

# “Buchón de agua” (*Eichhornia Crassipes*): impulsor de la fitorremediación

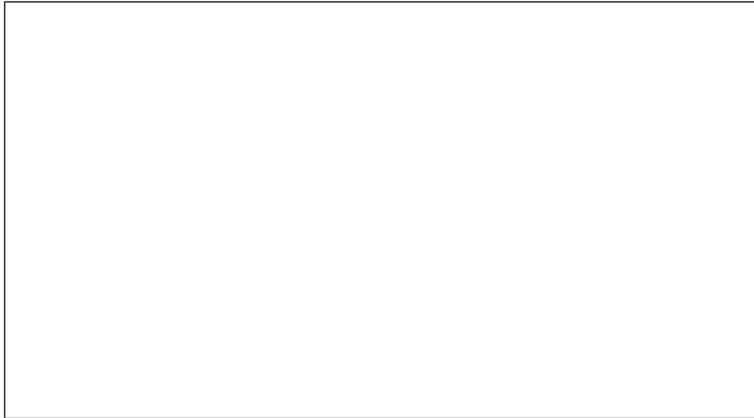
**Autor**

Uriel Fernando Carreño Sayago

COLECCIÓN **INVESTIGACIÓN**



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA



Primera edición  
Bogotá, diciembre de 2020

© Fundación Universitaria  
Los Libertadores  
Bogotá, D.C., Colombia.

Cra. 16 No. 63A-68 / Tel.: 254 47 50  
[www.ulibertadores.edu.co](http://www.ulibertadores.edu.co)

*Juán Manuel Linares Venegas*  
Presidente del Claustro

*Luis Ignacio Aguilar Zambrano*  
Vicerrector de Investigación

*Uriel Fernando Carreño Sayago*  
Autor

*Andrea Sierra*  
Corrección de estilo

*Diego A. Martínez Cárdenas*  
Coordinador Editorial

*Lápiz Blanco SAS*  
Diagramación y montaje

Los conceptos emitidos en esta publicación son responsabilidad expresa de sus autores y no comprometen de ninguna forma a la Institución. Se autoriza la reproducción del texto citando autor y fuente, únicamente con fines académicos. En caso distinto, se requiere solicitar autorización por escrito al editor.

# Contenido

	<b>Prólogo</b>	<b>7</b>
	<b>Introducción</b>	<b>10</b>
<b>SECCIÓN I</b>	<b>DISEÑO Y PROPUESTA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON E. CRASSIPES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES</b>	<b>13</b>
	1. CARACTERÍSTICAS DE E. CRASSIPES	13
	2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS A TRATAR	19
	3. CARACTERÍSTICAS DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DISEÑADO CON E. CRASSIPES	22
	4. ESTUDIOS DE CASO: CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES CON E. CRASSIPES	33
	5. DISEÑO DE UN HUMEDAL PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES	51
<b>SECCIÓN II</b>	<b>DISEÑO Y PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO BIOLÓGICO CON E. CRASSIPES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES</b>	<b>61</b>
	6. TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES CON <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i> TRITURADA	61
	7. MODIFICACIÓN DE LA CELULOSA Y MECANISMOS DE ADSORCIÓN DE LA BIOMASA DE <i>E. CRASSIPES</i>	64
	8. MODELOS DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN EN PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	69
	9. CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE SEGUNDO ORDEN EN PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	75
	10. ADSORCIÓN DE PLOMO (II) POR BIOMASA DE <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i> : ESTUDIOS CINÉTICOS Y DE EQUILIBRIO (EXPERIMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO)	77
	11. DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO A ESCALA INDUSTRIAL CON BASE EN LOS ESTUDIOS REALIZADOS CON <i>E. CRASSIPES</i>	85
	<b>Referencias</b>	<b>89</b>

# Prólogo

La presente publicación trata sobre los beneficios que tiene la planta acuática *E. crassipes* (o buchón de agua, como se le dice coloquialmente en Colombia) en el proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. El lector también encontrará información pertinente al diseño y puesta en marcha de un sistema de tratamiento económico y eficaz para estas aguas servidas, además de una guía que permite comprender los procesos de descontaminación para comunidades pequeñas y empresas que quieran descontaminar sus aguas con el fin de mitigar los impactos ambientales y sociales que causan las aguas residuales.

En las primeras páginas se encuentra una caracterización fisicoquímica de *E. crassipes*, en la que se exponen las características por las cuales esta planta puede remover materia orgánica y material contaminante, además de metales pesados. En los siguientes capítulos se describe una serie de estudios exitosos a escala laboratorio y a escala piloto realizados en la Fundación Universitaria Los Libertadores sobre el tratamiento de aguas con *E. crassipes* —tanto viva como seca y triturada—, aprovechando el potencial de biomasa.

Estos tratamientos sirven para todo tipo de agua residual, ya sean aguas producto de las industrias químicas o producto del inadecuado manejo que se le dan a las aguas residuales domésticas en nuestra ciudad.

Cabe recordar que de los diferentes humedales de Bogotá se retiran más de 30 000 toneladas de *E. crassipes* al año, y que toda esta biomasa está provocando impactos desfavorables en estos entornos tan importantes para el ecosistema de la sabana. El presente libro propone un manejo sostenible de la planta *E. crassipes* para descontaminar aguas residuales domésticas o industriales; además (como se mencionó), se ofrece una sencilla guía para aprender a realizar montajes de plantas de tratamiento caseros con el buchón de agua, con el fin de aprovechar su gran distribución.

El libro se divide en dos secciones: la primera trata sobre el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales a través del diseño de humedales artificiales flotantes que tienen como principal protagonista la *E. crassipes*. La segunda sección trata sobre la creación de filtros con la biomasa de *E. crassipes* para tratar aguas residuales industriales.

El autor del presente libro tuvo como propósito compartir sus experiencias para que sus lectores aprendan a realizar procesos de tratamiento de aguas residuales de una manera diferente a las convencionales, ayudando así a la preservación del medio ambiente.

Además, resulta ser también una guía que les permitirá resolver a los lectores, sin costo alguno, todas sus dudas respecto a los sistemas de tratamiento, diseño y montaje, con el fin de diseñar, evaluar, construir y realizar escalas industriales de humedales artificiales o filtros biológicos para el tratamiento de aguas de una forma macro.

Espero que este libro sea de utilidad y podamos contribuir a la mejora del medio ambiente gracias a los sistemas de tratamiento amigables con nuestros cuerpos de agua.

**El editor**

*Dedicado a mi Chirriflonfla y Muñeki*

# Introducción

La planta acuática *Eichhornia crassipes* es una especie que crece en humedales generalmente contaminados con abundante materia orgánica y que presenta rasgos interesantes, como se verá en las siguientes páginas. En la ciudad de Bogotá (Colombia) y su periferia hay una gran cantidad de humedales que aportan agua y riqueza natural, pero algunos de ellos se encuentran contaminados, lo que ha generado una proliferación de *E. crassipes*. Según la Alcaldía Mayor de Bogotá (2017) se retiraron cerca de 10 500 toneladas de esta planta acuática en diferentes humedales, desechos que se disponen finalmente en rellenos sanitarios.

Por otro lado, el manejo de las aguas residuales —tanto domésticas como industriales— en Bogotá y sus alrededores es impropio, ya que su vertimiento está ocasionando daños irreversibles en gran parte de los cuerpos de agua, como son los humedales y el río Bogotá, en los que la carga contaminante, que llega a niveles inefables, aumenta los efectos e impactos en el ambiente, la sociedad y la economía.

La contaminación del río Bogotá se ha convertido en un sempiterno, y la ausencia de proyectos por parte de los entes gubernamentales en Cundinamarca y Bogotá para mitigar esta problemática hace cada vez más desfavorable la situación. A pesar de ello, a partir de una sentencia que busca proteger al río Bogotá, desde el año 2016 se han formulado diversos proyectos para mitigar la contaminación que se ha presentado a lo largo de los años y que ha hecho decadente la situación de este río.

Por otra parte, es relevante mencionar que Colombia vive una época importante en su historia, que es el posconflicto. El conflicto armado dejó en nuestro país una huella letal de metales pesados en las fuentes hídricas debido a la explotación de minería ilegal por parte de grupos armados al margen de la ley. Es una realidad, puesto que en diferentes investigaciones se ha concluido que nuestro país es el más contaminado de Latinoamérica por cromo y mercurio. Por este motivo se deben buscar alternativas de tratamiento de aguas industriales económicas y fáciles de usar.

Considerando este contexto, en la Fundación Universitaria Los Libertadores se empezaron a investigar, desde el 2014, los diferentes beneficios de *E. crassipes*, caracterizando los tratamientos de fitorremediación y tratamientos con biofiltros para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. En dicho orden, este libro se divide en dos secciones: en la primera se aborda la

fitorremediación y en la segunda los biofiltros, teniendo ambas como protagonista a la planta *E. crassipes*, que se acendrará a lo largo de todo el libro.

Los tratamientos de aguas residuales domésticas a través de fitorremediación aprovechan la fotosíntesis de *E. crassipes* para oxigenar el agua contaminada a través de las raíces, que tienen asociaciones simbióticas con bacterias que aportan oxigenación y que por ende disminuyen la materia orgánica. Un indicador de la materia orgánica es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que describe cómo esta materia se ve afectada por los niveles de oxígeno que le aporta la planta a través de sus raíces, niveles que también determinan todo tipo de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, así como la presencia microorganismos patógenos en el agua que generalmente son anaerobios y no soportan la presencia de oxígeno. Otro proceso de quimisorción relevante tiene que ver con los metales pesados presentes en los cuerpos hídricos, producto del inadecuado manejo que se le dan a las aguas residuales industriales (como por ejemplo el sector productivo de curtiembres en el sur de Bogotá), que quedan adsorbidos en hojas, raíces y tallos.

Los tratamientos realizados en los laboratorios de la Fundación Universitaria Los Libertadores fueron diseñados en dos escalas: escala laboratorio, donde se desarrollaron pruebas en mililitros, y escala piloto, aplicando procedimientos a nivel de escala en litros; se espera, en un futuro próximo, llevar este experimento a una escala industrial, con procesos en metros cúbicos, de modo que se pueda brindar información a un proceso de escala industrial.

El presente libro está dividido en dos secciones. En la sección I, capítulo 1, se presentan las características fisiológicas de *E. crassipes*, detallando su resiliencia; en el capítulo 2 se presentan generalidades de las aguas a tratar, tanto domésticas como industriales; en el tercer capítulo se describen las características de un humedal y los parámetros de calidad de las aguas residuales que afectan a este tipo de ecosistema acuático. En el capítulo 4 se describe un estudio de caso que da cuenta de la fitorremediación con efectos importantes en la disminución de parámetros de calidad del agua, tanto para aguas residuales domésticas como para aguas industriales, siendo una investigación serendipia, ya que se buscaba solo tratar aguas residuales domésticas, si bien se concluyó también que la planta adsorbe metales pesados. En el capítulo 5 se muestra la propuesta de diseño de un humedal artificial flotante para construir y tratar las aguas residuales domésticas e industriales, haciendo uso principal de la planta *E. crassipes*, propuesta que arroja resultados no superfluos. Nuestra intención es montar un humedal con esta planta aprovechando todo su potencial para fitorremediar aguas residuales.

