



EN

Iron removal in water using water cabbage (*Pistia stratiotes*)

ES

Remoción de hierro en agua usando lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)

Marco Arturo Arciniega Galaviz^{1*}; Karla Patricia Rodríguez Fierro²; Arlet Yarely Leyva Loya²¹Universidad Autónoma de Occidente, Departamento Académico de Ingeniería y Tecnología, México.²Universidad Autónoma de Occidente, Programa Educativo de Ingeniería Ambiental, México.

*Corresponding author:

***Corresponding author:**

marco.arciniega@uadeo.mx

ORCID ID: 0000-0001-8532-7130.

Received: March 4, 2025

Accepted: September 12, 2025

Published online:

October 21, 2025

Abstract

Heavy metals such as iron, contained in wastewater even at low concentrations, cause harm to plants, human health and animals. There are treatments which use plants to remove them through adsorption. The objective of the study was to evaluate the iron removal capacity of *Pistia stratiotes* in water. 12 different treatments were carried out using two biomass particle sizes (<0.46 millimeters and greater than 0.46 millimeters), two different amounts of biomass (0.1 and 1 gram) and three aqueous solutions with different iron concentrations (50, 10, and 1 ppm). To determine the amount of iron contained in the solution after the treatments, a Hach UV-Visible spectrophotometer model DR/2010 was used at a wavelength of 562 nanometers using ferrozine (sodium 4-[3-(pyridin-2-yl)-6-(4-sulfophenyl)-1,2,4-triazin-5-yl]benzene-1-sulfonate) to develop the color. The highest percentage of iron removal was 87.1% using biomass <0.46 millimeters, 0.1 grams of biomass and an iron concentration of 10 ppm. Smaller particles can adsorb a greater amount of biomass, and using larger amounts of biomass also produces greater contact of the iron with the biomass particles, increasing the possibility of contact and thus the adhesion of the metal to the biomass.

Keywords: Adsorption, eutrophication, water cabbage, aquatic plants, wastewater treatment.**Resumen**

Los metales pesados como el hierro, presentes en aguas residuales aún en bajas concentraciones, causan daños a plantas, a la salud de las personas y animales. Existen tratamientos que emplean plantas para eliminarlos a través de la adsorción. El objetivo del estudio fue evaluar la capacidad de remoción de hierro presente en agua mediante el uso de *Pistia stratiotes*. Se realizaron 12 distintos tratamientos empleando dos tamaños de partículas de biomasa (<0.46 milímetros y mayor a 0.46 milímetros), dos diferentes cantidades de biomasa (0.1 y 1 gramo) y tres soluciones acuosas con diferentes concentraciones de hierro (50, 10 y 1 ppm). Para determinar la cantidad de hierro contenido en la solución después de los tratamientos, se empleó un espectrofotómetro UV-Visible modelo DR/2010 de Hach, a una longitud de onda de 562 nanómetros empleando ferrozina (sodio 4-[3-(piridin-2-yl)-6-(4-sulfopfenil)-1,2,4-triazin-5-yl]benzene-1-sulfonate) para desarrollar el color. El mayor porcentaje de remoción fue 87.1 % de hierro utilizando la biomasa <0.46 milímetros, 0.1 gramos de biomasa y una concentración de hierro de 10 ppm. Las partículas de menor tamaño pueden adsorber una mayor cantidad de biomasa, y el utilizar mayores cantidades de biomasa también produce un mayor contacto del hierro con las partículas de la biomasa, aumentando la posibilidad de contacto y con esto la adhesión del metal en la biomasa.

Palabras clave: Adsorción, eutrofización, repollito de agua, plantas acuáticas, tratamiento de aguas residuales

Please cite this article as follows (APA 7): Arciniega Galaviz, M. A., Rodríguez Fierro, K. P., & Leyva Loya, A. Y. (2025). Iron removal in water using water cabbage. (*Pistia stratiotes*). *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 5, 2025. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2025.05.12>

Introduction

Currently hydric resources are mainly affected by human and industrial actions which contribute foreign elements to the water when it is used, including organic matter, heavy metals, substances that modify the pH, agrochemicals, pathogenic microorganisms, which break the balance of the ecosystems within the bodies of water (Baños et al., 2022), it is necessary to eliminate these foreign elements (contaminants) and thus reduce damage to the environment.

Concern about environmental pollution has led to increased research and development of sustainable technologies and increasingly strict regulations, which allows reducing polluting emissions into the environment through the introduction of clean technologies in industrial processes (Telwesa, 2023), for example heavy metals are considered toxic to plants, animals and human beings, even in small concentrations and, are one of the pollutants in industrial wastewater that have the greatest impact on the environment (Facsa, 2017). They are considered one of the most dangerous groups due to their poor biodegradability, high toxicity at low concentrations and ability to accumulate in several organisms. (Mancilla et al., 2012).

Commonly used processes to treat wastewater containing heavy metals include activated carbon, ion exchange, solvent extraction, micro/nano/ultrafiltration, reverse osmosis and unconventional flotation (Cardona et al., 2013). Some of these processes can involve high costs and high energy consumption, among them reverse osmosis, treatments using ozone or ultraviolet light, which represent an economic limitation (Pabón et al., 2020). Therefore, there is a growing interest in using natural or residual materials as bioadsorbents, for example, residual products from industrial or agricultural operations are used to remove contaminants and are available in large quantities (Duany et al., 2022). Bark and leaves of conifers (*Pinophyta*), rice husk (*Oryza sativa*), walnuts (*Juglans regia*), groundnuts (*Arachis hypogaea*), orange peel (*Citrus sinensis*), banana peel (*Musa paradisiaca*) (Cardona et al., 2013) and olive pits (*Olea europea*) are some of the solids used to adsorb contaminants found in water (Table 1).

Consequently, this research aims to evaluate a natural resource such as water cabbage to eliminate iron in water.

There are investigations in which natural materials were used to eliminate contaminants, Pérez et al. (2020) evaluated the potential use of cocoa shell for the adsorption of chromium in aqueous solution, with which they achieved a maximum removal of 24%, at a

Introducción

Actualmente los recursos hídricos son afectados principalmente por acciones humanas e industriales que aportan elementos extraños al agua al momento de usarla, entre ellos materia orgánica, metales pesados, sustancias que alteran el pH, agroquímicos, microorganismos patógenos, los cuales rompen el equilibrio de los ecosistemas presentes en los cuerpos de agua (Baños et al., 2022), es necesario la eliminación de estos elementos extraños (contaminantes) y reducir de esta manera daños al ambiente.

La preocupación por la contaminación ambiental ha llevado a una mayor investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles y a regulaciones cada vez más estrictas, esto permite reducir las emisiones contaminantes al ambiente mediante la introducción de tecnologías limpias en los procesos industriales (Telwesa, 2023), por ejemplo los metales pesados son considerados tóxicos para plantas, animales y seres humanos, aun en pequeñas concentraciones y, son uno de los contaminantes de las aguas residuales industriales que mayor impacto tienen en el ambiente (Facsa, 2017). Se consideran uno de los grupos más peligrosos debido a su escasa biodegradabilidad, alta toxicidad en bajas concentraciones y capacidad de acumularse en varios organismos (Mancilla et al., 2012).

