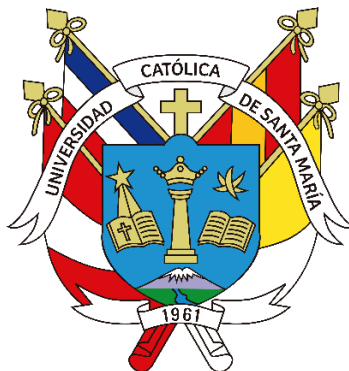


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotechnológicas
Escuela Profesional de Ingeniería Biotechnológica



**Métodos de fitorremediación en aguas residuales
municipales y domésticas**

Tesis presentada por la Bachiller:

Chávez Arenas, Fiorela Beatriz

ORCID: 0009-0007-4090-9429

para optar el Título Profesional de Ingeniera Biotecnóloga

Asesor:

Mg. Ortiz Romero, Derly David

ORCID: 0000-0003-1886-8206

Arequipa - Perú
2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 07 de Agosto del 2024

Dictamen: 005584-C-EPIB-2024

Visto el borrador del expediente 005584, presentado por:

2016802112 - CHÁVEZ ARENAS FIORELA BEATRIZ

Titulado:

MÉTODOS DE FITORREMEDIACIÓN EN AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y DOMÉSTICAS

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO BIOTECNOLOGO

**00476696 - BERNABE ORTIZ JULIO CESAR
DICTAMINADOR**



**42098888 - CORDOVA BARRIOS CINTHIA CAROL
DICTAMINADOR**



**41404327 - BARREDA DEL CARPIO JAIME ERNESTO
DICTAMINADOR**



Métodos de fitorremediación en aguas residuales municipales y domésticas

INFORME DE ORIGINALIDAD

26%

INDICE DE SIMILITUD

25%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

12%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

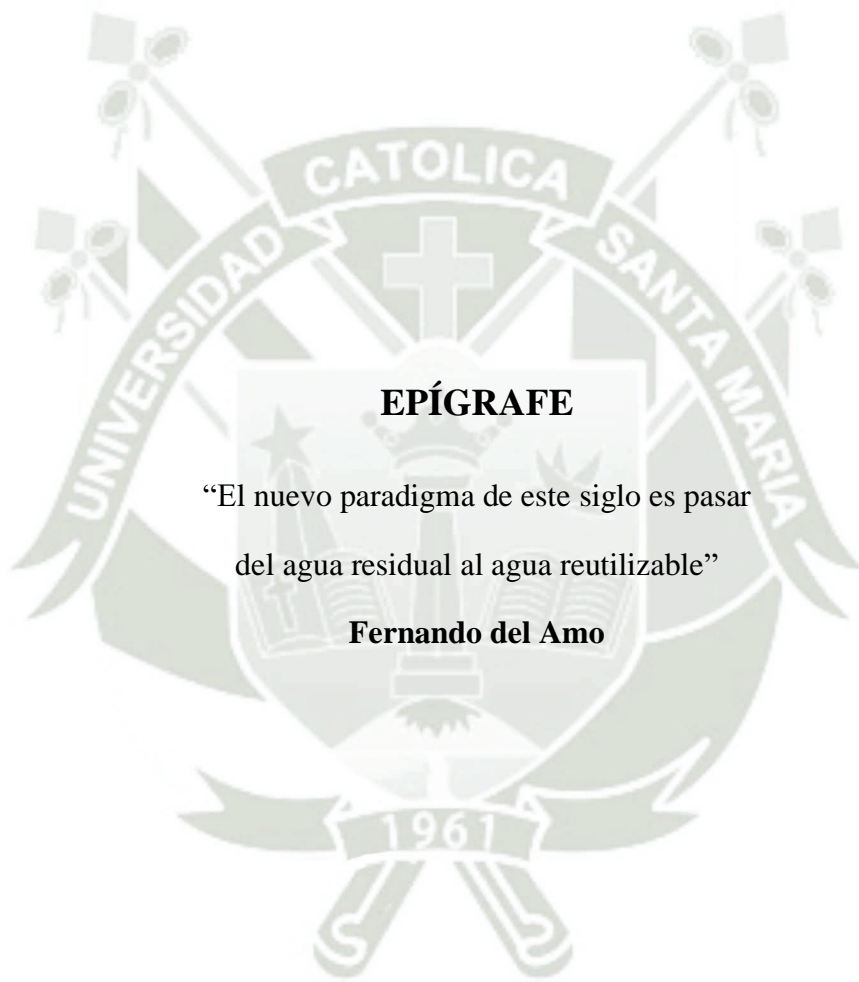
FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	8%
2	revistas.ustatunja.edu.co Fuente de Internet	2%
3	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorioinstitucional.ufpso.edu.co Fuente de Internet	1%
5	revistas.ucr.ac.cr Fuente de Internet	1%
6	revistas.cientifica.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
8	ciencialatina.org Fuente de Internet	1%
9	Submitted to Universidad de Guadalajara Trabajo del estudiante	

