

Evaluación de la capacidad fitorremediadora del Lirio de agua (*Eichornia crassipes*) para la remoción de mercurio en aguas contaminadas

Evaluation of the phytoremediation capacity of the Water Lily (*Eichornia crassipes*) for the removal of mercury in waters

Cynthia E. Blanco¹, Leonida Medina^{1,2,*} & Guido A. Troche A.²

¹Instituto Nacional de Tecnología Normalización y Metrología (INTN), Departamento de Ensayos Ambientales, Asunción, Paraguay.

²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biotecnología, Grupo de Investigación en Biotecnología Ambiental, San Lorenzo, Paraguay.

*Autor de correspondencia: lmolina@intn.gov.py.

Resumen: Para este trabajo se emplearon ejemplares de la macrófita flotante *Eichornia crassipes* colectadas de su hábitat natural Río Paraguay que fueron adaptadas y mantenidas en invernáculo con fotoperiodo natural, nutrientes y agua de grifo mezclada con agua de arroyo por un periodo de 15 días para luego exponerlas a aguas contaminadas artificialmente con mercurio mediante adición de solución estándar de este hasta obtener 47,69 y 268,7 µg Hg/L en sistema de cultivo hidropónico tipo película nutritiva NFT (Nutrient Film Technique). Se logró remover importante porcentaje de mercurio de las concentraciones ensayadas 89,5% y 95,2% para 47,69 y 268,7 µg Hg/L respectivamente. El análisis de la varianza entre las medias del porcentaje removido con un nivel de significancia 0,05 no mostró diferencias significativas entre el comportamiento de la remoción del mercurio de las concentraciones en los sistemas y el tiempo de exposición de las macrófitas. Los resultados obtenidos sugieren que la técnica con cultivo hidropónico y película nutritiva representa una opción viable para el tratamiento de aguas con contenido de mercurio atendiendo a que es una técnica eficiente de fácil mantenimiento bajo costo de instalación y amigable con el ambiente.

Palabras clave: metal; fitorremediación; macrófita; hidroponía.

Abstract: Specimens of the floating macrophyte *Eichornia crassipes* collected from its natural habitat Río Paraguay were used, were adapted and maintained in a greenhouse a natural photoperiod, nutrients and tap water mixed with stream water for a period of 15 days and exposed to waters artificially contaminated with mercury in hydroponic cultivation system of the NFT (Nutrient Film Technique). The analysis of the variance between the means of the percentage removed with a significance level of 0.05 did not show significant differences between the removal behavior of mercury concentrations in the systems and the exposure time of macrophytes. A significant percentage of mercury was removed from the concentrations tested for 47,69 µg Hg/L, 89.5% removal was achieved and 95.2% for the concentration of 268.7 µgHg/L in hydroponic systems with film technique. The results obtained suggest that the technique with hydroponic cultivation and nutrient film represents a viable option for the treatment of water with mercury content considering that it is an efficient technique that is easy to maintain, low in installation cost and environmentally friendly.

Keywords: metal; phytoremediation; macrophyte; hydroponics.

Introducción

Debido al aumento de la población y la constante industrialización, la demanda de agua segura para consumo y usos aumenta progresivamente. Este recurso se ve afectado en su calidad por la contaminación de metales pesados por vía antrópica afectando la salud humana y seguridad alimentaria, por su persistencia y bioacumulación, que re-

sulta en procesos bioquímicos, transformándose y distribuyéndose según su naturaleza química y especiación (Reyes *et al.*, 2016).

La mayoría de metales pesados a diferencia de los compuestos orgánicos tienden a acumularse y no pueden degradarse, aunque hayan pasado por diversos procesos de tratamiento desde una planta industrial hasta los efluentes generados para su vertido, causando problemas en el ecosistema.

Editor responsable: Nery López Acosta*

Recibido: 16/09/2024

Aceptado: 04/02/2025

*Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Dirección de Investigación, San Lorenzo, Paraguay.



2078-399X/2025 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.
Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>).

Los metales pesados como el Mercurio (Hg), el arsénico (As), el Plomo (Pb) no son metales esenciales para el organismo, ya que este puede prescindir de los mismos para su metabolismo, además ejercen en baja concentraciones toxicidad.

La presencia de mercurio (Hg) en el ambiente se puede considerar como un parámetro de contaminación de fuentes antropogénicas como mencionan varias investigaciones (Jaramillo *et al.*, 2016) este metal es considerado uno de los más tóxicos para el ambiente y nocivos para la salud humana., a temperatura ambiente es líquido, Hg⁰ y sus vapores son altamente tóxicos, son fácilmente metilables en su forma iónica (Hg⁺²) transformándose en metilmercurio /CH₃Hg) lipofílico y tóxico, a pesar de esto es un metal altamente útil en varios procesos debido principalmente por su afinidad a la formación de amalgamas con otros metales es utilizado aun en países de América en las minerías artesanales de oro, por lo tanto se vuelve necesaria su remoción tanto del suelo como de las aguas Garzón-Gutiérrez & Rodríguez-Miranda (2015).

