaron un pH ácido el primer día. El pH promedio para la dilución de 5mg/L con la *Pistia stratiotes* L. fue de 6.57 y de 6.33 en la dilución de 15mg/L con la planta. Se obtuvo un 36.31% de incremento en el pH de la dilución de 5mg/L en promedio entre las dos primeras mediciones y un 29.34% en la dilución de 15mg/L (tabla 1). Estos niveles coinciden con los obtenidos por Ayme y coautores para una dilución de 25mg/L de cobre [16].

Tabla 1. Niveles de pH promedio por día de los ensayos

Tipo	Días				
	0	3	5	7	10
Dilución 5mg/L + <i>Pistia stratiotes</i> L.	4.88	6.65	6.34	7.97	6.99
Dilución 15mg/L + <i>Pistia stratiotes</i> L.	4.52	5.84	7.74	6.41	7.16
Control Abiótico (5mg/L Cu) de	5.04	6.17	7.22	6.63	6.76
Control Abiótico (15mg/L Cu) de	4.92	6.44	7.00	6.93	6.72
Control Biótico	4.75	5.60	6.00	6.11	6.04

Los valores de pH fueron variando a lo largo del experimento con una tendencia a aumentar y algunos días a disminuir, esta variación se explica por factores como el CO₂ atmosférico que en contacto con el agua forma iones bicarbonatos que elevan el pH, otro factor influyente es la lluvia que tiene un pH ligeramente ácido y provoca una disminución del pH en los envases del experimento [17]. Al final de la observación, los niveles aumentaron un 43.21% en la dilución de 5mg/L y un 58.44% en la de 15mg/L con respecto a los valores iniciales. Todos los ensayos lograron entrar en el rango aceptable de 5.5 – 8.5 que establece la DGNTI-COPANIT 35-2019 [12].

3.3 Concentraciones de cobre

Los cambios en las concentraciones para ambas diluciones se notaron a partir la segunda medición. En la dilución de 5mg/L, los resultados se acercaron más al valor dictado por la DGNTI-COPANIT 35-2019 de 1mg/L. La disminución promedio de la concentración para el tercer día fue de 36.74% para la dilución de 5mg/L y de 35.33% en la de 15mg/L, estos porcentajes aumentaron a 45.38% y 42.66% respectivamente al quinto día, pero a partir del séptimo, la planta disminuyó la velocidad con la que eliminaba el cobre de las diluciones, lo cual indica la intoxicación de la planta, llegando en esta etapa a su máxima capacidad de absorción, por lo que los porcentajes finales fueron de 9.39% y 3.84% en el décimo día, como se observa en las figuras 6 y 7 con una tendencia exponencial decreciente.

En cuanto a los controles, los bióticos obtuvieron un promedio final de 0.5mg/L de Cu entre los dos ensayos; y en los abióticos, las diluciones oscilaron en sus concentraciones respectivas y su promedio final fue de 5.62mg/L y 15.34mg/L para las diluciones de 5mg/L y 15mg/L, lo que confirma que la disminución observada en los ensayos experimentales estuvo asociada a la presencia de la *Pistia stratiotes* L.

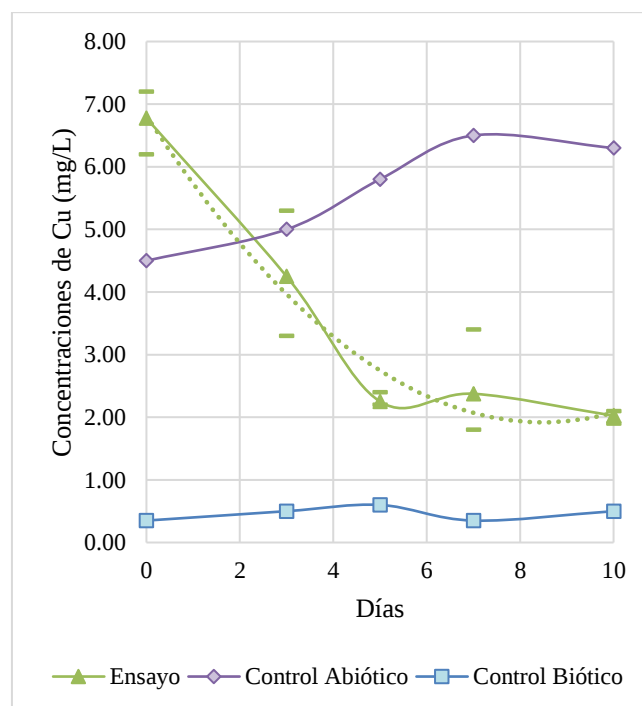


Figura 6. Niveles de concentración de cobre en la dilución de 5mg/L.