DEDICATORIA

Le dedico esta tesis a mi familia que siempre me apoyo y ayudo a continuar en todo momento tanto a los que están conmigo como a los que partieron y se encuentran en la gloria del señor.





EPÍGRAFE

“El nuevo paradigma de este siglo es pasar
del agua residual al agua reutilizable”

Fernando del Amo

RESUMEN

El presente trabajo de revisión sistemática tuvo como objetivo principal determinar la eficacia de los sistemas de tratamiento aplicados a la fitorremediación de aguas residuales municipales y domésticas.

La metodología consistió en la revisión bibliográfica que, se inició con la búsqueda y ubicación de artículos potenciales a través de descriptores booleanos en las bases de datos Google Scholar, Scopus, Springer, Science Direct, Web of Science, Research Gate. Luego se realizó una lectura cuestionante, reflexiva y crítica de la información con el fin de seleccionar los artículos originales y revisiones sistemáticas producto de investigaciones experimentales, quedando un total de 71 artículos.

En base a la revisión sistemática de los artículos, se pudo concluir que la especie *Eichhornia crassipes* fue la más eficiente en la fitorremediación realizada con el sistema de flujo discontinuo en el tratamiento de aguas residuales domésticas (pH: 8.78 – 7.10, Turbidez: 90.33%, Sólidos totales: 80.87%, DBO₅: 84.72%, DQO: 99.77%, Coliformes Totales: 91.92% y Coliformes Fecales: 92.25%); en aguas municipales fue la *Phragmites australis* con el sistema humedal artificial de flujo horizontal subterráneo (SST: 84.3%, DBO₅: 88.6% y DQO: 89.1%); y en aguas mixtas el sistema de fitorremediación más eficaz fue el de flujo discontinuo conjuntamente con la *Eichhornia crassipes*, que logró una eficiencia de 87.37%, 88.17% y 94.29% en DBO₅, DQO y NH₄⁺, respectivamente. Así mismo, si bien es cierto se produjo disminución de los parámetros pH, DBO₅, DQO, TDS en todas las investigaciones realizadas, la gran mayoría no alcanzó la eficiencia.

Palabras clave:

Fitorremediación, aguas residuales domésticas, aguas residuales municipales

ABSTRACT

The main objective of this systematic review work was to determine the effectiveness of the treatment systems applied to the phytoremediation of domestic and municipal wastewater.

The methodology consisted of a bibliographic review that began with the search and location of potential articles through Boolean descriptors in the Google Scholar, Scopus, Springer, Science Direct, Web of Science, and Research Gate databases. Then, a questioning, reflective and critical reading of the information was carried out in order to select the original articles and systematic reviews resulting from experimental research, leaving a total of 71 articles.

Based on the systematic review of the articles, it was concluded that the species *Eichhornia crassipes* was the most efficient in the phytoremediation carried out with the discontinuous flow system in the treatment of domestic wastewater (pH: 8.78 – 7.10, Turbidity: 90.33%, Total solids: 80.87%, DBO₅: 84.72%, DQO: 99.77%, Total Coliforms: 91.92% y Fecal Coliforms: 92.25%); in municipal waters it was *Phragmites australis* with the underground horizontal flow artificial wetland system (TSS: 84.3%, DBO₅: 88.6% y DQO: 89.1%); and in mixed waters the most effective phytoremediation system was the discontinuous flow system together with *Eichhornia crassipes*, which achieved an efficiency of 87.37%, 88.17% and 94.29% in BOD₅, COD and NH₄⁺, respectively. Likewise, although it is true that there was a decrease in the parameters pH, COD₅, BOD, TDS in all the investigations carried out, the vast majority did not achieve efficiency.