Los procesos comúnmente utilizados para tratar aguas residuales que contienen metales pesados incluyen carbón activado, intercambio iónico, extracción con solventes, micro/nano/ultrafiltración, ósmosis inversa y flotación no convencional (Cardona et al., 2013). Algunos de estos procesos pueden implicar altos costos y un consumo de energía elevado, entre ellos la osmosis inversa, tratamientos donde es usado el ozono o luz ultravioleta representando una limitante económica (Pabón et al., 2020). Por lo tanto, existe un interés creciente en utilizar materiales naturales o residuales como bioadsorbentes, por ejemplo, productos residuales de operaciones industriales o agrícolas son utilizados con el fin de eliminar contaminantes y se encuentran disponibles en grandes cantidades (Duany et al., 2022). Corteza y hojas de coníferas (*Pinophyta*), cáscara de arroz (*Oryza sativa*), nueces (*Juglans regia*), maní (*Arachis hypogaea*), cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) (Cardona et al., 2013) y huesos de aceituna (*Olea europea*) son algunos de los sólidos utilizados para adsorber contaminantes presentes en agua (Cuadro 1).

En consecuencia, en esta investigación se busca evaluar un recurso natural como la lechuga de agua, para eliminar hierro en agua.

Existen investigaciones en las que usaron materiales naturales para eliminar contaminantes, Pérez et al.

Table 1. Research where biomasses were used to eliminate heavy metals.**Cuadro 1. Investigaciones donde se emplearon biomásas para eliminar metales pesados.**

Biomass / Biomasa	Heavy Metal pesado eliminado / Metal pesado eliminado	Autores
Tamarind husk / Cáscara de tamarindo	Cd, Cu, Pb y Zn	Vargas et al. (2012)
Cocoa shell / Cáscara de cacao	Pb	Pérez et al. (2020)
Dried orange peel / Cáscara de naranjas secas	Pb y Zn	Cardona et al. (2013)
Cassava peel / Cáscara de yuca	Pb	Albis et al. (2016)
Sugarcane bagasse / Gabazo de caña	Cu	Cascaret et al. (2020)
Fungi (<i>Aspergillus</i> & <i>Penicillium</i>) / Hongos (<i>Aspergillus</i> & <i>Penicillium</i>)	Pb, Cr y Cd	Vallejo et al. (2021)

Source: Authors' self-made
Fuente: Elaboración propia

temperature of 28 °C, a particle diameter of 0.8 mm, a mass of material to solution volume ratio of 5 g·L⁻¹, a pH of 6 and a contact time of 4 hours.

Dried crushed and crosslinked orange peels were studied in order to evaluate the percentage of Cu (II) removal by means of bioadsorption, in this investigation a Cu (II) removal percentage of 99% was reached (Arciniega, 2023). On the other hand, Albis et al. (2016) achieved a Zn (II) removal percentage of 99.5% and the best removal capacity was 9.94 mg of Zn (II) per gram of orange peel.

Acosta et al. (2017) evaluated the absorption capacity of citric acid-modified cassava peel for Pb (II) removal in aqueous solutions simulating industrial effluents, the lead removal rate was up to 99% and the equilibrium time was 20 to 25 minutes. The lead removal capacity of the modified cassava peel was on average 95%, slightly higher than the 86% of the unmodified cassava peel.

On the other hand, Pinzón & Cardona (2008) reported that orange peel is an excellent bioadsorbent material for Cr (III) ions found in liquid solution with concentrations up to 100 ppm; obtaining adsorption percentages of 61.2 % for operating conditions of pH 5, contact time of 60 hours, particle size in the range of 0.30-0.42 mm and adsorbent material to solution volume ratio of 4 g·L⁻¹.

Moreira et al. (2008), removed iron through the bioadsorption process using an initial concentration of 43.95 mg·L⁻¹ and Saminiego et al. (2016) used an orange peel biomass to remove iron with an initial concentration of mg·L⁻¹, these authors being a reference for the initial iron concentrations of this research.

Floating macrophytes include a diverse group of plants, including *Eichhornia crassipes*, *P. stratiotes*, *Salvinia* spp., *Hydrocotyle ranunculoides* and some species of

(2020) evaluaron el uso potencial de la cáscara de cacao para la adsorción de cromo en solución acuosa, con lo cual lograron una eliminación máxima del 24 %, a una temperatura de 28 °C, un diámetro de partícula de 0.8 mm, una relación masa de material a volumen de solución de 5 g·L⁻¹, un pH de 6 y un tiempo de contacto de 4 horas.

Se estudiaron cáscaras de naranjas secas, trituradas y con reticulación, con el fin de evaluar el porcentaje de remoción de Cu (II) por medio de bioadsorción, en esta investigación se alcanzó un porcentaje de remoción de Cu (II) del 99 % (Arciniega, 2023). Por otra parte, Albis et al. (2016), alcanzaron un porcentaje de remoción de Zn (II) de 99.5 % y la mejor capacidad de remoción fue de 9.94 mg de Zn (II) por cada gramo de cáscara de naranja.

Acosta et al. (2017), evaluaron la capacidad de absorción de la cáscara de yuca modificada con ácido cítrico para la eliminación de Pb (II) en disoluciones acuosas simulando efluentes industriales, la tasa de eliminación del plomo fue de hasta el 99 % y el tiempo de equilibrio fue de 20 a 25 minutos. La capacidad de eliminación de plomo de la cáscara de yuca modificada fue en promedio del 95 %, ligeramente superior al 86 % de la cáscara de yuca no modificada.

Por otra parte, Pinzón & Cardona (2008) reportaron que la cáscara de naranja es un excelente material bioadsorbente de iones Cr (III) presentes en disolución líquida con concentraciones hasta de 100 ppm; obteniéndose porcentajes de adsorción de 61.2 % para condiciones de operación de pH de 5, tiempo de contacto de 60 horas, tamaño de partícula en el rango de 0.30-0.42 mm y relación material adsorbente a volumen de disolución de 4 g·L⁻¹.

Moreira et al. (2008), eliminaron hierro mediante el proceso de bioadsorción utilizando una concentración

duckweed (genus *Lemna*, genus *Spirodella*) (Martelo & Lara, 2012).

Water cabbage (*Pistia stratiotes*) floats on the surface of the water, with roots hanging below the floating leaves, it is a perennial monocotyledonous plant with thick and soft leaves that form rosettes. The leaves can be up to 14 centimeters long with parallel, lightly wavy veins covered with short hairs that form a basket-like structure that traps air bubbles, increasing the plant's buoyancy (Akimbile & Yosoff, 2012). It competes with native flora and fauna altering ecosystems, and reduces nitrogen and phosphorus levels causing an ecological imbalance in water bodies (Odjegba & Fasidi, 2004). In addition, it increases sedimentation rates and decreases the acceleration of water velocity, causing the degradation of fish nesting sites increasing nutrient loads (Mendoza et al., 2018). According to Meza et al. (2013), *P. stratiotes* can bioaccumulate in the roots, 463 mg of lead or 555 mg of chromium per kilogram of biomass.