En la sección II se describe un proceso acendrado de los beneficios del triturado de la planta *E. crassipes*, con el fin de crear biofiltros para el tratamiento de aguas residuales industriales. En el capítulo 6 se muestra el aprovechamiento

de la biomasa de *E. crassipes* triturada, con la caracterización de la cantidad de celulosa que posee esta planta. En el capítulo 7 se describirán mecanismos por los cuales esta biomasa adsorbe metales pesados, mientras que el capítulo 8 muestra las diferentes capacidades de adsorción de esta biomasa para retener y quimi-adsorber metales pesados. En el capítulo 9 se exponen las cinéticas de adsorción de diferentes contaminantes por parte de la biomasa transformada de *E. crassipes*. En el capítulo 10 muestra un estudio de caso para remover plomo, identificando la cantidad de este metal adsorbido por la biomasa de *E. crassipes*, para finalizar con variables de diseño en la construcción de sistemas alternativos de tratamiento de aguas en el capítulo 11.

# SECCIÓN I

## DISEÑO Y PROPUESTA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON *E. CRASSIPES* PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES

### 1. CARACTERÍSTICAS DE *E. CRASSIPES*

El presente capítulo muestra las diferentes características de crecimiento de *E. crassipes*, indica su proliferación actual en diferentes humedales de Bogotá y presenta su caracterización fisicoquímica, determinando los porcentajes de azúcares de su estructura vegetal.

La macrófita *E. crassipes*, también conocida como “jacinto de agua” o “buchón de agua”, es una planta vascular flotante de agua fresca, originaria de Suramérica (Brasil y región ecuatorial). Sus tallos y hojas están conformados por sacos llenos de aire que le permiten estar suspendida permanentemente en la superficie del agua, presenta reproducción tanto sexual como asexual y prevalece principalmente en cuerpos de agua tropical y subtropicales (Lowe, 2004).

*E. crassipes* es considerada una especie invasiva por su resiliencia a un amplio tipo de ecosistemas y porque afecta considerablemente el equilibrio natural de sistemas acuáticos (lagunas, lagos, humedales, entre otros). Se alimenta mayormente de la concentración de nutrientes de efluentes de la agroindustria, la deforestación o tratamientos de agua insuficientes. *E. crassipes* posee cantidades importantes de celulosa y hemicelulosa en su estructura vegetal, razón por la cual se ha utilizado en muchos proyectos de fitorremediación y bioenergía.

Es originaria de las aguas dulces de las regiones cálidas de América del Sur, en especial de la cuenca amazónica y la cuenca del río de la Plata, y aunque ha sido usada como planta medicinal, decorativa y fertilizante de suelos, por fuera de su nicho original se la considera especie dominadora. Está incluida en la lista 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Lowe, 2004). Esta planta se reproduce sexualmente, a partir de flores que producen frutos en forma de cápsula, procedimiento que le permite multiplicarse; sin embargo, su prodigio-

sa proliferación y la reproducción artificial más sencilla se efectúa por división de los estolones que los plantones emiten durante la estación favorable, lo que origina una tupida red vegetal capaz de colonizar en poco tiempo una gran superficie acuática y forma un tapiz que puede impedir la navegación.

Su taxonomía, característica de América del Sur, se representa completa en la tabla 1.

**Tabla 1.** Taxonomía de la *Eichhornia crassipes*

<b>Taxonomía de la <i>Eichhornia crassipes</i></b>	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Commelinales
Familia	Pontederiaceae
Género	Eichhornia

**Fuente:** Lowe (2004).

*Eichhornia crassipes* tiene el pecíolo inflado (por ese motivo en Colombia le dicen buchón de agua) y cada hoja presenta una única estípula intrapeciolar, membranácea, situada entre la hoja y el tallo, terminada en un lóbulo estipular; las hojas presentan un par de estípulas, una a cada lado, que pueden estar parcialmente soldadas a la hoja. En la imagen 1 se muestra la estípula de *Eichhornia crassipes*.

**Imagen 1.** Estípula interpeciolar membranácea de *Eichhornia crassipes*.



**Fuente:** Fotografía del autor.

*E. crassipes* es una planta extremadamente difícil de erradicar por procedimientos físicos (control mecánico), químicos (herbicidas) o biológicos (insectos o plantas patógenas) cuando se ha establecido en un ecosistema, razón que hace necesario encontrar un procedimiento económico, eficiente y verdaderamente efectivo para su control. En la imagen 2 se puede apreciar cómo esta planta afecta la navegación en ríos, humedales y lagunas.

**Imagen 2.** Problemática de la *E. crassipes* en el humedal Gualí.



Fuente: Fotografía del autor.

**Imagen 3.** Estado del humedal Gualí.



Fuente: Fotografía del autor.

En la sabana de Bogotá se ven muchos humedales y otros entornos acuáticos con evidente invasión de *E. crassipes*, como por ejemplo la laguna de Fúquene, el humedal Gualí, entre otros. La presencia de esta planta indica que estos humedales poseen fuerte contaminación de aguas residuales domésticas, puesto que los nutrientes presentes en ellas provocan el fenómeno de eutricación (exceso de nutrientes); por muchos años, la *E. crassipes* se ha adaptado a esta situación y su resiliencia como variable de respuesta es el consumo de estos nutrientes y el incremento de la biomasa a través de reproducción por estolones en crecimiento vegetal (Carreño y Rodríguez, 2019).

**Imagen 4.** Propagación de la *E. Crassipes* en el humedal Gualí.



**Fuente:** Fotografía del autor.

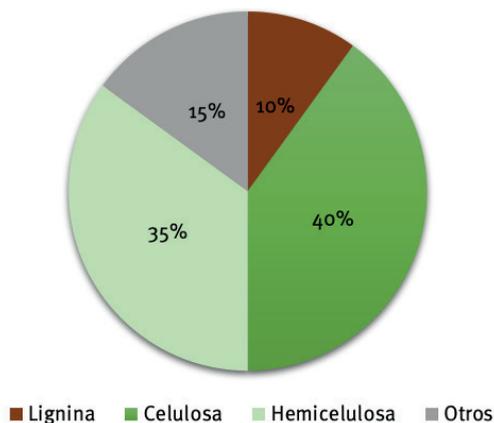
La presencia de una sola planta de *E. crassipes* en un humedal con alto contenido de nutrientes de material orgánico por aguas residuales domésticas permite la eutricación, pues la planta cuenta con mejores condiciones nutricionales para crecer y multiplicarse (Carreño y Rodríguez, 2019); por ejemplo, bajo dichas condiciones la planta empieza a reproducirse por estolones cada tres (3) días en promedio, y en seis (6) meses se reproducirá en más de 100 000 ejemplares en el mismo humedal. Se deja ver entonces que una opción para controlar el crecimiento de la planta *E. crassipes* es no contaminar los humedales (Sayago, 2019).

### 1.1. Caracterización físicoquímica de *E. crassipes*

Dentro de los principales atributos de *E. crassipes* se encuentra el bajo contenido de lignina presente en su estructura, en contraste con el alto contenido de

celulosa por unidad de volumen de materia seca, haciéndola fácilmente degradable. En la tabla 2 *infra* y en la figura 1, se muestran las caracterizaciones de *E. crassipes* con fines de fitorremediación u otros tratamientos.

**Figura 1.** Caracterización de *E. crassipes*.



**Fuente:** Elaboración del autor.

Para realizar la caracterización físico-química de la *E. crassipes* se hizo una recolección en el humedal Juan Amarillo, en el occidente de la ciudad de Bogotá, obteniendo aproximadamente treinta y cinco (35) ejemplares; con este material se procedió a realizar la identificación de las propiedades de las macrófitas recolectadas. Se determinaron los carbohidratos estructurales y el contenido de lignina, mediante la cuantificación de la matriz de los biomas utilizadas donde: a) (%) hemicelulosa, b) (%) celulosa, c) (%) lignina, d) cenizas. Para la extracción de celulosa se utilizaron extractos de benceno y etanol con relación en volumen de benceno a etanol 2:1; para la extracción de hemicelulosa se utilizaron ácido nítrico y etanol con relación 1:4; para la extracción de lignina se utilizó ácido clorhídrico al 12 % y para la determinación de cenizas se utilizó ácido sulfhídrico al 72 %. En la tabla 2 se pueden ver reflejados los porcentajes de celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas de la *Eichhornia crassipes*. En la imagen 5 se muestra la extracción de celulosa de *E. crassipes*.

**Imagen 5.** Extracción de celulosa de *E. crassipes*.



**Fuente:** Fotografía del autor.

En la tabla 2 se pueden apreciar las diferentes concentraciones de lignina, celulosa, hemicelulosa y cenizas en la caracterización fisicoquímica de la *Eichhornia crassipes*.

**Tabla 2.** Resultados de la caracterización en la *Eichhornia crassipes*

Lignina	Celulosa	Hemicelulosa	Otros
10 %	40 %	35 %	15 %

**Fuente:** Elaboración del autor.

En la caracterización fisicoquímica de *E. crassipes* expuesta en la tabla 2 se observa que tiene un contenido importante de hemicelulosa, con un 35 %, siendo el polisacárido de hemicelulosa es el más representativo en esta planta. El reporte de celulosa es de vital importancia para los intereses de la presente investigación, y se observa que tiene una cantidad de 40 %; la lignina es inferior, con un 10 % y el contenido de cenizas es alto, con un 15 %, debido a la contaminación inherente a esta planta.

En todo el libro se abordarán estas características importantes para el montaje de diferentes sistemas de tratamiento; la abundancia en sistemas de humedales y la abundancia de la celulosa son dos ítems interesantes en el diseño de plantas de tratamiento de aguas económicas y eficientes.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS A TRATAR

En este apartado se caracterizan las aguas residuales domésticas e industriales a tratar a través de la planta *E. crassipes*.

Las aguas residuales se pueden dividir en dos clases: agua residual doméstica y agua residual industrial. En el presente libro se evaluarán, diagnosticarán, determinarán y tratarán los dos tipos de aguas, y se evidenciará que el tratamiento ideal para el agua residual doméstica es el humedal artificial compuesto por *E. crassipes*. En caso de contar con diferentes tipos de aguas residuales industriales, se propone el tratamiento con un filtro biológico. En la imagen 6 se presenta la toma de muestras en el sector de curtiembres.

**Imagen 6.** Toma de muestras.



**Fuente:** Fotografía del autor.

### 2.1. Caracterización de aguas residuales

Para diferentes estudios, se caracterizaron aguas residuales, tanto industriales como domésticas, identificando los parámetros de calidad más relevantes. En

la tabla 3 se muestran los datos analizados por una empresa acreditada: se realizaron las pruebas en aguas residuales de un canal, de una curtiembre y de diferentes aguas residuales de algunos procesos productivos.

**Tabla 3. Caracterización de los parámetros de calidad**

Parámetro	Unidades	Agua residual doméstica	Agua residual de una industria	Límite permitido (Resolución 631 de 2015)	Tipo de agua caracterizada
Cromo	mg/L	-	1407	1,5	Curtiembre
Arsénico	mg/L	-	350	1,0	-
Plomo	mg/L	-	450	1,0	-
Cadmio	Mg/L	-	350	1,0	-
Mercurio	mg/L	-	500	0,5	Minería
DBO	mg/L	990	3210	600	Agua casera
DQO	mg/L	1245	3664	1200	Agua casera
Grasas	mg/L	149	1245	60	Agua casera
Coliformes fecales	NMP/100	2,5*10 <sup>6</sup>	1,1*10 <sup>8</sup>	-	Agua casera
Coliformes totales	NMP/100	6,5*10 <sup>6</sup>	2,5*10 <sup>8</sup>	-	Agua casera
Fósforo total	mg/L	80	-	Análisis y reporte	Agua casera
Nitrógeno total	mg/L	90	-	Análisis y reporte	Agua casera
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> )	mg/L	75	-	Análisis y reporte	Agua casera

**Fuente:** Elaboración del autor

En esta caracterización se puede apreciar el alto contenido de materia orgánica, representado en la demanda biológica de oxígeno (DBO) y en la demanda química de oxígeno (DQO), grasas y coliformes, en una gran cantidad de aguas residuales domésticas.