Key words:

Phytoremediation, domestic wastewater, municipal wastewater

ÍNDICE

DEDICATORIA

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	6
3. REVISIÓN	12
3.1. Aguas residuales domésticas y municipales	12
3.1.1. Productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP)	14
3.1.2. Contaminantes disruptores endocrinos (EDC)	15
3.2. Fitorremediación.....	15
3.3. Mecanismos de la fitorremediación.....	16
3.4. Identificación de plantas comúnmente utilizadas	19
3.4.1. Plantas Flotantes	21
3.4.1.1. <i>Eichhornia crassipes</i> (jacinto de agua, buchón de agua)	21
3.4.1.2. <i>Pistia stratiotes</i> (lechuga de agua).....	22
3.4.1.3. <i>Salvinia molesta</i>	22
3.4.1.4. <i>Azolla filiculoides</i> (helecho de agua)	23
3.4.1.5. <i>Lemnaceae</i>	24
3.4.1.6. <i>Lemna minor</i> (lenteja de agua).....	24
3.4.1.7. <i>Lemna minuta</i>	25
3.4.1.8. <i>Nymphoides humboldtiana</i> (ninfoides sudamericana)	25
3.4.2. Plantas emergentes.....	27
3.4.2.1. <i>Phragmites australis</i> (carrizo).....	27
3.4.2.2. <i>Scirpus grossus</i>	27
3.4.2.3. <i>Typha angustifolia</i>	27
3.4.2.4. <i>Brachiaria mutica</i>	27

3.4.2.5. <i>Canna indica</i>	27
3.4.2.6. <i>Chrysopogon zizanioides</i> (Vetiver)	28
3.4.2.7. <i>Cortaderia selloana</i> (Hierba de la pampa).....	28
3.4.2.8. <i>Hordeum vulgare</i>	28
3.4.2.9. <i>Lepironia articulata</i>	28
3.4.2.10. <i>Nephtylis podophyllum</i>	29
3.4.2.11. <i>Schoenoplectus litoralis</i>	29
3.4.2.12. <i>Schumannianthus dichotomus</i>	29
3.4.3. Plantas sumergidas	29
3.4.3.1. <i>Echinodorus radicans</i>	29
3.4.3.2. <i>Nasturtium officinale</i> (berro de agua).....	30
3.4.3.3. <i>Sangittaria lancifolia</i>	30
3.5. Sistemas de tratamiento	36
3.5.1. Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas o batch system	36
3.5.2. Lagunas de estabilización o humedales artificiales de flujo horizontal o vertical o Short-term pilot reed bed system.....	36
3.5.3. Filtros verticales	43
3.5.4. Sistema hidropónico.....	44
3.6. Eficiencia de la fitorremediación.....	46
3.6.1. Parámetros de Calidad del Agua.....	46
4. PERSPECTIVAS FUTURAS	61
4.1. Economía circular y Biomasa	61
4.2. Innovación tecnológica	62
4.3. Biotecnología y Genética	63
4.4. Producción Alimentaria y Ornamentales	63
4.5. Limitaciones	64
5. CONCLUSIONES.....	66
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Numero de artículos utilizados en la revisión sistemática en cada base de datos ...	7
Tabla 2. Artículos para la revisión sistemática	8
Tabla 3. Plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales domésticas	32
Tabla 4. Plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales municipales	33
Tabla 5. Plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales.....	34
Tabla 6. Sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de aguas residuales domésticas	44
Tabla 7. Sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de aguas residuales municipales.....	45
Tabla 8. Sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales.....	45
Tabla 9. Eficacia del sistema de tratamiento de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales domésticas	48
Tabla 10. Eficacia del sistema de tanques hidropónicos para la fitorremediación de aguas residuales domésticas	50
Tabla 11. Eficacia del sistema humedal artificial de flujo horizontal en la fitorremediación de aguas residuales domésticas	51
Tabla 12. Eficiencia del sistema humedal artificial de flujo vertical en la fitorremediación de aguas residuales domésticas	51
Tabla 13. Eficiencia del sistema humedal artificial bio-rack común y modificado en la fitorremediación de aguas residuales domésticas.....	52
Tabla 14. Eficiencia del sistema de ingeniería ecológica en la fitorremediación de aguas residuales domésticas	52
Tabla 15. Eficiencia de los sistemas de fitorremediación en aguas residuales domésticas con tratamiento primario.....	53
Tabls 16. Eficiencia de los sistemas de fitorremediación de aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	54
Tabla 17. Eficiencia de los sistemas de fitorremediación de aguas residuales domésticas al 25% y 50%.....	55