P. stratiotes represents a problem in water bodies since it is considered a noxious weed (Rodríguez et al., 2022). Among the negative effects is the decrease in the oxygen exchange capacity between the air-water interface, preventing the transfer of oxygen and the penetration of light into the water. Furthermore, when it dies, it settles at the bottom of the water body producing anaerobic conditions generating bad odors, the shadow projected by water cabbage inhibits the growth of phytoplankton and, therefore, the oxygenation of water bodies is affected by preventing the entry of sunlight into the water column (Cárdenas, 2023). In addition, it provides an ideal habitat for insects and vectors that could transmit diseases to people such as malaria (*Plasmodium malariae*), encephalitis and filaria (*Wuchereria bancrofti*). On the other hand, the excessive growth of this aquatic plant has economic consequences by directly interfering with navigation in water bodies, hindering fishing activity, causing economic losses in tourism activities, hampering the operation of hydroelectric plant turbines, clogging irrigation and drainage canals in agricultural systems, and finally increasing evapotranspiration and accelerating reservoir silting (Meza et al., 2013). Therefore, its use in treatment allows on the one hand, to take advantage of the material and, on the other hand, to reduce a water pollutant such as iron.

Iron can reach water bodies through metallurgical, steel and mining companies (Castro, 2015), although iron is essential for the oxygen carrying in the human body and fundamental for photosynthesis and phytoplankton growth, it can have adverse effects on ecosystems and human health when it is found in excess in the environment, for example the formation of atmospheric

initial of 43.95 mg·L⁻¹ y Saminiego et al. (2016) utilizaron una biomasa de cáscara de naranja para eliminar hierro con una concentración inicial de 50 mg·L⁻¹, siendo estos autores una referencia para las concentraciones iniciales de hierro de esta investigación.

Los macrófitos flotantes incluyen un grupo diverso de plantas, entre ellas destacan *Eichhornia crassipes*, *P. stratiotes*, *Salvinia* spp., *Hydrocotyle ranunculoides* y algunas especies de lentejas de agua (género *Lemna*, género *Spirodella*) (Martelo & Lara, 2012).

La *Pistia stratiotes* flota en la superficie del agua, con raíces colgando debajo de las hojas flotantes, es una planta perenne monocotiledónea con hojas gruesas y suaves que forman rosetas. Las hojas pueden tener hasta 14 centímetros de largo con las venas paralelas, onduladas ligeras cubiertas con pelos cortos que forman como la estructura de una cesta que atrapan burbujas de aire, aumentando la flotabilidad de la planta (Akimbile & Yosoff, 2012), compete con la flora y fauna nativa alterando ecosistemas, reduce los niveles de nitrógeno y fósforo provocando un desequilibrio ecológico en los cuerpos de agua (Odjegba & Fasidi, 2004). Además, aumenta las tasas de sedimentación y disminuye la aceleración de la velocidad del agua, provocando la degradación de los sitios de anidación de peces aumentando la carga de nutrientes (Mendoza et al., 2018). De acuerdo con Meza et al. (2013), la *P. stratiotes* puede bioacumular en las raíces, 463 mg de plomo o 555 mg de cromo por kilogramo de biomasa.

La *P. stratiotes* representa un problema en cuerpos de agua ya que se considera como maleza nociva (Rodríguez et al., 2022). Dentro de los efectos negativos está la disminución de la capacidad de intercambio de oxígeno entre la interfaz aire-agua, evitando la transferencia de oxígeno y la penetración de luz al agua. Además, al morir, se deposita en el fondo del cuerpo de agua produciendo condiciones anaerobias generando malos olores, la sombra proyectada por la lechuga de agua inhibe el crecimiento del fitoplancton y, por lo tanto, la oxigenación de los cuerpos de agua se ven afectados al impedir la entrada de luz solar a la columna de agua (Cárdenas, 2023). Además, proporciona un hábitat ideal para insectos y vectores que pudieran transmitir enfermedades a personas como la malaria (*Plasmodium malariae*), encefalitis y filaria (*Wuchereria bancrofti*). Por otro lado, el crecimiento excesivo de esta planta acuática tiene consecuencias económicas al interferir directamente en la navegación en los cuerpos de agua, entorpece la actividad pesquera, causa pérdidas económicas en las actividades turísticas, dificulta la operación de las turbinas de las plantas hidroeléctricas, obstruye los canales de riego y drenaje en los sistemas agrícolas y

pollutants such as iron oxides produces the acidification of water bodies (Granados et al., 2010).

These phenomena can deteriorate soil quality and affect aquatic life, as well as plant health by hindering the absorption of other essential nutrients. Regarding human health, inhalation of iron particles can exacerbate lung diseases and cause respiratory problems. Furthermore, the presence of iron in drinking water can be harmful to organs such as the liver, heart, and pancreas, and negatively affect the nervous system and cognitive function (Vargas & Brenes, 2011).

Eutrophication is a process by which the quality of water resources deteriorates, it results from the accumulation of nutrients, especially nitrogen and phosphorus, It determines the use of these nutrients and has significant ecological, health and economic impacts at the local level (Fontúrbel, 2005). This phenomenon is mainly due to human activities such as agriculture, livestock farming, poor solid waste management and the discharge of wastewater from industries that contribute nutrients such as phosphorus, potassium and nitrogen to water bodies. The presence of large amounts of nutrients favors the reproduction and growth of invasive plants. This is followed by problems for aquatic ecosystems, as plants reduce the entry of light into the water column, affecting the process of photosynthesis, in addition, when plants die, they are degraded by bacteria that use the dissolved oxygen in the water to carry out the oxidation process. Added to the above there are economic problems in communities due to troubles with navigation and fishing (FAO, 1997).

The uncontrolled presence of heavy metals (MP by its Spanish abbreviation) can have serious consequences for both, human life and the ecosystem (Carolin et al., 2017). MP can be found both naturally in the earth's crust in several types of minerals and in industrial pollution processes (Tejeda et al., 2015). Iron is a heavy metal with a lustrous black or bluish-gray color, is ductile, malleable, tenacious, extremely hard and heavy, oxidizes upon contact with air, and has ferromagnetic properties (Secretaría de Economía, 2013). The main conventional methods for treating heavy metals in aqueous solutions are chemical precipitation, coagulation-flocculation, flotation, ion exchange resins and membrane filtration (Monreal & Hernández, 2015).

Bioadsorption is defined as a physicochemical process for the uptake of both organic and inorganic compounds found in an aqueous solution, in order to remove or recover them from their environment (Mejía, 2006). In bioadsorption, the uptake of metal ions occurs due to the interactions that develop among the ions found in the aqueous solution and the functional groups exposed

por último incrementa la evapotranspiración y acelera el azolvamiento del embalse (Meza et al., 2013). Por lo que su utilización con el tratamiento permite por una parte aprovechar el material y por otra reducir un contaminante de las aguas como es el hierro.

El hierro puede llegar a los cuerpos de agua a través empresas metalúrgicas, siderúrgicas y minerías (Castro, 2015), aunque el hierro es esencial para el transporte de oxígeno en el cuerpo humano y fundamental para la fotosíntesis y crecimiento del fitoplancton, puede tener efectos adversos en los ecosistemas y la salud humana cuando se encuentra en exceso en el ambiente, por ejemplo la formación de contaminantes atmosféricos como óxidos de hierro produce la acidificación de cuerpos de agua (Granados et al., 2010).