### 2.2. Agua residual doméstica

Estas aguas provienen de las casas residenciales y el contaminante es orgánico; además, tienen olores desagradables y se deben manejar de forma adecuada. Los parámetros a utilizar en el presente libro de investigación son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), coliformes totales, coliformes fecales, nitrógeno y fósforo, entre otros.

Estos índices son producto de una gran concentración de materia orgánica, siendo también indicadores de nutrientes como nitrógeno y fósforo.

### 2.2.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda biológica de oxígeno DBO es un parámetro de calidad del agua utilizada que sirve para determinar el estado en que se encuentran dichas aguas residuales; evalúa la cantidad de oxígeno consumido al degradarse la materia orgánica en el agua. Se emplea para medir el grado de contaminación, normalmente se mide tras cinco días de reacción ( $DBO_5$ ) y se expresa en miligramos de oxígeno por litro ( $mg O_2/L$ ).

Es uno de los parámetros más importantes, debido a que establece la concentración de la materia orgánica contaminante en aguas residuales domésticas. En concreto, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la oxidación de la materia orgánica, que es biodegradable, en condiciones aeróbicas. Por tal razón, este parámetro no se utiliza para aguas residuales industriales, ya que es específico para material orgánico y no para material inorgánico. En la caracterización de los valores DBO de la tabla 3 se refleja que no hay control de estos vertimientos.

### 2.2.2. Nutrientes

Los nutrientes están presentes en la materia orgánica en aguas contaminadas; sus indicadores son el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno, presente en forma orgánica e inorgánica, como amoníaco, nitrito y nitratos, y el fósforo, también presente en forma orgánica e inorgánica, principalmente como fósforo soluble (ortofosfatos). Los valores normales de nitrógeno total suelen oscilar entre 20 y 85 mg/L (orgánico 8-35 mg/L, amoniacal 12-50 mg/L y nitratos 0-10 mg/L); el nitrógeno aportó un resultado de 80 mg/L en el agua caracterizada. Los valores normales de fósforo total varían entre 80 y 120 mg; según la tabla 3, el agua caracterizada en el presente estudio arrojó 80 mg/L.

### 2.2.3. Características biológicas

Por su contenido en materias orgánicas, especialmente fecales, las aguas residuales domésticas urbanas albergan numerosos organismos patógenos, como virus y bacterias. La *Escherichia coli* es una bacteria patógena que vive en el tracto intestinal humano, pertenece a la familia de las enterobacterias y forma parte de la microbiota del tracto gastrointestinal de animales homeotermos, como por ejemplo el ser humano. La importancia de esta bacteria es que es indicadora de la contaminación fecal de aguas, pues la sola presencia de *coli* demuestra una grave contaminación de aguas residuales domésticas en ríos, humedales, quebradas, entre otros cuerpos hídricos; ello porque, al ser anaerobia, esta bacteria demuestra que solo podría vivir en aguas totalmente con-

taminadas sin ningún tipo de oxigenación. En el estudio de caracterización, los coliformes fecales de las aguas reportaron  $2,5 \cdot 10^6$  (NMP/100), demostrando gran cantidad de microorganismos patógenos presentes en el agua.

Los datos de DBO, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales son correlacionados debido a que la presencia de una alta DBO asimila una alta presencia de nutrientes y patógenos en el agua. Esto demuestra la grave situación de los humedales de nuestra ciudad, que son altamente impactados, a diario, por este tipo de aguas residuales, lo cual afecta notablemente sus servicios ecosistémicos.

### 2.3. Agua residual industrial

Las aguas residuales industriales son producto del desecho de un proceso de producción industrial. Estas aguas no poseen carga orgánica tan prominente como es el caso de las aguas residuales domésticas. Su contenido es más inorgánico, por ejemplo: fenoles, colorantes y metales pesados, entre otros. Nuestra propuesta de investigación es tratar este tipo de contaminantes a través de los humedales artificiales diseñados con *E. crassipes* y con el filtro biológico realizado a partir de la biomasa de esta misma planta. Analizando los datos de la tabla 3, la cantidad de cromo que se vierte al alcantarillado es de más de 1400 mg/L, medida que incumple la Resolución 631 de 2015, donde se indica que debe ser de menos de 1,5 mg/l; se deja ver entonces que el vertimiento es casi mil veces superior a lo estipulado en la ley. Igualmente, en la caracterización de otros contaminantes en diferentes procesos productivos, como arsénico, plomo, cadmio y mercurio, se encontró que los parámetros violan la normatividad.

Hemos descrito diferentes tipos de aguas con sus respectivos parámetros de calidad; en capítulos posteriores se determinarán cada uno de estos, evaluando porcentajes de remoción o capacidades de adsorción, ya sea por medio de humedales artificiales o de filtros biológicos.

## 3. CARACTERÍSTICAS DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DISEÑADO CON *E. CRASSIPES*

En el presente capítulo se expondrán las características relevantes para la construcción de un humedal diseñado con *E. crassipes*, propicio para el tratamiento de aguas residuales domésticas, ya que la planta podría vivir de la materia orgánica que tiene este tipo de agua residual, aprovechando así nutrientes que son contaminantes para nuestros humedales y ríos.

Los asentamientos humanos han descargado aguas residuales en arroyos, ríos y humedales desde tiempos remotos, pero en nuestros días la carga orgánica es muy grande y estos hidrosistemas se ven afectados. Es por esto que se requiere tratar las aguas residuales domésticas para minimizar sus impactos negativos a estos cuerpos de agua, pero además de esto se deben buscar alter-

nativas, ya que los sistemas de tratamiento convencionales son muy costosos. El diseño de humedales artificiales con la macrófita *E. crassipes* es una alternativa, debido a que es un fitosistema cuya característica principal es el empleo de la energía solar a través de los procesos biológicos naturales (fotosíntesis) en sustitución de la energía que se emplea en los sistemas de tratamiento convencionales. Los humedales artificiales hechos con la planta flotante *E. crassipes* a través de la energía solar producen el oxígeno necesario para el crecimiento de la población microbiana que degrada gran parte de la materia orgánica.

Las plantas acuáticas poseen, en el interior de sus células, orgánulos especializados en captar la energía solar y transformarla en energía química, que es utilizada en sus reacciones metabólicas para formar su biomasa (hojas, raíces, tallos) y realizar funciones vitales como la reproducción. El tratamiento que proponemos consiste en el rompimiento de la molécula de agua para aportar oxígeno molecular al medio acuático, tratamiento que también reduce el carbono mineral contenido en el  $\text{CO}_2$  y lo transforma en moléculas como glucosa o ramificaciones especializadas como la celulosa.

En los humedales naturales, la pérdida de los servicios ecosistémicos vinculados a la biodiversidad ha aumentado dramáticamente debido al deterioro del agua. Los esfuerzos para recuperar estos servicios perdidos están aumentando y se están poniendo en práctica nuevos usos de tecnologías bien conocidas. En la imagen 7 se muestra cómo se ha visto afectado el humedal Mosquera.

**Imagen 7.** Afectaciones en el humedal Mosquera.



**Fuente:** Fotografía del autor.

Según Parques Nacionales de Bogotá (2016), los humedales de la sabana de Bogotá se han constituido como el sistema de tierras húmedas más importante del norte de la cordillera de los Andes, pues son una importante reserva de fauna y flora, en especial para la ciudad de Bogotá. Estas tierras permiten el cuidado, conservación y reproducción de una amplia variedad de especies de mamíferos, reptiles y aves, entre las que se cuentan más de setenta especies de aves migratorias, gran variedad de especies endémicas y vegetales. Además, todos en conjunto forman parte de la cuenca del río Bogotá. Estos humedales son ricos en fauna y flora, pero lamentablemente muchos de ellos están desapareciendo por causa del crecimiento avanzado de la población en la ciudad de Bogotá y del poco tratamiento de las aguas residuales domésticas.

La presencia de la macrófita *E. crassipes* se podría aprovechar para diseñar y montar sistemas de tratamiento de aguas residuales, controlando su crecimiento; esta planta podría ayudar a descontaminar las aguas debido a que en las aguas residuales existen nutrientes que ella consume, reduciendo así la contaminación.

La planta es también afectada por la exagerada contaminación que hay de los humedales, que provoca un desequilibrio en su crecimiento; un ejemplo de lo anterior es su fuerte presencia en humedales contaminados como el Juan Amarillo de la ciudad de Bogotá, que motivó a que se removieran cerca de treinta toneladas de la planta.

### 3.1. Fitorremediación con otras plantas

Los sistemas de tratamiento a través de la fitorremediación se han convertido en tendencia a nivel mundial debido a los bajos costos de su implementación y, sobre todo, a su eficiencia en la remoción de metales pesados.

Un agente biológico importante para esto son las algas, que se encuentran fácilmente en cualquier sistema acuático y que son importantes a la hora de remover metales pesados presentes en las aguas, ya que absorben estos metales incorporándolos a su estructura biológica. Por ejemplo, se ha demostrado el poder de las algas *Scenedesmus obliquus* a la hora de remover el cromo; también se ha utilizado el alga parda *Sargassum sp.*, removiendo el 85 % de cromo (Lu, Xu, Li, & Chai, 2018).

En diferentes investigaciones como las de Bohórquez, Paredes y Arias (2017), Chen et ál. (2016), Cui et ál. (2015), Datta Wani, Patil y Tilak (2016) y Manjate et ál. (2015), se ha encontrado que las plantas son agentes bioacumuladoras de metales pesados, como en el caso de las “hojas de café”, que pueden remover cerca del 90 % de los diferentes metales pesados.

Las plantas acuáticas como la *Lemna minor* (“lenteja de agua”) son especialmente utilizadas en sistemas de tratamiento no convencionales, como en

la remoción de metales pesados, siendo utilizadas a escala piloto para el tratamiento de mercurio, cromo, plomo y cadmio, removiendo alrededor del 75 % (Bohórquez, Paredes y Arias, 2017).

### 3.2. Características generales del humedal con *E. crassipes*

El uso de humedales artificiales (HA) como infraestructuras verdes construidas cerca de humedales naturales con el objetivo de eliminar sólidos suspendidos totales (TSS), fitoplancton, nutrientes del agua, aumentar la transparencia, facilitar la recuperación de la vegetación y mejorar la biodiversidad, es una posibilidad para remediar el daño realizado por las aguas residuales domésticas.

Diferentes investigaciones (Bohórquez, Paredes & Arias, 2017; Chen et ál., 2016; Cui et ál., 2015; Datta Wani, Patil y Tilak, 2016; Manjate et ál., 2015) sobre la planta *E. crassipes* han aportado una posible solución efectiva y económica para el tratamiento de las aguas residuales domésticas que llegan a los humedales por instalaciones fraudulentas. En la imagen 8 se pueden ver las raíces de una planta de *E. crassipes*.