Tabla 18. Eficiencia del sistema de tratamiento de tanques de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales domésticas pretratadas	56
Tabla 19. Eficiencia del sistema de tratamiento de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales municipales.....	57
Tabla 20. Eficiencia del sistema de tratamiento humedales de flujo horizontal en la fitorremediación de aguas residuales municipales	58
Tabla 21. Eficiencia del sistema de tratamiento humedales de flujo vertical en la fitorremediación de aguas residuales municipales	59
Tabla 22. Eficiencia de los sistemas de humedales de tratamiento flotantes y de flujo vertical en la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales.....	60



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disminución de reservas de agua dulce (a), Contaminación por actividad humana (b) y Falta de conciencia sobre el valor del agua (c).	1
Figura 2. Aguas residuales vertidas con poco o escaso tratamiento en América Latina.....	2
Figura 3. Deficiencias en tratamiento de aguas residuales en Perú	3
Figura 4. Porcentaje de artículos utilizados en cada base de datos	7
Figura 5. Dodecibencenosulfonato de sodio (NaDBS) (a) y estructura de barras y esferas (b)	13
Figura 6. Tripolifosfato de sodio (STPP) (a) y estructura de barras y esferas (b).....	13
Figura 7. Plantas acuáticas <i>Lemna minor</i> (a), <i>Salvinia molesta</i> (b), <i>Pistia stratiotes</i> (c) y <i>Azolla filiculoides</i> (d)	26
Figura 8. Plantas acuáticas <i>Canna indica</i> (a), <i>Thypha angustifolia</i> (b) y <i>Eichornia crassipes</i> (c)	31
Figura 9. Sistema de tratamiento de flujo discontinuo provisto de sistema de aireación (a) y Sistema de humedal artificial de flujo subterráneo vertical (b).....	38
Figura 10. Sistema de humedal artificial de flujo subterráneo horizontal (a) y Sistema de humedales de tratamiento flotantes (HTF) con esteras flexibles de bambú, poliéster o PVC (b)	42

LISTA DE ABREVIATURAS

AINE	Medicamentos antiinflamatorios no esteroideos
BC	Biochar
CPE	Contaminantes de preocupación emergente
CRISPR-Cas 9	nucleasa 9
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
ECA	Estándares de calidad ambiental
EDA	Evaluación de desempeño ambiental
EDC	Contaminantes disruptores endocrinos
LMP	Límites máximos permisibles
MFC	Celda de combustible biológica
Na BDS	Dodecibencenosulfonato de sodio
NMP	Número más probable
OD	Oxígeno disuelto
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNRH	Plan nacional de recursos hídricos
PPCP	Producto farmacéutico y de cuidado personal
PTAR	Plantas de tratamiento de aguas residuales
Pt-Co	Escala Platino Cobalto
PVC	Policloruro de vinilo
SHEFROL	Sheet Flow root level
STPP	Tripolifosfato de sodio
SS	Sólidos suspendidos
SST	Sólidos totales suspendidos
TALEN	Nucleasa efectora de tipo activador de la transcripción
TDS	Sólidos totales disueltos
TRH	Tiempo de retención hidráulica
TKN	Nitrógeno Total Kjeldahl
TN	Nitrógeno total
TP	Fosforo total
TS	Sólidos totales

