

Desarrollo de un sistema sostenible de fitorremediación y bioetanol con *E. crassipes*

Development of a sustainable system of phytoremediation and bioethanol with *E. crassipes*

Uriel Fernando Carreño-Sayago¹

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria los Libertadores, Bogotá, Colombia, ufcarrenos@libertadores.edu.co

Autor para correspondencia: Uriel Fernando Carreño-Sayago, ufcarrenos@libertadores.edu.co

Resumen

Eichhornia crassipes es una planta acuática, presente en climas tropicales. Debido al mal manejo de aguas residuales domésticas en ecosistemas acuáticos su reproducción es prominente, por lo tanto, en cuerpos de aguas contaminados, la biomasa de esta planta es muy abundante y por ende su disposición final conlleva grandes gastos económicos. Además, toda esta biomasa en la actualidad no se aprovecha de manera sostenible. Esta planta podría utilizarse para diferentes usos de tipo ambiental,

269

debido a su comprobado uso en la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados y también se podría utilizar en la producción de biocombustibles debido a su alto contenido de celulosa en su biomasa. El objetivo de esta investigación es desarrollar un proceso sostenible entre fitorremediación y producción de bioetanol con la biomasa de *Eichhornia crassipes*, evaluando la incidencia de plomo (II) adherido a la biomasa de esta planta en la producción de bioetanol. Materiales y métodos: se instaló un sistema para evaluar la fitorremediación con *E. crassipes* con agua cargada con plomo (II) y la determinación de la eficacia de esta planta para eliminar este metal pesado incluso si está viva en un cuerpo de agua. Después de este proceso se procedió a tomar la biomasa cargada con plomo (II); se llevó a los biorreactores para evaluar la producción de bioetanol, así como para la evaluación de tres tipos de biomasa: una sin plomo (II) adherido y los otros dos con plomo (II) adherido a la estructura de su planta. Hubo una disminución del 30 % en la producción de etanol de *Eichhornia crassipes* debido a la presencia de plomo (II). Se concluye que la biomasa de *E. crassipes* podría utilizarse totalmente para los procesos de fitorremediación de aguas contaminadas con metales pesados.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, biomasa, fitorremediación, bioetanol.

Abstract

Eichhornia crassipes is an aquatic plant, present in tropical climates and due to poor management of domestic wastewater in aquatic ecosystems,

its reproduction is prominent, therefore, in contaminated water bodies, the biomass of this plant is very abundant and hence its final disposal entails great economic costs. Moreover, all this biomass is currently not used in a sustainable way. This plant could use for different process of type environmental, due to its proven use in the recuperations of waters contaminated with heavy metals and also it is could use in the productions of biofuels, due to high content of cellulose in your biomass. The objective of this research is to develop a sustainable process between phytoremediation and bioethanol production with the biomass of *Eichhornia crassipes*, evaluating the incidence of lead (II) adhered to the biomass of this plant in the production of bioethanol. Materials and methods: a system was installed to evaluate phytoremediation with *E. crassipes* with water loaded with Lead (II), determining the effectiveness of this plant to remove this heavy metal even if it is alive in a water body. After this process, we proceeded to take the lead (II) loaded biomass to the bioreactors to evaluate the bioethanol production, evaluating three types of biomass, one without lead (II) attached and the other two with lead (II) attached to the structure of its plant. There was a 30 % decrease in ethanol production from *Eichhornia crassipes* due to the presence of lead (II). Concluding that *E. crassipes* biomass could be fully used for phytoremediation processes of heavy metal contaminated water.

Keywords: *Eichhornia crassipes*, biomass, phytoremediation, bioethanol.

