

**Eichhornia crassipes y su uso en técnicas de aprovechamiento y fitorremediación
de cuerpos de agua**

John Alexander Jiménez Rodríguez

Monografía presentada como requisito para optar al título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Semillero Ecohidrología

Director:

Denisse Viviana Cortés Castillo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Bogotá, Colombia

Abril 2021

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de formarme como Ingeniero Ambiental, a mis padres Ana Belén Rodríguez y Ángel Jiménez por el apoyo que siempre me brindaron y por los valores que me inculcaron.

En especial a la memoria de mi padre Ángel María Jiménez Jiménez que me enseñó el valor de la educación y a no rendirme ante las adversidades.

A mis hijos Sebastián, Valeria y Santiago Jiménez por ser el incentivo para seguir adelante y en general a mi familia por el apoyo constante.

A la doctora Denisse Viviana Cortés por la colaboración y la dirección de esta monografía. A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD y a sus docentes

John Alexander Jiménez Rodríguez

Resumen

Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica a nivel mundial, sin embargo, ha alcanzado una elevada cifra de contaminación de este recurso, causando una problemática ambiental de gran proporción a nivel nacional. La poca conciencia y la falta de educación ambiental ha llevado a la población colombiana a vivir en el consumismo, causando desinterés por el medio ambiente y los recursos naturales. La fabricación y compra desmedida de productos, provoca gran cantidad de desechos que en su mayoría terminan contaminando los cuerpos de agua. El incremento de la población a nivel nacional ocasiona altos impactos en el medio ambiente, ya que los vertimientos industriales y domésticos se incrementan. Las actividades agrícolas, la deforestación y la contaminación en las cuencas de los ríos, causan el aumento de la eutrofización afectando seriamente el recurso hídrico, la salud de las comunidades, la biodiversidad y la ecología. Por esta razón, nace la necesidad de caracterizar e identificar diferentes soluciones a dicha problemática, con el propósito de analizar su viabilidad para disminuir la carga contaminante en los diferentes cuerpos de agua del país. En este sentido, el objetivo de la monografía es analizar las técnicas existentes de fitorremediación y aprovechamiento de la especie *Eichhornia crassipes* a nivel mundial y su posible implementación en ecosistemas locales, ya que se ha comprobado que técnicas de fitorremediación como la fitotransformación son muy efectivas en la industria agrícola pecuaria y piscícola, logrando remover un alto porcentaje de contaminantes como fenoles y nitratos, la fitorrestauración para vertimientos domésticos que restaura parámetros como pH, DQO, coliformes totales y fecales, DBO soluble, y SST. y la fitoextracción para hidrocarburos que disminuye fenoles, fósforo total, nitratos, conductividad etc. Estas son algunas de las técnicas que veremos más adelante.

Palabras claves: Calidad del agua, compostaje, abono orgánico, buchón de agua, biodigestores, humedales artificiales, biocombustibles.

Abstract

Colombia is one of the countries with the greatest water wealth in the world, however, it has reached a high level of contamination of this resource, causing a large proportion of environmental problems at the national level. Lack of awareness and lack of environmental education has led the Colombian population to live in consumerism, causing disinterest in the environment and natural resources. The excessive manufacture and purchase of products causes a large amount of waste that mostly ends up contaminating the bodies of water. The increase in the population at the national level causes high impacts on the environment, since industrial and domestic discharges increase. Agricultural activities, deforestation and pollution in river basins cause increased eutrophication, seriously affecting water resources, community health, biodiversity and ecology. For this reason, the need arises to characterize and identify different solutions to this problem, in order to analyze their viability to reduce the pollutant load in the different bodies of water in the country. In this sense, the objective of the monograph is to analyze the existing techniques of phytoremediation and use of the *Eichhornia crassipes* species worldwide and its possible implementation in local ecosystems, since it has been proven that phytoremediation techniques such as phytotransformation are very effective in the livestock and fish farming industry, managing to remove a high percentage of pollutants such as phenols and nitrates, phytorerestoration for domestic discharges that restores parameters such as pH, COD, total and fecal coliforms, soluble BOD, and TSS. and phytoextraction for hydrocarbons that reduces phenols, total phosphorus, nitrates, conductivity, etc. These are some of the techniques that we will see later.

Keywords: Water quality, composting, organic fertilizer, water buchón, biodigesters, artificial wetlands, biofuels.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	11
Problema	13
Planteamiento del problema	13
Pregunta de investigación	14
Justificación	14
Objetivos	16
Objetivo general	16
Objetivos Específicos	16
Marco teórico	17
Capítulo 1: Caracterización de las técnicas de fitorremediación de cuerpos de agua con <i>Eichhornia crassipes</i>	17
Características y morfología de la <i>Eichhornia crassipes</i>	17
Técnicas de fitorremediación con <i>Eichhornia crassipes</i>	20
Fitoextracción	21
Fitofiltración	22
Fitotransformación	23
Fitovolatilización	24
Fitorrestauración.	26
Estado del arte del uso de la fitorremediación con <i>Eichhornia crassipes</i> a nivel mundial	30
Eficiencia de <i>Eichhornia crassipes</i> en aguas residuales domésticas	30
Eficiencia de <i>Eichhornia crassipes</i> en la remoción de metales pesados	32

Usos potenciales y posibles riesgos asociados a la implementación de técnicas de fitorremediación con <i>Eichhornia crassipes</i>	34
Riesgos	35
Potencialidades	35
Capítulo 2: Aprovechamiento de la especie <i>Eichhornia crassipes</i> como materia prima	38
Aprovechamiento de <i>Eichhornia crassipes</i> en las diferentes industrias	38
Extracción de lignina	40
Alimento para animales	40
Biodigestores	40
Compostajes	41
Biosólidos	41
Artesanías	43
Conclusiones	49
Recomendaciones	51
Referencias	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Fotografía de <i>Eichhornia crassipes</i>	18
Figura 2. Técnica de fitoextracción	21
Figura 3. Técnica de fitofiltración	22
Figura 4. Técnica de fitotransformación	24
Figura 5. Técnica de fitovolatilización	25
Figura 6. Técnica de fitorrestauración	27
Figura 7. Aprovechamiento de <i>Eichhornia crassipes</i>	39
Figura 8. Uso artesanal de <i>E. crassipes</i> . a. Recolección; b. Obtención de fibras; c. Productos artesanales	45

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación taxonómica y morfología de <i>Eichhornia Crassipes</i>	18
Tabla 2. Técnicas de fitorremediación con <i>Eichhornia crassipes</i>	29
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la fitorremediación	37
Tabla 4. Comparación de la especie con otras materias primas	45
Tabla 5. Eficiencia de la especie	47

Introducción

Colombia se ubica en un lugar privilegiado entre los países que cuentan con una gran cantidad de agua a nivel mundial, sin embargo, no toda el agua nacional está disponible en los ríos, pues también se cuenta con lagos, glaciares, humedales, aguas subterráneas y otros cuerpos de agua. Según el estudio nacional del agua (ENA) que adelantó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (2018), los sectores con mayor demanda hídrica son: el sector agrícola, pecuario, piscícola, minero e hidrocarburos, energía, industria manufacturera, doméstico, comercio y servicios.

Teniendo en cuenta lo anterior, Fernández et al (2005), afirman que en dichas actividades se generan gran cantidad de aguas residuales, que son entregadas a las fuentes hídricas, contaminándolas con metales, fertilizantes fungicidas, herbicidas, nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio, manganeso, aluminio, boro, azufre, hierro, cobre y zinc entre otras sustancias peligrosas, que impactan negativamente sobre los recursos naturales.

Por consiguiente, la creciente contaminación del recurso hídrico ha llevado a buscar alternativas que traten de minimizar el impacto, toda vez que el ciclo del agua no llega a depurar la gran carga contaminante que presentan algunos cuerpos de agua, por esta razón se han desarrollado tecnologías en diferentes campos, ya sea por medios mecánicos químicos o biológicos como es el caso de la fitorremediación con plantas acuáticas.

Tal como lo establece Delgadillo (2010), la fitorremediación consiste en el uso de plantas para la reducción o degradación de contaminantes orgánicos con el fin de recuperar cuerpos de agua, suelo y aire ya que existen técnicas de biodepuración del aire por medio del intercambio de dióxido de carbono.

Mentaberry (2011), afirma que algunas plantas acuáticas como la especie *Eichhornia crassipes* tienen la capacidad de asimilar nutrientes creando condiciones que favorecen la descomposición de materia orgánica, metales, radioactivos, hidrocarburos y lixiviados explotando su capacidad para metabolizar los compuestos químicos.

En aguas residuales, la planta *Eichhornia crassipes* se utiliza como un tratamiento complementario auto depurando las aguas de sustancias y contaminantes como el cadmio, cromo, arsénico y mercurio. también logran reducir los sólidos suspendidos que disminuyen el paso de los rayos solares afectando el crecimiento de fitoplancton y zooplancton, Vásquez (2004), señala que ésta planta tiene la capacidad de transportar oxígeno y una excelente tolerancia a altas concentraciones de contaminantes.

Por esta razón, se realizó una revisión y análisis de las técnicas de fitorremediación y aprovechamiento de la especie *Eichhornia crassipes*, que se han adoptado a nivel mundial y sus resultados en cuerpos de agua contaminados.

En este documento, el marco teórico se encuentra dividido en 2 capítulos, en el capítulo 1 se abordan las características y morfología de la especie *Eichhornia crassipes*, así como la caracterización de las técnicas de fitorremediación en cuerpos de agua a nivel mundial y los posibles riesgos asociados a la implementación de técnicas de fitorremediación con esta planta.

Luego, en el capítulo 2, se exponen las técnicas de aprovechamiento de la especie *Eichhornia crassipes* y sus diversos usos.

Problema

Planteamiento del problema

En Colombia, la normatividad vigente para vertimientos es la “Resolución 0631 de 2015, reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años) respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país. Esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua, vertidas por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país.

Esta Resolución es de obligatorio cumplimiento para todas aquellas personas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios y que en el desarrollo de estas generen aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público.” (Res 0631 , 2015).

Para dar cumplimiento a esta norma y solucionar la problemática de la contaminación hídrica, existen varias alternativas. Al respecto, Hernández (2009), sostiene que algunas industrias han adoptado tratamientos novedosos como la precipitación electroquímica, intercambio iónico, adsorción y desinfección, así como los tratamientos con polímeros y coagulantes tradicionalmente utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) todo esto para minimizar el impacto ambiental. Sin embargo, este tipo de tratamientos necesitan costosas inversiones y generan subproductos que deben ser tratados adicionalmente, ya que cuentan con altas cargas contaminantes. Por esta razón surge la necesidad de implementar métodos alternativos naturales como la fitorremediación. Esta técnica nace como una forma de mejorar la calidad del agua, aprovechando plantas con capacidad de absorción o acumulación de sustancias contaminantes. Este es el caso de la especie *Eichhornia crassipes*,

la cual, según Muñoz y Novoa (2019), tiene una excelente capacidad de metabolizar compuestos tóxicos y purificar el agua.

Pregunta de investigación

¿Cuál ha sido el uso que se le ha dado a *Eichhornia crassipes* en procesos de aprovechamiento y fitorremediación de cuerpos de agua a nivel mundial?