Las técnicas convencionales utilizadas para la remoción de metales se basan en filtración, osmosis inversa, electroquímica, siendo técnicas relativamente más costosas tanto por su instalación y el mantenimiento. El aumento de los costos de estos procesos convencionales y la eficacia limitada al momento de los tratamientos para la remoción o degradación de los metales pesados, han producido el desarrollo de nuevas tecnologías que pueden ser aplicadas eficazmente y que representen bajo costo, sustentables y sostenibles algunas técnicas de remediación utilizan procesos bioquímicos, físicos de contención, extracción o inmovilización para poder reducir el impacto en el ambiente de los contaminantes.

La biotecnología ambiental es una rama de la ciencia que se aboca a la reducción y/o eliminación de la peligrosidad de los contaminantes sean del tipo orgánico o inorgánico, utilizando sistemas que involucran macrófitas flotantes, humedales, biofiltros construidos usando algunas

especies vegetales de alta eficiencia en la remoción de contaminantes y han demostrado una elevada eficiencia en la remoción del contenido de nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas, siendo además versátil, eficaces, económicas y de bajo mantenimiento que, además de diversos, estos tratamientos alternativos se han desarrollado para que los contaminantes no lleguen a los cursos hídricos y así proteger y preservar el medio ambiente.

La fitorremediación es un tratamiento de bajo costo, amigable con el ambiente, y sustentable comparado con otros métodos convencionales de tratamiento para la remoción una gran cantidad de contaminantes de las aguas utilizando macrófitas (Mabhungu *et al.*, 2019; Bróker *et al.*, 2013; Guevara *et al.*, 2015). y aplicando correctamente la hidroponía, ésta puede convertirse en una solución ecológica inclusive para la eliminación de contaminantes (Cortez & Mendoza., 2020).

Amplia variedad de especies de macrófitas son evaluadas en la fitorremediación, siendo la *E. crassipes* poseedora de características que la hacen tener mucho éxito en el tratamiento de las aguas residuales Borker *et al.* (2013). Investigaciones evidencian la capacidad remediadora de esta macrófita para varios contaminantes entre ellos los metales pesados como el cromo en efluentes de curtiembre Medina (2019), mercurio, Poma Llantoy & Valderrama Negrón (2014) siendo tolerante a importantes variaciones de temperatura 1- 40°C, pH, nutrientes y altamente invasiva. Domínguez *et al.* (2016) demostraron su capacidad de remoción en humedales construidos hasta 71% del mercurio presente y Paredes & Ñique (2016) estudiaron la remoción del Hg II con la misma macrófita en medios de diferentes pH, demostrando la tendencia de la macrofita a amortiguar el pH donde la remoción del metal fue de 94,68% en los tres medios y se obtuvo durante las tres primeras horas, Infante (2013) estudiaron influencias de algunas variables para biosorción de Pb;Hg y Ni y *Saccaromyces cerevisiae*. La técnica de cultivo hidroponica puede convertirse en una solución ecológica inclusive para eliminar

contaminantes, aplicando correctamente Cortez & Mendoza (2020) La eficiencia de remoción de mercurio por *Lemna minor*, estudiada por Arenas *et al.* (2011) fue de 30% en bloques al azar. En cuanto a la explotación minera aurífera artesanal tiene conocimiento en el Paraguay se ha iniciado en la década de los años 90 en el Distrito de Paso Yobai localizado al norte del Departamento del Guaira, se encuentra el más importante yacimiento de Oro del país atrayendo a interesados en inversión Benítez *et al.* (2018) mencionado en el informe final Estudio de Panorama Nacional del Sector MAPE del Plan de Acción Nacional y por cada gramo de oro obtenido se utilizan entre 7 a 30 gramos de mercurio para su extracción y la frecuencia de manipulación del metal es de 61,4 %. En cuanto a las emisiones a la tierra y al agua fueron del orden de 916,1Kg Hg/año y 1.553,3 Kg Hg/año. La mayoría de estas emisiones son provenientes de desechos generales (tubos fluorescentes, pilas, termómetros y otros) siendo 2.368Kg Hg/año y las emisiones de Mercurio provenientes de procesos u otros usos son

de 275 Kg Hg/año.

Estudios realizados en el país, sobre el uso de Mercurio y minerías auríferas han arrojado como resultado la utilización del metal durante el beneficio del oro, donde se constataron la falta de medidas mitigación ambiental necesarias ya que los relaves son vertidos en piletas a cielo abierto y en la mayoría de los casos sin contención adecuada contaminando el suelo y el agua. Flores (2020).

Considerando el problema ambiental es necesario promover alternativas de tratamiento para estas aguas, de fácil acceso sin altos costos y amigables con el ambiente.