**Imagen 8.** Tallo y raíces de *E. crassipes*.



**Fuente:** Fotografía del autor.

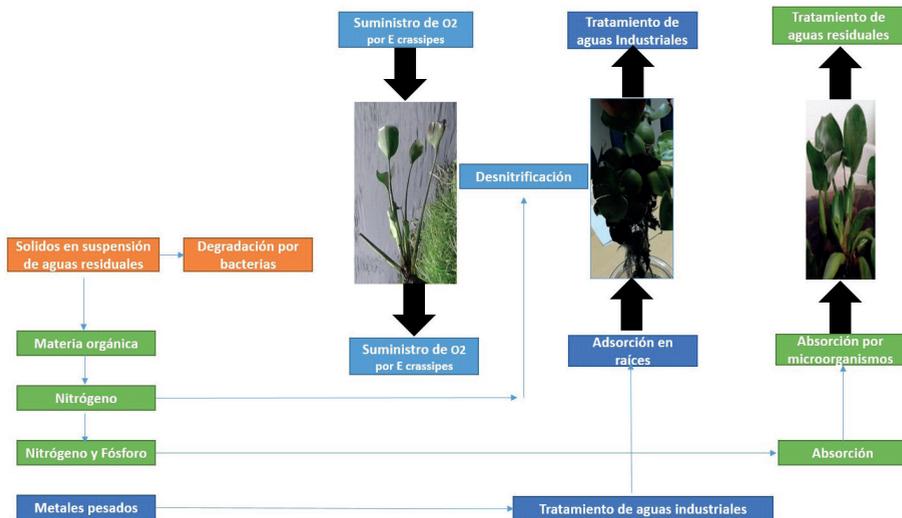
En comparación con los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales, una propuesta de tratamiento con *E. crassipes* sería más económica debido a que se utilizará la biomasa de *E. crassipes* presente en los humedales para el tratamiento de las mismas, acondicionándose en compartimientos es-

peciales, controlando su crecimiento y optimizando la remoción y tratamiento del agua. Los humedales con las plantas flotando sobre la superficie del agua se construyen con plantas del mismo humedal tales como el buchón de agua (*E. crassipes*) o la lenteja de agua (*Lemna spp.*), que tienen tallos con aire que las hacen flotar. La principal ventaja que ofrecen estos sistemas es que en la superficie de contacto con las raíces se consumen los nutrientes presentes en el agua residual, permitiendo una gran actividad depuradora de la materia orgánica; este proceso también se realiza por medio de las bacterias adheridas en las raíces, que proporcionan absorción de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno. En la figura 2 se podrá apreciar el proceso que sufre un agua residual con nutrientes y metales pesados: la planta suministra oxígeno al agua, proporcionando un ambiente ideal para la oxidación de la materia orgánica y el favorecimiento de bacterias benéficas para el ecosistema.

Como inconveniente principal está la capacidad limitada de estas plantas para acumular residuos, ya que no llegan a alcanzar una altura significativa, permaneciendo normalmente en la superficie de la lámina de agua.

Los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo son *absorbidos* por parte de las raíces de la planta para su incorporación fisiológica, mientras que los metales pesados son *adsorbidos* por parte de las raíces u otras partes de la planta; a diferencia de los nutrientes, estos metales son filtrados y no se incorporan a la fisiología de la planta.

**Figura 2.** Diagrama de acción de *E. crassipes*.



**Fuente:** Elaboración del autor.

En los últimos años se ha demostrado que *E. crassipes* se podría manejar de manera sostenible y así crear soluciones prácticas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, debido a que tiene una fuerte relación con las bacterias adheridas a sus raíces, que ayudan a eliminar la materia orgánica; estas bacterias reciben oxigenación a través de un sistema de aireación especializado. Una parte de la aireación del agua también se realiza por difusión del oxígeno del aire a través de la superficie del agua, proceso en el que se elimina nitrógeno a través de absorción directa por la planta para su consumo, ayudándola a crecer y reproducirse en gran medida; otra causa de este crecimiento acelerado, aunque en una menor medida, son los fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación realizados por bacterias. A continuación se presentará cómo el humedal trata las aguas residuales consumiendo los nutrientes y disminuyendo la contaminación con parámetros de calidad como DBO, nitrógeno y fósforo.

### 3.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Las remociones en la demanda química de oxígeno son alrededor del 90 % en aproximadamente una semana de tratamiento; el tratamiento efectivo de las aguas contaminadas con materia orgánica se debe a diferentes procesos bioquímicos, químicos y biológicos, en humedales construidos con *E. crassipes*.

**Figura 3.** *E. crassipes*.



**Fuente:** Elaboración del autor.

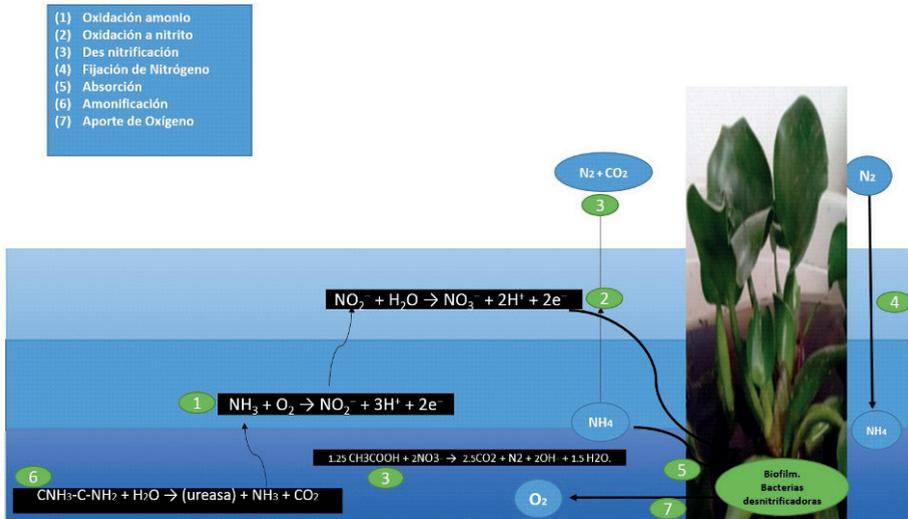
Cuando la materia orgánica presente en el agua supera los 400 mg/L representados en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), esto indica que el agua no posee el suficiente oxígeno para los microorganismos aerobios y, por ende, favorece la aparición de microorganismos patógenos causantes de olores des-

agradables. Para desarrollarse, los microorganismos presentes en las raíces de la planta *E. crassipes* requieren oxígeno como aceptor de electrones disueltos, y son los encargados de solubilizar la materia biodegradable en compuestos minerales, gases y biomasa microbiana. Por ello, las condiciones de aerobias son necesarias para reducir la contaminación por materia orgánica. La disponibilidad de oxígeno es un criterio en el diseño de humedales con *E. crassipes*, siendo fundamental para la remoción bioquímica de la materia orgánica. La disponibilidad de oxígeno en el humedal corresponde al proceso de fotosíntesis realizado por la planta *E. crassipes*, siendo indispensable la cantidad de esta planta para garantizar la aerobiosis.

### 3.4. Nitrógeno

El tratamiento de nitrógeno total Kjeldahl (TKN) y nitrógeno amoniacal total (NT) en un humedal a base de *E. crassipes* es un proceso interesante debido a que la planta incorpora este nutriente para su crecimiento y posterior reproducción, lo cual contribuye a su disminución y tratamiento. En la figura 4 se muestra el ciclo del nitrógeno con la planta *E. crassipes*.

**Figura 4.** Ciclo del nitrógeno en el humedal con *E. crassipes*.



Fuente: Elaboración del autor.

La figura 4 muestra un primer paso (1), que es la oxidación del amonio ( $\text{NH}_3$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ); el amonio es característico de aguas residuales domésticas, mostrándose en la siguiente reacción:



Sigue a continuación el proceso de oxidación (2) del nitrito a nitrato ( $\text{NO}_2^-$ ), a través de la oxigenación que posee el agua con el aporte de oxígeno que brindan las raíces de la planta *E. crassipes* a través de las raíces (7). Ello se muestra en la siguiente reacción:



La imagen también muestra el proceso de desnitrificación (3), esencial en la eliminación de este nutriente en humedales artificiales con *E. crassipes*; en las raíces de la planta viven bacterias anóxicas (que no toleran el oxígeno), como por ejemplo pseudomonas, paraccocus, alcaligenes, thiobacillus y bacillus, creando micrositios anóxicos, *biofilm* adheridos al tejido de planta, especialmente a las raíces. Este proceso se muestra en la siguiente reacción:



Dichas bacterias toman el ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (compuesto presente en las aguas residuales domésticas) y, junto con el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), lo transforman en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y en nitrógeno atmosférico ( $\text{N}_2$ ).

Las dos formas de nitrógeno más utilizadas en la asimilación (5) de un humedal artificial compuesto por plantas como *E. crassipes* son el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), y el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Estos dos compuestos se transforman en aminoácidos por una amplia gama de microorganismos, siendo los potenciales más relativos para la eliminación de nitrógeno de las aguas residuales en los humedales.

Otra vía que tiene el ciclo del nitrógeno con *E. crassipes* es la amonificación (6), donde el nitrógeno presente en el agua residual doméstica ( $\text{CNH}_3\text{-C=O-NH}_2$ ) tiene orina que le da un aporte significativo de esta sustancia, que se convierte en nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ ), como se muestra en la siguiente reacción:



Las eficiencias de nitrógeno Kjeldahl se acercan al 60 % en este tipo de humedal con *E. crassipes*.

**Imagen 9.** Planta de *E. crassipes* reteniendo nitrógeno.



**Fuente:** Fotografía del autor.

### 3.5. Fósforo

Otro nutriente del agua residual doméstica importante para los microorganismos es el fósforo. Este nutriente es esencial para el crecimiento biológico de las plantas acuáticas como *E. crassipes*. En el agua residual, el fósforo se encuentra de diferentes formas como ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos. El ortofosfato es la forma más asimilable por los microorganismos y se utiliza como un parámetro de calidad del agua que controla los procesos biológicos de eliminación de fósforo

En el proceso de remoción del nutriente fósforo se presentan remociones por encima del 30 % en un humedal con *E. crassipes*. La remoción de fósforo depende en gran medida de las bacterias presentes en la planta. El fósforo orgánico disuelto, fósforo orgánico en partículas y fósforo insoluble no están disponibles para las plantas, a menos que sean transformados en fósforo inorgánico soluble. En el humedal de *E. crassipes* estas transformaciones pueden ocurrir por la intervención de bacterias asociadas a las raíces y en biopelículas en los sedimentos. Una vez solubilizado por estos microorganismos, puede ser asimilado por la planta para su crecimiento y reproducción, siendo este proceso el tratamiento que posee el humedal para disminuir el fósforo en el agua.

**Imagen 10.** Planta de *E. crassipes* reteniendo fósforo.



Fuente: Fotografía del autor.

### 3.6. Eliminación de patógenos

El sistema de plantas macrófitas en flotación es un gran eliminador de microorganismos debido a la disminución de la materia orgánica en la que se alojan las bacterias. Esta reducción también se debe a que dichos patógenos no soportan la oxigenación generada en el sistema de tratamiento, debido a que estas bacterias son anaerobias y la presencia de oxígeno les afecta, reduciendo su presencia. Tal es el caso de la bacteria *Echerichia coli*, altamente patógena para los humanos y cuya presencia es indicador de contaminación orgánica en el agua; través de este humedal se reduce notablemente la presencia de este patógeno.

### 3.7. Plantas

Después de ocho días de operación de un sistema de tratamiento con humedal artificial se incrementa el 20 % la biomasa de *E. crassipes*. El aumento de la densidad vegetal puede indicar una adaptación generalizada por parte de esta planta, pues al consumir los nutrientes la densidad vegetal crece y se favorece la reproducción asexual, que es por estolones. Para mejorar la construcción de un humedal se recomienda controlar el crecimiento de *E. crassipes*, ya sea la en-

vergadura vegetal o la reproducción. En la imagen 11 se muestran los estolones de *E. crassipes*, estructura vegetal con la que logra su reproducción.