Justificación

En Colombia, en las últimas décadas se ha venido implementando el tratamiento de aguas residuales por medio de estanques y humedales artificiales con plantas acuáticas, Muñoz y Novoa (2019), afirman que la aplicación de estas técnicas permite dar solución a bajo costo a algunas problemáticas de contaminación, garantizando excelentes resultados en actividades como el saneamiento básico y el manejo de aguas residuales domésticas e industriales en pequeñas poblaciones. Por otro lado, Rodríguez et al (2017), aseguran que algunos de estos humedales y estanques artificiales se han complementado con biofiltros, que consisten en un sistema de lechos filtrantes de grava con diferentes dimensiones, anaerobios o aerobios, para mejorar su rendimiento y eficiencia,

La fitorremediación brinda varias ventajas en el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, tales como efectividad en el proceso, bajos costos, no consume energía, y cuenta con gran versatilidad en la descontaminación de dichas aguas, Garzón et al (2012), estiman que estos sistemas tienen una eficiencia de más del 90 % en remoción de contaminantes, permitiendo reutilizar las aguas en diferentes actividades como el riego de cultivos y plantas, adicional a esto, la especie *Eichhornia crassipes*, tiene gran capacidad de propagación brindando materia prima para la depuración del agua, “puede reproducirse por vía

sexual o asexual, se estima que dos plantas adultas pueden originar cerca de 30 nuevos individuos en un promedio de 23 días”. (Rodríguez et al., 2017).

Otra de las ventajas que brindan estas tecnologías es que se adaptan paisajísticamente creando hábitats para la fauna y flora de la zona.

En la fitorremediación las plantas inician el proceso en sus raíces, tallos y hojas metabolizando las sustancias en su interior, y transformándolas en menos tóxicas o en gases que se expulsan al ambiente.

Así mismo, Mentaberry (2011), señala que, dependiendo de la técnica utilizada en la fitorremediación, se pueden generar residuos orgánicos, algunos de ellos pueden tener un aprovechamiento adicional, es el caso de la Fitoextracción o Fitosecuestro, las plantas utilizadas en esta técnica se cosechan como biomasa y se incineran, sus cenizas son dispuestas en rellenos sanitarios o se emplean para recuperar metales con una técnica llamada Fitominería. Por otro lado, Rodríguez (2017), expone que también se utilizan en fabricación de bioetanol, biogás, briquetas y biomasa residual o después de un proceso de compostaje en abonos orgánicos con altos niveles de nutrientes.

Por su parte, Martelo y Lara (2012), afirman que las macrófitas acuáticas como el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), prestan un gran beneficio ecológico, relacionado con su potencial de absorción, asimilación y transformación de compuestos tóxicos. El crecimiento de esta especie está asociado a las aguas ricas en nutrientes, como el nitrógeno, fósforo y potasio, también toma elementos como el calcio, manganeso, magnesio, hierro, azufre, boro, aluminio, zinc y cobre, extrayendo nutrientes y metales pesados, por esta razón es importante incluir la planta para la biorremediación en cuerpos de agua, suelos e incluso aire.

Objetivos

Objetivo general

Analizar las técnicas de fitorremediación y aprovechamiento existentes para *Eichhornia crassipes* a nivel mundial.

Objetivos Específicos

Caracterizar las técnicas de fitorremediación de cuerpos de agua en las cuales se emplea a *Eichhornia crassipes*.

Caracterizar los tipos de aprovechamiento que se han desarrollado con relación a *Eichhornia crassipes*.

Identificar usos potenciales y posibles riesgos asociados a la implementación de técnicas con *Eichhornia crassipes*.

Marco teórico

Capítulo 1: Caracterización de las técnicas de fitorremediación de cuerpos de agua con *Eichhornia crassipes*

Características y morfología de la Eichhornia crassipes

Antes de hablar de las técnicas de fitorremediación en las cuales se ha empleado *Eichhornia crassipes*, es importante hacer una breve caracterización de su morfología. El buchón de agua o lirio de agua (*Eichhornia crassipes*) es una planta con gran capacidad de crecimiento y propagación que forma grandes colonias flotantes. De acuerdo a los autores Guevara y Ramírez (2015), esta especie es originaria de climas tropicales y se desarrolla plenamente en aguas ricas en nitrógeno, fósforo y potasio; su nutrición principal es el calcio, azufre, manganeso, magnesio, hierro, boro, aluminio, cobre y zinc, estas colonias flotantes ocupan los espejos de agua reduciendo así la entrada de luz, e impidiendo la fotosíntesis de otras plantas o algas y disminuyendo la cantidad de oxígeno a cero, afectando la cadena trófica, influyendo directamente en la salud del ecosistema acuático y convirtiéndose en una especie dominante, su crecimiento y proliferación, según Arteaga et al (2010), se debe a la eutrofización que es el proceso mediante el cual aumentan los nutrientes en un cuerpo de agua causando una problemática.

Aun así, algunas características de la planta *Eichhornia crassipes* tales como, su alta capacidad depuradora permite que sea utilizada en procesos de fitorremediación, aunque, de acuerdo con la sugerencia de Guevara (2015), es recomendable utilizarla solo en humedales artificiales para tener un control estricto sobre su crecimiento, con el fin de evitar la invasión de los ecosistemas tratados.

Tomando como referencia lo establecido por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR (2019), dentro de sus características morfológicas, se destaca su crecimiento en brotes unidos a un rizoma, que carece de tallo, sus hojas cuentan con una parte inflada como un globo lo que le permite flotar. En su parte superior se encuentran las flores en colores lila y violeta con lóbulos amarillos, su envergadura puede llegar hasta los 30 centímetros.

Figura 1.

Fotografía de Eichhornia crassipes



Fuente: Cortés, 2012.

En la tabla 1, se puede observar la clasificación taxonómica de la especie.

Tabla 1.

Clasificación taxonómica y morfología de Eichhornia crassipes

Reino	Plantas
Orden	Commelinales
Género	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>crassipes</i>
Familia	Pontederiaceae
Clase	Liliopsida
Phylum	Magnoliophyta

Fuente: Autor

Jiménez y Padilla (2009), sostienen que las plantas de *Eichhornia crassipes* tienen la capacidad de producir oxígeno por medio de la fotosíntesis, estimulando el crecimiento de bacterias para degradar y absorber sustancias y materias orgánicas, que pueden ser removidas de forma biológica, donde intervienen organismos microscópicos y macroscópicos, o de forma física aprovechando factores como oxígeno, temperatura y pH, produciendo reacciones de reducción, fotólisis, oxidación e hidrólisis, también adelanta procesos de eliminación de sólidos suspendidos, por filtración a través de las raíces de las plantas que forman una especie de maya que filtra las partículas sólidas, también utilizan la sedimentación (por gravedad) y floculación (por aglomeración de partículas).

Así mismo, estas autoras también afirman que estas plantas ejecutan un proceso de eliminación de patógenos que son organismos vivos que se coagulan formando coloides flotantes. Estos patógenos pueden ser hongos, bacterias, protozoos, virus o parásitos. Dichos patógenos son eliminados por antibióticos producidos en las raíces de la planta por filtración o por adsorción.

Para la eliminación de nitrógeno, fósforo y metales pesados, la macrófita inicia el proceso de detoxificación en su raíz, pasa por el tallo y termina acumulándose en las hojas las cuales sufren daños en los cloroplastos y mitocondrias, afectando su fotosíntesis.

Se sabe que la capacidad de adsorción que tiene la macrófita está relacionada con los grupos de hidroxilo en su celulosa, que forman puentes de hidrógeno. En su tallo cuenta con celdas compuestas por un material bastante poroso y bulboso, en el cual se acumula agua y aire permitiendo que flote.

Por otro lado, Daniel y Acosta (2003), afirman que, los microorganismos existentes en la rizósfera degradan la materia orgánica, generando metabolitos los cuales son absorbidos

junto a minerales, fósforo y nitrógeno. Estos contaminantes son metabolizados por bacterias minimizando el impacto ambiental.

Técnicas de fitorremediación con *Eichhornia crassipes*

González (2001), define la fitorremediación como un conjunto de técnicas sostenible, fundamentada en el uso de algunas plantas con capacidad de disminuir y metabolizar contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, agua y aire, partiendo de procesos que realizan dichas plantas por medio de sus raíces, tallo, hojas y microorganismos asociados que estabilizan los contaminantes.

La efectividad del tratamiento dependerá de la especie que se escoja para lograr resultados óptimos. González (2001), también afirma que la macrófita *Eichhornia crassipes*, posee gran tolerancia a metales pesados y al calcio, azufre, manganeso, magnesio, hierro, boro, aluminio, cobre y zinc, adicionalmente cuenta con una gran tasa de crecimiento, abarcando una extensión considerable en el tratamiento. Así lo confirma Núñez et al (2004), pues estas plantas cumplen la función de remover los contaminantes de las aguas residuales por medios físicos como la sedimentación, adsorción, filtración y volatilización, por medios químicos como hidrólisis, precipitación, oxido-reducción; y por medios biológicos mediante el metabolismo microbiano y procesos de bioadsorción.

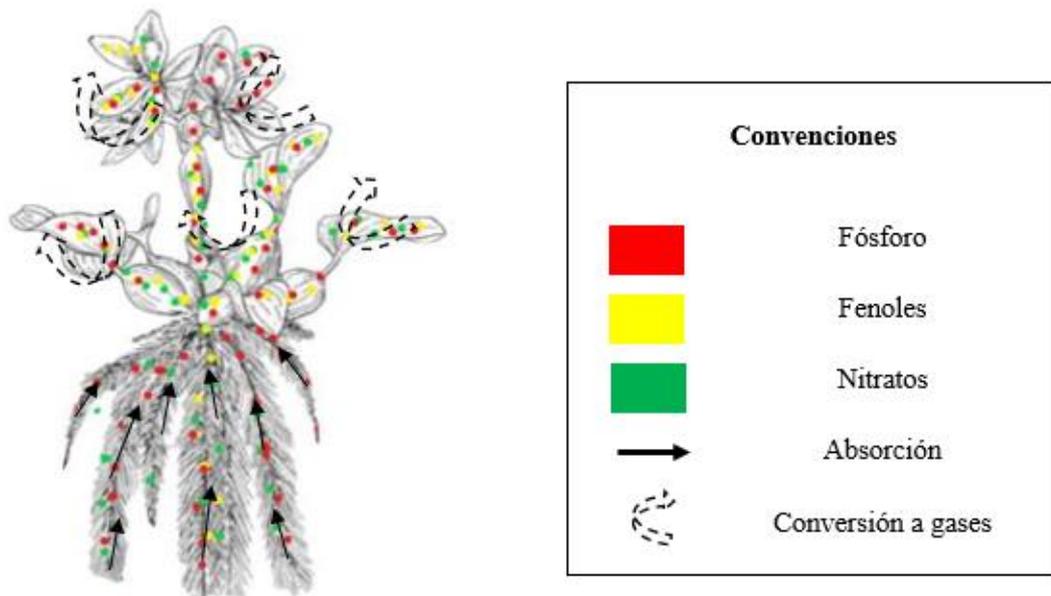
La especie *Eichhornia crassipes* es ideal para los procesos de remoción de metales pesados en aguas contaminadas. Según Núñez et al (2004), esta especie es bastante efectiva para remover plomo, arsénico, contaminantes y patógenos en aguas residuales por el método de absorción vertical de las raíces de las plantas.

A continuación, se presentan las técnicas de fitorremediación en las cuales se puede emplear *Eichhornia crassipes*:

Fitoextracción. Esta técnica se basa en la absorción de contaminantes por medio de estructuras en sus raíces como la rizodermis y córtex, acumulando dichos contaminantes en la corteza y núcleo del tallo y en las hojas en tejidos como el epidérmico, el xilema y el floema. Un estudio realizado por Muñoz (2016), demostró la eficiencia de la *Eichhornia crassipes* en la remoción de fósforo, fenoles y nitratos en aguas residuales producidas en una finca cafetera. En dicho estudio se empleó la especie en un prototipo de humedal artificial, el cual arrojó excelentes resultados en la remoción de contaminantes con este sistema de fitorremediación. Se obtuvo disminución de fenoles en un 89%, fósforo total del 71%, nitratos del 87%, neutralización de pH y disminución en la conductividad de un 86,6%. En la figura 2 se muestra el proceso de fitoextracción:

Figura 2.