Estos fenómenos pueden deteriorar la calidad del suelo y afectar la vida acuática, así como la salud de las plantas al dificultar la absorción de otros nutrientes esenciales. En cuanto a la salud humana, la inhalación de partículas de hierro puede exacerbar enfermedades pulmonares y causar problemas respiratorios. Además, la presencia de hierro en el agua potable puede ser perjudicial para órganos como el hígado, corazón y páncreas, afecta negativamente el sistema nervioso y la función cognitiva (Vargas & Brenes, 2011).

La eutrofización es un proceso por el cual se deteriora la calidad de los recursos hídricos, resulta de la acumulación de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, condiciona el uso de estos nutrientes y tiene importantes impactos ecológicos, sanitarios y económicos a nivel local (Fontúrbel, 2005). Este fenómeno se debe principalmente a las actividades que realiza el hombre como la agricultura, ganadería, mal manejo de residuos sólidos y descarga de aguas residuales de las industrias que aportan nutrientes como fósforo, potasio y nitrógeno a los cuerpos de agua. Al existir gran cantidad de nutrientes favorece la reproducción y crecimiento de plantas de una manera invasiva. Posteriormente vienen los problemas a los ecosistemas acuáticos, ya que las plantas reducen la entrada de luz a la columna de agua afectando el proceso de la fotosíntesis, además, al morir las plantas son degradadas por bacterias las cuales aprovechan el oxígeno disuelto en el agua para realizar el proceso de oxidación. Aunado a lo anterior existen problemas económicos en las comunidades debido a problemas con la navegación y pesca (FAO, 1997).

La presencia descontrolada de metales pesados (MP) puede provocar graves consecuencias, tanto para la vida humana, como para el ecosistema (Carolin et al., 2017). Los MP se pueden encontrar tanto naturalmente en la corteza terrestre en diversos tipos de minerales

on the organism's outer surface (Farooq et al., 2010). The functional groups that have the greatest relevance in the bioadsorption process are the carboxyl, hydroxyl, sulfate, phosphate and amine groups (He & Chen, 2014), that is why *P. stratiotes*, is considered an excellent bio-adsorbent, since it is an aquatic plant with wide, thick, very porous and hairy leaves, its roots are abundant and long, this means that it has a large surface area for heavy metals such as iron to be adsorbed by it.

The objective of the research was to evaluate the iron removal capacity present in water through the use of *P. stratiotes* biomass, where two different amounts of biomass, two different particle sizes and three different concentrations of iron in aqueous solution were used, due to the negative effects that this metal has on aquatic ecosystems and human health.

Materials and Methods

The research was experimental and exploratory with a quantitative approach which was developed in the unit operations laboratory of the Universidad Autónoma de Occidente unidad regional, Los Mochis. 12 treatments were performed, consisting of two different particle sizes, two different amounts of biomass and three different concentrations of iron in aqueous solution, the above with the aim of determining which treatment achieves the highest percentage of iron removal.

Harvesting water cabbage

P. stratiotes plants were collected from an irrigation canal, approximately 25 to 30 complete individuals. The collected macrophytes had a foliage diameter of 15 to 20 centimeters and the root was approximately 25 centimeters long. Individuals who were not withered were sought, had no damaged leaves, and were not yellow or brown in color, indicating health. They were collected in april due to low water levels in the water bodies, which allowed for greater conglomeration of the plants.

Because the adsorption phenomenon is the physical union of contaminants to the surface of the biomass (Sánchez et al., 2013), two particle sizes were used, a 0.46 millimeter sieve was used, thus obtaining two different sizes, <0.46 and >0.46 millimeters.

Plants were washed with drinking water to remove sludge and any other solids, then the leaves were cut into small pieces so they could be dried in a laboratory oven by forced air convection, at 60 °C for 48 hours.

The biomass was crushed in a mortar, passed through a 0.46 mm mesh screen and thus to obtain two different particle sizes in order to evaluate whether there is a

como en procesos de contaminación industrial (Tejeda et al., 2015). El hierro es un metal pesado que tiene un color negro lustroso o gris azulado, dúctil, maleable, tenaz, es extremadamente duro y pesado, se oxida al contacto con el aire y tiene propiedades ferromagnéticas (Secretaría de Economía, 2013). Los principales métodos convencionales de tratamiento de metales pesados en soluciones acuosas está la precipitación química, coagulación-floculación, flotación, resinas de intercambio iónico y filtración por membrana (Monreal & Hernández, 2015).

La bioadsorción se define como un proceso fisicoquímico de captación de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos presentes en una solución acuosa, con el fin de remover o recuperarlos del medio en que se encuentran (Mejía, 2006). En la bioadsorción, la captación de los iones metálicos se produce debido a las interacciones que se desarrollan entre los iones presentes en la solución acuosa con los grupos funcionales que están expuestos en la superficie exterior del organismo (Farooq et al., 2010). Los grupos funcionales que presentan una mayor relevancia en el proceso de bioadsorción son los grupos carboxilo, hidroxilo, sulfato, fosfato y amina (He & Chen, 2014), es por esto por lo que la *P. stratiotes*, es considerada un bioadsorbente excelente, ya que es una planta acuática con hojas anchas, gruesas, muy porosa y con vellosidad, sus raíces son abundantes y largas, esto hace que tenga una superficie grande para que metales pesados como el hierro sea adsorbido por ella.

El objetivo de la investigación fue evaluar la capacidad de remoción de hierro presente en agua mediante el uso de la biomasa de *P. stratiotes*, en donde se emplearon dos diferentes cantidades de biomasa, dos distintos tamaños de partículas y tres diferentes concentraciones de hierro en solución acuosa, debido a los efectos negativos que tiene este metal en los ecosistemas acuáticos y salud de las personas.

Materiales y Métodos

La investigación fue de tipo experimental y exploratorio con un enfoque cuantitativo la cual se desarrolló en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Autónoma de Occidente unidad regional, Los Mochis. Se realizaron 12 tratamientos, que consistieron en dos diferentes tamaños de partícula, dos distintas cantidades de biomasa y tres diferentes concentraciones de hierro en solución acuosa, lo anterior con la finalidad de determinar en cual tratamiento se obtiene un mayor porcentaje de remoción de hierro.

Recolección de la lechuga de agua

Se recolectaron plantas de *P. stratiotes* en un canal que conduce agua para riego, aproximadamente entre

Figure 1. Obtaining two different particle sizes from the biomass.

Figura 1. Obtención de dos diferentes tamaños de partículas de la biomasa.



Source: Authors' self-made
Fuente: Elaboración propia

significant difference in the removal of heavy metals using two different particle sizes (Figure 1).

Iron bioadsorption

Three different concentrations of iron were used in aqueous solutions of 50, 10 and 1 ppm, which were prepared in the laboratory using hydrated hepta iron sulfate from the company JT Baker of Mexico, 0.050 grams of the reagent were weighed and filled into a one liter flask, for the 10 and 1 ppm solutions, the same procedure was followed, weighing 0.010 and 0.001 grams. It is important to note that the Mexican Official Standard NOM-127-SSA1-2021 indicates a concentration of $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ as the permissible limit for iron in drinking water.