Recibido: 29/08/2018

Aceptado: 10/09/2020

Introducción

La macrófita *Eichhornia crassipes* se considera una especie invasiva debido a su adaptabilidad a un amplio tipo de ecosistemas, que afecta de forma considerable el equilibrio natural de lagunas, lagos, etcétera (Vankar & Bajpai, 2008; Vásquez 2012). Una sola planta de *E. crassipes* que alcance un humedal contaminado por aguas residuales domésticas con exceso de nutrientes está eutrificada, por lo tanto la planta tiene las mejores condiciones nutricionales para crecer y multiplicarse; en promedio, cada tres días se reproduce por estolones, llegando a que esa sola planta posea en seis meses un total de más de 100 000 ejemplares en el mismo humedal. La mejor manera de controlar el crecimiento de la planta *E. crassipes* es no contaminar los humedales (Carreño-Sayago & Rodríguez-Parra, 2019; Sayago, Castro, Rivera, & Mariaca, 2020). Es una planta que ha sido fuente de muchas investigaciones en el mundo, como en fitorremediación de aguas contaminadas y la producción de bioenergía. En los últimos años se ha demostrado que esta especie se puede maniobrar de manera sustentable y diseñar soluciones sencillas, pero interesantes, en diferentes industrias que contaminan el agua con metales pesados y además como un aporte a la problemática energética que

enfrenta el mundo (Zimmels, Kirzhner, & Malkovskaja, 2006); Atehortua & Gartner, 2003); Carreño-Sayago, 2020).

La descontaminación de aguas provenientes de industrias que vierten metales pesados y contaminan el recurso hídrico es una opción eficiente y económica con el aprovechamiento de la biomasa de *E. crassipes* (Eid *et al.*, 2019; Victor, Ladji, Adjiri, Cyrille, & Sanogo, 2016). La presencia en la celulosa de *E. crassipes* de grupos hidroxilo (OH), amino (NH₂) y carboxilos (C=O) facilita la adsorción de diferentes metales pesados a través de intercambio catiónico (Lin, Yang, Na, & Lin, 2018; Eyley & Thielemans, 2014; Han, Zhou, French, Han, & Wu, 2013; Man *et al.*, 2011; Sayago *et al.*, 2020; Carreño-Sayago, 2021).

El diseño y desarrollo de sistemas de tratamiento con la biomasa de *E. crassipes* ha tenido resultados significativos en la adsorción de zinc (Atehortua & Gartner, 2003); cobre (Ibrahim, Ammar, Soylak, & Ibrahi, 2012); cromo (Atehortua & Gartner, 2003); arsénico (Sarkar, Rahman, & Bhoumik, 2017; Lin *et al.*, 2018); y plomo (Borker, Mane, Saratale, & Pathade, 2013; Zhou *et al.*, 2011; Ammar, Elhaes, Ibrahim, & Ibrahim, 2014; Deng *et al.*, 2012; (Sayago, 2021).

La biomasa generada en estos tratamientos conlleva una serie de disposiciones finales costosas debido al tipo de residuo; una alternativa es continuar el proceso sostenible, ya que esta biomasa contiene aun los polisacáridos principales para la producción de bioetanol.

E. crassipes contiene grandes contenidos de celulosa y hemicelulosa, lo que la hacen una planta significativa como biomasa para la producción a gran escala de etanol e hidrógeno (Cuervo, Folch, &

Quiroz, 2009; Porous, Siregar, & Salem, 2012; Pizarro *et al.*, 2016; Lee, Park, Cho, & Kim, 2018; Zabed, Sahu, Boyce, & Faruq, 2016; Kouwanou *et al.*, 2018).

En la presente investigación se desarrolló un sistema sostenible con la biomasa de *E. crassipes*, donde se construyó un sistema de fitorremediación para la descontaminación de plomo (II) en un agua sintética; la biomasa producto de este proceso se llevó a un proceso de producción de bioetanol, con el fin de evaluar la capacidad de producción de bioetanol de esta biomasa con plomo adherido utilizada en dicho proceso.

Materiales y métodos

E. crassipes fue tomada en el municipio de Mosquera, cerca de la ciudad de Bogotá; después se lavó con agua para eliminar las trazas de barro, pues en ese humedal hay un alto grado de contaminación. Dos procesos importantes se llevaron a cabo en esta investigación: un proceso de fitorremediación donde se utilizaron *E. crassipes* para tratar el agua contaminada con plomo (II), y después de esta experimentación, el empleo de la biomasa que se usa para tratar el agua para crear un sistema compuesto por dos biorreactores para la producción de bioetanol.