Técnica de fitoextracción



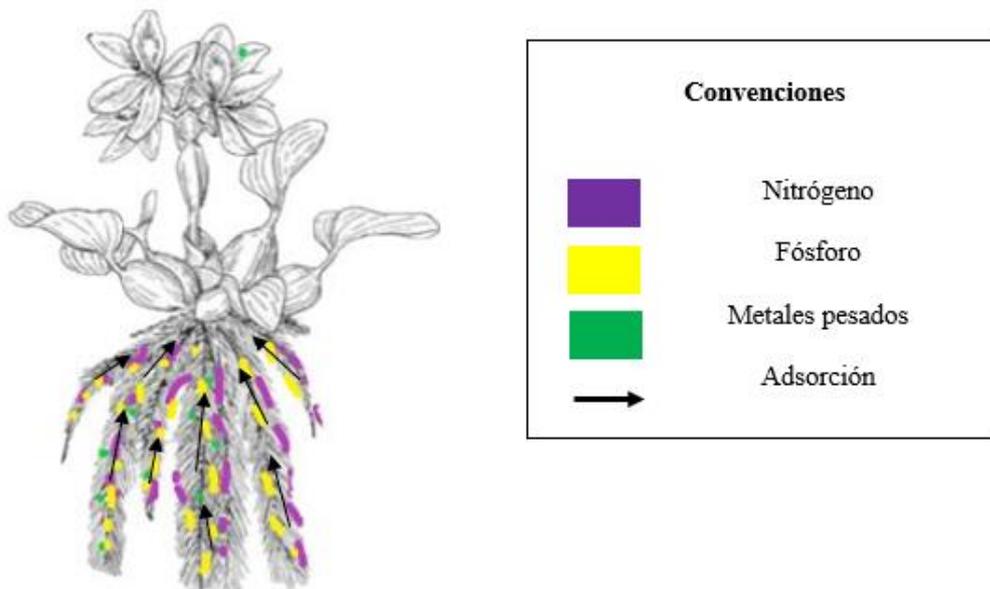
Fuente: University of California, Berkeley.

En la figura anterior se representa el proceso que realiza la planta absorbiendo los contaminantes por medio de sus raíces acumulándolos en tallo y hojas, los puntos de colores simbolizan el recorrido de los contaminantes.

Fitofiltración. Esta técnica utilizada en la descontaminación de aguas superficiales se basa en la adsorción de los contaminantes por su sistema vascular cilindro, sistema dérmico rizodermis, y fundamental córtex, que se encuentran en las raíces de las plantas. Según León (2009), las plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* tienen un papel primordial en estas técnicas, teniendo como funciones principales, la aireación de su sistema radicular, proporcionar oxígeno a los microorganismos en la rizosfera, la absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, asimilar contaminantes y eliminarlos por medio de sus tejidos, a su vez tiene la capacidad de filtrar sólidos a través de su sistema radicular. En la figura 3 se muestra el proceso de fitofiltración:

Figura 3.

Técnica de fitofiltración

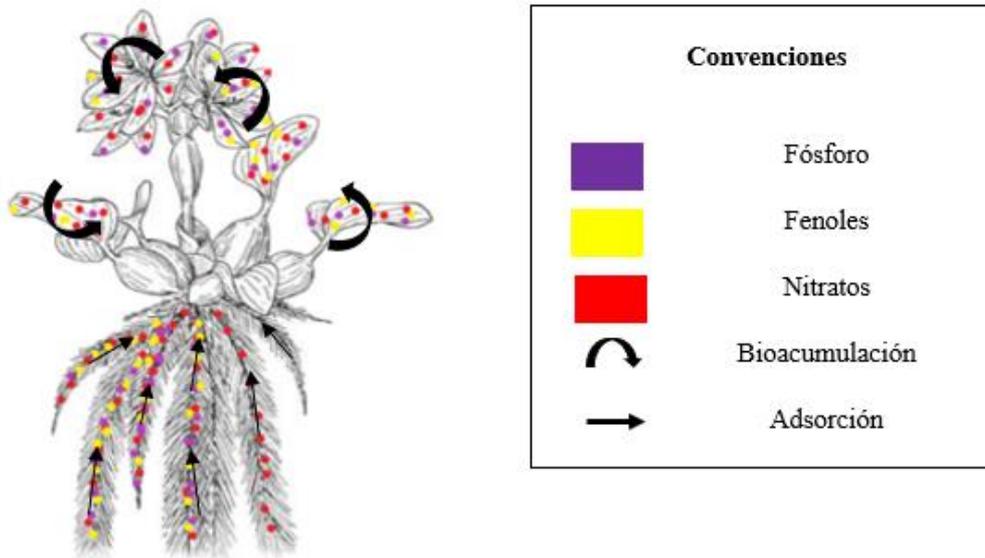


Fuente: University of California, Berkeley.

La figura anterior representa el proceso que realiza la planta en este caso la adsorción de los contaminantes por las raíces de la planta, los puntos de colores simbolizan la acumulación de los contaminantes.

Fitotransformación. Requiere de la producción de enzimas en las plantas que catalizan las sustancias, rompiendo las moléculas haciéndolas más pequeñas y menos tóxicas para alimentarse de estas metabolizándolas en tejidos como tallo y hojas. Miguez et al (2014), realizó un estudio sobre el proceso de bioacumulación de nutrientes y compuestos organoclorados en plantas de *Eichhornia crassipes* en los vertimientos de una fábrica de celulosa, caracterizando sus aguas antes y después del tratamiento con la planta. Se analizaron las concentraciones de los halógenos orgánicos en plantas expuestas a este tipo de vertimientos.

Al finalizar el tratamiento se evidenciaron cambios en las plantas, bioacumulando los compuestos organoclorados en sus hojas. (figura 4), registrando acumulación de 9,4 $\mu\text{g/g}$ frente a 2,1 $\mu\text{g/g}$ en la biomasa y con una remoción de nutrientes cercana al 90%. Los resultados obtenidos sugieren que la Fitotransformación con plantas flotantes es un método potencialmente exitoso.

Figura 4.*Técnica de fitotransformación*

Fuente: University of California, Berkeley.

La figura anterior representa el proceso que realiza la planta catalizando y metabolizando los contaminantes en los tejidos, alimentándose de estos y bioacumulándolos en sus hojas, los puntos de colores simbolizan la bioacumulación de los contaminantes.

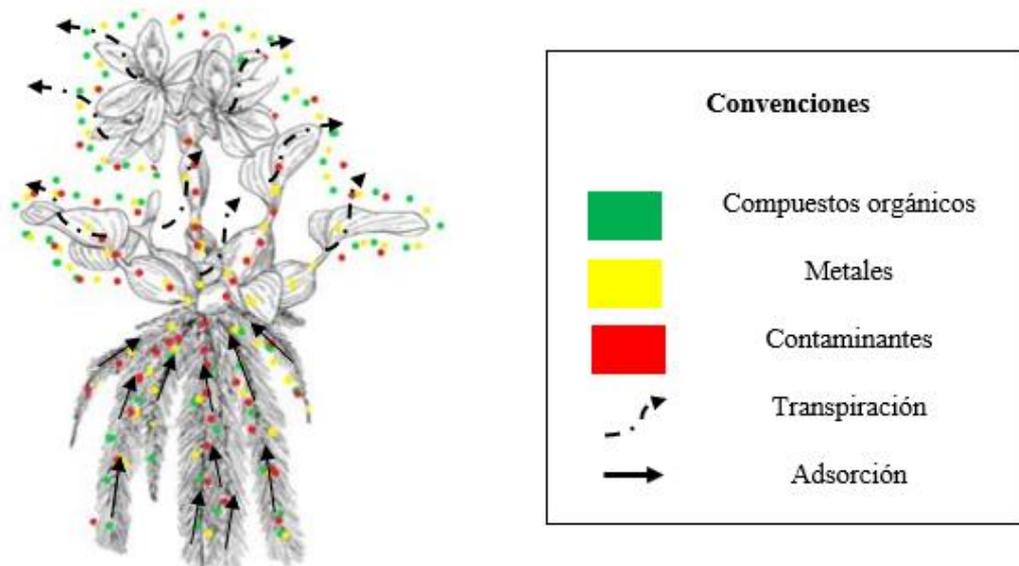
Fitovolatilización. Como lo indica Mentaberry (2011), con esta técnica se busca la absorción de los contaminantes para convertirlos en gases con menor grado de toxicidad, que son liberados a través de las estomas, las estomas son estructuras porosas en las hojas de la planta y su función es el intercambio de gases. los compuestos orgánicos y metales absorbidos son convertidos y expulsados al aire mediante la transpiración. Compuestos clorados como triclorometano, tetraclorometano, mercurio y selenio son algunos de los contaminantes metabolizados. Según Sridhar et al (2002), la Fitovolatilización es un mecanismo por el cual las plantas convierten un contaminante en una forma volátil, eliminando así la afectación del agua. Se cree que las plantas en asociación con los

microorganismos pueden convertir el selenio en seleniuro de di metilo, que es una forma menos tóxica y volátil de selenio. Por esto la Fitovolatilización llega a ser un medio útil y de bajo costo en la eliminación del selenio.

Como lo señala Rodriguez (2015), la capacidad de algunas plantas en el proceso de Fitovolatilización es alta para eliminar de su organismo, compuestos xenobióticos en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con BTEX, en este proceso se tomaron mediciones del aire circundante a las plantas encontrando concentraciones de BTEX de 14,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 12,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1,61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para benceno, tolueno y etilbenceno. Esto demostró que algunas plantas macrófitas están capacitadas para absorber contaminantes como BTEX y expulsarlos en forma de gas a la atmosfera. En la figura 5 se muestra el proceso de fitovolatilización:

Figura 5.

Técnica de fitovolatilización



Fuente: University of California, Berkeley.

La figura anterior representa el proceso que realiza la planta por medio de la absorción de contaminantes convirtiéndolos en gases con menor grado de toxicidad, que son liberados a través de las hojas; mediante la transpiración al medio ambiente, los puntos de colores simbolizan la absorción y liberación de los contaminantes.