To perform the different iron removal treatments, 0.1 and 1 gram of biomass were placed in beakers to which 200 milliliters of the aqueous solution with iron was added with different concentrations of 50, 10, and 1 ppm. The solution was stirred using a thermo stirring plate and a magnetic bar, and the biosorption process was carried out at a speed of 250 rpm for 90 minutes

The solution was left to stand for 24 hours to allow the solids that make up the biomass to settle. Finally, a 50-milliliter sample was taken for analysis using a Hach DR/2010 UV-Visible spectrophotometer. To determine the iron content in the solution, a wavelength of 562 nanometers was applied, using the reagent ferrozine (sodium 4-[3-(pyridin-2-yl)-6-(4-sulfophenyl)-1,2,4-triazin-5-yl]benzene-1-sulfonate) to develop color.

25 y 30 individuos completos. Las macrófitas recolectadas tenían un diámetro en su follaje entre 15 y 20 centímetros y aproximadamente la raíz contaba con una longitud de 25 centímetros de largo. Se buscaron individuos que no estuvieran marchitos, sin hojas dañadas y que no presentaran un color amarillo o café con la finalidad de que indicaran estar sanos. Fueron recolectadas en el mes de abril debido a que los cuerpos de agua presentaban un nivel bajo de agua lo que permitió una mayor conglomeración de las plantas.

Debido a que el fenómeno de adsorción es la unión física de los contaminantes a la superficie de la biomasa (Sánchez et al., 2013), se emplearon dos tamaños de partículas, se utilizó un tamiz de 0.46 milímetros, obteniendo así, dos distintos tamaños, <0.46 y >0.46 milímetros.

Las plantas se lavaron con agua potable para eliminar lodos y cualquier otro sólido, posteriormente las hojas se cortaron en pedazos pequeños para poderlos secar en una estufa de laboratorio por convección de aire forzado, a 60°C durante 48 horas.

La biomasa se trituro en un mortero, se hizo pasar por una malla de 0.46 mm de abertura y así obtener dos diferentes tamaños de partículas con la finalidad de evaluar si existe una diferencia significativa en la remoción de metales pesados empleando dos diferentes tamaños de partículas (Figura 1).

Bioadsorción de hierro

Se emplearon tres diferentes concentraciones de hierro en soluciones acuosas de 50, 10 y 1 ppm, las

Table 2. Treatments performed for iron adsorption using water cabbage biomass.
Cuadro 2. Tratamientos realizados para adsorción de hierro utilizando una biomasa de lechuga de agua.

Amount of biomass / Cantidad de Biomasa	Particle size / Tamaño de la partícula	Iron concentratioin aqueous solution / Concentración de hierro en la solución acuosa
0.1 grams / 0.1 gramos	<0.46 centimeters / <0.46 centímetros	50 ppm
		10 ppm
		1 ppm
	>0.46 centimeters / >0.46 centímetros	50 ppm
		10 ppm
		1 ppm
1 gram / 1 gramo	<0.46 centimeters / <0.46 centímetros	50 ppm
		10 ppm
		1 ppm
	>0.46 centimeters / >0.46 centímetros	50 ppm
		10 ppm
		1 ppm

Source: Authors' self-made
Fuente: Elaboración propia

Descriptive statistical analysis

Two amounts of biomass, two particle sizes and three different concentrations of iron in aqueous solution were evaluated (Table 2), giving a total of 12 different treatments. A descriptive statistical analysis was performed and frequency tables were obtained, giving percentages for each treatment.

Results and Discussion

For the three treatments where an initial concentration of 50 ppm iron was used, the highest removal percentage was 80% and was obtained using 1 gram of biomass and a particle size <0.46 millimeters (Figure 2).

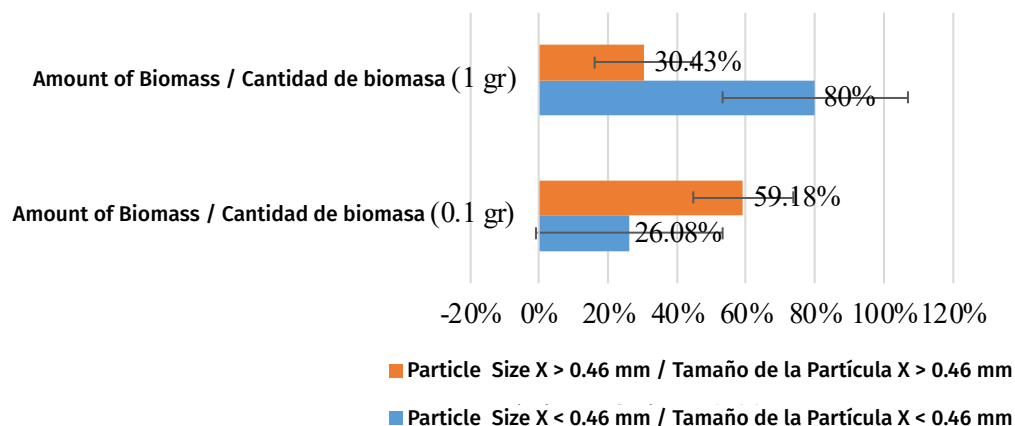
According to Tejeda et al. (2015), adsorption takes place inside particles, mainly within the pores of the biomass and is directly proportional to the volume of the adsorbent. In this case when there is a greater amount of biomass, the contact between the absorbate (iron) and the adsorbent (water cabbage) increases, and thus a greater amount of metal adheres to the biomass. It can be observed that the highest removal percentages resulted from using a greater amount of biomass (1 gram).

Of the three treatments where an aqueous solution with 10 ppm of iron was used, the one that obtained the highest percentage of removal (87%) was where a particle size <0.46 millimeters and 0.1 grams of biomass were used (Figure 3).

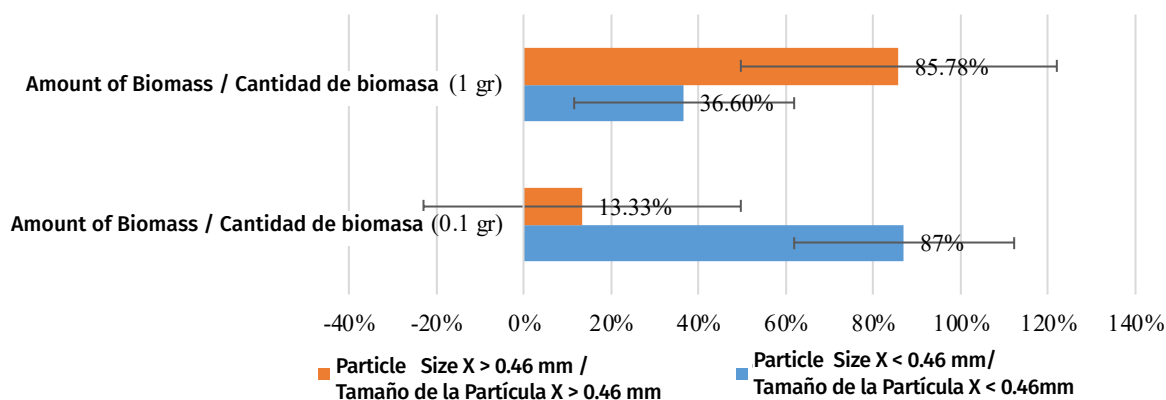
cuales fueron preparadas en el laboratorio utilizando sulfato de hierro hepta hidratado de la empresa J.T. Baker de México, se pesaron 0.050 gramos del reactivo y se aforó en un matraz de un litro, para las soluciones de 10 y 1 ppm, se siguió el mismo procedimiento pesando 0.010 y 0.001 gramos. Es importante señalar que la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, indica como límite permisible de hierro en agua potable la concentración de 0.3 mg·L⁻¹.