Desarrollo de la experimental de la fitorremediación

Las dimensiones del modelo experimental de la fitorremediación son de 45 cm de largo, 10 cm de alto y 12 cm de ancho, en donde cada uno tenía 10 l de agua. Este diseño es a escala piloto y tenía 200 gramos de *E. crassipes* (aproximadamente dos plantas). Se realizaron experimentos por duplicado. En la Figura 1 se pueden apreciar los experimentos.

- **(2) 500 (mg/l) de plomo.**
- (2) 750 (mg/l) de plomo

Donde se obtuvieron la media, las desviaciones estándar y los coeficientes de correlación.



Figura 1. Biomasa proceso de fitorremediación de plomo.

Estas soluciones de plomo están estandarizadas para las pruebas y se asemejan a efluentes industriales, donde se prepararon soluciones de plomo (II) disolviendo sal anhidra de nitrato de plomo en agua desionizada. La evaluación propuesta de tal sistema de tratamiento duró aproximadamente 15 días. Para las evaluaciones de este sistema de tratamiento, las concentraciones en el agua de plomo en (mg/l) se midieron al principio y después cada dos días.

Desarrollo del modelo experimental de producción de bioetanol

La biomasa utilizada en el proceso de fitorremediación anterior se usó en este proceso de la producción de biocombustibles. En la Figura 2 se muestra plomo (II) adherido a la estructura de la planta.



Figura 2. Biomasa utilizada en la producción de bioetanol.

Tres experimentos se llevaron a cabo con tres diferentes tipos de biomasa:

- x1 es la biomasa del tratamiento de 500 (mg/l).
- x2 es la biomasa de 750 (mg/l).
- x0 es la biomasa sin el proceso de la fitorremediación.

Evaluando plomo (II), afecta la producción de bioetanol a partir de este tipo de biomasa. Se representa en la Tabla 1.

Tabla 1. Diferentes tipos de biomasa.

Experimental	Representación
1. Biomasa de tratamiento de 500 (mg/l) de plomo (II)	E1
2. Biomasa de 700 (mg/l) de plomo (II)	E2
3. Biomasa sin el proceso de fitorremediación	E0

El diseño del proceso de generación de bioetanol consiste, para cada experimento, de la construcción de dos biorreactores: un biorreactor para hacer el hidrolizado y un biorreactor para la fermentación. Para todos los experimentos, se contó con 50 gramos de biomasa seca utilizada en el proceso fitorremediación.

Biorreactor hidrólisis. Es de un litro en vidrio, tiene una tapa para la evaporación gases y para algunas muestras de pH y temperatura, también posee un calentador de agitación magnética a 120 rpm a una temperatura de 60 °C; esta operación se lleva a cabo de manera continua.

Se llevaron 100 g de *E. crassipes* seco a dicho reactor, donde se mezcló con agua destilada. Se hicieron reaccionar las muestras en 1 % (peso/volumen) de sosa cáustica (NaOH) a una temperatura de 60 °C, durante 12 h; las muestras se lavaron con agua del grifo hasta alcanzar el valor de pH del agua.

Posteriormente, se añadió ácido sulfúrico (H₂SO₄) 3% (volumen/volumen) a una temperatura de 60 °C durante 12 h; las muestras se lavaron con agua del grifo hasta que alcanzaron el valor de pH del agua. El contenido de azúcares reductores se determinó mediante el método dinitro ácido salicílico (DNS) (Cuervo *et al.*, 2009), que cuantifica indirectamente el consumo de sustrato. Se obtuvieron dos litros de solución de hidrolizado de *E. crassipes* para la continuación de la producción de bioetanol.

Biorreactor de la fermentación. Se tuvieron 2.5 litros en vidrio, con las mismas características del biorreactor para el hidrolizado. Se utilizó *Sacharomices sereciciae* como inóculo del fermentador del hidrolizado de *E. crassipes*. De acuerdo con los estudios de Cuervo *et al.* (2009), y Ganguly, Chatterjee y Dey (2012), se determinó que *Sacharomyces cerevisiae* es adecuada para la producción de etanol con biomasa vegetal.

Se llevaron 40 g del hidrolizado al biorreactor de la fermentación, donde se mezcló con agua destilada y se añadieron 50 gramos del inóculo; el pH inicial se ajustó a 5.5. Los biorreactores se sellaron herméticamente con septos de goma y tapones de aluminio. Durante la fermentación de la hidrólisis de la biomasa de cada tipo de biomasa, las pruebas de los porcentajes de etanol se hicieron por cromatografía de gases a diferentes intervalos de tiempo.