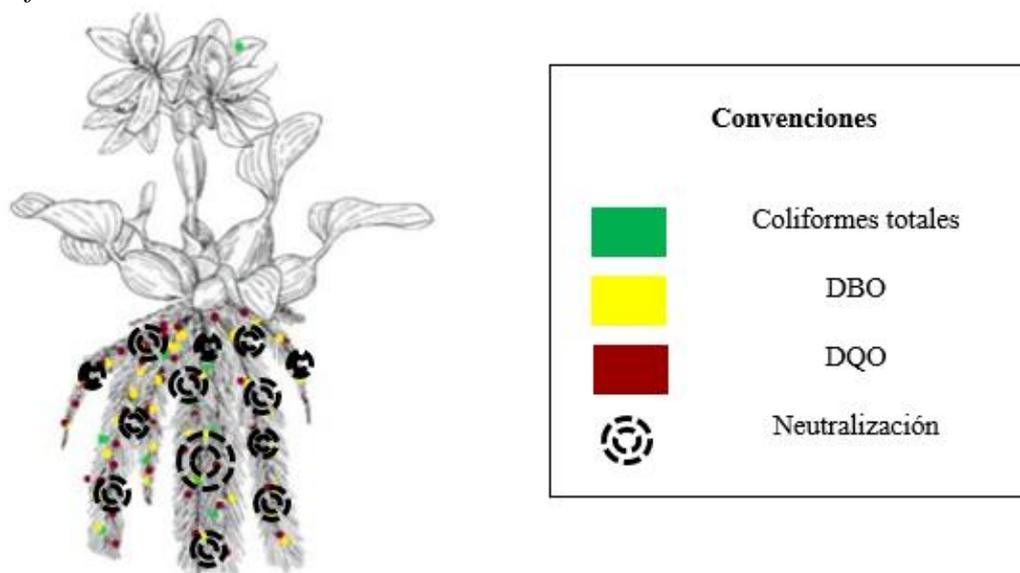
Fitorrestauración. Esta técnica se utiliza para la remoción de contaminantes en aguas provenientes de actividades agropecuarias y domésticas, es un proceso de purificación de aguas residuales en el cual actúan bacterias que se desarrollan en las raíces de las plantas, formando colonias. dichas bacterias adelantan el proceso de remediación desactivando las sustancias tóxicas por solidificación absorción o precipitación. Se han desarrollado trabajos que involucran a la especie *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas resultantes de la cría de cerdos, plantas de lácteos e ingenios azucareros. Valderrama (1996), indica que para su investigación tomó el efluente de un sistema de lagunas de oxidación de una agroindustria en la Sabana de Bogotá, dicho sistema posee albercas que reciben residuos líquidos de una industria láctea y el estiércol de una granja porcícola. Los dos efluentes son tratados anticipadamente por separado en un sistema de flotación de aire disuelto (DAF), para remover grasas.

El agua residual contenía especialmente materia orgánica descompuesta, cloruros concentrados debido a vertimientos de salmueras y aguas producto del proceso de lavado de quesos, y altas concentraciones de nutrientes, provenientes del estiércol de los cerdos. Se utilizó *Eichhornia crassipes* durante 9 semanas, con un tiempo de retención de 8 días y una alimentación discontinua, caracterizando cada semana el agua de cambio antes de pasar por el tratamiento con las plantas, al cabo de ocho días, antes de la nueva alimentación, se caracterizó una muestra. Se evaluaron parámetros como pH, DQO, coliformes totales y

fecales, DBO soluble, y SST. En términos generales la especie fue eficiente en la regulación y neutralización de los parámetros anteriormente nombrados. Gonzales (2010), afirma que esta técnica también fue aplicada en minería logrando una considerable reducción de hierro, cobre y manganeso y como alternativa se puede enfocar en el tratamiento de sedimentos de estas aguas ya que allí se acumulan los metales pesados. En la figura 6 se muestra el proceso de fitorrestauración:

Figura 6.

Técnica de fitorrestauración



Fuente: University of California, Berkeley.

La figura anterior representa el proceso que realiza la planta de regulación y neutralización del pH, la remoción de coliformes totales, DBO, DQO y sólidos suspendidos totales por medio de sus raíces, los puntos de colores simbolizan la regulación y neutralización de los contaminantes.

En Colombia desde hace algunos años se ha venido experimentando e implementando con la especie debido a su potencial en el tratamiento y remoción de metales pesados,

brindando excelentes resultados en industrias como la galvanotécnica, aluminio o curtiembres, o en aguas residuales domésticas. Para mejorar su desempeño biorremediador se han complementado las técnicas de fitorremediación con el uso de humedales artificiales de flujo superficial, subsuperficial horizontal y vertical, estos humedales permiten el crecimiento de la planta ya que ofrecen condiciones ideales como la temperatura que es de gran importancia para su metabolismo. Dichos humedales se basan en los humedales naturales acercándose a sus principios ecológicos; en palabras de Arroyave (2004), los humedales artificiales son un sistema ingenieril diseñado para simular los procesos que ocurren en la naturaleza, pero en un ambiente controlado

A continuación, se presenta la tabla 2 con una síntesis de las técnicas contaminantes y partes de la especie *Eichhornia crassipes* usada en procesos de fitorremediación.

Tabla 2.*Técnicas de fitorremediación con Eichhornia crassipes*

Técnica	Contaminante	Parte de la planta
Fitoextracción	Según Muñoz (2016), con esta técnica se extraen los siguientes contaminantes. Fósforo, fenoles y nitratos, cadmio, mercurio, cobalto, cromo, níquel, plomo, selenio, zinc.	Absorción de contaminantes por medio de sus raíces acumulándolos en tallo y hojas
Fitofiltración	Según León (2009), esta técnica puede eliminar nitrógeno y fósforo, filtrar sólidos, isótopos radioactivos, cadmio, mercurio, cobalto, cromo, níquel, plomo, selenio, zinc.	Absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, asimilar contaminantes y eliminarlos por medio de sus tejidos, a su vez tiene la capacidad de filtrar sólidos a través de su sistema radicular.
Fitotransformación	Según Miguez et al (2014), la técnica metaboliza compuestos organoclorados, halógenos orgánicos, nitrobenzono, TNT, nitrotolueno, compuestos clorados, pesticidas fosfatados, nitrilos, fenoles.	Metabolización de los contaminantes en sus tejidos y bioacumulación en las hojas
Fitovolatilización	Según Rodríguez (2015), la técnica logra absorber contaminantes como tetraclorometano y triclorometano), mercurio, selenio, BTEX (benceno, tolueno y etilbenceno)	Absorción de contaminantes por sus raíces y liberación de gases con menor grado de toxicidad a través de las hojas, mediante transpiración
Fitorrestauración	Según Arroyave (2004), la técnica permite controlar pH, DQO, coliformes totales y fecales, DBO soluble, y SST, hierro, cobre, manganeso, fenoles y compuestos clorados	Adsorción de contaminantes por medio de sus raíces evitando su movilidad

Fuente: Autor

Estado del arte del uso de la fitorremediación con Eichhornia crassipes a nivel mundial

A nivel mundial el tratamiento de aguas a través de sistemas alternativos con plantas acuáticas se ha convertido en un programa sostenible y de gran importancia como opción en tratamientos terciarios. El gran potencial depurador de la especie *Eichhornia crassipes*, ha generado según Araque et al (2018), gran acogida para tratamientos en humedales artificiales que cuentan con baja cantidad de contaminantes como las aguas residuales domésticas. Así mismo se ha implementado en el tratamiento de vertimientos resultantes de la industria metalúrgica, agrícola y minera entre otras.

Durante la investigación, se pudo identificar que la fitorremediación está tomando fuerza en diferentes países debido a su efectividad y bajo costo, como una alternativa biológica, sostenible y eficaz frente a la problemática de la contaminación del agua.

En el caso de la especie *Eichhornia crassipes*, han sido varios los estudios desarrollados sobre esta especie, referentes a su capacidad y eficiencia en la remoción de contaminantes de distinto tipo a nivel mundial.

La fitorremediación es una tecnología verde ambientalmente sostenible, que protege la conservación de los ecosistemas sin generar gases de efecto invernadero, tanto así que, de acuerdo con Barcelo y Charlotte (2003), la Unión Europea y Estados Unidos destinan considerables recursos para la investigación en esta área.

Eficiencia de *Eichhornia crassipes* en aguas residuales domésticas.

La eficiencia de la macrófita *Eichhornia crassipes* en la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas ha tenido varios estudios a nivel mundial.

En el estudio realizado por Perales (2017), en el caserío Santa Catalina Moyobamba - Perú, se evaluó la remoción de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas

por medio de la Fitorrestauración. Se realizaron mediciones en 3 pozos diferentes para determinar temperatura del lecho, pH y parámetros químicos como DBO, DBQ, aceites y grasas. En dicho estudio se tomó como control los datos preliminares a la siembra de las plantas, la cual se realizó a los 40 días, determinando temperatura estable del lecho acuático promedio de 28,6°C, pH neutro en los 3 pozos de estudio, también se realizaron 3 muestreos para determinar los parámetros químicos antes del sembrado, a los 40 días y 86 días del sembrado de las plantas.

Los resultados en la remoción de DBO5 en los 3 pozos fue entre el 94,44 % y 95,24 %, DQO entre el 92,69% y 93,03 %, aceites y grasas entre el 94,41 % y 94,91 %. Perales (2017), además demuestra, que la especie posee una adaptación adecuada y una respuesta positiva a las condiciones ambientales.

Sarango y Sánchez (2016), en Ecuador, desarrollaron una investigación a partir de la construcción de dos biofiltros con *Eichhornia crassipes*. Para ello utilizaron arena, grava, gravilla, y piedra pómez como lecho, para tratar aguas residuales domésticas. Se realizó una identificación fisicoquímica y microbiológica inicial del agua, y se analizó cada semana de tratamiento para establecer las concentraciones y porcentajes de remoción en parámetros como DQO, DBO 5, Aceites y grasas, Sólidos totales, Sólidos suspendidos, nitrógeno total, hierro y fósforo. En la investigación Sarango y Sánchez (2016), calcularon los porcentajes de degradación usando *Eichhornia crassipes*, entregando los siguientes resultados. Para aceites y grasas 91,58 %, DQO 89,24 %, DBO5 91,96 %, fósforo total 96,34 %, nitrógeno total 95,68 % sólidos totales 95,87 %, sólidos suspendidos 96,72 %, hierro 89,30 %.

Como lo explica Rodríguez et al (2010), en su investigación desarrollada sobre humedales artificiales, bajo la técnica de Fito restauración en la laguna de Fúquene ubicada

en la región cundiboyacense de Colombia, “los humedales artificiales presentan resultados de remoción de materia orgánica (DBO5) de entre 70% y 86% al utilizar *Eichhornia crassipes*. Durante la experimentación se observó que, los valores de pH del agua se mantenían en un rango de 6 a 8,0, favoreciendo la estabilización de la materia orgánica dentro del sistema biológico”.

En todos los casos citados anteriormente, la eficiencia de la planta *Eichhornia crassipes* fue similar, por lo que se puede afirmar que la especie mejora las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua tratada, obteniendo resultados superiores al 89% de remoción dependiendo del contaminante.

En general las técnicas de fitorremediación en la que se incorporan plantas de la especie *Eichhornia crassipes* tiene un excelente desempeño en la remoción de parámetros fisicoquímicos y metales pesados. De acuerdo con lo descrito por Quispe (2017), en su estudio hecho en la laguna de la Universidad Peruana Unión, la eficiencia en la remoción de los parámetros fisicoquímicos utilizando la planta *Eichhornia crassipes* fue 31% en la remoción de conductividad, temperatura, sólidos totales, oxígeno disuelto, pH, fosfatos, turbiedad, DQO y DBO5.

Eficiencia de *Eichhornia crassipes* en la remoción de metales pesados

La capacidad de remoción de la especie *Eichhornia crassipes*, en vertimientos industriales contaminados con diferentes sustancias también ha sido abordada por varios autores. En la investigación realizada por Carrión et al (2012), se evaluó el uso potencial del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como planta acumuladora de metales en los canales de Xochimilco México, para lo cual se midió la concentración de un metaloide (As) y 14 metales (Co, V, Cd, Fe, Sr, Cr, Cu, Pb, Al, Zn, Sn, Mn, Ti, Ni) en la estructura aérea y

submarina de la planta. Se encontró que la estructura subacuática bioacumuló mayores concentraciones de metales que los brotes; los resultados mostraron que el jacinto de agua de Xochimilco podría usarse como planta remediadora de metales, ya que tienen la capacidad de acumular al menos 1000 $\mu\text{g/g}$ de Cu, Co, Ni, Cr, y Pb; 10 000 $\mu\text{g/g}$ de Mn y 100 $\mu\text{g/g}$ de Cd y As, sin embargo, requiere ser removido periódicamente de los canales.