La efectividad de reducción alcanzó un 70.06% para la concentración inicial de 5mg/L y un 69.37% para la de 15mg/L. Estos valores concuerdan con los reportados por Khambali y coautores [18], quienes obtuvieron una disminución del 70% de la concentración de cobre utilizando *Pistia stratiotes* L. durante un periodo de observación de tres semanas en aguas residuales de origen industriales con una concentración inicial de 2.00 mg/L de Cu. A pesar de la diferencia en las condiciones experimentales (tipo de agua, concentración del contaminante y tiempo de evaluación), la similitud en los porcentajes de remoción indica una capacidad consistente de la especie para la absorción de cobre en distintos contextos.

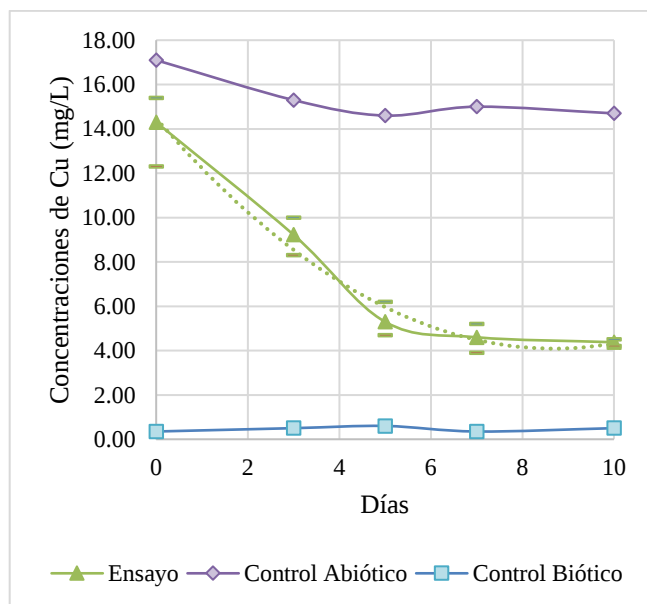


Figura 7. Niveles de concentración de cobre en la dilución de 15mg/L.

La velocidad promedio de consumo de la *Pistia stratiotes* L. dentro de la dilución de 5mg/L de cobre fue de 0.47mg/L/día, en la cual, entre los días siete y cinco, se dio un aumento de los niveles de concentración que arrojó una velocidad de desorción promedio de 0.06mg/L/día que puede ser explicada por el ingreso inesperado de agua de lluvia dentro del ensayo, más específicamente, dentro de la planta 3 (en 5mg/L de Cu) en el séptimo día; mientras que en la dilución de 15mg/L, la velocidad de consumo fue de 1.02mg/L/día, aunque, no se descarta alteración semejante al caso de la anterior dilución. En la tabla 2, se comparan las velocidades de consumo de cobre obtenidas por la *Pistia stratiotes* L. con las de otras plantas remediadoras en agua en un periodo de evaluación similar.

Tabla 2. Velocidades de plantas remediadoras de cobre

Especie	Cu (mg/L)	Días	Velocidad (mg/L/día)	Referencia
<i>Pistia stratiotes</i> L.	5	10	0.47	Este estudio
	15		1.02	
<i>Pistia stratiotes</i> L.	5	10	0.46	Tang y cols. [13]
	10		0.78	
	15		1.15	
	20		1.52	
	25		1.73	
<i>Limnocharis Flava</i>	30	5	1.34	Alikasturi y cols. [19]
<i>Eucalyptus</i>	3	21	0.48	Chua y cols. [20]
	6		3.14	
	8		1.97	
<i>Scirpus Californicus</i>	5	15	0.27	Chagua y Tardío [21]

Las velocidades de consumo de la dilución de 5mg/L y 15mg/L de cobre de este estudio concuerdan con los obtenidos por Tang y colaboradores [13] utilizando *Pistia stratiotes* L. en agua destilada. Aunque, se destaca que, las plantas usadas entre evaluaciones no se comportaron de igual manera, lo cual podría deberse a que la biomasa de las plantas usadas en cada estudio era distinta (en el presente, se usaron plantas de menor tamaño). La capacidad de depuración de una planta antes morir se deriva de la cantidad de biomasa que esta posea, así como del clima, microbioma y niveles de CO₂ [2].