El presente trabajo evaluara la capacidad de remoción de una macrofita flotante, exponiéndola a aguas contaminadas artificialmente con mercurio durante un periodo de 5 días en sistema de cultivo hidropónico del tipo NFT (Nutrient film technique) flujo continuo y recirculación como una alternativa eficaz para la fitorremediación del metal teniendo en cuenta las indicaciones de Troche Arias *et al.* (2021) para la instalación y

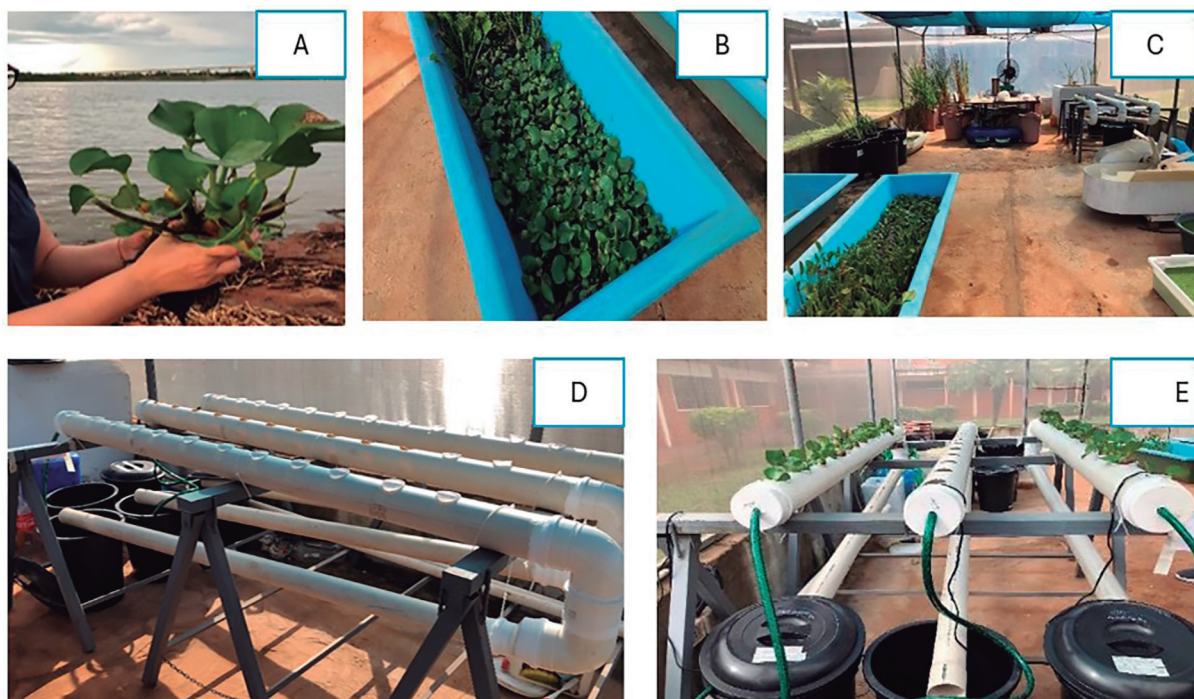


Figura 1. A) Colecta. B) Aclimatación. C) Invernáculo. D-E) Montaje de sistema hidropónico tipo NFT.