UNEP

Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente

ZFN

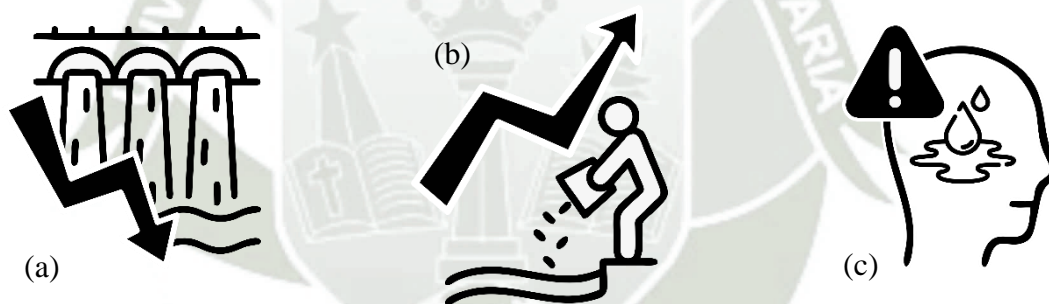
Nucleasas con dedos de Zinc



1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos, que hoy en día es considerado vital para la supervivencia del ser humano en el tiempo, debido a la disminución de las reservas de agua dulce, al constante incremento de su contaminación por las actividades que realiza el propio hombre y a la falta de conciencia de la población sobre el valor del agua. El agua es contaminada por compuestos orgánicos e inorgánicos provenientes de aguas residuales domésticas, municipales, agrícolas, industriales, y de extracción minera, que son descargadas muchas veces sin tratamiento previo o con tratamiento, pero insuficiente en las fuentes naturales de agua (1,2,3).

Figura 1. Disminución de reservas de agua dulce (a), Contaminación por actividad humana (b) y Falta de conciencia sobre el valor del agua (c).



Según señala la ONU, la escasez hídrica, así como la baja calidad del agua y el saneamiento inadecuado tienen un impacto en la seguridad alimentaria y en las formas de vida de las familias pobres a nivel global. Al respecto, aún existe una barrera que impide el buen uso de los recursos hídricos, es la defectuosa calidad de las aguas, debido a las actividades antrópicas, cuya causa principal de contaminación es el vertimiento de aguas residuales domésticas y municipales (1).

En América Latina, más del 70% de las aguas residuales son vertidas con poco o escaso tratamiento previo, en los suelos y fuentes de agua limpia. Si bien es cierto que, en los últimos años la región ha mejorado en la gestión de sus recursos hídricos, como el acceso a agua potable, sin embargo, no se puede asentar lo mismo acerca del tratamiento de aguas residuales, aspecto que trae inconvenientes a las comunidades en la actualidad (2).

Figura 2. Aguas residuales vertidas con poco o escaso tratamiento en América Latina

En definitiva, en Perú la principal fuente de contaminación de las masas de agua es el insuficiente tratamiento de aguas residuales domésticas. Las conclusiones de la EDA han mostrado la deficiente calidad de las aguas de la costa peruana, sus ríos y el mar adyacente, debido al continuo aumento de los efluentes de las aglomeraciones urbanas, producto de la gran migración de la población andina a la costa. Ante tal escenario, el estado peruano ha señalado en el PNRH claras metas para aumentar la reutilización de aguas residuales urbanas tratadas, sin que ello repercuta en la salud pública y el ambiente. Sin embargo, pese al notable incremento del tratamiento de las aguas residuales urbanas a un 50%, aún persisten las deficiencias en cuanto a infraestructura y ausencia de políticas públicas (1).

En el Perú, son 96 localidades en el ámbito de empresas prestadoras que no realizan tratamiento de sus aguas residuales, por lo que estas se vierten directamente a ríos, mares, canales o drenes, o se usan para riego agrícola clandestino. Estas localidades brindan el servicio de alcantarillado a 2.1 millones de habitantes lo cual representa el 12% de la población total atendida por las empresas prestadoras. Estas localidades vertieron en el año 2020 aproximadamente un total de 267.29 millones de m³/año a algún cuerpo de agua sin ningún tratamiento, lo que representa el 22% de toda el agua residual vertida al alcantarillado de las empresas prestadoras. Asimismo, se debe mencionar que también se han identificado empresas prestadoras que, si bien cuentan con una PTAR en alguna de sus localidades, estas solo tratan un caudal mínimo (3).

Entonces, el tratamiento de aguas residuales se configura como un problema álgido en Perú que, afecta al medioambiente y a la salud humana si es que no se gestiona de manera correcta, debido a razones económicas, a la poca exigencia de las autoridades ambientales y al desconocimiento de tecnologías empleadas para este tipo de procesos (4).

Figura 3. Deficiencias en tratamiento de aguas residuales en Perú



A causa del alto costo, el complejo mantenimiento y operación del accionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales, se ha venido buscando otras opciones que permitan realizar la depuración del agua que, reemplace a los tratamientos convencionales y que consigan porcentajes de remoción mínimamente parecidos o mayores a estos sistemas, una de estas alternativas que se han estudiado y con las cuales se han obtenido porcentajes de remoción de SST (Sólidos Suspendidos Totales), DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) considerables, son los filtros percoladores y la fitorremediación. La implementación de estos sistemas es novedosa y sostenible para el medio ambiente, pues para la construcción de estos no se necesita de muchos materiales de construcción y las plantas mismas se encargan de realizar los procesos físicos, químicos y biológicos para limpiar el agua de manera natural (5).