**Imagen 11.** Estolones de *E. crassipes*.



**Fuente:** Fotografía del autor.

### 3.8. Tratamiento de metales pesados

La planta *E. crassipes* absorbe nitrógeno, fósforo y carbono para su crecimiento y reproducción; al contrario de este proceso, adsorbe los metales pesados como cromo, mercurio, plomo, entre otros, debido a que no los incorpora a su biomasa sino que los retiene, gracias a su gran cantidad de celulosa, polisacárido responsable de la retención de estos contaminantes en el agua. El proceso de retención se debe a un proceso de quimiadsorción. Para el tratamiento de aguas residuales industriales se necesita construir un humedal bajo las mismas condiciones que para tratar aguas residuales domésticas. En las raíces, en las hojas y en los tallos soplados de la *E. crassipes* se retienen los diferentes metales, llegando a adsorber un 75 % en una semana de tratamiento. Se han identificado diferentes puntos en donde se alojan los diferentes metales pesados, siendo las raíces donde más se depositan.

**Imagen 12.** Caracterización de la planta y lugares donde se alojan los metales pesados.



**Fuente:** Fotografía del autor.

En la imagen 12 se pueden ver los lugares donde se alojan los metales pesados, por ejemplo, el cromo, plomo y mercurio se alojan en las raíces, el cadmio se aloja en las hojas y el zinc se aloja en los estolones. Más adelante se proporcionará la caracterización de la adsorción de metales pesados en la estructura vegetal de la planta.

Los humedales artificiales (HA) construidos con *E. crassipes* aprovechan la abundante biomasa de esta planta para tratar las aguas, sean residuales domésticas o residuales industriales. En el capítulo 4 se muestran dos estudios de caso donde se montaron estos tratamientos a escala piloto, comprobando su poder de absorber nutrientes y de adsorber metales pesados.

#### **4. ESTUDIOS DE CASO: CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES CON *E. CRASSIPES***

En este caso se montaron sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales (una curtiembre), diseñando y desarrollando humedales artificiales con *E. crassipes*.

Se recogieron plantas de *E. crassipes* en distintos humedales aledaños a la ciudad de Bogotá (ver imagen 13), para realizar montajes de diferentes experimentos controlando el crecimiento de la *E. crassipes* para tratamientos de fitorremediación.

**Imagen 13.** Toma de *E. crassipes* en la sabana de Bogotá.



**Fuente:** Fotografía del autor.

El diseño y experimentación se dividió en dos procesos diferentes: uno consistió en realizar el montaje con agua residual doméstica y el otro montaje fue diseñado con agua residual de una curtiembre del sur de Bogotá.

Estos dos tratamientos son a escala piloto y asemejan un proceso de tratamiento a mayor escala; nuestro propósito es que los resultados ayuden en lo posible a un tratamiento más grande que contribuya a mitigar los impactos sociales y ambientales que producen estos tipos de aguas.

#### *4.1. Tratamiento de aguas residuales domésticas*

El primer sistema de tratamiento consistió en simular un humedal artificial con aguas residuales domésticas tomadas en el humedal Córdoba. Se midieron las variables de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno y fósforo. El diseño se realizó a escala y se emplearon 180 gramos de *E. crassipes*, el equivalente a dos plantas.

La imagen 14 muestra un sistema experimental para remoción de cromo y materia orgánica en las curtiembres del sur de Bogotá.

**Imagen 14.** Experimentos de la Fundación Universitaria los Libertadores.

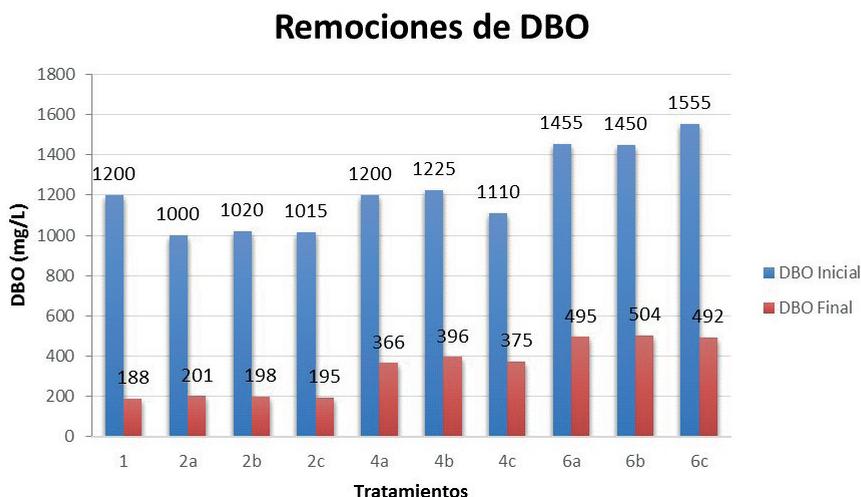


**Fuente:** Fotografía del autor.

Se realizaron nueve (9) montajes experimentales: tres (3) con bajas cargas orgánicas de 1000 mg/L de DBO inicial, tres (3) con cargas medias de DBO de 1200 mg/L de DBO y tres (3) últimas con altas cargas orgánicas de DBO inicial de 1455, con aguas residuales del canal Córdoba. La evaluación propuesta de este sistema de tratamiento duró aproximadamente un (1) mes.

#### *4.1.1. Remoción de materia orgánica (DBO)*

Para las evaluaciones de este sistema de tratamiento se midieron las concentraciones en el agua de DBO mg/L al inicio del experimento y al final del tratamiento.

**Figura 5.** Experimentación en el humedal sobre DBO.

**Fuente:** Elaboración del autor.

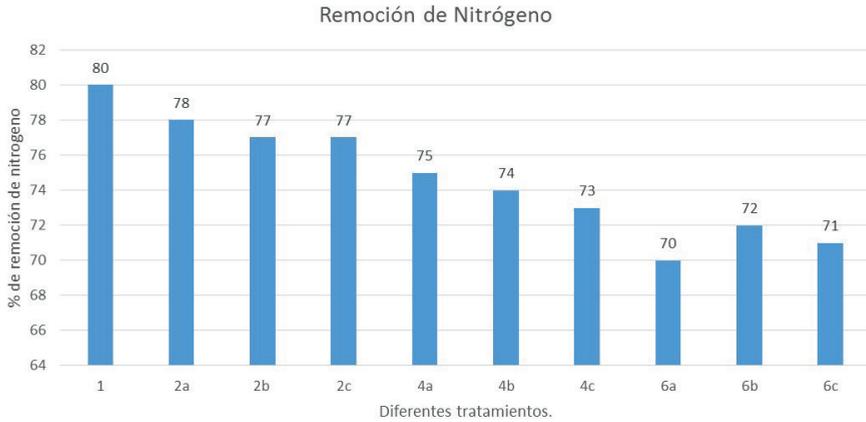
En la anterior figura se observa que los resultados obtenidos para diez experimentos son favorables, pues en todos los sistemas de tratamiento se removió más del 80 % en DBO.

La disminución de DBO implica que la planta incorporó materia orgánica a su estructura vegetal y por ende ayudó a descontaminar las aguas: esto demuestra la eficacia del tratamiento, pues, como se ha dicho, la DBO es un indicador de contaminación de aguas residuales.

#### 4.1.2. Remoción de nitrógeno

En todos los procesos experimentales para la eliminación de nitrógeno, este se remueve en más del 70 % (figura 6), lo cual indica que el nitrógeno se incorporó a la planta. La planta *E. crassipes* prefiere el amonio que los nitritos y su absorción de nitrógeno se debe a la fijación de esta molécula. Las plantas acuáticas parecen preferir absorber el amonio mediante las hojas antes que hacerlo directamente del sedimento a través de las raíces; también pueden utilizar más eficientemente el amonio para estimular su crecimiento.

**Figura 6.** Remociones de nitrógeno.



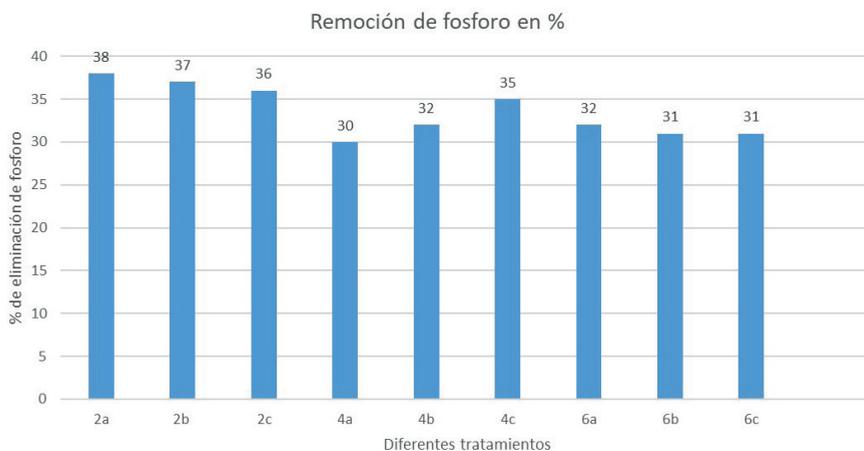
**Fuente:** Elaboración del autor.

Otra característica de las plantas acuáticas es que absorben el amonio con mayor rapidez que los nitratos. Por eso, aún en presencia abundante de nitratos, las plantas acuáticas estarán escudriñando el agua, todo el día, en busca de amonio. Este parámetro indica que en las aguas residuales la presencia de nitrógeno en su mayoría es en forma de amonio y en pequeñas concentraciones de nitritos; debido a esto, se remueve cerca del 70 % de este nutriente.

#### 4.1.3. Remoción de fósforo

El alto requerimiento nutricional de fósforo hace que la presencia de *E. crassipes* en el humedal resulte adecuada para reducir los niveles de este nutriente, que es altamente contaminante. En la figura 7 se muestra cómo en los diez experimentos hubo una reducción del más del 30 %, debido a la absorción de  $PO_4$ .

**Figura 7.** Experimentación en el humedal con fósforo



**Fuente:** Elaboración del autor.

Las raíces son responsables de almacenar la mayor parte de la masa de nutrientes de nitrógeno y fósforo, lo cual es muy posible que sea resultado del contacto directo con las aguas residuales.

**Imagen 15.** *E. crassipes* con sus raíces, responsables de la asimilación de nitrógeno y fósforo.



**Fuente:** Fotografía del autor.

Lo anterior revela una ventaja prometedora de *E. crassipes* en comparación con otras especies vegetales. Se deja ver que la absorción de nutrientes por esta macrófita es su principal medio de obtenerlos. La imagen 15 muestra las partes de *E. crassipes* responsables de la asimilación de nitrógeno y fósforo.

#### 4.2. Tratamiento de agua residual industrial (curtiembre)

El segundo tratamiento consistió en tomar muestras de las aguas residuales industriales del sector de curtiembres de San Benito, con el fin de asemejar un proceso de tratamiento donde el cromo es el parámetro a medir, debido a su importancia en este proceso productivo. A escala piloto, se busca determinar la eficacia de este sistema de tratamiento para, en lo posible, escalarlo y llevarlo a una curtiembre real. En la imagen 16 se muestra la curtiembre donde se tomaron las aguas residuales industriales.

**Imagen 16.** Curtiembre donde se tomaron las muestras.



**Fuente:** Fotografía del autor.

Durante la investigación se midieron parámetros de calidad del agua como pH, oxígeno disuelto y se hizo un seguimiento exhaustivo de cromo hexavalente, determinando el cromo en el agua y el cromo adherido en las plantas, especialmente en las raíces.

El diseño propuesto consistió en montar nueve (9) sistemas diferentes de tratamiento, tres (3) con un 20 % de agua de curtiembres, llamadas 2a, 2b y 2c, tres (3) con un 40 % de agua de curtiembres llamadas 4a, 4b y 4c y tres (3)

con un 60 % de aguas de curtiembres llamadas 6a, 6b y 6c restante, que se complementó con agua destilada. Se realizó un montaje de un blanco con agua del humedal. Las aguas de muestra de las curtiembres se recogieron en la empresa Curtipiel, en el barrio San Benito, al sur de Bogotá. En la siguiente tabla se muestra el resumen de los montajes.