Otro estudio realizado en Ecuador por Paredes (2015), determinó que la especie *Eichhornia crassipes* posee una excelente remoción del mercurio por medio de la técnica de fitofiltración. Para esta investigación se expuso la planta a concentraciones entre las 0,05 a 0,5 partes por millón (ppm), en 3 niveles de pH: ácido, neutro y básico. Los resultados arrojaron que la más alta eliminación del mercurio se alcanzó en medio básico, con una eliminación promedio de 94,68%. También se estudió la capacidad que tiene la macrófita en cuanto a la remoción de mercurio cada 60 minutos, durante un lapso de 11 horas, determinando que tuvo una mayor remoción de mercurio en las primeras tres horas. Los hallazgos de este trabajo son significativos teniendo en cuenta que, el mercurio es un metal altamente tóxico para los individuos de la cadena alimenticia, y se transfiere a medios acuáticos y atmosféricos.

Por otro lado, en un estudio desarrollado por Ortega y Sánchez (2019), sobre las técnicas de fitorremediación en aguas industriales contaminadas con cromo, como tratamiento adicional en aguas residuales de la industria galvano técnica en Colombia, se expuso a individuos de la especie *Eichhornia crassipes* a concentraciones de cromo de 40 y 70 mg/L, durante diez días, los datos medidos permitieron determinar un nivel de remoción cercano al 80 % en un lapso de 3 días.

Según Poma y Valderrama (2014), con una concentración de 5 mg/L de cromo, la planta *Eichhornia crassipes* subsiste por un tiempo suficiente para cumplir su labor detoxificante, lo que se considera un hallazgo importante, teniendo en cuenta que solo algunas plantas poseen la capacidad de soportar altos niveles de metales pesados. Sin embargo, la especie *Eichhornia crassipes* es una de las pocas plantas que pueden acumular metales tóxicos, sin perturbar su metabolismo.

La especie tiene mucho que ofrecer, tomando las precauciones necesarias para el control de su crecimiento. La planta *Eichhornia crassipes* brinda grandes beneficios al ser humano y el medio ambiente, no solo en cuanto al tratamiento y depuración de aguas residuales domésticas e industriales sino también en tratamiento de suelos y aire, ya que puede ser usada para generar energías limpias gracias a su versatilidad. Igualmente, se pueden obtener productos y subproductos de esta especie, aprovechando su ciclo de vida. Esta especie se debe tomar como una aliada en materia ambiental, implementando de manera adecuada procesos de fitorremediación, en poblaciones que no cuentan con una PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales) para el tratamiento de las aguas producidas en sus actividades domésticas e industriales. La educación de las comunidades frente al valor del agua y los beneficios que el cuidado de esta trae, también son aspectos relevantes en el cumplimiento de la normatividad vigente y en la protección de los ecosistemas acuáticos del país.

Usos potenciales y posibles riesgos asociados a la implementación de técnicas de fitorremediación con *Eichhornia crassipes*

La fitorremediación es un proceso que permite recuperar aguas contaminadas por medio de diferentes especies que poseen la capacidad de bioacumular y procesar diferentes

contaminantes. Como se viene mencionando, la macrófita *Eichhornia crassipes* tiene amplios usos en la fitorremediación de aguas, sin embargo, además de las potencialidades que presenta la especie también se pueden encontrar algunos riesgos asociados a la implementación de estas técnicas.

Riesgos. Dentro de los posibles riesgos asociados encontramos que la fitorremediación no impide la lixiviación o percolación de contaminantes a las aguas subterráneas en su totalidad. Estas técnicas pueden llegar a tener efectos negativos en los ecosistemas debido a la bioacumulación de sustancias nocivas.

Según Bradl (2005), durante el proceso de descontaminación de las aguas la planta llega a acumular un alto porcentaje de metales pesados, teniendo en cuenta que dicha macrófita es consumida por algunos animales en la base de la cadena alimenticia, y estos a su vez son presa de depredadores secundarios, los metales pesados serán asimilados en cada consumidor afectando la salud de los ecosistemas.

Al ser una especie con alta tasa de crecimiento puede invadir ecosistemas en poco tiempo, si no se realiza un manejo adecuado de la planta. Se pudo determinar que la mejor técnica para controlar su crecimiento es la implementación en humedales artificiales.

También se estima, que la presencia de esta especie está relacionada con la producción de insectos y vectores, lo que genera riesgos de salud pública por transmisión de enfermedades como el dengue, zika, malaria, chikunguña entre otras, que pueden llegar a afectar a la comunidad aledaña.

Potencialidades. La fitorremediación es un proceso de descontaminación de baja inversión, no necesita operación solo monitoreo, su consumo energético es sustentado por la luz solar y mejora la calidad ambiental. Este tipo de tecnologías es muy rentable comparada

con otras que llegan a ser bastante costosas. (Sridhar S et al, 2002), indica que la técnica se potencializa cuando se alía con tecnologías como humedales artificiales de flujo subsuperficial y superficial en el tratamiento de aguas residuales, ya que en ellos se adelantan procesos como transformación biológica de materia orgánica por intervención de bacterias aerobias y anaerobias, que eliminan sustancias por absorción, filtración y sedimentación, algunos sólidos suspendidos por sedimentación y filtración, eliminación del nitrógeno por asimilación y volatilización, procesos de nitrificación y desnitrificación, reducción de fósforo por precipitación, sedimentación, absorción y asimilación, todos estos procesos mediados por microorganismos y las mismas plantas.

En el caso de los metales pesados, estos son eliminados por absorción y sedimentación a través de las raíces de la planta y detritos, y los demás contaminantes orgánicos por absorción, biodegradación y volatilización.

Arias y Brix H (2003), también incluye eliminación de patógenos por radiación U.V, sedimentación, secreción de antibióticos de las plantas o depredación por otros organismos.

De igual manera, Cáseres (2019), sostiene que los tratamientos alternativos sostenibles como la fitorremediación, aportan a la calidad de vida de la población mundial. Es muy importante que los cuerpos de agua se mantengan saludables y que las aguas que se entregan a los ríos sean de una calidad aceptable para que el ciclo del agua pueda realizar su trabajo, descontaminando de manera natural este preciado líquido, ocasionando un menor impacto al medio ambiente.

La macrófita *Eichhornia crassipes*, según Díaz et al (2013), posee gran capacidad de acumulación lo que les genera un alto potencial remediador por su tolerancia a los metales y a otras sustancias contaminantes.

En la tabla 3, se presentan las ventajas y desventajas que tiene el uso de las técnicas de fitorremediación en aguas residuales domésticas e industriales.

Tabla 3.

Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es una tecnología totalmente sustentable • Es efectiva para el tratamiento de diferentes tipos de contaminantes. • Se puede aplicar a aguas con concentraciones de contaminación moderada o baja. • No requiere de personal capacitado para su manejo y tiene bajos costos de operación. • Es de bajo impacto ambiental • No produce desechos contaminantes • Es paisajísticamente agradable por la belleza de sus plantas y flores. • Puede tratar una gran diversidad de contaminantes. • Es reciclable (agua, biomasa, metales) • Sirven como hábitat de vida silvestre. • Vargas (2018), incluye, la remoción de, DBO, SST y DQO metales, compuestos orgánicos, puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. • Puede ser construida y reparada con materiales localmente disponibles, con bajos costos de operación • No requiere energía eléctrica. • Si se diseña y mantiene correctamente no genera ningún problema con malos olores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las sustancias que se acumulan en las hojas de las plantas pueden ser descargadas al medio ambiente puesto que esta especie es perenne • Algunos contaminantes pueden incrementar su solubilidad migrando y causando un mayor daño ambiental. • Los humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno. • El fósforo, algunos compuestos orgánicos, y los metales permanecen en el sedimento y se acumulan con el tiempo. • En climas fríos se reduce la tasa de remoción de DBO, la nitrificación y desnitrificación. • En humedales de flujo superficial se puede ver limitado el potencial de nitrificación del amoníaco debido a que el agua es anóxica. • De acuerdo con Vargas (2018), los insectos, mosquitos y vectores transmisores de enfermedades representan un potencial problema de salubridad. • Se debe esperar a que las macrófitas se adapten y crezcan para trabajar a máxima capacidad. • Requiere experiencia en construcción y un excelente diseño.

Fuente: Autor.

Capítulo 2: Aprovechamiento de la especie *Eichhornia crassipes* como materia prima

La especie *Eichhornia crassipes* presenta aplicaciones importantes en la depuración de agua, además de otros usos que han sido documentados para esta especie en procesos de biorremediación de suelos, compostajes, bio-abonos, como biomasa seca, (que es procesada para obtener briquetas), bioetanol y biogás, adicionalmente en la elaboración de papel artesanal.

En las últimas décadas se han buscado alternativas para aprovechar los recursos existentes de manera sostenible, llegando a tomar materiales que abundan en la naturaleza (Tolú, 2012). como es el caso de la especie *Eichhornia crassipes* que es una planta de gran crecimiento y propagación, y que al no ser controlada ocupa los cuerpos de agua en un corto lapso causando problemas a los ecosistemas.

Buscando contrarrestar su expansión se han creado técnicas para el aprovechamiento de la especie obteniendo beneficios de ella, algunos de estos proyectos son: energéticos, artesanales, obtención y procesamiento de fibras naturales, alimento para especies animales, biocombustibles, bio gas, materiales de construcción, compostajes, bio sólidos, entre otras aplicaciones.