Para realizar los diferentes tratamientos de remoción de hierro, se colocaron 0.1 y 1 gramo de la biomasa en vasos de precipitado al cual se le adicionó 200 mililitros de la solución acuosa con hierro con las diferentes concentraciones de 50, 10 y 1 ppm. Se agitó la solución utilizando una plancha termoagitadora y una barra magnética, el proceso de bioadsorción se realizó a una velocidad de 250 rpm durante 90 minutos.

La solución se dejó reposar por 24 horas para realizar el proceso de sedimentación de los sólidos que conforman la biomasa. Por último, se tomó una muestra de 50 mililitros para ser analizada en el espectrofotómetro UV-Visible modelo DR/2010 de Hach. Para determinar la cantidad de hierro contenido en la solución, se aplicó una longitud de onda de 562 nanómetros en el cual se empleó el reactivo ferrozine (sodium 4-[3-(pyridin-2-yl)-6-(4-sulfophenyl)-1,2,4-triazin-5-yl]benzene-1-sulfonate) para desarrollar color.

Figure 2. Removal percentages in aqueous solution of 50 ppm iron.**Figura 2. Porcentajes de remoción en una solución acuosa de 50 ppm de hierro.**

Source: Authors' self-made
Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Porcentajes de remoción en una solución acuosa de 10 ppm de hierro.**Figure 3. Removal percentages in an aqueous solution of 10 ppm.**

Source: Authors' self-made
Fuente: Elaboración propia

There is a higher percentage of heavy metal removal in bioadsorbents where there is a greater contact surface between the heavy metal and the bioadsorbent (Sánchez et al., 2020). Therefore, with a small particle size, there is better contact between the iron and the bioadsorbent, increasing the possibility of the iron adhering to the biomass of *P. stratiote*.

For the three treatments where 1 ppm of iron was used, the highest percentage of removal (71.42%) occurred for the biomass where a particle size >0.46 millimeters was used with 0.1 grams of biomass (Figure 4).

In general, it can be said that the dead biomass of the water cabbage leaf with a particle size <0.46 millime-

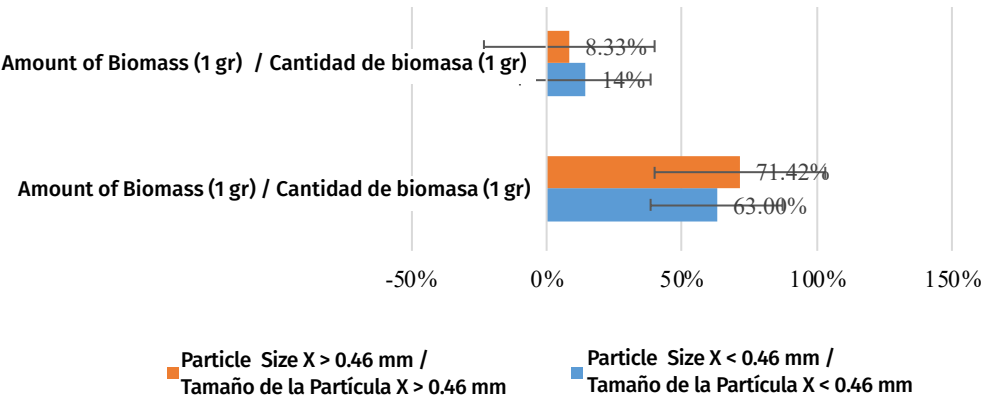
Análisis estadístico descriptivo

Se evaluaron dos cantidades de biomasa, dos tamaños de la partícula y tres diferentes concentraciones de hierro en solución acuosa (Cuadro 2), dando un total de 12 distintos tratamientos. Se realizó un análisis estadístico descriptivo donde se obtuvieron tablas de frecuencia obteniendo porcentajes para cada tratamiento.

Resultados y Discusión

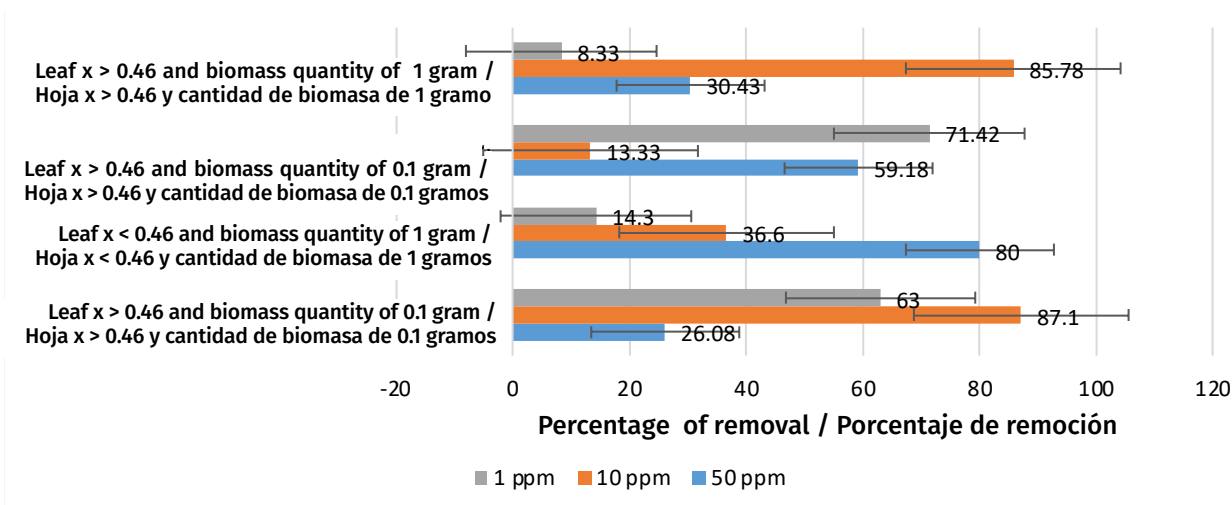
Para los tres tratamientos en donde se utilizó una concentración inicial de 50 ppm de hierro, el mayor porcentaje de remoción fue de 80 % y se obtuvo em-

Figure 4. Removal percentages in aqueous solution of 1 ppm iron.
Figura 4. Porcentajes de remoción en una solución acuosa de 1 ppm de hierro.



Source: Authors' self-made
Fuente: Elaboración propia

Figure 5. Results of the 12 treatments performed.
Figura 5. Resultados de los 12 tratamientos realizados.



ters, turned out to have a higher percentage of removal compared to the particle larger than 0.46 millimeters (Figure 5).

The treatment that showed the highest percentage of removal (87.1%) was with dead leaf biomass using a particle size of <0.46 millimeters.

The higher the contaminant concentration, the more contaminant particles are available to adhere to the adsorbent surface. This can be seen in the difference in removal percentages for solutions containing only 1 ppm of iron and those containing 10 or 50 ppm of iron. With a higher concentration of iron in the water, more molecules are available to collide with the adsorbent surface and adhere resulting in a higher adsorption rate.

pleando 1 gramo de biomasa y un tamaño de partícula <0.46 milímetros (Figura 2).