Resultados de la fitorremediación

Las pruebas se llevaron a cabo durante 15 días. En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestran los resultados de las dos pruebas de cada experimento, los promedios y desviación estándar de cada experimento.

Tabla 2. Los resultados de experimento con 500 (mg/l) de plomo (II).

	Experimento 1 (mg/l)	Experimento 2 (mg/l)	Media (mg/l)	desviación estándar (mg/l)	Porcentaje (%) de remoción de plomo (II)
Día (0)	500	500	500	-	0

Día (1)	405	433	419	14	16
Día (3)	305	298	302	3,5	40
Día (5)	182	179	181	1,5	64
Día (7)	151	121	136	15	73
Día (11)	121	111	116	5	77
Día (13)	120	105	113	7,5	77
Día (15)	93	95	94	1,5	81

Tabla 3. Los resultados de experimento con 750 (mg/l) de plomo (II).

	Experimento 1 (mg/l)	Experimento 2 (mg/l)	Media (mg/l)	Desviación estándar (mg/l)	Porcentaje (%) de remoción de plomo (II)
Día (0)	750	750	-	-	0
Día 1)	599	622	611	12	19
Día 3)	480	514	497	17	34
Día 5)	388	366	377	11	50
Día (7)	288	255	272	16	64
Día (11)	179	155	167	12	78
Día (13)	155	145	150	5	80
Día (15)	145	159	152	7	80

Los resultados de la Tabla 2 y Tabla 3 indican una homogeneidad de los datos; los tres experimentos muestran un promedio significativo

debido a la baja desviación estándar, los promedios suficientemente representados en los experimentos, porque a mayor coeficiente de variación mayor es la heterogeneidad de los valores. Desde el coeficiente medio e inferior de variación, mayor homogeneidad en los valores medios (Lin *et al.*, 2018).

Las eliminaciones del proceso de la fitorremediación, con 500 (mg/l) de plomo (II) iniciales, muestran una disminución continua en este metal; se puede observar la estabilización después de 15 días de tratamiento. Las dos pruebas mostraron un comportamiento similar durante todo el proceso y las remociones estuvieron por encima del 80 %; estos resultados podrían ser comparados con Borker *et al.* (2013), donde obtuvieron remociones de Pb (II) en un 72 %. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los datos del experimento con concentraciones iniciales de plomo de 750 (mg/l).

Al igual que el experimento inicial de 500 (mg/l), donde la planta fue capaz de adsorber 100 (mg/l) de plomo (II), en este experimento también se alcanzaron resultados representativos al primer día de tratamiento y en general en todo el proceso de tratamiento en remociones de plomo (II) por parte de *E. crassipes*, donde alcanzaron concentraciones finales de 152 (mg/l) de este metal pesado, alcanzando una remoción del 80 %.

La celulosa de las raíces atrae el plomo presente en el agua, es el mecanismo por el cual *E. crassipes* es capaz de retener de forma amplia metales pesados, especialmente plomo (II) (Pizarro *et al.*, 2016; Ibrahim *et al.*, 2012).

Resultados de la producción de bioetanol

La producción de azúcar a través de la hidrólisis de los tres experimentos fue significativa. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la producción de cada tipo de biomasa.

Tabla 4. La productividad de azúcares reductores con tres tipos de biomasa.

	(g/l) de azúcares primarios	Rendimiento después de 25 horas
Biomasa 500 (mg/l) (E1)	8	110
Biomasa 750 (mg/l) (E2)	6	75
Biomasa de <i>E. crassipes</i> (E0)	14	150

Hubo una producción constante en el proceso de hidrólisis. Se puede observar que las concentraciones de plomo (II) adheridas a la estructura de la planta sí afecta a la producción de azúcares reductores en este proceso. Este hidrolizado se pasa al siguiente biorreactor de producción de etanol.

La Figura 3 muestra una producción de etanol más alta para la muestra de *E. crassipes* sin fitorremediación (E0), en comparación con muestras de biomasa de 500 (E1) y 750 (E2), en un tiempo de 24 horas.