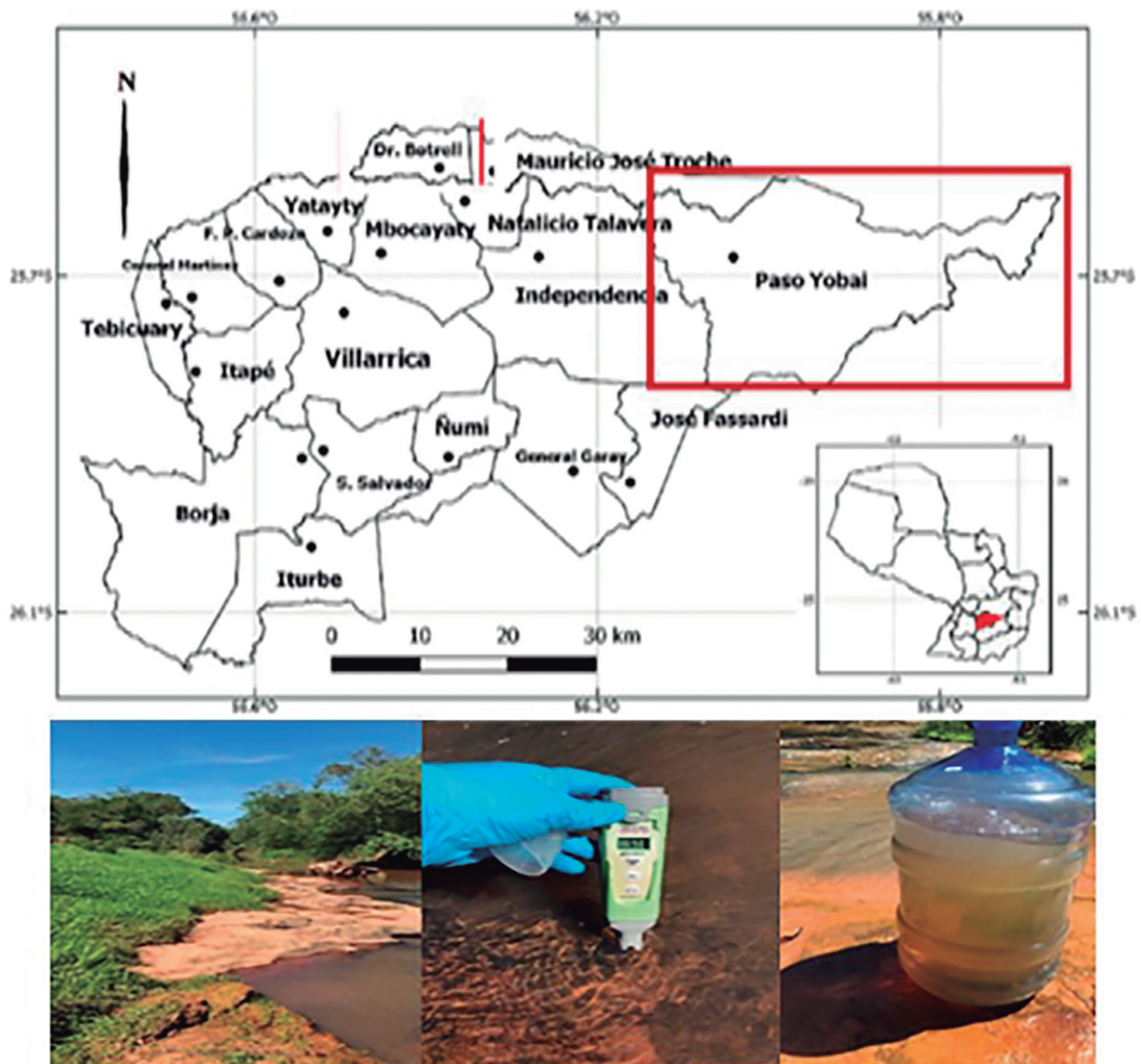


Figura 2. Distrito de Paso Yobai. Arroyo Gasory.

configuración del sistema.

Materiales y métodos

El trabajo se encuadra dentro del tipo experimental, donde se expusieron ejemplares de macrofita flotante *E. crassipes*, en un sistema de cultivo hidropónico del tipo NFT, que fueron colectadas de su hábitat natural, Río Paraguay, Ciudad de Mariano Roque Alonso. Coordenadas: 25°42' 47,0"S - 55° 59' 52,0"W (Fig. 1) llevadas a resguardo y mantenidas en invernáculo situado en

la FACEN, UNA. (Fig. 1) en una pileta de 1000 litros con una mezcla de agua de grifo y agua de arroyo en una proporción de 50:50 y el agregado de solución nutritiva APHA modificada según Peterson & Moody (1997) en Troche Arias *et al.* (2021) (Fig. 1) Se mantuvieron bajo condiciones de fotoperiodo natural y una temperatura ambiente entre 26 a 33°C durante el periodo de mantenimiento y experimentación.

Se tomaran muestras de agua de arroyo,

Tabla 1. Concentración de soluciones de trabajo.

Soluciones	Concentración teórica según cálculos ($\mu\text{g Hg/L}$)	Concentración real determinada por EAA ($\mu\text{g Hg/L}$)
Solución de trabajo A	50	47,69
Solución de trabajo B	250	268,6

proveniente del Arroyo Gasory, Ciudad de Paso Yobai, Dpto. del Guaira, (Fig. 2) aguas abajo, siguiendo el curso natural del mismo, cercanos a molinos y piletas de relave de la extracción de Oro y se determinó contenido inicial de mercurio en ellas por Espectrofotometría de absorción atómica con generados de hidruros (Thermo Scientific Modelo iCE 3000), posteriormente se contaminaron artifi-

cialmente para obtener 2 soluciones de trabajo (A y B) adicionando mililitros de solución estándar de mercurio de 1000 mg/L (SCP Science.) aplicando cálculos estequiométricos y dilución para obtener concentraciones aproximadas de 50 $\mu\text{g Hg/L}$ y de 250 $\mu\text{g Hg/L}$ (Tabla 1) a estas soluciones de trabajo también se adicionara solución nutritiva para macrófitas APHA modificada (0,5 ml de cada solución por cada 10 litros de agua agregadas según recomendaciones Dure *et al.* (2021).