**Tabla 4.** Porcentajes de aguas destiladas y agua de curtiembre

Porcentajes de aguas destiladas y agua de curtiembre	Agua de curtiembre (%)	Agua destilada (%)
Tratamiento 2a 2b y 2c.	20	80
Tratamiento 4a 4b y 4c.	40	60
Tratamiento 6a 6b y 6c.	60	40
Blanco 100 % agua del humedal original	0	0

Fuente: Elaboración del autor.

El diseño de cada sistema de tratamiento a escala piloto consistió en adaptar un recipiente de plástico resistente con las dimensiones representadas en la siguiente figura.

**Figura 8.** Diseño del sistema de tratamiento con sus dimensiones.



Fuente: Elaboración del autor.

Como se pudo observar en la figura anterior, las dimensiones de este sistema de tratamiento son 40 cm de largo, 15 cm de alto y 15 cm de ancho, volumen en el que se vertieron diez 10 L de agua. A continuación, en las ilustraciones se muestran diferentes sistemas de tratamiento a escala piloto de laboratorio.

**Imagen 17.** Experimentación.



**Fuente:** Fotografía del autor.

**Imagen 18.** Tratamiento al 20 %.



**Fuente:** Fotografía del autor.

**Imagen 19.** Tratamiento al 40 %.



**Fuente:** Fotografía del autor.

**Imagen 20.** Tratamiento al 60 %.



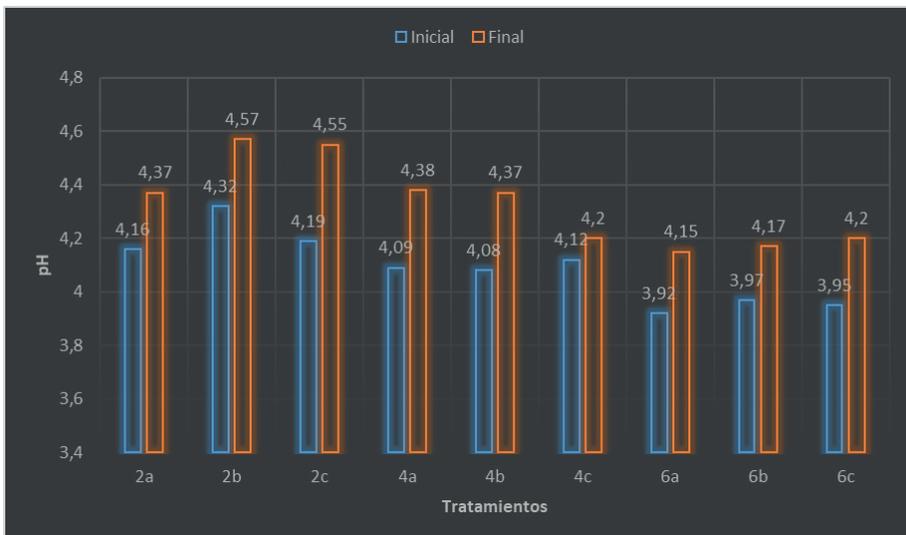
**Fuente:** Fotografía del autor.

Este diseño es a escala piloto de laboratorio y tuvo 180 gramos de *Eichhornia crassipes*, que es el equivalente a dos plantas.

#### 4.2.1. pH

El pH se midió antes y durante la investigación; la figura 9 muestra los datos de esta medición y deja apreciar los bajos niveles en todo el proceso. Las aguas residuales industriales son descargadas al alcantarillado, que posteriormente se dirige al río Tunjuelo, y los bajos niveles de pH afectan las tuberías y por supuesto agravan la situación del río en mención. La planta *E. crassipes* soportó estos niveles bajos de pH.

**Figura 9.** pH antes y después del tratamiento.



**Fuente:** Elaboración del autor.

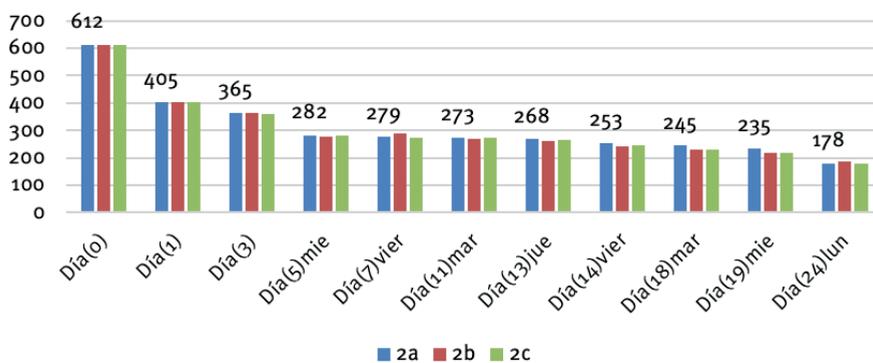
Se puede apreciar que en los tratamientos con aguas residuales concentradas con cromo industrial del 60 % el pH es de menos de 4,0 empezando el proceso de tratamiento; los niveles de pH de los tratamientos más bajos como el de 20 % y 40 % están por encima de 4,0. Estos niveles de pH son muy bajos, lo que evidencia la resiliencia de *E. crassipes* en aguas industriales. A medida que avanzaba el proyecto se demostró que estos niveles iban subiendo y se estabilizaron en 4,2 en casi todos los tratamientos.

#### 4.2.2. Evaluación del cromo

Un uso de concentraciones altas de cromo, como en esta investigación, no se encuentra en la literatura: las más altas concentraciones son las utilizadas por Gupta y Balomajumder (2015), Hadad et ál. (2011) y Kasturiarachchi (2014), quienes utilizaron concentraciones de menos de 30 mg/L de cromo.

Para las evaluaciones de este sistema de tratamiento se midieron las concentraciones de cromo en el agua en mg/L, al inicio y posteriormente cada dos días. En la siguiente figura se puede apreciar que las concentraciones iniciales estaban alrededor de los 612 mg/L de cromo. Con las remociones hay una continua disminución, estabilizándose después de veinticuatro (24) días de tratamiento:

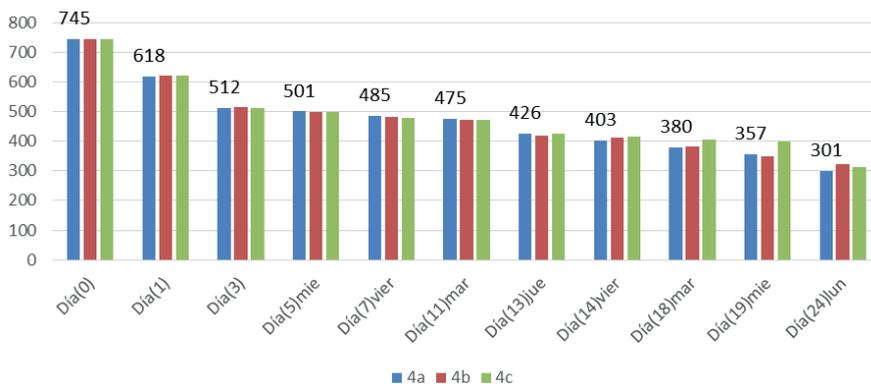
**Figura 10.** Concentraciones de cromo (612 mg/l) iniciales.



**Fuente:** Elaboración del autor.

En la siguiente figura las concentraciones iniciales de los tratamientos estaban alrededor de los 740 mg/L de cromo (se realizaron por triplicado); se puede apreciar que tan solo dos días después hubo una remoción hasta 618 mg/L de cromo (VI). Como se puede apreciar en las figuras, las remociones muestran una continua disminución de este metal, estabilizándose después de 24 h de tratamiento. Las tres pruebas arrojaron un comportamiento similar durante todo el proceso y se obtuvieron remociones por encima del 60 %; esto permite concluir que esta tecnología se podría implementar en una curtiembre debido a su alto grado de remoción.

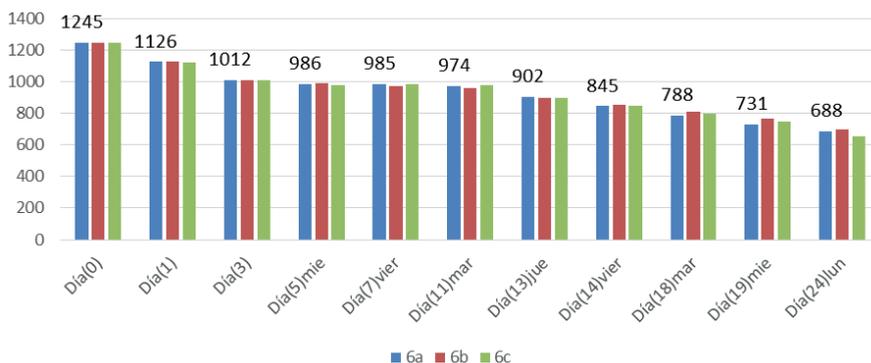
**Figura 11.** Concentraciones de cromo (740 mg/L) iniciales.



Fuente: Elaboración del autor.

En otra experimentación con concentraciones iniciales de 1200 mg/L (también por triplicado) se pudo observar que al tercer día se obtuvieron remociones hasta 1000 mg/L (ver figura 12).

**Figura 12.** Concentraciones de cromo (1250 mg/L) iniciales.



Fuente: Elaboración del autor.

Como se puede apreciar en estas dos gráficas, las remociones muestran una continua disminución de este metal, estabilizándose después de 24 h de tratamiento. Las tres pruebas arrojaron un comportamiento similar durante todo el proceso y se obtuvieron remociones por encima del 45 %.

**Imagen 21.** Planta de *E. crassipes* con cromo adsorbido.



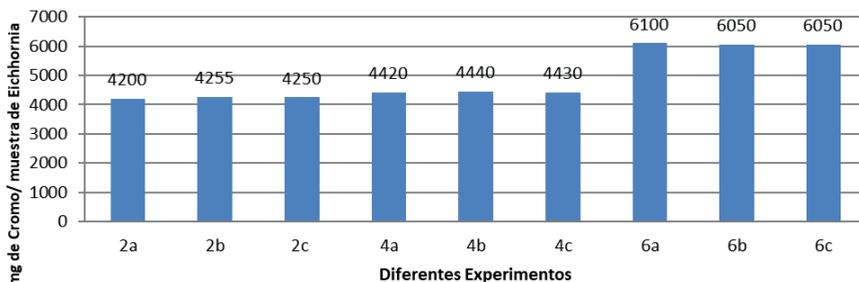
**Fuente:** Fotografía del autor.

En la ilustración 21 se puede ver adherido el cromo a las raíces de la planta acuática *E. crassipes*; esta adsorción se hizo efectiva bajo un proceso de quimisorción, debido a que las raíces de esta planta poseen gran cantidad de celulosa.

#### *4.2.3 Determinación del porcentaje de cromo en Eichhornia crassipes*

Al final del proceso de tratamiento con la *E. crassipes*, se realizaron pruebas de concentración de cromo en su estructura vegetal. Estos resultados muestran mg de cromo sobre 180 gr de muestra de material vegetal que se evidenciaron en los diferentes experimentos. En la figura 13 se puede apreciar cada experimento con la respectiva cantidad de cromo encontrado.

**Figura 13.** Cantidad de cromo encontrado en las plantas



Fuente: Elaboración del autor.

Para los experimentos con menos concentración de cromo (del 20 %), se puede apreciar que hay unas concentraciones de 4000 mg cromo/muestra en su estructura vegetal. Se utilizaron 180 gr de muestra para retener 4000 mg de cromo, lo que indica que se acumularon 23,33 mg de cromo por cada gramo de *Eichhornia crassipes*.