3.4 Alteraciones físicas – Índice de color verde oscuro

Los primeros cambios físicos se dieron en la coloración de las raíces, estas pasaron de un marrón oscuro a uno pálido y redujeron su longitud. Los niveles de clorofila disminuyeron para el tercer día, las plantas sometidas a la dilución de 15mg/L de Cu marcaron un DCGI nulo, mientras que las de dilución 5mg/L de Cu tuvieron un promedio de 0.2343 de DCGI y los controles en agua destilada quedaron en un promedio de 0.3089 de DCGI. Para el quinto día, estos valores aumentaron quedando un promedio de 0.2594 de DCGI en las de dilución 5mg/L, y de 0.4370 de DCGI en los controles de agua destilada. En el séptimo día el promedio de DCGI fue de 0.1768 para las plantas en dilución de 5mg/L de Cu, y los controles en 0.4343 de DCGI. El último día el DCGI fue nulo para las plantas en dilución 5mg/L de Cu, y los controles de agua destilada tuvieron 0.4754 cada uno (figura 8).

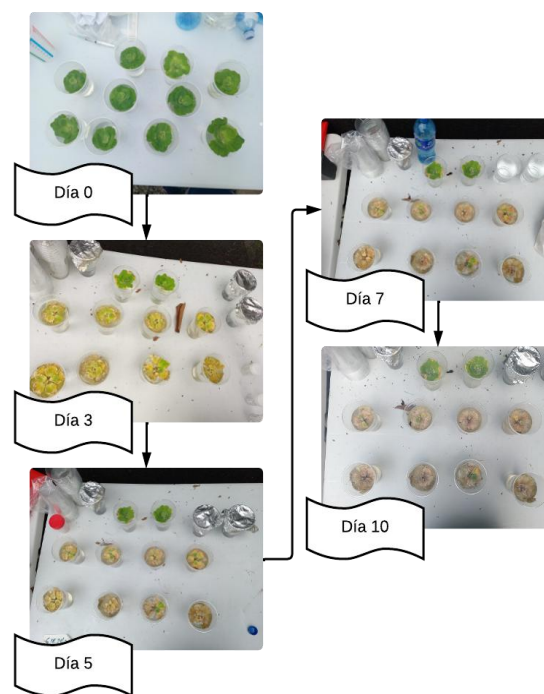


Figura 8. Pérdidas de clorofila de la *Pistia stratiotes* L. en diluciones de cobre.

El porcentaje de pérdida de DCGI, como un indicador indirecto de la cantidad de clorofila en la planta, fue de 59.72% en la dilución de 5mg/L para el séptimo día, para la dilución de 15mg/L no se obtuvieron datos concluyentes y en los controles en agua destilada se obtuvo un aumento de clorofila de un 8.29%. La *Pistia stratiotes* L. también fue utilizada por

Sidek y colaboradores [22] para humedales artificiales en los cuales se depuró muestras de un lago contaminado por una mina de hierro, esta presentó los mismos síntomas de clorosis a lo largo de 28 días, pero absorbió un 96% del hierro y disminuyó la turbiedad del agua en un 50%. Brăhaiața y coautores [23] determinaron que pese a la mortandad de la *Pistia stratiotes* L., era una alternativa viable para la remediación *in situ* de las aguas en tinas de lavado de minas de cobre, zinc y hierro.

La disminución progresiva del DCGI es consistente con los hallazgos de Upadhyay y Panda [24], quienes comprobaron que la exposición de la *Pistia stratiotes* L. a concentraciones elevadas de cobre induce estrés oxidativo, caracterizado por la reducción de los pigmentos fotosintéticos y la inhibición del crecimiento en raíces y hojas, atribuyéndolo a la acumulación del metal y a la alteración de los sistemas antioxidantes de la planta causando daños fisiológicos tempranos y pérdida de clorofila. Según Wang y coautores [25], el estrés por cobre reduce la eficiencia en la captura de luz de las plantas y tiene un efecto irreversible en sus centros de reacción fotosintética, lo que explicaría la muerte de la *Pistia stratiotes* L. y puesto que las utilizadas para el experimento fueron de un tamaño reducido, la concentración más alta (de 15mg/L) debilitó más rápido a la planta, mientras que la menor concentración (de 5mg/L) permitió que durara una semana.