El proceso de fitorremediación comenzó en el siglo XVIII, cuando los químicos Joseph Priestley, Karl Scheele y Antoine Lavoisier, consiguieron exponer que las plantas

poseían la competencia de purificar el ambiente mediante la luz. En la década de 1960, la Unión Soviética llevó a cabo varios experimentos para limpiar el suelo contaminado con dinucleótidos utilizando plantas; para 1970, se confirmó que las plantas tenían propiedades naturales para purificar el suelo y el agua, y en los años 90 se establece el concepto de fitorremediación como tal (5).

Desde los últimos 10 a 20 años el tratamiento de aguas residuales para reúso o reincorporación a los cuerpos de agua o para el riego ha cobrado importancia, debido a la escasez del agua en el mundo, a su sobreexplotación y contaminación. Para alcanzar este objetivo es necesario que exista una sostenibilidad ambiental en el tratamiento de aguas residuales, como es la aplicación de una tecnología alternativa eficiente y viable que permita reutilizar los caudales y/o regresarlos a la naturaleza con buena calidad, sin hacer un uso intensivo de la energía y sin producir contaminantes (6).

En 1988 en Colombia por primera vez se registró como antecedente el uso de macrófitos flotantes en la Fábrica de Imusa S.A. localizada en el municipio de Río Negro (Antioquía), en el cual se comprobó la eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes en más de 97% en los metales pesados (7). Por otro lado, un estudio realizado en la ciudad de México en Xochimilco, (2012), en él se utilizó el jacinto de agua para remover metales pesados junto con la tecnología de fitorremediación, en este estudio se valoró el uso potencial como planta acumuladora de metales para los canales de Xochimilco de aguas residuales. Se compararon las concentraciones de metales en la raíz y en la parte aérea, Los coeficientes de bioacumulación arrojaron que el jacinto de agua de Xochimilco se podría utilizar como planta remediadora de metales (8).

Gavilánez (2015), probó un sistema de tratamiento con *E. crassipes* en estanques de 1m^3 de volumen, realizando remociones del 50.0%, 94.8% y 87.6% de H_2S , DBO_5 y DQO respectivamente (9).

Pérez (2019), en el tratamiento biológico de efluentes domésticos de Sevilla Don Bosco – Ecuador descargados al río Upano, con humedales artificiales de *Eichhornia crassipes*, reportó porcentajes de remoción de DBO_5 en 59.64%, DQO en 71.59%, aceites y grasas en 80.82%, sólidos sedimentables 94.15%, sólidos suspendidos 91.79% y coliformes fecales en 99.32%, concluyendo que existe una eficiencia de descontaminación del Río Upano por parte de la *Eichhornia crassipes* (10).

Qin et al. (2016), determinaron que el jacinto de agua con una capacidad de acumulación hiperactiva de nitrógeno (58.64% de las reducciones totales), fue más adecuado que la lechuga de agua en la depuración intensiva de aguas residuales domésticas. Los mismos autores en el 2020, determinaron la capacidad de remoción de N y P, concluyendo que *E. crassipes* tiene una alta capacidad de eliminación de N y P incluso en condiciones adversas, como bajas concentraciones de OD y alto contenido de amonio (11,12).

Rezania et al. (2015), estudiaron la utilización de *E. crassipes* para la remoción de metales y contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en diferentes tipos de aguas residuales. Concluyeron que el jacinto de agua era adecuado para controlar zonas urbanas y diferentes tipos de aguas residuales provenientes de las diferentes industrias, así mismo, el jacinto de agua tiene impactos positivos en el medio ambiente, alta capacidad de fitorremediación, genera biogás, producción de alimentos para animales y compost (13,14).

OBJETIVOS DE LA REVISIÓN

- **Objetivo general**

Determinar la eficacia de los métodos de tratamiento aplicados a la fitorremediación de aguas residuales municipales y domésticas.

- **Objetivos específicos**

Identificar las plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales municipales y domésticas.

Conocer los sistemas de tratamiento aplicados en la fitorremediación de aguas residuales municipales y domésticas.