Para los experimentos 4 (a, b y c), realizados con 40 % de aguas de curtiembres, se puede apreciar que estas tienen unas concentraciones de 4400 mg cromo/muestra en su estructura vegetal. Se utilizaron 180 gr de muestra para retener 4400 mg de cromo, lo que indica que se acumularon 22,33 mg de cromo por gramo de *Eichhornia crassipes*.

Para los experimentos 6 (a, b y c), realizados con 60 % de aguas de curtiembres, se puede apreciar que estas tienen unas concentraciones de 6200 mg cromo/muestra encontrado en su estructura vegetal. Se utilizaron 180 gr de muestra para retener 6200 mg de cromo, lo que indica que se acumularon 34,33 mg de cromo por gramo de *Eichhornia crassipes* saturándose completamente.

El grado de acumulación vio afectada a cada planta de *Eichhornia crassipes*; por tal motivo, se propone escalar el tratamiento debido a la saturación de cromo en este pequeño sistema.

En la tabla 5 se muestra un balance general de cada uno de los experimentos respecto a las concentraciones de cromo iniciales, junto con las concentraciones en la planta y las concentraciones de cromo finales.

Hubo remociones debido a que el cromo quedó retenido en la estructura vegetal de *E. crassipes*. Esta adhesión de cromo en la planta es debido a la alta presencia de celulosa y hemicelulosa en su componente vegetal. Estos macropolímeros son estructuras ramificadas de glucosa, y en esta es donde queda adsorbido el cromo, proceso conocido como quimisorción y que se detallará más adelante.

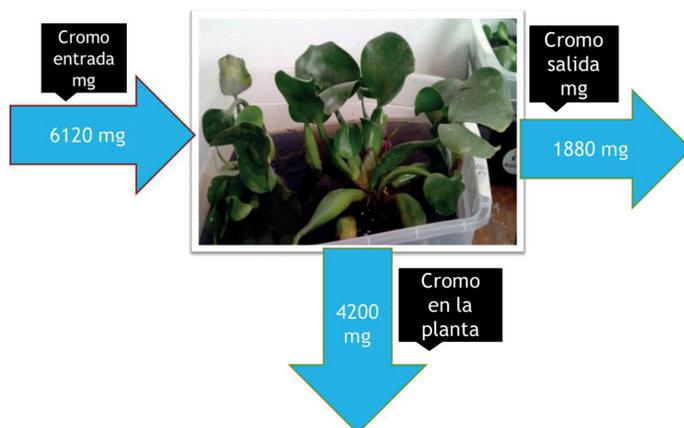
**Tabla 5.** Balance general de cromo

Experimento	Cromo inicial (mg)	Cromo final (mg)	Cromo en la <i>Eichhornia crassipes</i> (mg de cromo en la muestra)	Diferencias
2 <sup>a</sup>	6120	1740	4200	180
2b	6120	1745	4255	120
2c	6122	1720	4250	152
4 <sup>a</sup>	7480	2910	4550	20
4b	7490	2920	4540	30
4c	7490	2910	4560	20
6 <sup>a</sup>	12200	6000	6100	100
6b	12200	6020	6050	130
6c	12200	6040	6050	110

**Fuente:** Elaboración del autor.

En este balance general se tuvieron en cuenta las concentraciones iniciales, finales y las encontradas en la *Eichhornia crassipes*. En el experimento se cuenta con diez (10) litros de agua de contaminada y combinada con agua destilada. Al inicio se contaron alrededor de 612 mg de cromo sobre litro de agua en los experimentos de (2), multiplicando 612 mg/L\* 10 L, se determina la entrada de cromo al sistema de tratamiento, que llega a ser alrededor de 6120 mg. Realizando el mismo procedimiento, se determinó que aún quedaron alrededor de 1880 mg de cromo en el total del agua.

La figura 14 muestra el balance general de los tres experimentos con concentraciones de 20 % de aguas de curtiembres.

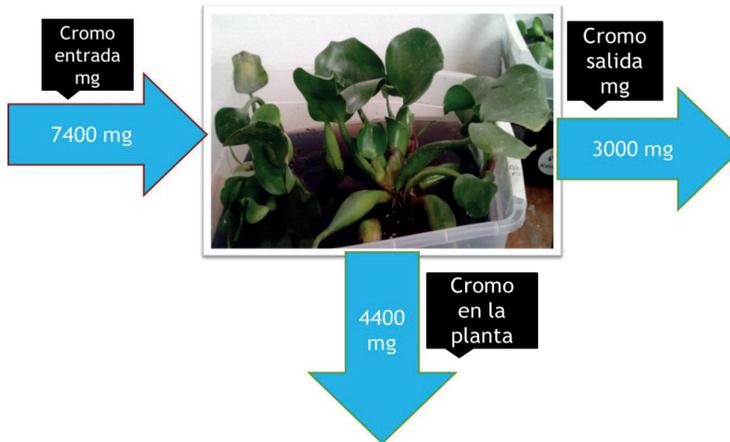
**Figura 14.** Balance de cromo en el experimento 2.

**Fuente:** Elaboración del autor.

En la entrada al sistema de tratamiento hubo 6120 mg de cromo presentes en 10 L de agua. De estos 6120 mg quedaron adheridos a la planta *Eichhornia crassipes* 4200 mg de cromo, un 68 % del total de cromo. Esto demuestra que la planta tiene un punto de saturación importante, parámetro a considerar en un proceso de escalado.

En la figura 15 se muestra el balance general de tres experimentos con concentraciones de 40 % de aguas de curtiembres.

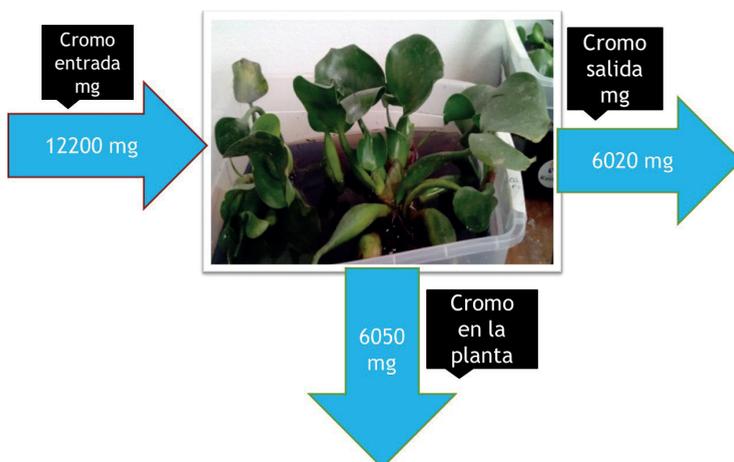
**Figura 15.** Balance de cromo en el experimento 4.



**Fuente:** Elaboración del autor.

En la entrada de este sistema de tratamiento con 40 % de aguas de curtiembres hubo 7400 mg de cromo presentes en 10 L de agua. De estos 7400 mg, 4400 mg de cromo quedaron adheridos a la planta *Eichhornia crassipes*, con un 59 % del total de cromo que entró al sistema de tratamiento. La saturación en este sistema de tratamiento fue mayor que en el anterior, la planta soporta concentraciones menores de cromo iniciales.

En la figura 16 se muestra el balance general de estos tres experimentos con concentraciones de 60 % de aguas de curtiembres.

**Figura 16.** Balance de cromo en el experimento 6.

**Fuente:** Elaboración del autor.

En la entrada al sistema de tratamiento hubo 12 200 mg de cromo presentes en 10 L de agua. De estos 12 200 mg quedaron adheridos a la planta *E. crassipes* 6050 mg de cromo, un 50,2 % del total de cromo. Se presentó una saturación de cromo en la planta debido a la alta cantidad presente en el agua. El cromo adherido a la biomasa de *E. crassipes* es producto de un proceso de intercambio catiónico entre los grupos OH que aportan electrones a los metales pesados, en este caso cromo (VI), que se estabiliza en la celulosa de la planta, uniéndose a esta, que le comparte los electrones.

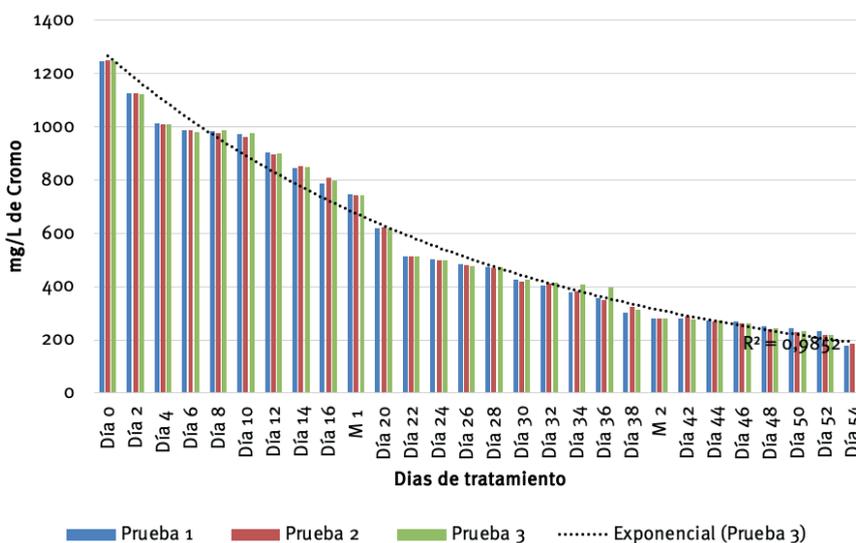
Se podría seguir el tratamiento cambiando la planta saturada de cromo por otra nueva para seguir bajando los niveles de ese metal pesado; este es un parámetro para futuros montajes a escala industrial, pues al albergar gran cantidad de cromo, la planta deviene un material peligroso. También se podría montar experimentos para aprovechar esta biomasa.

#### 4.2.4 Propuesta de tratamiento escalonado de *E. crassipes*

En los tratamientos anteriores se pudo apreciar que las concentraciones de cromo variaron de un experimento a otro. De esta manera, se propone un tratamiento escalonado de modo que cuando la *E. crassipes* se sature de cromo, se cambie por otra planta nueva. Este tratamiento se hace viable debido a las altas concentraciones de cromo que tienen estas curtiembres. Con esta propuesta se tendrían remociones de más del 90 % en 55 días, cambiando plantas de *E. crassipes* cada 15 días; al disminuir paulatinamente las concentraciones de cromo, presentando valores en disminución, se procederá a cambiar de planta

cuando sea necesario. Para el día 39 se cambiará de planta nuevamente debido al grado de saturación de cromo de la segunda planta de *E. crassipes*.

**Figura 17.** Propuesta de tratamiento escalonado.



Fuente: Elaboración del autor.

Estos datos se establecieron con los tratamientos de 60 % de aguas de curtiembres que tenían concentraciones por encima de 1200 mg/L de cromo. Después de su tratamiento vendría el primer cambio de *E. crassipes*; los datos de las concentraciones de 40 % se medirán hasta el día 38 y con los datos de las concentraciones de 20 % se llegaría al final del proceso.

## 5. DISEÑO DE UN HUMEDAL PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES

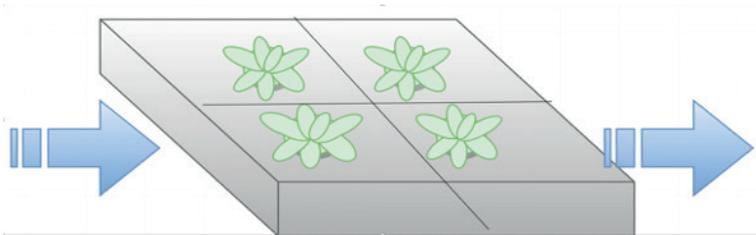
Con los resultados obtenidos en el capítulo 4, se diseñó un humedal para el tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales. Se propuso una malla flotante donde se ubican las plantas de *E. crassipes* en compartimentos ajustables a las dimensiones de los canales de aguas de escorrentía antes de llegar a un humedal. Este diseño propuesto puede servir para aguas residuales domésticas e industriales contaminadas con metales pesados, o para una combinación de ambos tratamientos. Para el correcto uso de este humedal se deben caracterizar las aguas residuales y, dependiendo de estos parámetros, se procederá a construir el humedal, adaptándose a los parámetros de calidad.