De acuerdo con Tejeda et al. (2015), la adsorción se desarrolla en el interior de partículas, principalmente dentro de los poros de la biomasa y es directamente proporcional al volumen del adsorbente, en este caso al existir una mayor cantidad de biomasa aumenta el contacto del adsorbato (hierro) con el adsorbente (lechuga de agua), y de esta manera una mayor cantidad de metal adherido a la biomasa. Se puede observar que los mayores porcentajes de remoción resultaron al emplear una mayor cantidad de biomasa (1 gramo).

De los tres tratamientos donde se utilizó una solución acuosa con 10 ppm de hierro, el que obtuvo un mayor

According to Arciniega (2023) when evaluating the copper removal percentages using an orange biomass (*C. sinensis*), the best results were obtained using the lowest concentrations (50 ppm) of the metal in aqueous solution, for this research the best results were obtained with iron concentrations of 10 ppm and 50 ppm, therefore, the treatments were more effective at low concentrations of heavy metals.

Although agitation was not a variable to be evaluated, it does influence the adsorption processes, since adequate agitation increases the possibility of contact of the absorbate (iron) with the adsorbent (water cabbage biomass) and in this way, mass transfer improves, insufficient agitation can limit contact between the polluting particles and the active sides of the adsorbent (Kuśmierk & Świątkowski, 2015).

Conclusions

According to the obtained results, dead biomass of water cabbage is a viable option for treating water containing iron, since the plant is found abundantly in water bodies such as rivers and canals, and its preparation involves a low cost to obtain a dead biomass to remove heavy metals found in water.

It is important to use biomass for water treatment to avoid excessive use of chemicals that affect ecosystems and human health, this also has a second benefit, as removing it from water bodies reduces the negative effects on water conveyance systems to agricultural land and drinking water treatment units, It also prevents the oxygenation of water bodies by reducing contact between air with water and light penetration, thus damaging the photosynthesis process.

Although significant removal percentages ranging from 80 to 88% were obtained, this gives rise to further research to determine whether the smaller the particle, the greater the adsorption, using concentrations greater than 50 mg·L⁻¹ and observing whether the removal percentages increase or decrease.

Recommendation

Other variables can also be studied such as the protonation of the iron solution, stirring times, the influence of temperature, among other variables.

porcentaje de remoción (87 %) fue donde se empleó un tamaño de partícula <0.46 milímetros y 0.1 gramos de biomasa (Figura 3).

Existe un porcentaje de remoción de metales pesados más alto en bioadsorbente donde hay una mayor superficie de contacto del metal pesado con el bioadsorbente (Sánchez et al., 2020). Por lo tanto, con un tamaño de partículas pequeño existe un mejor contacto entre el hierro y el bioadsorbente aumentando la posibilidad de que quede adherido el hierro a la biomasa de *P. stratiote*.

Para los tres tratamientos donde se empleó 1 ppm de hierro, el mayor porcentaje de remoción (71.42 %) se dio para la biomasa donde se utilizó un tamaño de partícula >0.46 milímetros con 0.1 gramos de la biomasa (Figura 4).

De manera general se puede decir que la biomasa muerta de la hoja de lechuga de agua con el tamaño de partícula <0.46 milímetros, resultó tener un mayor porcentaje de remoción en comparación con la partícula mayor a 0.46 milímetros (Figura 5).

El tratamiento que mostró el mayor porcentaje de remoción (87.1 %) fue con la biomasa muerta de la hoja empleando un tamaño de partícula de <0.46 milímetros.

Cuanto mayor sea la concentración del contaminante, más partículas de contaminante estarán disponibles para adherirse a la superficie del adsorbente. Esto se puede observar en la diferencia de los porcentajes de remoción para soluciones que solo tenían 1 ppm de hierro y los que contenían 10 o 50 ppm de hierro. Al existir una mayor concentración de hierro en el agua habrá más moléculas disponibles para colisionar con la superficie del adsorbente y éstas queden adheridas lo que resulta en una tasa de adsorción más alta.

De acuerdo con Arciniega (2023) al evaluar los porcentajes de remoción de cobre utilizando una biomasa de naranja (*C. sinensis*), los mejores resultados se dieron utilizando las concentraciones más bajas (50 ppm) del metal en solución acuosa, para esta investigación los mejores resultados se obtuvieron concentraciones de hierro de 10 ppm y 50 ppm, por lo tanto, los tratamientos fueron más efectivos a concentraciones de bajas de metales pesados.

Aunque la agitación no fue una variable a evaluar, si influye en los procesos de adsorción, ya que una agitación adecuada aumenta la posibilidad de contacto del absorbato (hierro) con el adsorbente (biomasa de lechuga de agua) y de esta manera, mejora la trans-

End of English version

References / Referencias

- Acosta Arguello, H., Barraza Yance, A., Andrés, C., & Arrieta, A., Ricardo, A. (2017). Adsorción de cromo (VI) utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) como biosorbente: Estudio cinético. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 58-76. <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8943>
- Akinbile, C., & Yusoff, M., (2012). Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) effectiveness in aquaculture wastewater treatment, doi: 10.1080/15226514.2011.587482, *Int. J. Phytoremediation*, 14(3), 201-211.
- Albis, A., Martínez, J., Severiche, M., & García, J. (2016). Remoción de plomo de soluciones acuosas usando cáscara de yuca modificada con ácido cítrico. *Avances de Investigación en Ingeniería*, 13(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.254>
- Arciniega Galaviz, M. A. (2023). Remoción de cobre en agua sintética utilizando pectina de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*). *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(1), 45-54. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.04>
- Baños-Castro, G. L., Martínez-de-Navas, E. N., & Landaverde-Sánchez, J. V. (2022). Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales restaurante Tekunal en el lago de Coatepeque, Santa Ana. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 10(1), 61-72.
- Cardona Gutiérrez, A. F., Cabañas Vargas, D. D., & Zepeda Pedreguera, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1), 1-9.
- Cárdenas, E., Allende, Z., Ferreira, M., Velázquez, A., & Vogt, Ch. (2023). Estudio de la capacidad depuradora de *Pistia stratiotes* L., en el tratamiento de aguas residuales generados en el Laboratorio de Efluentes de FACEN-UNA. *Reportes científicos de la FACEN*, 14(1), 70-77. Epub 00 de junio de 2023. <https://doi.org/10.18004/rfacen.2023.14.1.70>
- Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J., & Naushad, M. (2017). "Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 2782-2799.
- Cascaret-Carmenaty, D., Rodríguez-Matos, A., Ricardo-Lobaina, J., Quesada-González, C. A., Omaida, & Bahín-Deroncele, L. (2020). Utilización de bagazo de caña de azúcar natural y tratado ecucquímicamente, como material adsorbente para Cu 2+. *Revista Cubana de Química*, 32(2), 331-344. Epub 21 de septiembre de 2020. Recuperado en 01 de agosto de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212020000200331&lng=es&tng=es.
- Castro-Torres, Y. (2015). Determinación de metales pesados en agua superficial de la mina de Dolores municipio de Madera, Chihuahua. [Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/7895/YESMIN%20HORTENSIA%20CASTRO%20TORRES.pdf?sequence=1>
- Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horruitiner, T., & Rodríguez-Heredia, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales

ferencia de masa, una agitación insuficiente puede limitar el contacto entre las partículas contaminantes y los sitios activos del adsorbente (Kuśmierek & Świątkowski, 2015).