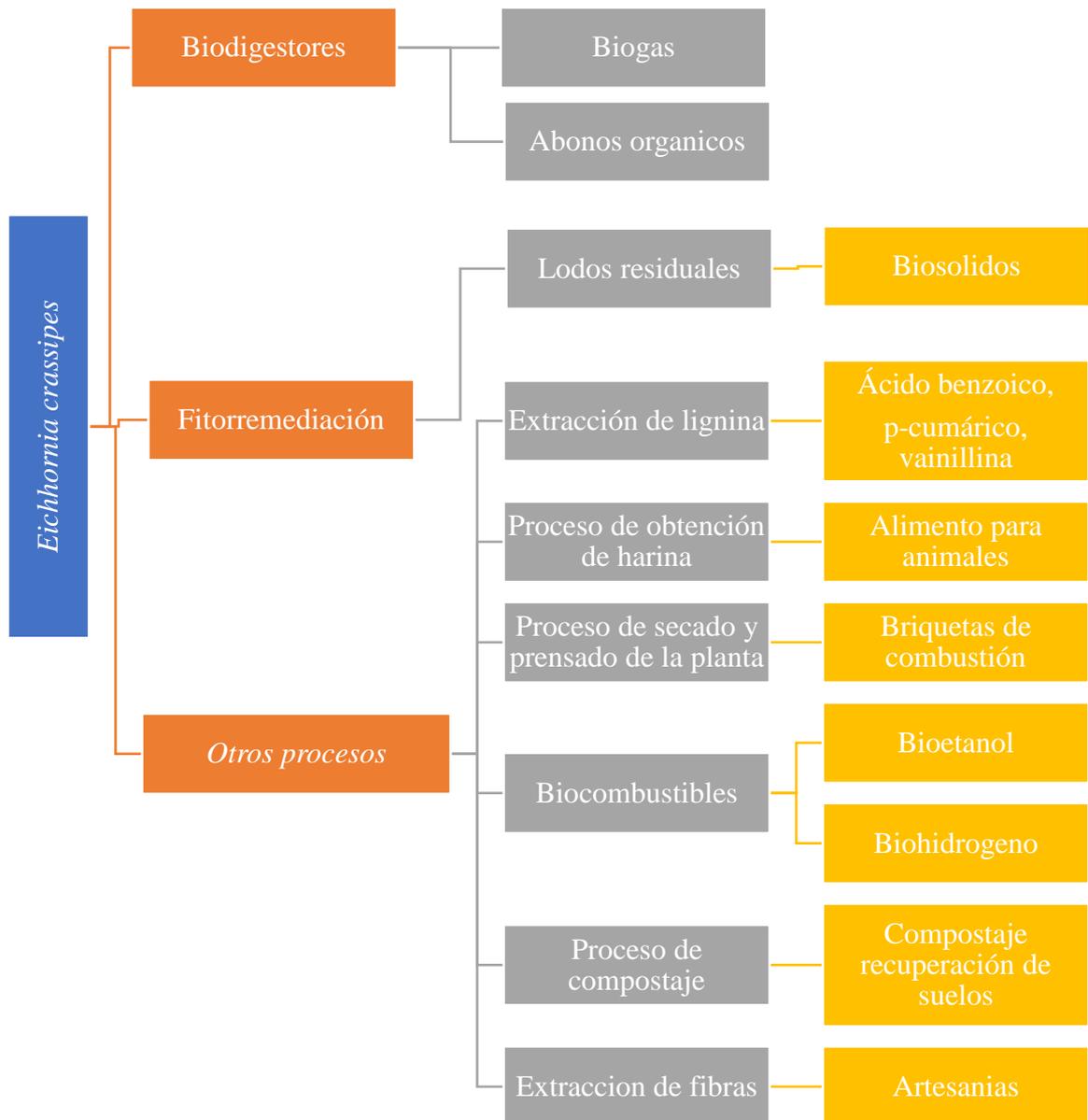
Aprovechamiento de *Eichhornia crassipes* en las diferentes industrias

La especie *Eichhornia crassipes* ha demostrado muchas cualidades aprovechables, no solo en las técnicas de fitorremediación en aguas residuales, sino también en diversos usos después de su vida productiva, toda vez que de esta planta se adquieren materias primas con las que se desarrollan productos y subproductos. Para el aprovechamiento de esta especie se han desarrollado tecnologías que permiten la obtención de compuestos útiles en diferentes industrias. A continuación, veremos los usos más comunes.

En la figura 7, se pueden observar de forma resumida, las formas de aprovechamiento de la planta *Eichhornia crassipes*, sus usos en fitorremediación, en biodigestores y finalmente, su empleo en otros procesos.

Figura 7.

*Aprovechamiento de *Eichhornia crassipes**



Fuente: Autor.

Extracción de lignina. La Lignina es un polímero con alto peso molecular el cual en su base estructural contiene unidades de fenil-propano, debido a esto se pueden obtener gran variedad de compuestos como: vainillina, p-cumárico, ácido benzoico, entre otros. Hernández et al (2015) estiman que, mediante un tratamiento con base en ácidos y solventes orgánicos optimizados, la lignina que se obtiene de la macrófita por el método de peróxido alcalino es mayor en un 36% en relación con la obtenida con la paja de cebada, 83,3% superior al rastrojo de maíz y 9,9% mayor a la obtenida con el bagazo de caña, por lo cual es una buena opción para extraer compuestos alifáticos de alto valor agregado.

Alimento para animales. Párraga A et al (2018), evaluaron las características nutritivas de la especie *Eichhornia crassipes* con el propósito de considerar su viabilidad como alimento, teniendo en cuenta que algunos animales la consumen de forma natural. Este estudio halló valores promedios de humedad de 3,12%, grasa 1,7 %, proteína 15,5 %, ceniza 11 % y fibra 15 %, lo que indica que tiene un alto contenido de minerales como potasio, calcio, magnesio, y otros minerales esenciales. A partir de este estudio se concluye que la harina obtenida de esta especie es idónea para la alimentación animal de porcinos, bovinos, peces y aves de corral. Es importante tener en cuenta que las plantas usadas para este tipo de aprovechamiento deben provenir de fuentes hídricas no contaminadas debido a que la especie posee gran capacidad de absorber o bioacumular metales pesados altamente tóxicos.

Biodigestores. Un biodigestor es un contenedor cerrado en el que se depositan desechos orgánicos con una determinada cantidad de agua; por medio de esta mezcla se produce una fermentación anaerobia de esta materia, generando gas metano y abonos orgánicos ricos en nutrientes. En el estudio de López (2012), se pudo establecer que las hojas de *Eichhornia crassipes* se fermentan fácilmente produciendo un abono de buena calidad.

Adicional a esto se suma la generación de gas metano o biogás en el proceso, el cual se puede aprovechar para el uso doméstico.

Los procesos anaeróbicos de los biodigestores permiten utilizar desperdicios orgánicos, de la industria, la agricultura y aguas residuales domésticas, para obtener productos como bio gas y bio fertilizante. En Costa Rica, se realizó un estudio con aguas residuales y *Eichhornia crassipes* para determinar la composición química y la carga microbiológica de los lixiviados resultantes de este proceso. Según su autora, Margie (2010), la materia utilizada para la carga incrementó su contenido de nutrientes con el proceso de biodigestión y minimizando las bacterias coliformes y otros contaminantes.

Compostajes. La utilidad de la macrófita *Eichhornia crassipes* en materia de compostajes también se ha estudiado ya que esta planta almacena gran cantidad de microorganismos que realizan la descomposición de materia orgánica. Conforme a lo establecido por Espinosa (2019), los compostajes con *Eichhornia crassipes* se hacen mezclando la planta, recorte de césped, hojarasca, bovinaza, etc. Este compost puede ser utilizado como abono orgánico en procesos de recuperación de suelos, reforestación y abono para plantas ornamentales debido a sus características ricas en nutrientes.

Biosólidos. Los biosólidos son los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales domésticas por la técnica de fitorremediación en humedales artificiales, con la especie *Eichhornia crassipes*. Agudelo et al (2005), afirman que los biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrientes esenciales para las plantas, y pueden ser utilizados como fertilizante o abono, mejorando la tierra y estimulando el crecimiento de las plantas.

El aprovechamiento de la planta *Eichhornia crassipes* a través de los procesos mencionados anteriormente, ha permitido la obtención de biomasa que ofrece una alternativa

energética a pequeñas comunidades, así pues, de acuerdo con Bustamante (2010), se puede destacar su uso como biogás, briquetas, bioetanol etc. A continuación, se describen algunas de las tecnologías:

Bioetanol: Rodríguez et al (2017), indica que existen varios reprocesos para la obtención de azúcares de *Eichhornia crassipes* tales como la hidrólisis enzimática o química. A partir de estos procesos el azúcar que se obtiene se fermenta produciendo el etanol y dióxido de carbono, posteriormente se pasa por el proceso de destilación cuyo producto es el bioetanol.

Biogás: De acuerdo con Wang y Calderón (2012), se puede obtener gas metano en biodigestores a partir de la mezcla de aguas residuales, *Eichhornia crassipes* y estiércol de cualquier animal, consiguiendo un biogás de buena calidad, el rendimiento del biogás a partir del buchón de agua es aproximadamente de 340 L/g superando al obtenido con forraje de arroz y otros residuos agrícolas. Por esta razón se ha convertido en una materia prima de gran interés.

Briquetas. Las briquetas son un conglomerado o bloque sólido de materia orgánica en este caso de *Eichhornia crassipes* que son utilizadas como combustible en pequeñas poblaciones. Son bastante eficientes gracias a su densidad y son una excelente fuente de energía. Para la fabricación de briquetas a partir del buchón de agua, la materia prima debe pasar por un proceso de secado y molido, posteriormente se mezcla con residuos orgánicos para luego ser prensadas en forma cilíndrica. Según Echeverry (2006), la eficiencia de estas briquetas es de 28,17% mientras que la del carbón es de un 31%, sin embargo, estas briquetas son una alternativa para minimizar el impacto ambiental ya que producen una combustión

más limpia, se evita la tala de árboles, se realiza control de la especie y su fabricación es de bajo costo.

Hidrógeno: Los procesos actuales para la obtención de hidrógeno son de alto costo y dependen de combustibles fósiles para su producción, por esta razón se buscan alternativas sostenibles para la obtención de dicho producto, a partir de materiales orgánicos renovables (biomasa). El buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) es una fuente óptima de biohidrógeno debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, que por medio de procesos químicos llamados hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida se transforma en biomasa rica en glucosa. Para la producción de este gas, Robayo (2019), indica que se fermenta el buchón en un reactor UASB (anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos), teniendo como resultado el biohidrógeno. Por otra parte, Han y Shin (2004), afirman que el biohidrógeno es un combustible limpio, cuenta con un alto rendimiento energético (122 KJ/g), siendo 2,75 veces más alto que los combustibles hidrocarbonados.

Rodríguez et al (2017), confirma que la especie *Eichhornia crassipes* es muy útil para la producción de energías amigables con el medio ambiente como el biogás, bioetanol, biohidrógeno o briquetas de combustión, demostrando que es una materia prima energética con bajos costos de producción debido a su gran proliferación, que se ha venido desaprovechando de manera repetitiva y que puede convertirse en una solución a los problemas energéticos en zonas rurales.

Artesanías. En Colombia el ministerio de comercio, industria y turismo con el apoyo de expertos de la comunidad científica nacional e internacional y con la orientación de expertos diseñadores crearon un paquete tecnológico a partir de la utilización de *Eichhornia crassipes* (buchón de agua) para la producción de artesanías. Cruz (2005), establece que se

espera que los resultados de este trabajo en el campo del biocomercio permitan el aprovechamiento sostenible de esta especie, cuya sobre población genera impactos en el ambiente, y posibilite crear ocupación de mano de obra e ingresos a familias de bajos recursos económicos de la Sabana de Bogotá, por medio de la elaboración de productos como artesanía (tejidos, muebles, paneles para construcción, papel, alfombras, joyas, etc.), que sean de interés en los mercados artesanales nacionales e internacionales.

No solo en Colombia vemos este tipo de artesanías realizadas con *Eichhornia crassipes*, en otros países suramericanos como el Ecuador también se elaboran artesanías con este tipo de fibras. La artesanía va de la mano del desarrollo sostenible aprovechando materiales naturales, generando empleo e ingresos. La artesanía producida con calidad puede competir en mercados internacionales. En la figura 8, se muestran los diferentes usos artesanales dados a la *E. crassipes*. a. Recolección; b. Obtención de fibras; c. Productos artesanales.

Figura 8.

Uso artesanal de E. crassipes. a. Recolección; b. Obtención de fibras; c. Productos artesanales



a. Figura a. tomada de Google imágenes

Recolección *Eichhornia crassipes*



b. Figura b. tomada de Google imágenes

Obtención de fibras

Eichhornia crassipes



c. Figura c. tomada de Google imágenes

Productos artesanales *Eichhornia crassipes*

En la tabla 4, se muestra el rendimiento y la eficiencia de la especie frente a otras materias primas identificando la parte de la planta utilizada en procesos orgánicos.

Tabla 4.