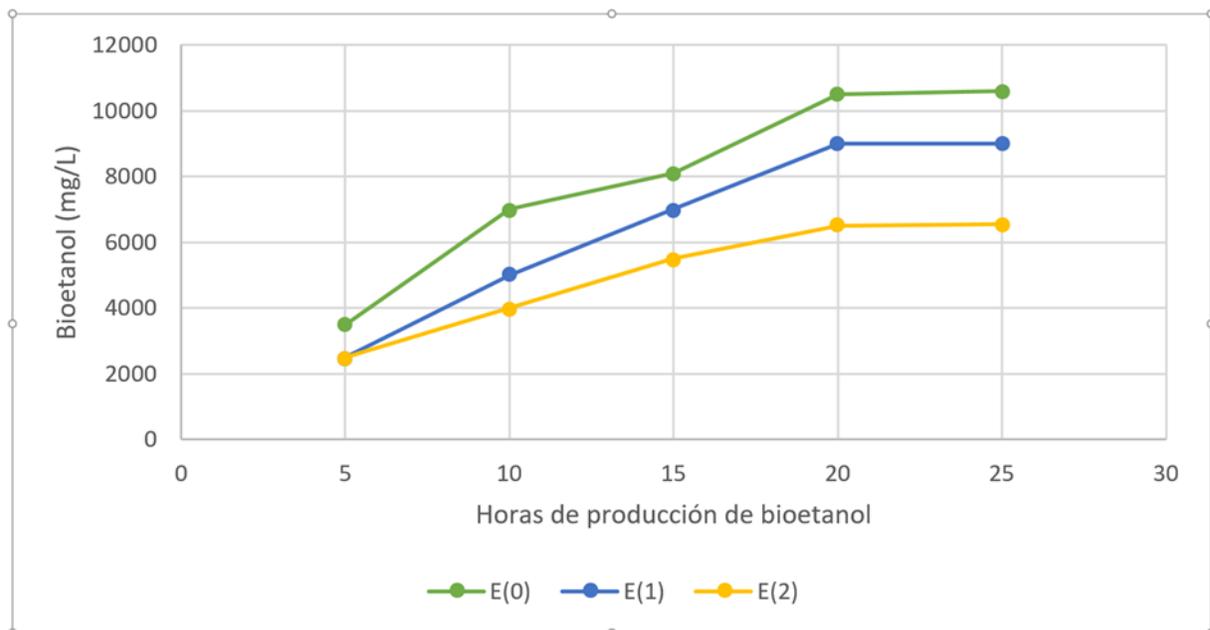


Figura 3. Productividad de etanol con diferentes cantidades de biomasa hidrolizada.

Los tratamientos con la biomasa de *E. crassipes* con plomo (II) adherido comenzaron en las primeras cinco horas para producir etanol en

cantidad menor que la biomasa sin plomo (II). En la Figura 3 se observan las curvas de crecimiento y la estabilización de cada cantidad de biomasa.

Al llevar a cabo el balance de masas se estableció que la producción de etanol a partir de biomasa hidrolizada de *E. crassipes* (E0) es rentable sin plomo adherido, con una cantidad de 10 000 (mg/l) en 25 horas. Estos diferentes resultados son similares a los estudios hechos por Lee *et al.* (2018), Zabed *et al.* (2016) y Kouwanou *et al.* (2018), donde la producción de bioetanol a partir de la biomasa de *E. crassipes* se produce con diferentes tipos de hidrólisis y con un agente de fermentación diferente. Estas investigaciones reportaron resultados eficaces, pero ninguno con biomasa cargados de metales pesados.

La biomasa del experimento de 750 (mg/l) (E2) de plomo (II) produjo una cantidad de 4 000 (mg/l) en 10 horas, menos que las otras dos muestras; posteriormente, en la hora 15, se estabilizó al llegar a 6 000 (mg/l) de bioetanol. Mientras que la biomasa del experimento de 500 (mg/l) (E1) alcanza los valores más altos al producir 7 000 (mg/l) de bioetanol a la hora 15. Esta biomasa fue menos afectada que (E2); ambos experimentos demostraron algún grado de afectación, pero produjeron bioetanol a pesar de tener grandes cantidades de plomo (II) adherido.