4. Conclusiones

La velocidad de consumo de la *Pistia stratiotes* L. aumenta en correlación con la concentración en la cual se le evalúe, que a su vez representa un mayor estrés para la planta y se refleja en su fisiología a través de la acelerada pérdida de DCGI en la planta indicando necrosis. La *Pistia stratiotes* L. puede realizar el proceso de fitorremediación de manera individual aun iniciada la pérdida de color verde oscuro y su necrosis, pero su tiempo de vida podría alargarse si el número de plantas actuando dentro de un mismo cuerpo de agua se incrementa para reducir el estrés individual *in situ* o en un humedal artificial si se dispone como un tratamiento terciario en una planta de tratamiento de aguas contaminadas por cobre, lo que aprovecharía aún más sus capacidades de absorción para lograr cumplir con la concentración máxima de 1mg/L de cobre permitida por la DGNTI-COPANIT 35-2019.

Estos datos pueden ser utilizados como base para otros proyectos de fitorremediación en cuerpos de agua afectados por actividades mineras o por pasivos ambientales asociados a procesos de cierre de minas de cobre. Se recomienda el uso del índice de color verde oscuro como método indirecto para la evaluación fisiológica de especies vegetales en las que sea aplicable, así como la extensión de esta línea de investigación hacia otros xenobióticos y sus combinaciones.

Agradecimiento

A la Lic. Yarisel González, encargada del laboratorio de sanitaria, por proveernos algunos equipos y materiales necesarios para la realización de esta investigación; y al personal encargado de las Áreas Verdes dentro del campus.

Referencias

- [1] A. C. González Valoys, «Impacto ambiental sobre suelos y plantas por actividades extractivas en los contenidos de metales pesados y cianuro en la zona minera de Remance, Panamá,» Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Madrid, Madrid, España, 2022.
- [2] V. Chandra Pandey, G. Gajić, P. Sharma y M. Roy, Adaptive Phytoremediation Practices: Resilience to Climate Change, Amsterdam:

Elsevier, 2022.