El sistema de cultivo hidropónico se montó en el invernáculo situado en el predio de la FACEN-UNA Ciudad de San Lorenzo. Paraguay., adaptado según Troche Arias *et al* (2021) (Fig. 1 D-E) y consta de 3 tubos de cultivo o canales, construidas de tubos de PVC de 100mm de diámetro, dotados de 12 orificios cada uno para contención de la macrófita, sobre caballetes con pendiente de 0,4 %, 3 tubos de recirculación, 3 mangueras, 3 bombas sumergibles y 3 contenedores de 40 litros cada uno y soluciones con recirculación de las mismas y condiciones de estudio (Tabla 2).

Tabla 2. Configuración de los sistemas hidropónicos tipo NFT.

Parámetros	Valores.		
	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
	Solucion A	Control	Solucion B
Caudal (L/min)	6,5	6,5	6,5
Temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$)	27,2	25,6	27,1
pH promedio	5,2	5,7	5,7
Conductividad promedio ($\mu\text{S/cm}$)	74,7	47,7	99,6
Volumen (L)	35	35	35
Diámetro tubo superior (mm)	100	100	100
Diámetro tubo inferior (mm) (recirculación)	40	40	40
Largo (metros)	2,11	2,11	2,11
Altura (metros)	0,90	0,90	0,90
Numero de aberturas de sostén para <i>E. Crassipes</i>	12	12	12
Concentración de Hg $\mu\text{g/L}$	47,69	<6,1	268,7

Tabla 3. Esquema de muestreo de los sistemas con Solución A y B. **T)** Tiempo en horas. **A)** Solución A. **B)** Solución B. **M)** Muestra.

Tiempo (horas)		Solución A (47,69 $\mu\text{g/L}$)		Solución B (268,6 $\mu\text{g/L}$)
0	T0	to A M1	to A M2	t0 B M1
4,5	T4,5	t4,5 A M1	t4,5 A M2	t4,5 B M1
8	T8	t8 A M1	t8 A M2	t8 B M1
10	T10	t10 A M1	t10 A M2	t10 B M1
24	T24	t24 A M1	t24 A M2	t24 B M1
36	T36	t36 AM1	t36 AM2	t36 BM1
48	T48	t48 AM1	t48 AM2	t48 B M1
56	T56	t56 AM1	t56 AM2	t56 B M1
72	T72	t72 AM1	t72 AM2	t72 B M1
80	T80	t80 AM1	t80 AM2	t80 B M1
96	T96	t96 AM1	t96 AM2	t96 B M1
105	T105	t105 AM1	t105 AM2	t105 B M1
120	T120	t120 AM1	t120 AM2	t120 B M1

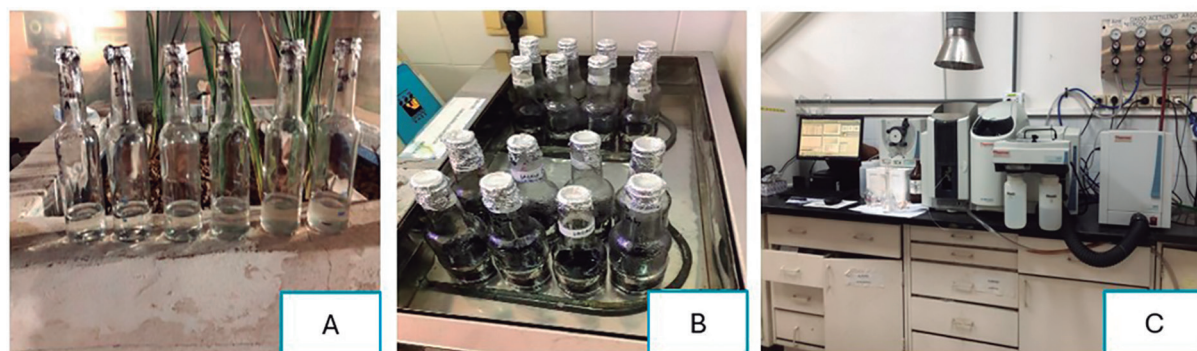


Figura 3. Trabajo de laboratorio. **A)** Muestreo del sistema. **B)** Procesamiento de muestra. **C)** Cuantificación.

Una vez montado el sistema en el invernáculo, se lavó el mismo con agua de grifo de manera exhaustiva y fueron expuestos los ejemplares de *E. crassipes* en sistema con por un día, para adaptación, luego de este tiempo se drenó por completo el sistema y se colocaron las soluciones de trabajo (A y B) en cada contenedor, con 35 litros cada uno para el inicio del proceso de recirculación. Cada solución recircula de manera independientemente por tubo a un caudal de 6,5 L/min, por un periodo

de 5 días. (Fig. 1E).

Se tomaron volúmenes de 50 ml de cada solución de trabajo A y B, por duplicado en diferentes tiempos durante los 5 días de exposición según Tabla 3.