2. METODOLOGÍA

La revisión bibliográfica se inició con la búsqueda y ubicación de artículos potenciales a través de descriptores booleanos con las siguientes palabras claves: (phytoremediation AND wastewater) OR (phytoremediation AND domestic wastewater) OR (phytoremediation AND municipal wastewater) en las bases de datos Google Scholar, Scopus, Springer, Science Direct, Web of Science, Research Gate. Luego se realizó una lectura cuestionante, reflexiva y crítica de la información con el fin de seleccionar los artículos originales y revisiones sistemáticas producto de investigaciones experimentales pertinentes a los objetivos planteados. Finalmente se realizó un análisis de homogeneidad de los datos con el fin de agruparlos para ser presentados en las respectivas Tablas e integrarlos en la discusión.

Criterios de inclusión

- Artículos primarios acerca del objetivo general de la investigación.
- Artículos productos de investigaciones de nivel experimental.
- Artículos de publicación entre los años 2017 al 2024 en revistas indexadas.
- Artículos en idioma inglés y español.
- Artículos de acceso abierto.
- Tesis.
- Artículos de revisión bibliográfica con el objetivo de aclarar y profundizar el problema.
- Informaciones gubernamentales o de instituciones sobre el problema.

Criterios de exclusión

- Artículos sobre Fitorremediación en aguas residuales provenientes de la minería.
- Artículos producto de investigaciones que asocian la fitorremediación a otro tipo de tratamiento biológico.
- Experimentos que adolecen de observación previa.

El acceso a la literatura inicial estuvo constituido por la ubicación de artículos resultados de investigaciones, luego del procedimiento mencionado en párrafos anteriores se filtraron estos a través de los criterios de inclusión y exclusión, quedando finalmente un total 71 artículos.

Tabla 1. Numero de artículos utilizados en la revisión sistemática en cada base de datos

Bases de datos	Número
Google Scholar	4
Scopus	3
Springer	4
Science Direct	23
Web of Science	28
Research Gate	9
Total	71