- [3] N. Ruiz, «Telemetro,» Telemetro, 15 Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.telemetro.com/nacionales/minera-panama-mici-inicia-cierre-controlado-y-definitivo-mina-n5950723>. [Último acceso: 4 Abril 2024].
- [4] B. Wu, H. Peng, M. Sheng, H. Luo, X. Wang, R. Zhang, F. Xu y H. Xu, «Evaluation of phytoremediation potential of native dominant plants and spatial distribution of heavy metals in abandoned mining area in Southwest China,» Elsevier: Ecotoxicology and Environmental Safety, vol. 220, n° s. i., p. s. i., 2021.
- [5] M. Macklin, C. Thomas, A. Mudbhakal, P. Brewer, K. Hudson-Edwards, J. Lewin, P. Scussolini, D. Eilander, A. Lechner, J. Owen, G. Bird, D. Kemp y K. R. Mangalaa, «Impacts of metal mining on river systems: a global assessment,» Science, vol. 381, n° 6664, pp. 1345-1350, 2023.
- [6] V. Kumar, M. Shah y S. Kumar Shahi, Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water, Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [7] D. Delvalle de Borrero, K. Fuentes y J. Medina, «Humedales artificiales flotantes y su valor paisajístico en ríos urbanos-Ciudad de Panamá,» Prisma Tecnológico, vol. 13, n° 1, pp. 3-9, 2022.
- [8] M. Waly, T. Ahmed, Z. Abunada, S. Mickovski y C. Thomson, «Constructed Wetland for Sustainable and Low-Cost Wastewater Treatment: Review Article,» Land, vol. 11, n° 9, p. 1388, 2022.
- [9] J. Velásquez García y H. Cobefia Navarrete, «Fitorremediación como alternativa en remoción de metales pesados del suelo: Una revisión teórica,» Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios, vol. 9, n° 2, p. s. i., 2022.
- [10] A. Franco, S. Buoso, L. Zanin, R. Pinton y N. Tomasi, «Copper Toxicity in Maize: The Severity of the Stress is Reduced Depending on the Applied Fe-Chelating Agent,» Journal of Plant Growth Regulation, vol. 42, n° 3, p. 1567–1581, 2023.
- [11] J. Chen, Y. Jiang, H. Shi, Y. Peng, X. Fan y C. Li, «The molecular mechanisms of copper metabolism and its roles in human diseases,» Pflügers Archiv - European Journal of Physiology, vol. 472, n° 10, p. 1415–1429, 2020.
- [12] Gobierno de Panamá, «Ministerio de Comercio e Industrias,» 27 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.mici.gob.pa/wp-content/uploads/2021/12/35rt-dgnti-copanit-35-2019-1.pdf>. [Último acceso: 14 Mayo 2024].
- [13] K. H. D. Tang, S. H. Awa y T. Hadibarata, «Phytoremediation of Copper-Contaminated Water with Pistia stratiotes in Surface and Distilled Water,» Water, Air, & Soil Pollution, vol. 231, n° 12, p. s. i., 2020.
- [14] V. Kumar, J. Singh, A. Saini y P. Kumar, «Phytoremediation of copper, iron and mercury from aqueous solution by water lettuce (Pistia stratiotes L.),» Environmental Sustainability, vol. 2, p. 55–65, 2019.
- [15] Gobierno de Panamá, «Gaceta Oficial,» 4 Junio 2008. [En línea]. Available: <https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/26078/11616.pdf>. [Último acceso: 25 Julio 2024].
- [16] M. Ayme Estacio, C. Castaneda-Olivera y E. Benites Alfaro, «Eichhornia Crassipes and Pistia Stratiotes as Biosorbents for Lead, Copper and Zinc in Wastewater Treatment,» Chemical Engineering Transactions, vol. 93, pp. 19-24, 2022.
- [17] C. Boyd, «Carbon Dioxide, pH, and Alkalinity,» de Water Quality: An Introduction, Auburn, E.E.U.U., Springer, 2020, pp. 177-203.
- [18] K. Khambali, T. Anwar y S. Wardoyo, «Innovation in Utilisation of Apu-apu (Pistia stratiotes) for Phytoremediation of Heavy Metal Contaminants in Industrial Wastewater: A Case Study on Local Biodiversity,» Journal of Ecological Engineering, vol. 25, n° 12, pp. 333-339, 2024. <https://doi.org/10.12911/22998993/194952>.
- [19] A. S. Alikasturi, M. Z. A. M. Kamil, N. A. A. M. Shakri, M. E. Serit, N. S. A. Rahim, S. Shaharuddin, M. R. Anuar y A. R. M. Radzi, «Phytoremediation of Copper in Mineral, Distilled and Surface Water using Limnorchis Flava plant,» Materials Today: Proceedings, vol. 19, n° 4, pp. 1489-1496, 2019.
- [20] J. Chua, J. M. Banua, I. Arcilla, A. Orbecido, M. E. de Castro, N. Ledesma, C. Deocarís, C. Madrazo y L. Belo, «Phytoremediation potential

- and copper uptake kinetics of Philippine bamboo species in copper contaminated substrate,» *Heliyon*, vol. 5, nº 9, 2019.
- [21] R. E. Chagua Orosco y J. J. Tardío Osorio, «Evaluación de remoción de cobre y zinc por la planta nativa *scirpus californicus* (totora) en la comunidad de Pomachaca – Tarma,» Universidad Nacional del Centro del Perú, Tarma, Junín, Perú, 2015.
- [22] N. M. Sidek, S. R. S. Abdullah, N. ' . Ahmad, S. F. S. Draman, M. M. Mohd Rosli y M. F. Sanusi, «Phytoremediation of abandoned mining lake by water hyacinth and water lettuces in constructed wetlands,» *Jurnal Teknologi*, vol. 80, nº 5, 2018.
- [23] B. I. D., M. D. y P. E. G., «Phytoremediation study of water polluted with heavy metals using floating macrophytes: *Lemna minor* and *Pistia stratiotes*,» *AES BIOFLUX*, vol. 7, nº 2, pp. 155-162, 2015.
- [24] R. K. Upadhyay y S. Panda, «Copper-induced growth inhibition, oxidative stress and ultrastructural alterations in freshly grown water lettuce (*Pistia stratiotes* L.),» *Comptes Rendus. Biologies*, vol. 332, nº 7, pp. 623-632, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2009.03.001>.
- [25] Y. Wang, P. Zhang, C. Yang, Y. Guo, P. Gao, T. Wang, Y. Liu, L. Xu y G. Zhou, «Responses in Plant Growth and Root Exudates of *Pistia stratiotes* under Zn and Cu Stress,» *Physiology and Ecology of Aquatic Plants*, vol. 13, nº 5, 2024.