### 5.1. Diseño del humedal con *E. crassipes*

Para el debido funcionamiento de un humedal artificial se adaptarán rejillas primarias y secundarias para la retención de material sólido que podría afectar el tratamiento.

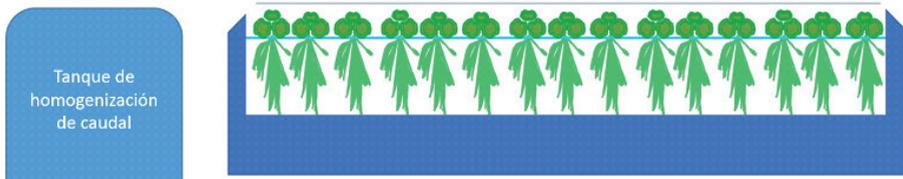
Se procederá a diseñar y construir una malla plástica que flote y se diseñarán compartimientos de tratamiento donde se ubiquen las plantas de *E. crassipes*. En la figura 18 se observa la distribución de los compartimientos.

**Figura 18.** Compartimientos de *E. crassipes*.



**Fuente:** Elaboración del autor.

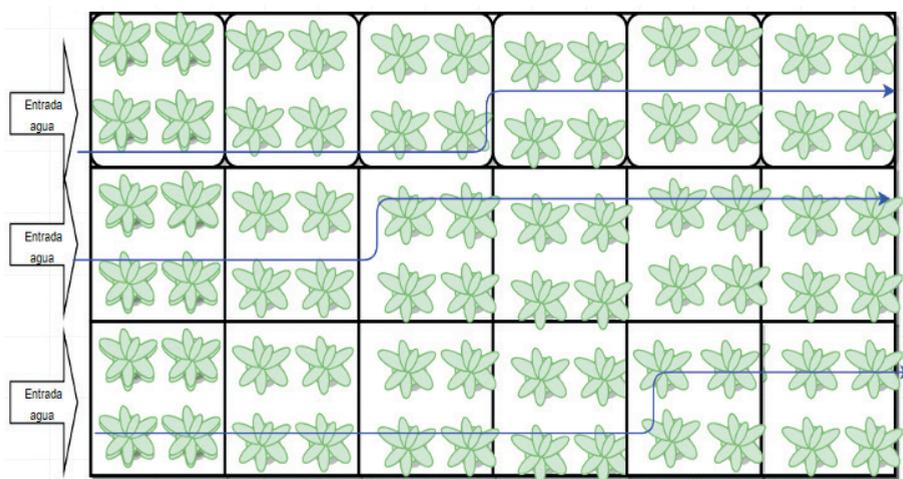
**Figura 19.** Vista lateral del humedal.



**Fuente:** Elaboración del autor.

En la siguiente figura se puede observar la planta *E. crassipes* en contacto con el agua para su tratamiento.

**Figura 20.** Vista frontal.



Fuente: Elaboración del autor.

### 5.2. Dimensionamiento biológico

Para la obtención de las ecuaciones de diseño, se supone que los humedales se comportan como reactores de flujo ideal en pistón, en los cuales los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden (Carreño y Rodríguez, 2019) Hay un gradiente de concentración a medida que el agua contaminada pasa por cada compartimiento donde pueda haber una remoción de nutrientes expresados en DBO, nitrógeno y fósforo. Los parámetros a tener en cuenta en el montaje del humedal flotante con *E. crassipes* se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6.** Parámetros de diseño de un humedal

PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN HUMEDAL		
Caudal	$m^3/D$	250
Tiempo Retención Hidráulico	$D$	3,125
Volumen	$m^3$	80
Superficie	$m^2$	200
Longitud	$m$	50
Altura	$m$	0,4
Ancho	$m$	4
Pendiente (s)	$m/m$	0,02
W ancho	$m$	5

PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN HUMEDAL		
h altura	m	0,4
Longitud	m	60

**Fuente:** (Carreño y Rodríguez, 2019)

Cada parámetro del diseño se ajustó a los datos de entrada obtenidos en la caracterización. Los valores presentados en la tabla 6 son los propuestos en este libro, totalmente adaptables a las condiciones iniciales. La tabla 7 reporta los datos generados en una caracterización de agua residual doméstica.

**Tabla 7.** Parámetros de diseño de un humedal

DBO	mg/L	350
DBO	mg/L	20
Ka	D-1	0,06
Carga Orgánica	gd/m <sup>2</sup>	6,5
Ks Conductividad hidráulica Ks (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ×d)	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ×d.	3000
As (es la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo)	m <sup>2</sup>	4,16666667

**Fuente:** (Carreño y Rodríguez, 2019)

Donde la DBO inicial es de 350 mg/L, a través del humedal se llegaría a remover cerca del 90 %, de este parámetro.

### 5.3. Dimensionamiento del tratamiento

Proponemos un gradiente de concentración en el que a medida que el agua contaminada pase por cada compartimiento, se obtenga una remoción de nutrientes expresados en DBO, nitrógeno y fósforo.

Por tanto, el balance de masa para un contaminante es simplemente:

$$\frac{dc}{dt} = -KvC$$

#### **Ecuación 1 balance de masa para un contaminante**

Siendo,

C: la concentración del contaminante, por ejemplo, DBO o nitrógeno en mg/L.

kV: la constante de cinética de primer orden, en días-1. El signo negativo en la expresión indica que la concentración de contaminante disminuye a lo largo del tiempo.

Si se integra esta ecuación entre la concentración inicial de contaminante o afluente ( $C_0$  para  $t=0$ ) y la final o efluente ( $C_1$  para  $t=t$ , siendo este último el tiempo medio de retención hidráulico, en días) se obtiene:

**Ecuación 2. Ecuación de diseño de un humedal**

$$\frac{C}{C_0} = \exp(-Kvt)$$

El tiempo medio de retención hidráulico es:

**Ecuación 3. Tiempo de retención hidráulico**

$$t = \frac{v}{Q} = \frac{S \cdot h}{Q}$$

Siendo,

V: el volumen del humedal, en  $m^3$ .

Q: el caudal medio, en  $m^3/d$ .

S: la superficie del humedal, en  $m^2$ .

H: la profundidad media del humedal, en m.

Sustituyendo t en las dos ecuaciones anteriores y definiendo una nueva constante cinética de primer orden ( $k_A$ , en  $m/d$ ):

Despejando S:

**Ecuación 4. Ecuación de diseño para dimensionar el humedal.**

$$s = \frac{Q}{k_A} \ln \left[ \frac{C}{C_0} \right]$$

La anterior ecuación, de diseño, es recomendada para dimensionar la superficie de humedales de flujo horizontal. Los valores de Q y  $C_0$  se determinan a partir de los estudios de caracterización del afluente y el de  $C_1$  se define a partir de los límites de vertido o los objetivos de calidad establecidos por la normativa ambiental vigente. Determinada la superficie de tratamiento, se realiza una verificación final, consistente en comprobar que la carga orgánica superficial sea menor de  $6 \text{ g DBO}/m^2 \times d$ .

**5.4. Dimensionamiento hidráulico**

El dimensionamiento hidráulico sirve para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida su superficie. Este proceso se realiza aplicando la ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = K_s \cdot A_s \cdot s$$

### **Ecuación 5. Régimen de flujo poroso**

Q: el caudal, en m<sup>3</sup>/d.

Ks: la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>×d.

As: es la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo, en m<sup>2</sup>.

S: es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), en m/m.

Las dimensiones del humedal se determinan entonces así:

### **Ecuación 6. Dimensiones del humedal.**

$$As = \frac{Q_{\text{medio}}}{Ks * s}$$

Q medio d, el caudal medio diario, en m<sup>3</sup>/d.

Calculada el área de la sección transversal, y una vez fijada la profundidad (h), se determina el ancho del humedal.

Para tratar 250 m<sup>3</sup> de agua diarios, se debe tener un volumen total de 80 m<sup>3</sup>, se cuenta con una longitud de 50 m, una profundidad de 0,4 m y una anchura de 4 m. Se utilizó la ecuación para determinar la superficie necesaria para tratar 350 mg/L de DBO, y el resultado arrojado es que se necesitan 200 m<sup>2</sup>. También utilizamos la ecuación 5 para determinar la carga orgánica y se obtuvo 6,5 gramos de DBO por m<sup>2</sup> al día.

En el proceso se obtuvo un ancho de 5 m, una altura de 0,4 m y una longitud de 60 m. Para obtener las mediciones ajustadas al modelo se debe contar con unos ajustes por encima del dimensionamiento biológico. De esta forma se realizó un montaje experimental de un humedal flotante teniendo como protagonista la planta *E. crassipes*.

### **5.5. Antecedentes**

A continuación, se muestran diferentes experiencias en el mundo relacionadas con humedales artificiales diseñados con *E. crassipes*. En las imágenes 21 y 22 se muestran resultados de investigaciones con tratamiento terciario de aguas residuales domésticas en México y China.

**Imagen 22.** Tratamiento terciario, México.



Fuente: (Jayaweera et ál.,2008)

**Imagen 23.** Piscina de tratamiento de aguas negras.



Fuente: (Jayaweera et ál.,2008)

En estas dos investigaciones se observa un tratamiento terciario de aguas residuales domésticas para reducir nutrientes aún presentes en el agua después de un tratamiento de sedimentación y de zanjas de oxidación. Las remociones de estos nutrientes fueron de más del 80 % en nitrógeno y más del 65 % en fósforo.

En la imagen 24 se evidencia la experiencia con biofiltros para el tratamiento de aguas residuales industriales. Estos biofiltros se utilizaron para las aguas contaminadas con nutrientes presentes en los efluentes de la agricultura. Hubo remociones de más del 90 % en demanda bioquímica de oxígeno y más del 70 % en remociones de nitrógeno.

**Imagen 24.** Biofiltro, Brasil.



**Fuente:** (Kutty et ál.,2009)

**Imagen 25.** Humedal flotante.



**Fuente:** (Kutty et ál.,2009)

En la imagen 25 se observa un material flotante utilizado para remover residuos de materia orgánica presente en el agua doméstica. Este material es similar al material utilizado en el presente libro. Se pueden apreciar unas mallas con *E. crassipes*, para la remoción de DBO, nutrientes y patógenos.

El tratamiento de aguas residuales industriales se aplicará a partir de este proceso experimental, con el fin de retener los contaminantes. La biomasa de *E. crassipes* estaría totalmente saturada de los metales, que pueden ser arsénico, plomo, mercurio, plata, aluminio y especialmente cromo, pero se deben cambiar cada cierto tiempo, cuando la planta esté totalmente saturada.

En la imagen 26 se muestra un sistema ideal para el tratamiento de aguas residuales, ya sean domésticas o industriales.

**Imagen 26.** Malla flotante.



**Fuente:** (Kutty et ál.,2009)

Las plantas de *E. crassipes* utilizadas en el proceso de tratamiento de aguas residuales han crecido de forma tal que esta biomasa se podría aprovechar, así como las plantas utilizadas en el proceso de tratamiento de metales pesados, aunque en menor proporción.

El aprovechamiento consiste en la utilización de esta biomasa para su transformación en biocombustibles como el bioetanol, el biohidrógeno y el biogás.