Se repuso el volumen tomado después de cada muestreo con agua de grifo acidulada a fin de evitar pérdidas por evaporación y mantener un volumen total o inicial en el sistema, ajustando el pH para mantenerlo alrededor de 5 con ácido nítrico, una vez tomadas las muestras éstas fueron acidificadas con ácido nítrico a pH < 2 refrigeradas para su conservación y transportadas al laboratorio para su procesamiento y análisis del contenido de mercurio. (Fig. 3).

Las muestras tomadas fueron procesadas en el laboratorio de Ensayos Ambientales del Instituto Nacional de Tecnología Normalización y Metrología (INTN) siguiendo las técnicas de análisis de los métodos estandarizados de análisis para aguas Sección 3112 B (2012) con el agregado de ácido nítrico y ácido sulfúrico, permanganato de potasio y persulfato de potasio y digeridas en Baño de agua a 90°C por 2 horas. (Fig. 3) y la cuantificación se realizó por la técnica de vapor frío o generador de hidruros en el laboratorio de Ensayos Instrumentales del INTN. (Fig. 3).

Resultados

Las macrófitas colectadas de su ambiente natural se adaptaron exitosamente a las condiciones del invernáculo, así también al sistema hidropónico tipo NFT configurado para este propósito, se

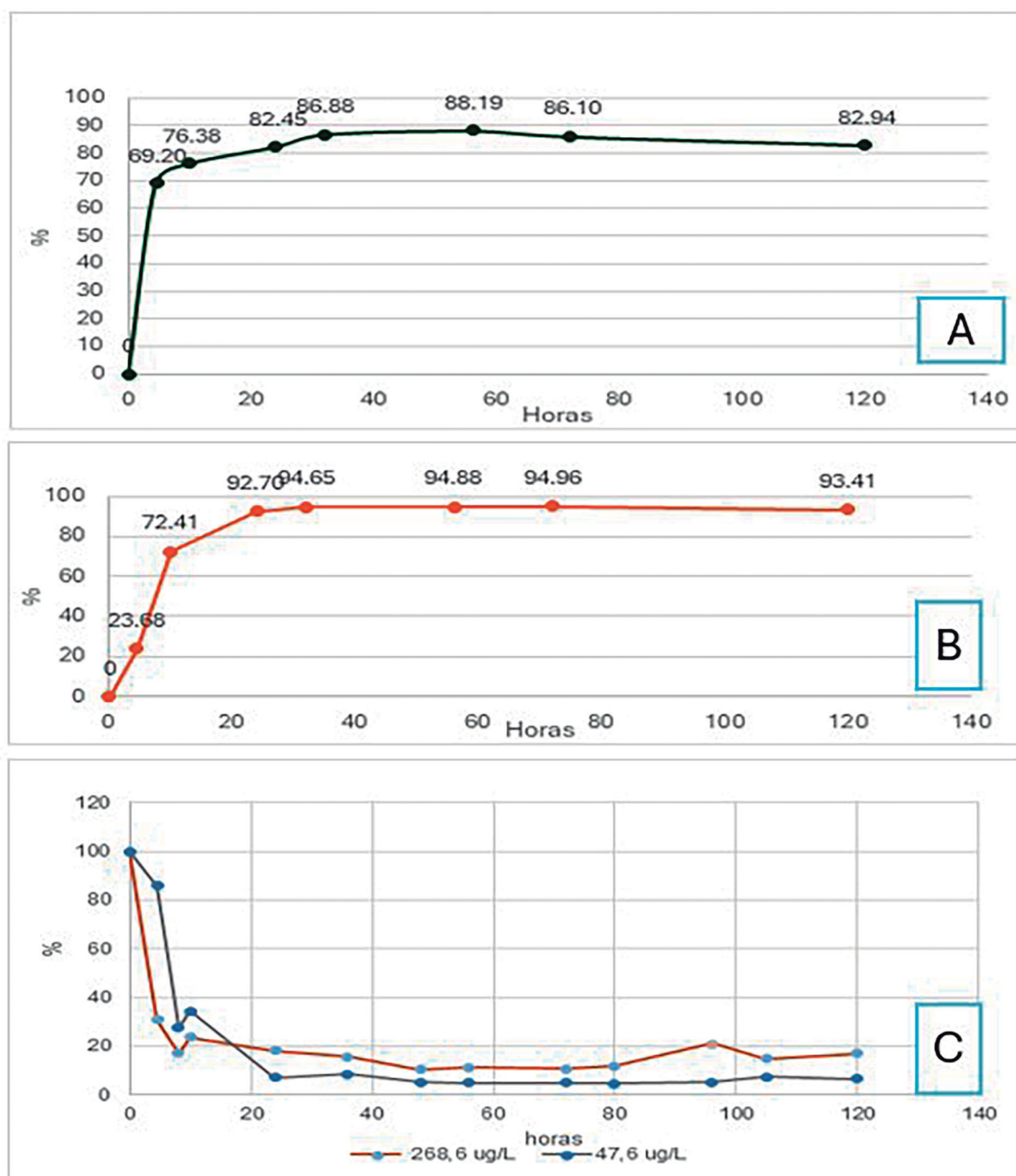
Tabla 4. Disminución de la concentración de Hg para las soluciones en sistemas hidropónicos.