Discusión

En diferentes investigaciones, las capacidades de *E. crassipes* para bioadsorber metales pesados han sido comprobadas, pero no se discute cuál es la disposición final de esta biomasa con material contaminante adherido a ella. También diferentes investigaciones han concluido que con la biomasa de esta planta se puede extraer biocombustibles debido a su gran cantidad de celulosa y hemicelulosa.

Se desarrolló un proceso sustentable debido al mal uso que se le da a la planta *E. crassipes* que abunda en las zonas húmedas de diferentes ciudades de Latinoamérica. El proyecto demostró que la fitorremediación con dicha planta es eficiente y también la biomasa utilizada en este tratamiento podría ser utilizada en procesos de hidrólisis y la posterior producción de biocombustibles.

La experimentación con dos tipos de biomasa *E. crassipes* cargado con diferentes concentraciones de plomo (II) mostró que podían usarse para producir bioetanol u otros biocombustibles, pues su afectación no es significativa. Toda la biomasa de *E. crassipes* puede emplearse para la fitorremediación, y más tarde para la producción de bioetanol u otros biocombustibles como el biohidrógeno.

Debe promoverse el uso de la planta *E. crassipes* para los procesos de fitorremediación y el posterior uso de esta biomasa para la producción de biocombustibles en gran escala; es necesario determinar los costos de este macroproyecto y el mercado de su uso en la fitorremediación y bioetanol.

Conclusiones

La biomasa sin carga de plomo (II) obtuvo resultados interesantes en la producción de bioetanol, con una cantidad de 10 000 (mg/l) en 25 horas. Para las muestras con 500 (mg/L) plomo (II) adherido (E1), se produjo un 10 % menos de etanol, siendo aproximadamente 9 000 (mg/l) en las mismas 25 horas. Mientras que el experimento de biomasa de *E. crassipes* utilizada en las remociones iniciales de plomo (II) de 750 (mg/l) alcanzó un rendimiento de 40 % menos de producción de bioetanol; esta biomasa se vio afectada por la cantidad de plomo (II) adherida. Toda la biomasa de *E. crassipes* se puede usar tanto para la fitorremediación como para la producción de bioetanol.

La gran presencia de esta planta en los humedales se debe utilizar para proyectos grandes de fitorremediación y producción de biocombustibles. Se recomienda formular un macroproyecto sostenible de fitorremediación y bioenergía utilizando el potencial de la planta de *E. crassipes*.

Referencias

- Ammar, N. S., Elhaes, H., Ibrahim, H. S., & Ibrahim, M. A. (2014). A novel structure for removal of pollutants from wastewater. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 121, 216-223.
- Atehortua, E. & C.Gartner. (2003). Preliminary studies of *Eichhornia crassipes* dry biomass for lead and chromium removal from waters. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 42-51.
- 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.
- Carreño-Sayago, U. F. (2020). "*Buchón de agua*" (*Eichhornia Crassipes*): *impulsor de la fitorremediación*. Bogotá, Colombia: Editorial Fundación Universitaria los Libertadores. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11371/3807>.
- Carreño-Sayago, U. F. (2021). Development of microspheres using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for treatment of contaminated water with Cr (VI). *Environment, Development and Sustainability*, 23, 4735-4746.
- Carreño-Sayago, U. F., & Rodríguez-Parra, C. (2019). *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: un sistema integrado de fitorremediación y bioenergía. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales*, 25(3), 399-411.