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, la biomasa muerta de lechuga de agua es una opción viable para el tratamiento de aguas con presencia de hierro, ya que la planta se encuentra abundantemente en cuerpos de agua como ríos y canales, e implica un costo bajo en su preparación para obtener una biomasa muerta para eliminar metales pesados presentes en el agua.

Es importante el aprovechamiento de biomasa para el tratamiento de agua para no hacer un uso excesivo de productos químicos que afectan a los ecosistemas y salud de las personas, además de presentar un segundo beneficio ya que al retirarla de los cuerpos de agua se reducen los efectos negativos que afecta los sistemas de conducción del agua a tierras agrícolas y plantas de tratamientos de agua potable, además de evitar la oxigenación de cuerpos de agua al reducir el contacto del aire con el agua y la penetración de la luz dañando así el proceso de la fotosíntesis.

Aunque se obtuvieron importantes porcentajes de remoción que oscilaron entre el 80 y 88 %, esto da pie a seguir con la investigación para definir si entre más pequeña sea la partícula mayor será la adsorción, usar concentraciones mayores a 50 mg·L⁻¹ y observar si los porcentajes de remoción aumenta o disminuye.

Recomendación

También se pueden estudiar otras variables como la protonación de la solución de hierro, los tiempos de agitación, la influencia de la temperatura, entre otras variables.

Fin de la versión en español

pesados. *Revisión. Tecnología Química*, 42(1), 94-113. Epub 30 de abril de 2022. Recuperado en 01 de agosto de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&tng=es.

Facsa (2017). Metales Pesados. Facsa – Ciclo Integral del Agua. España. Recuperado de <https://www.facsa.com/metales-pesados/>.

FAO (1997). Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua. *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55). Recuperado de: <https://www.fao.org/4/w2598s/w2598s00.htm#Contents>.

- Fontúrbel Rada, F. (2005). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del Lago Titikaka (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4(1-2), 135-141. Recuperado en 01 de agosto de 2024, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162005000100018&lng=es&tlng=es.
- Farooq, J. A., Kozinski, M. A., Khan, & M. Athar, (2010). "Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents -a review of the recent literature", *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 14, pp. 5043-53. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410003019>
- Granados Sánchez, D., López Ríos, G. F., & Hernández García, M. Á. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 187-206. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.022>
- He J., & Chen J. P. (2014). Bioresource Technology A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource Technology* 160, 67– 78. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.068
- Kuśmirek, K., & Świątkowski, A. (2015). The influence of different agitation techniques on the adsorption kinetics of 4-chlorophenol on granular activated carbon. *Reac Kinet Mech Cat* 116, 261–271 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11144-015-0889-1>
- Mejía Sandoval, G., (2006). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 1(1), 77-99.
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 39-48. Recuperado en 01 de agosto de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000100004&lng=es&tlng=es
- Martelo, J., & Lara Borrero, J. A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243. Retrieved September 13, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652012000100011&lng=en&tlng=es.
- Mendoza, Yoma I., I. Pérez, J., & Galindo, Andrés A. (2018). Evaluation of the Contribution of the Aquatic Plants *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* in the Municipal Wastewater Treatment. *Información tecnológica*, 29(2), 205-214. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200205>
- Meza Pérez, M., Marín, J. C., Behling Quintero, E., Colina Andrade, G., Rincón L., N., & Polo, C. A. (2013). Bioabsorción de Pb (II) Y Cr (III) usando la planta acuática *Pistia stratioides*. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 28(3), 19-27. Recuperado en 01 de agosto de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652013000300003&lng=es&tlng=es.
- Monreal-Saavedra, R., & Ramírez-Rábago, P. (2015). Mi México ES MINERO. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México A.C. México. Recuperado de: [https://www.geomin.com.mx/publicaciones/pub3_MEXICO %20MINERO%203%20edicion.pdf](https://www.geomin.com.mx/publicaciones/pub3_MEXICO_%20MINERO%203%20edicion.pdf).
- Moreira, A. S., Duarte, Márcia M. L., Nandenha, J., & Gorete R. M. (2008). Estudio del Mecanismo de Remoción de Hierro y Cobre presentes en Aceites Lubricantes Usados Mediante Bioadsorción. *Información tecnológica*, 19(1), 57-68. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000100008>
- Odjegba, V. I., & Fasidi, I. O. (2004). Accumulation of trace elements by *Pistia stratiotes*: Implications for phytoremediation. *Ecotoxicology*. 13: 637-646. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10646-003-4424-1>
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. Epub March 20, 2021. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pérez Antolinez, L. L., Paz Astudillo, I. C., Sandoval Aldana, A. P., & Peñaloza Atuesta, G. C. (2020). Uso de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la remoción de cromo en solución acuosa. *Revista EIA*, 17(34), 1–13. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1393>
- Pinzón-Bedoya, M. L., & Cardona Tamayo, A. M. (2008). "Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente". *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 6 (1), 1-23.
- Rodríguez-Lara, J. W., Cervantes-Ortiz, F., Arámbula-Villa, G., Mariscal-Amaro, L. A., Aguirre-Mancilla, C. L., & Andrio-Enríquez, E. (2021). Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*): una revisión. *Agronomía Mesoamericana*, 33 (1), 44201. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.44201>
- Samaniego León, J. E., Arzamendia, A. R., & Ayala, M. J. (2016). Remoción de Hierro y Plomo en aguas Residuales por Bioadsorción de la Cáscara de Naranja Agria. *Revista Sobre Estudios e Investigaciones del saber académico*, (10), 69-75. <https://doi.org/10.70833/rseisa10item164>
- Sánchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J., & Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-biológicas*, 23, e20200261. Epub 05 de marzo de 2021. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>
- Sánchez-Galván, G., Mercado, F. J., & Olguín, E. J. Leaves and Roots of *Pistia stratiotes* as Sorbent Materials for the Removal of Crude Oil from Saline Solutions. *Water Air Soil Pollut* 224, 1421 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1421-0>
- Secretaría de Economía (2013). Perfil de Mercado del Hierro-Acero. Dirección General de Desarrollo Minero. México. Recuperado de: https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_hierro_acero_1013.pdf
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 109-123. Retrieved August 01, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012377992015000100010&lng=en&tlng=es.
- Telwesa (2023). Importancia de Agua Regenerada. Congreso ecostp2023.España. Recuperado de <https://telwesa.com/congreso-ecostp2023/>
- Vallejo Aguilar, M. de la L., Marín Castro, A., Ramos Cassellis, M. A., Silva Gómez, M. E., Ibarra S. E., Cantún, D., & Tamariz Flores, J. V. (2021). Biosorción y tolerancia de Pb, Cr y Cd por la biomasa de *Pleurotus*

- ostreatus (Jacq. Ex Fr.) P. Kumm. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12(2), 275-289. Epub 25 de abril de 2022. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2687>
- Vargas, M. Cerro, S. Reyna, E. R. Bandala, & J. L. Sanchez, "Biosorption of heavy metals in polluted water, using different waste fruit cortex," Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C, vol. 37-39, pp. 26-29.
- Vargas-Snabria, M., & Brenes-Pino, F. (2011). Hemocromatosis como causa de cirrosis en Costa Rica: A propósito de un caso. Medicina Legal de Costa Rica, vol. 28 (2). <https://www.scielo.sa.cr/pdf/mlcr/v28n2/art9%20v28n2.pdf>.