Tiempo (horas)	Solución A 47,69 ugHg/L	% remoción	Solución B 268,7 ugHg/L	% remoción
0	47,69	0,0	268,7	0,0
4,5	14,7	69,2	230,7	14,1
8	8,1	83,0	74,1	72,4
10	11,3	76,4	92,7	65,5
24	9,5	80,0	19,6	92,7
36	7,5	84,2	23,3	91,3
48	5,0	89,5	14,4	94,7
56	5,5	88,6	13,7	94,9
72	5,1	89,3	13,5	95,0
80	5,7	88,1	12,8	95,2
96	10,1	78,8	14,0	94,8
105	7,1	85,2	19,9	92,6
120	8,1	82,9	18,2	93,2

cuantifico el contenido inicial de mercurio del arroyo Gasory arrojando mercurio menor $6,1 \mu\text{g/L}$. El límite máximo de contenido de mercurio en aguas superficiales es de $20 \mu\text{g Hg/L}$ según lo establecido en la Res. 222/02 (SEAM) y se man-

tuvo como control en el tubo N°2., el contenido de mercurio en las muestras tomadas de cada solución contaminada artificialmente y en cada tiempo de muestreo mostraron disminución de la concentración de mercurio en más de 60 % en las

Figura 4. Porcentaje de remoción de Hg. **A)** Solucion A $47,69 \mu\text{gHg/L}$. **B)** Solución $268,7 \mu\text{gHg/L}$. **C)** Disminución del porcentaje de mercurio en ambas soluciones.



primeras horas de exposición aumentando hasta llegar a 89,5 % para la solución A disminuyendo a 5,0 µg/L a las 48 horas y un 95,2% para la solución B a 12,8 µg/L a las 80 horas, observándose que el porcentaje de remoción permanece ligeramente constante hasta el final del experimento. (Tabla 4) En el análisis estadístico de datos Anova de un solo factor con nivel de significancia 0,05, entre el porcentaje de remoción de mercurio en ambas soluciones de trabajo y el tiempo de exposición, se mostró que no existe diferencias significativas en la remoción de mercurio entre las soluciones A y B. (Fig.4).

Discusión

La concentración inicial de mercurio en las aguas de arroyo Gasory, se encuentra por debajo del límite de cuantificación del método y por debajo de los valores permitidos por la legislación vigente de 0,002 mg Hg /L (20 ppb) de mercurio. Paredes & Ñique (2016) obtuvieron resultados de remoción de mercurio con tratamiento en un humedal artificial superficial de flujo continuo, tasas de absorción del mercurio superiores en medio básico (94,67%) para concentraciones de 0,05 a 0,5 ppm de Hg que para medio neutro o ácido, contrastando este trabajo se obtuvo una remoción superior al 85 % en sistema de cultivo hidropónico del tipo NFT, recirculación de las soluciones y con reposición de volumen a pH entre 5 y 6, el sistema proporcione un flujo continuo de caudal para que la planta y sus raíces tengan constante disponibilidad de iones del metal y simular el movimiento de los cursos de agua además de una mejor oxigenación de las raíces de las macrofitas en Domínguez *et al.* (2016).

Para 7 días de estudio a una concentración de 5mg/L, obtuvieron porcentajes de absorción del metal de 15,6% para el Hg(II), en este estudio para una solución de 47,69 µg Hg/L fueron superiores al 60% durante las primeras 5 horas de tratamiento y para la solución de 268,7 µg Hg /L ese porcentaje de remoción se alcanzó a 10 horas incrementándose hasta alcanzar un 89,5 y 95,2 % respectivamente. Durante las primeras 8 horas de

exposición se logra la remoción de la mayor cantidad del metal, evidenciando que ésta macrofita una vez acondicionada al sistema sustrae el metal rápidamente y que el mecanismo de remoción puede asociarse a una absorción rápida o biosorción asociándose el metal a las superficies biológicas, de las macrofitas y los microorganismos asociados a ellas. Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez (2016). Luego se observa un mantenimiento del porcentaje de remoción hasta el final del experimento.

Conclusión

En este trabajo se logró remover mercurio de aguas contaminadas en un sistema de cultivo hidropónico con técnica de película nutritiva y *E. Crassipes* en un porcentaje de hasta 95,2% para la solución con mayor concentración de 268,7 µgHg/L, que corresponde a valores mínimos de 12,8 µg Hg /L, en tanto para la concentración menor 47,69 µg Hg/L se logró una remoción de hasta 89,5 % que corresponde a 5 µg Hg/L, logrando remover el mercurio de las aguas por debajo de lo establecido en la legislación vigente.