- Cuervo, L., Folch, J. L., & Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología*, 13(3), 11-25.
- Deng, L., Geng, M., Zhu, D., Zhou, W., Langdon, A., Wu, H., ... & Wang, Y. (2012). Effect of chemical and biological degumming on the adsorption of heavy metal by cellulose xanthogenates prepared from *Eichhornia crassipes*. *Bioresource Technology*, 107, 41-45.
- Eid, E. M., Shaltout, K. H., Moghanm, F. S., Youssef, M. S., El-Mohsnawy, E., & Haroun, S. A. (2019). Bioaccumulation and translocation of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* in Nile Delta, Egypt: Perspectives for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 21(8), 821-830.
- Eyley, S., & Thielemans, W. (2014). Surface modification of cellulose nanocrystals. *Nanoscale*, 6(14), 7764-7779.
- Ganguly, A., Chatterjee, P. K., & Dey, A. (2012). Studies on ethanol production from water hyacinth—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 966-972.
- Han, J., Zhou, C., French, A. D., Han, G., & Wu, Q. (2013). Characterization of cellulose II nanoparticles regenerated from 1-butyl-3-methylimidazolium chloride. *Carbohydrate Polymers*, 94(2), 773-781.
- Ibrahim, H. S., Ammar, N. S., Soylak, M., & Ibrahim, M. (2012). Removal of Cd (II) and Pb (II) from aqueous solution using dried water hyacinth as a biosorbent. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 96, 413-420.

- Kouwanou, C. S., Dossa, C. P. A., Adjou, E. S., Tchobo, F. P., Bonou, C., Soumanou, M. M., & Sohounhloué, D. C. (2018). Physicochemical and Enzymatic Hydrolysis of *Eichhornia crassipes* for the production of second-generation bioethanol. *American Journal of Chemistry*, 8(2), 41-44.
- Lee, J., Park, K. Y., Cho, J., & Kim, J. Y. (2018). Releasing characteristics and fate of heavy metals from phytoremediation crop residues during anaerobic digestion. *Chemosphere*, 191, 520-526.
- Lin, S., Yang, H., Na, Z., & Lin, K. (2018). A novel biodegradable arsenic adsorbent by immobilization of iron oxyhydroxide (FeOOH) on the root powder of long-root *Eichhornia crassipes*. *Chemosphere*, 192, 258-266.
- Man, Z., Muhammad, N., Sarwono, A., Bustam, M. A., Kumar, M. V., & Rafiq, S. (2011). Preparation of cellulose nanocrystals using an ionic liquid. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(3), 726-731.
- Pizarro, R., Flores, J. P., Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., ... & León, L. (2016). Especies forestales para la recuperación de suelos contaminados con cobre debido a actividades mineras. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(1), 29-43.
- Porous, D., Siregar, H., & Salem, F. (2012). Studies on the uses of water hyacinth as biogas energy resource in the dam of curag (west java). In: Proceedings of the international conference on water hyacinth, Hyderabad. Chemical composition of the plant and water from different habitats. *Indian Veterinary Journal*, 68, 833-837.

- Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., & Bhoumik, N. C. (2017). Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder. *Water Resources and Industry*, 17, 1-6.
- Sayago, U. F. C., Castro, Y. P., Rivera, L. R. C., & Mariaca, A. G. (2020). Estimation of equilibrium times and maximum capacity of adsorption of heavy metals by *E. crassipes*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2), 141.
- Sayago, U. F. C. (2021). Design and development of a biotreatment of *E. crassipes* for the decontamination of water with Chromium (VI). *Scientific Reports*, 11(1), 1-16.
- Vankar, P. S., & Bajpai, D. (2008). Phyto-remediation of chrome-VI of tannery effluent by *Trichoderma* species. *Desalination*, 222(1-3), 255-262.
- Vásquez, B. (2012). El tratamiento de los desechos líquidos de la zona de tintura en las flores para la exportación con *Eichhornia crassipes* (Buchón de Agua). *Revista Lasallista de Investigación*; Vol.1, No. 2.
- Victor, K. K., Ladji, M., Adjiri, A. O., Cyrille, Y. D. A., & Sanogo, T. A. (2016). Bioaccumulation of heavy metals from wastewaters (Pb, Zn, Cd, Cu and Cr) in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). *International Journal of ChemTech Research*, 9(2), 189-195.
- Zabed, H., Sahu, J. N., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2016). Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 751-774.

Zhou, W., Ge, X., Zhu, D., Langdon, A., Deng, L., Hua, Y., & Zhao, J. (2011). Metal adsorption by quasi cellulose xanthogenates derived from aquatic and terrestrial plant materials. *Bioresource Technology*, 102(3), 3629-3631.

Zimmels, Y., Kirzhner, F., & Malkovskaja, A. (2006). Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of Environmental Management*, 81(4), 420-428.