Comparación de la especie con otras materias primas

Aprovechamiento	Rendimiento – ventajas <i>E.</i> <i>crassipes</i>	Otras materias primas	Parte de la planta utilizada
Extracción de Lignina Hernández et al (2015)	36 % mas	Paja de cebada	Tallo
	83.3 % mas	Rastrojo de maíz	Hojas
	9.9 % mas	Bagazo de caña	
Alimento para animales Párraga A et al (2018)	<i>Eichhornia crassipes</i>	Concentrado	Raíz
	Humedad 3.12 %	13.0 %	Tallo
	Grasa 1.7 %	2.5 %	Hojas
	Ceniza 11 %	10 %	
	Proteína 15.5 %	12.1 %	
	Fibra 15 %	12 %	
Biodigestores Echeverry (2006)	Menor tiempo de reacción	Mayor tiempo de reacción	Hojas
Artesanías Cruz (2005)	Fibras naturales Bajo costo	Fibras sintéticas Costo moderado	Hojas
Compostajes Espinosa (2019)	<i>Eichhornia crassipes</i> categoría B restauración de suelos	NTC 5167 Decreto 1287 10/jul/2004	Hojas (Cruz L, 2006)
	Humedad 48.5 %	Humedad Mayor 35 %	
	pH 7.02	pH 4-9	
	Carbono (%) 22.30 %	Carbono Menor 15%	
	Ceniza (%) 55.40 %	Ceniza Mayor 60%	
	Plomo (mg/kg) 9.00	Plomo 300 (mg/kg)	
	Cromo (mg/kg) 90.0	Cadmio 39 (mg/kg)	
	Cadmio (mg/kg) 0.90	Cromo 1200 (mg/kg)	
	Mercurio (mg/kg) 0.41	Níquel 420 (mg/kg)	
	Níquel (mg/kg) 72.0	Mercurio 17 (mg/kg)	
		(Cruz L, 2006)	

Fuente: Autor.

Mediante la tabla 4 se puede identificar, que la elaboración de productos orgánicos, utilizando la macrófita *Eichhornia crassipes* como materia prima, presenta una eficacia de algo más del 90% a nivel de aprovechamiento, considerando que toda su estructura es utilizada en los procesos de extracción y explotación, minimizando así el impacto ambiental toda vez que se reduce en gran proporción los residuos del tratamiento implementado. Esta eficacia en su aprovechamiento anudada a que es una materia prima abundante en la naturaleza genera una notable reducción en los costos de producción de los procesos previamente descritos. De aquí se destaca la producción de alimento para animales, abonos orgánicos y compostajes de buena calidad.

En la tabla 5, se muestra el rendimiento y eficiencia de la especie frente a la producción de biocombustibles en comparación con otras materias primas.

Tabla 5.

Eficiencia de la especie

Aprovechamiento	Rendimiento –Ventajas <i>E. crassipes</i>	Otras materias primas	Parte de la planta utilizada
Biosólidos Agudelo et al (2005)	<i>E. crassipes</i>	Concentración máxima EPA	Lodos resultantes de la fitorremediación
	Arsénico menor de 0.01	Arsénico 75.00	
	Cadmio menor de 0.01	Cadmio 85.00	
	Cobre 271.50	Cobre 4300.00	
	Plomo 170.95	Plomo 840.00	
	Mercurio menor de 1.76	Mercurio 57.00	
	Molibdeno menor de 4.90	Molibdeno 75.00	
	Níquel 86.73	Níquel 420.00	
	Selenio menor de 0.05	Selenio 100.00	
	Zinc 1695.04	Zinc 7500.00 (EPA, 2000)	
Bioetanol Rodríguez et al (2017)	Biocombustible Bajos costos de producción Mayor eficiencia	Combustible fósil Altos costos de producción	Hojas Tallo
Biogás	Biogás <i>Eichhornia crassipes</i>	Gas natural	Hojas

Wang y Calderón (2012)	Fuentes renovables Eficiencia 340 L / g	Fuentes de origen fósiles	
Briquetas Echeverry (2006)	Eficiencia energética <i>Eichhornia crassipes</i> 28.17%	Eficiencia energética carbón 31%	Raíz Tallo Hojas
Hidrogeno Robayo (2019)	Rendimiento energético Biohidrógeno 122 KJ/g	Rendimiento energético Combustibles hidrocarbonados 118.5 KJ/g	Tallo Hojas

Fuente: Autor.

Como se puede determinar en la tabla 5, el proceso de producción de biocombustibles utilizando la especie *Eichhornia crassipes*, representa un menor costo, brindando beneficios a nivel económico, toda vez que sus tiempos de reacción son cortos, así mismo los productos resultantes de estos procesos ofrecen mayor eficiencia en comparación con los productos combustibles obtenidos a partir de otras materias primas.

Es importante mencionar, que los biocombustibles son amigables con el medio ambiente, evitan la contaminación de los ecosistemas y generan menos emisiones tanto en su uso como en su producción.

Conclusiones

El desarrollo de las Fitotecnologías se ha venido perfeccionando a través de los años brindando experiencias positivas al medio ambiente. La macrófita *Eichhornia crassipes* se ha utilizado en diversas técnicas de fitorremediación y aprovechamiento demostrando que es muy eficiente en estos dos campos, en fitorremediación está ubicada en un lugar privilegiado por su alta capacidad remediadora y depuradora. En cuanto a su aprovechamiento en diferentes áreas, ha mostrado un rendimiento excelente debido a su versatilidad y composición, esta especie se presenta como materia prima de calidad de bajo costo y sostenible.

A nivel mundial la fitorremediación con *Eichhornia crassipes* ha arrojado buenos resultados en aguas con altos contenidos de metales pesados (industriales), y en aguas domésticas brinda excelentes resultados en remoción de SST materia orgánica DBO, DBQO, entre otros parámetros fisicoquímicos, esta tecnología es económica y altamente efectiva. Es recomendable construir humedales artificiales para el correcto tratamiento de dichas aguas, garantizando que la devolución a los ríos sea menos impactante, descontaminando y permitiendo la conservación de otras especies, las técnicas que se abordaron en esta monografía para el tratamiento de aguas son:

Fitoextracción: Absorción iones metálicos por las raíces de las plantas acumulándose en tallos y hojas, es ideal para tratar aguas residuales de las industrias metalúrgicas, fábricas de cerámica, cementos e hidrocarburos.

Fitotransformación: Metabolización en tejidos y bioacumulación en las hojas ideal para el tratamiento de aguas provenientes de la agricultura y minería.

Fitofiltración: Absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, asimilación y eliminación de contaminantes por medio de sus tejidos, a su vez tiene la capacidad de filtrar sólidos a través de su sistema radicular, es muy recomendada para el tratamiento de aguas provenientes de forjas y fundiciones, industria eléctrica cables e hilos conductores, fabricación de estructuras, industria automotriz, fabricación de aparatos domésticos, equipos de oficina, joyería, fabricación de envases para bebidas o alimentos, fabricación de pinturas, industria pirotécnica, industria del petróleo y en la industria del caucho.

Fitovolatilización: Absorción de contaminantes para convertirlos en gases con menor grado de toxicidad, que son liberados a través de las hojas, esta técnica es recomendada para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio y selenio.

Fitorrestauración: La planta se encarga de inmovilizar los contaminantes en su raíz, este proceso reduce el traslado de los contaminantes significativamente, disminuyendo los efectos al medio ambiente, por esto es recomendada para aguas residuales domésticas.

En cuanto a los aprovechamientos de la especie *Eichhornia crassipes* los más importantes a nivel mundial son: la generación de energías sostenibles como el biogás, bioetanol, hidrógeno y briquetas de combustión, ya que aportan al desarrollo de las comunidades brindando una alternativa energética limpia y de bajo costo, beneficiando la economía de la comunidad y la estabilidad del medio ambiente.

Los biofertilizantes y compostajes provenientes de la especie *Eichhornia crassipes* son recomendados como abonos orgánicos de excelente calidad, debido a sus altas concentraciones de nutrientes, son muy efectivos en el mejoramiento de tierras áridas.

Recomendaciones

A partir de los estudios realizados sobre la especie *Eichhornia crassipes*, se ha podido establecer que, aunque es una especie que ha invadido diferentes ecosistemas y se percibe como una plaga, también ofrece importantes beneficios en cuanto a la remediación de aguas contaminadas en especial en aguas industriales, ya que puede procesar metales pesados con una gran eficiencia, al igual que en la eliminación de materia orgánica en aguas residuales domésticas.

Con la implementación de las técnicas de fitorremediación, es posible llegar a un tratamiento básico pero efectivo que permite a las poblaciones más vulnerables cuidar sus reservas de agua y aprovechar una materia prima de origen natural, controlando la propagación y reciclando la planta para darle diferentes usos. Sin embargo, la razón principal es el cuidado del agua, ya que se ha convertido en un objetivo de desarrollo sostenible en las últimas décadas. Según la organización de las naciones unidas ONU, se incluyó dentro de políticas económicas, ambientales y sociales a nivel mundial, reconociendo así que el agua es el núcleo del desarrollo sostenible y es fundamental para los ecosistemas, producción de alimentos, energía, es esencial para la supervivencia de los seres vivos y para el progreso socioeconómico de un país, el objetivo de desarrollo sostenible (ODS 6) agua limpia y saneamiento, pretende garantizar la accesibilidad del agua y su saneamiento de forma sustentable, contribuyendo a cumplir 7 de los objetivos de desarrollo sostenible que tienen injerencia con el agua.

Es muy importante continuar realizando investigaciones sobre fitorremediación en cuerpos de agua con diferentes especies de plantas acuáticas ya que existen varias con capacidades biorremediadores complementando estas técnicas con nuevas tecnologías para

optimizar y potencializar sus propiedades y características. La adopción de estas tecnologías con organismos vivos permite devolver el agua en buenas condiciones minimizando el impacto causado por las acciones antrópicas.

Se recomienda que la especie *Eichhornia crassipes* sea utilizada en humedales artificiales para evitar su propagación controlando su crecimiento y al final de su ciclo remediador pueda ser retirada periódicamente para darle alguno de los usos mencionados anteriormente

Referencias

- Agudelo Betancur, L. M., Macias Mazo, K. I., & Suárez Mendoza, A. J. (junio de 2005). Fitorremediación: La alternativa para absorber metales pesados de los bioslidos. *Revista Lasallista de Investigación*, 2, 57-60. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520110>
- Ansola González, G. (2001). Utilización de humedales artificiales en la depuración de aguas residuales. 145-170. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=596741>
- Araque Niño, I. D., Britto Aponte, M. C., Cuellar Rodríguez, L. A., & Perico Granados, N. R. (2018). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista de Tecnología*, 17, 37-48. Obtenido de <https://doi.org/10.18270/rt.v17i1.2950>
- Arias , C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. (U. M. Granada, Ed.) *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>
- Arroyave, M. D. (julio de 2004). La lenteja de agua (Lemma Minor L): una planta acuática promisoriosa. *Revista EIA*, 33-38. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100004
- Arteaga Carrera, J., W. Cuéllar, D. Ramírez, S. Ríos y S. Giraldo. 2010. Manejo de plantas acuáticas invasoras en embalses de epm. caso: buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) en el embalse porce ii, antioquia-colombia. *Revista EMP*, 3: 22–35
- Bradl, H. (Diciembre de 2005). Chapter 1 Sources and origins of heavy metals. *Journal Interface Science and Technology*, 1–27. doi: 10.1016 / S1573-4285 (05) 80020-1
- Bustamante Sanint , S. (2010). *Modelado de especies invasoras, caso de estudio : pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (Eichhornia crassipes)*. (P. U. Javeriana, Ed.) Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana : <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/921>
- Carrión, C., Ponce de León, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., & Vanegas, C. (Agosto de 2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Revista Agrociencia*, 609-620. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000600007

- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. (Diciembre de 2019). Plan de Prevención Manejo y Control del buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) para la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Obtenido de <http://www.car.gov.co/uploads/files/5ef52b2827af5.pdf>
- Cruz , C. I., & Díaz López, L. d. (2005). *Formulación del proyecto de diseño de un paquete tecnológico para la utilización de especies consideradas plaga en la producción de artesanías*. (2. Bogotá : Artesanías de Colombia, Ed.) Obtenido de Artesanías de Colombia: <https://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/handle/001/3793>
- Cruz Farak , L. O. (Febrero de 2006). *Compostaje del buchón de agua como alternativa de gestión. Primeros resultados*. Obtenido de Universidad de los Andes: repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9142/u271349.pdf
- Daniel, T. F., & Acosta Castellanos, S. (Noviembre de 2003). *Flora del Bajío y de regiones adyacentes*. Obtenido de <http://inecolbajio.inecol.mx/floradelbajio/documentos/fasciculos/ordinarios/Acanthaceae%20117.pdf>
- Delgadillo López, A. E., González Ramírez, C. A., Prieto García, F., Villagómez Ibarra, J. R., & Acevedo Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Journal Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 597- 612. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext
- Díaz C, S. E., Zamora C, E. R., Caselles Osorio, A., & León P, J. A. (2013). Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un campo de petróleo colombiano. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 11, 53-63. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3831>
- Echeverry Gil , J. S. (2006). <https://repositorio.uniandes.edu.co>. *Diseño de máquina prensadora para hacer briquetas de biomasa* . Bogotá, Bogotá: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/25606/u275512.pdf?sequence=1>
- Espinosa Merchán , L. F. (2019). *Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mezclados con buchón de agua, por medio del compostaje*. Obtenido de Universidad Santo Tomás : <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/18369>

- Faith Vargas , M. (2010). *Evaluación de la calidad de la química y microbiología del afluente de dos biodigestores a escala en el ITCR para su utilización como bioabono en ensayos de invernadero*. Obtenido de Repositorio Tecnológico de Costa Rica: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/2876>
- Fernández Bremauntz, A., Yarto Ramírez, M., & Castro Díaz, J. (2 de Marzo de 2005). *Las sustancias tóxicas persistentes en México*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de http://centro.paot.org.mx/documentos/ine/sustancias_toxicas_persistentes.pdf
- Garzón Zúñiga, M. A., Buelna, G., & Moeller Chávez, G. E. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, vol.3, 153-161. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000300011
- González Gómez , J. D. (2010). *Fitorremediación: Una herramienta viable para la descontaminación de aguas y suelos*. Obtenido de Universidad de los Andes : <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/19276/u445054.pdf?sequence=1>
- Guevara Granja, M. F., & Ramírez Cando , L. J. (3 de Diciembre de 2015). Eichhornia crassipes, su invasividad y potencial. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 22, 5-11. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047267001.pdf>
- Hernández García , F. A. (2 de Abril de 2009). *Combinacion de electrodia intercambio ionico osmosis inversa para desnitrificacion de aguas potencialmente potables*. doi:https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/217/1/Combinacion%20de%20electrodi%20A1lisis%20intercambio%20i%20C3%B3nic%20y%20C3%B3smosis%20inversa%20para%20desnitrificaci%20de%20aguas%20potencialmente%20potables_rees.pdf
- Hernández, J. A., Torres García, A., Conejo Moreno, F. B., Oliva González, A. S., & Alba N., A. A. (marzo de 2015). Aprovechamiento de Eichhornia crassipes (lirio acuático proveniente de la zona de Yuriria, Guanajuato, como fuente de Lignina, Celulosa y Hemicelulosa. *Innovación Y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, 7, 1-7. Obtenido de <https://iydt.files.wordpress.com/2016/03/01-aprovechamiento-de-eichhornia-crassipes-proveniente-de-la-zona-de-yuririra1.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (14 de Noviembre de 2018). *Ministerio de Ambiente e IDEAM presentan el avance del Estudio Nacional del Agua (ENA- 2018)*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/sala-de>

prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/ministerio-de-ambiente-
e-ideam-presentan-el-avance-del-estudio-nacional-del-agua-ena-2018-

- Jimenez Castro, C. G., & Padilla Jimenez, C. M. (2009). *Remocion de contaminantes inorganicos de aguas residuales industriales con eichhornia crassipes o jacinto de agua*. Obtenido de Repositorio Universidad de Guayaquil:
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/1881/1/1038..pdf>
- Kee Han, S., & Sik Shin, H. (2004). Biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste. *International journal of hydrigen energy*, 29, 569-577.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.001>
- León Espinoza, M., & Lucero Peralta , A. M. (2009). *Estudio de Eichhornia crassipes, Lemna gibba y Azolla filiculoides en el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas en sistemas comunitario y unifamiliares del cantón Cotacachi*. Obtenido de Universidad Técnica del Norte:
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/102?mode=full>
- López Jerves, , G. N. (Marzo de 2012). *Aprovechamiento del Lechuguín (Eichhornia Crassipes) para la generación de abono orgánico mediante la utilización de tres diseños diferentes de biodigestores*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1938>
- Martelo, J., & Lara Borrero, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de. *Revista Ingeniería y Ciencia* , 221–243. Obtenido de
<http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>
- Mentaberry, A. (2011). *Fitorremediación* . Obtenido de Universidad de Buenos Aires:
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM_fitorremediacion_argentina_25620.pdf
- Míguez Caramés, D. M., Martínez Bengochea, A., Carrara Balbi, M. V., Ferreira, N., Bombi Haedo, K., & Cartmell, E. (2014). Evaluación de la remoción de nutrientes y compuestos organoclorados y sus rutas de bioacumulación con la planta flotante *Eichhornia crassipes* expuesta a efluentes de pulpa de celulosa. *Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay* , 19 - 23. Obtenido de
<https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC/article/view/262>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (17 de Marzo de 2015). *Resolución 0631*. Obtenido de Ministerio de ambiente :
https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

- Morales et al. (2019). Efecto del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en la depuración del agua residual del colector Santa Lucía- Chachapoyas. (revistacytunt@unitru.edu.pe, Ed.) *Revista ciencia y tecnología, revista de la Universidad Nacional de Trujillo*, 15. Obtenido de <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/2673>
- Muñoz C. & Novoa S. (2019). *El Humedal Artificial como Material Educativo para la Enseñanza de la Fitorremediación con Buchón de Agua (Eichhornia Crassipes) en Sistemas Acuáticos Dirigido a los Maestros de Biología del Distrito*. Universidad Pedagógica Nacional. Obtenido de <http://repository.pedagogica.edu.co>: <http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/10509>
- Muñoz Cruz, F. A. (2016). *Evaluación de la remoción de fenoles, fósforo y nitratos en agua residual doméstica rural en Bruselas Huila, a partir de un sistema de fitorremediación con buchones de agua (eichhornia crassipes)*. Obtenido de Universidad nacional Abierta y a Distancia: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13304/20-abr-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olguín, E. J. (septiembre de 2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Revista Biotecnología y biología molecular*, 69-82. Obtenido de http://ciaorganico.net/documypublic/390_Fitorremediacion.pdf
- Ortega Quimbay, S. M., & Sánchez Salazar, |. (2019). *Evaluación de la capacidad de remoción de cromo de Eichhornia crassipes Y Azolla sp. con miras a su aplicación como tratamiento complementario de aguas residuales de la industria galvanotécnica*. Obtenido de Universidad de La Salle: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1137
- Paredes Salazar , J. L. (2015). *Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando Eichhornia crassipes Jacinto de agua*. Obtenido de Universidad Nacional Agraria de la Selva: <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/927/T.EPG-54.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Perales Vasquez, B. K. (16 de abril de 2017). <http://tesis.unsm.edu.pe>. Obtenido de <http://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/2734>
- Poma, & Valderrama. (02 de 09 de 2014). *Laboratorio de investigación en biopolímeros y metalofármacos -LIBIPMET, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Ingeniería. Av. Túpac Amaru 210. Rímac, Lima-Perú*. vpomal@uni.pe. Obtenido de vpomal@uni.pe: vpomal@uni.pe

- Porras Pardo, C. N. (2017). *Estudio Del Buchon De Agua (Eichornia Crassipes) Para El Tratamiento De Aguas Residuales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Abierta y a Distancia UNAD. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/17528/1098682038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quispe Baldeón, L., Arias Chavez, J. B., Martinez Suarez, C. F., & Cruz Huaranga, M. (2017). Eficiencia de la especie macrófita *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) para la remoción de parámetros fisicoquímicos, metal pesado (Pb) y la evaluación de su crecimiento en función al tiempo y adopción al medio en una laguna experimental. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3, 79-93. doi:<https://doi.org/10.17162/rictd.v3i1.650>
- Robayo , B. L. (2019). *Proceso de producción de biohidrógeno, a partir de la biomasa hidrolizada de la Eichhornia Crassipes*. Obtenido de Los libertadores Fundación Universitaria: <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/3017>
- Rodríguez Meléndez, A. G., Colmenares Mestizo, F. A., Barragán Vega, J. C., & Mayorga Betancourt, M. A. (2017). Aprovechamiento energético integral de la *Eichhornia crassipes* (Buchón de agua). *Revista de la Facultad de Ingeniería Ingenium*, 18, 134-151. Obtenido de <file:///C:/Users/lieese/Downloads/Dialnet-AprovechamientoEnergeticoIntegralDeLaEichhorniaCra-6089821.pdf>
- Rodríguez Miranda, J. P., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Revista Tecnología y ciencias del agua* , 1, 59-68. Obtenido de Universidad Manuela Beltrán, Colombia: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000100005
- Sarango Araujo , O. P., & Sánchez Ramírez, J. A. (Abril de 2016). *Diseño y construcción de 2 biofiltros con Eichhornia Crassipes y Lemna Minor para la evaluación de la degradación de contaminantes en aguas residuales de la extractora Río Manso EXA S.A. "Planta la Comuna", Quinindé*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4930>
- Susarla, S., Medina, V., & McCutcheon, S. (2002). Phytoremediation: An Ecological Solution to Organic Chemical Contamination. *Journal Ecological Engineering* , 647–658. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/223490239_Phytoremediation_An_Ecological_Solution_to_Organic_Chemical_Contamination

- United States Environmental protection Agency EPA. (2000). *Water Topics*. Obtenido de <https://www.epa.gov/environmental-topics/water-topics>
- Valderrama Valderrama, L. T. (1996). Uso de dos especies de macrófitas acuáticas, *Limnium laevigatum* Y *Eichhornia crassipes* para el tratamiento de aguas residuales agro industriales. *Revista de la facultad de ciencias*, 3, 83-97. Obtenido de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/scientarium/article/view/5058>
- Vargas Perdomo, C. M., Oviedo Salazar, A., Montañez Velasquez, M. N., & Polania Patiño, A. (2018). Estado del arte; del uso de la *eichhornia crassipes* en la fitorremediación de aguas residuales industriales. *www.dx.doi.org*, 9, 106-130. Obtenido de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1631>
- Vásquez Bernal, C. I. (2004). Tratamiento de los residuos líquidos del área de tinturados en flores de exportación con *Eichhornia crassipes* (Buchón de Agua). *Revista LASALLISTA de Investigación*, 23-27. Obtenido de Biblioteca Digital Lasallista: <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/238>
- Wang, Z., & Calderon, M. M. (15 de Nov de 2012). Análisis medioambiental y económico de la aplicación del jacinto de agua para el tratamiento de aguas eutróficas junto con la producción de biogás. *Journal of Environmental Management*, 110, 246-253. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479712003465>