La especie de macrofita flotante *Eichornia crassipes* es tolerante a las condiciones de estudio en cultivos hidropónicos y puede ser utilizada para la remoción del metal en las aguas contaminadas demostrando que el sistema de cultivo hidropónico con técnica de película nutritiva es efectiva y estadísticamente no hay una diferencia significativa para el tratamiento en ambas soluciones estudiadas indicando que se puede aplicar a concentraciones de mercurio en el rango de 50 a 300 µg/l aproximadamente y que la mayor cantidad de biosorción del metal se da durante las primeras horas del tratamiento.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Fuente de financiamiento

Fuente de financiamiento propia.

Agradecimientos.

Al Instituto Nacional de Tecnología Normalización y Metrología INTN, A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales FACEN, al Dpto. de Biotecnología Ambiental de la FACEN, Grupo de Investigación en Biotecnología Ambiental GIBTA y colaboradores.

Literatura citada

- American Public Health Association – APHA, AWWA, WPCF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (22nd Ed.). Washington D.C.: American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environment Federation. 1360 pp.
- Arenas, A., Marco, L. & Torres, G. (2011). Evaluación de la planta *Lemna minor* como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 2(3): 1–11.
- Beltrán Pineda, M.E. & Gómez Rodríguez, A.M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2): 172–197. <<https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>>.
- Borker, A.R., Mane, A.V., Saratale, G.D. & Pathade, G.R. (2013). Phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* for the treatment of cadmium in relation with biochemical and water parameters. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25(6): 443–456. <<https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i6.13970>>.
- Cortez, F.N., Mendoza, C. & Kathia, G. (2020). *Revisión sistemática: reaprovechamiento de aguas residuales en sistemas hidropónicos*. (Trabajo de grado). Lima: Universidad César Vallejo. [Consulted: 2.vii.2025]. <<https://hdl.handle.net/20.500.12692/63539>>.
- Domínguez, M., Gómez, S. & Ardila, A. (2016). Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera. *UGCiencia*, 22(1): 227–237.
- Duré, G.M., Medina García, L.M., Rodríguez Bonet, S., Ferreira, F., Sezerino, P.H. & López Arias, T. (2022). Fitorremediación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en humedales flotantes. *Reportes Científicos de la FACEN*, 13(2): 153–159. <<http://doi.org/10.18004/rcfa-cen.2022.13.2.153>>.
- Flores, L. (2020). *Determinación de niveles de mercurio en sedimentos de recursos hídricos y relaves de molinos auríferos del distrito de Paso Yobai*. (Resultados de investigación inéditos). Asunción: Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenido.
- Garzón-Gutiérrez, J.M. & Rodríguez Miranda, J.P. (2015). Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte. *Universidad y Salud*, 17(1): 132–144.
- Guevara, M.F. & Ramírez, L. (2015). *Eichhornia crassipes*, su invasividad y potencial fitorremediador. *La Granja*, 22(2): 5–11.
- Guevara, M.S.P. (2021). Fitorremediación en cuerpos de agua contaminados por metales pesados. *Innova Biology Sciences*, 1(1): 61–78.
- Infante, J., De Arco, D. & Angulo, E. (2014). Removal of lead, mercury and nickel using the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Revista MVZ Córdoba*, 19(2): 4141–4149.
- Mabhungu, L., Adam, E. & Newete, S.W. (2019). Monitoring of phytoremediating wetland macrophytes using remote sensing: The case of common reed (*Phragmites australis*) and the giant reed (*Arundo donax*). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4): 7957–7972. <https://doi.org/10.15666/aecer/1704_79577972>.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES). (2019). *Informe final: Estudio de Panorama Nacional del Sector MAPE en el sector salud, con estrategias a incluir en el*

- PAN. Asunción: Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES).
- Paredes, J. & Ñique, M. (2016). Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando *Eichhornia crassipes* “Jacinto de agua”. Investigación y Amazonía, 5(1): 44–49.
- Poveda, A. & Velastegui, R. (2014). *Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua*. (Trabajo de grado). Ambato: Universidad Técnica de Ambato. xxi + 85 pp. + 75 annex. pp.
- Poma Llantoy, V.R. & Valderrama Negron, A.C. (2014). Estudio de los parámetros físico-químicos para la fitorremediación de cadmio (II) y mercurio (II) con la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3): 164–173. <<https://doi.org/10.37761/rsqp.v80i3.224>>.
- Troche Arias, G.A., Duré, G., Velázquez Decoud, L. & López Arias, T.R. (2021). Reutilización del efluente de un humedal construido de flujo subsuperficial vertical en un cultivo hidropónico tipo NFT de *Lactuca sativa*. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 26(1): 35–48. <<https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.35>>.
- Yu, X., Liu, F., Li, Y. & Dong, H. (2017). Mercury accumulation in plant *Cyrtomium macrophyllum* and its potential for phytoremediation of mercury polluted sites. *Chemosphere*, 189: 161–170. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.055>>.