Figura 4. Porcentaje de artículos utilizados en cada base de datos

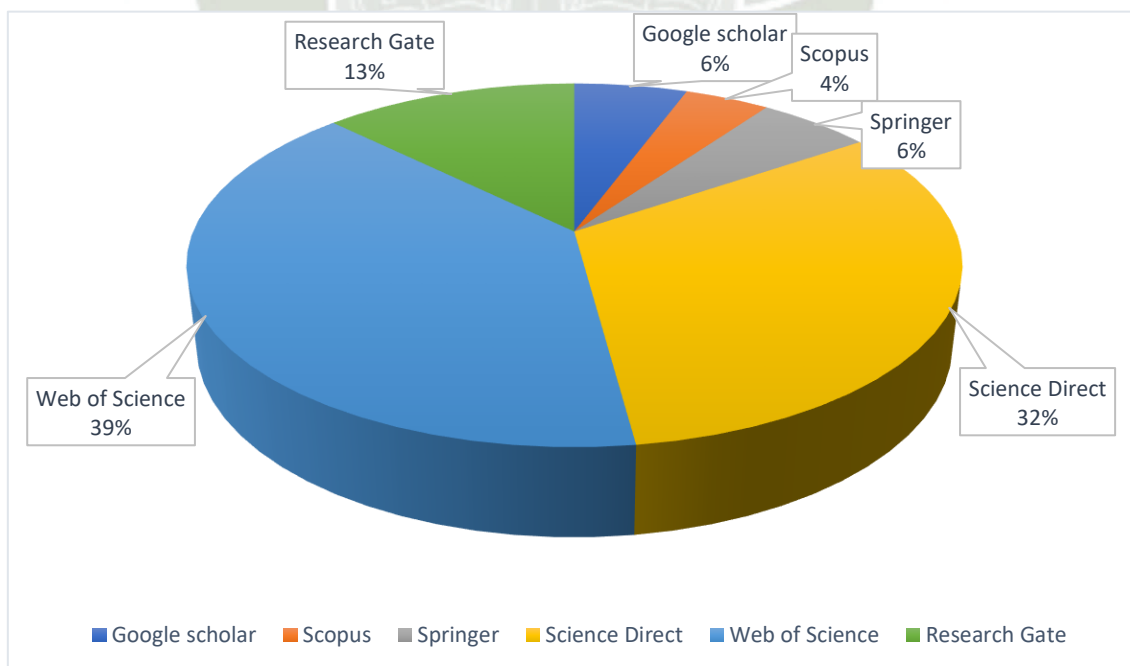


Tabla 2. Artículos para la revisión sistemática

Autores	Tipo de agua residual	Sistema de fitorremediación	Plantas
Rezooqi AM, Mouhamad RS, Jasim KA. (6)	Aguas residuales con tratamiento primario	Tratamiento por tandas	<i>Azolla filiculoides</i>
Amare E, Kebede F, Mulat W. (15)	Aguas domésticas, textiles y de destilería en proporción (18:3:1 respectivamente)	Tratamiento por tandas o lotes	
Kausar, A; Zahra, N; Kiran, H; Asim, S; Raza, A (16)	Aguas residuales domésticas 100% Aguas residuales domésticas 50%	Tanques hidropónicos	<i>Azolla pinnata</i>
Akowanou, A; Deguenon, H; Balogoun, K; Daouda, M; Aina, M (17)	Aguas residuales domésticas con tratamiento primario	Estanque facultativo	<i>Pistia stratiotes</i>
Mustafa, HM; Hayder, G. (18)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	
Selvaraj, D; Velvizhi, G (19)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento por tandas Sistema de ingeniería ecológica (lecho de lago + aireador + carbón activado)	
Mustafa HM, Hayder G (1)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	
Mustafa HM, Hayder DG (20)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Tratamiento en tanques de flujo discontinuo	
Imron MF, Firdaus AAF, Flowerainsyah ZO, Rosyidah D, Fitriani N, Kumiawan, SB (21)	Aguas residuales domésticas disueltas al 25 %	Tratamiento en tanques de flujo discontinuo	
Erzsebet Buta, Ionut Lucian Borsan, Mariana Omota, Emil Bogdan Trif, Claudiu Ioan Bunea, Andrei Mocan, Florin Dumitru Bora, Sándor Rózsa, Alexandru Nicolescu (22)	Aguas residuales municipales	Tratamiento de flujo discontinuo	
Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T (23)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo	
Kaushal, J; Mahajan, P (4)	Aguas residuales con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	<i>Nephtylis podophyllum</i>
Karaghool HAK, Ismaeal NN. (24)	Aguas residuales municipales	Humedales de flujo superficial vertical	<i>Phragmites australis</i>
Abou-Elela SI, Hellal MS, Elekhrawy MA (25)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	
Aalam T, Arias CA, Khalil N (26)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	
Chand N, Suthar S, Kumar K. (27)	Aguas mixtas	Humedales artificiales de flujo de marea con Biochar Humedales artificiales de flujo de marea sin Biochar	<i>Typha sp.</i>
Kausar A, Zahra N, Kiran H, Asim S, Raza A, Raza A (16)	Aguas residuales domésticas 100%	Tanques hidropónicos	<i>Typha latifolia</i>

Autores	Tipo de agua residual	Sistema de fitorremediación	Plantas
	Aguas residuales domésticas 50%		
Mustafa HM, Hayder G (1)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Tanques hidropónicos	<i>Salvinia molesta</i>
Munfarida, I; Auvaria, SW; Suprayogi, D; Munir, M (7)	Aguas de rio con aguas residuales domésticas e industriales	Tratamiento de sistema discontinuo	
Mustafa HM, Hayder G (28)	Aguas domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo con 280 g de planta Tratamiento de flujo discontinuo con 140 g de planta Tratamiento de flujo discontinuo con 70 g de planta	
Alawadhi, N; Hayder, G (29)	Aguas residuales domésticas pretratadas	Sistema de tanques de flujo discontinuo	
Mustafa HM, Hayder G. (18)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	
Kausar A, Zahra N, Kiran H, Asim S, Raza A, Raza A (16)	Aguas residuales domésticas 100% Aguas residuales domésticas 50%	Tanques hidropónicos	
Mustafa HM, Hayder G (1)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	
Abid Maktoof A, AL-Enazi MS (5)	Aguas residuales domésticas, aguas de restaurante e industriales	Tratamiento por tandas	<i>Schoenoplectus litoralis</i>
Ayala Tocto RY, Calderón Ordoñez E, Rascón J, Collazos Silva R.. (30)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas	<i>Eichhornia crassipes</i>
Araque Niño ID, Britto Aponte MC, Cuellar Rodríguez LA, Perico Granados NR (31)	Aguas residuales domésticas, industriales e institucionales	Humedal artificial	
Alawadhi NMS, Hayder G. (29)	Aguas residuales domésticas pretratadas	Sistema de tanques de flujo discontinuo	
Akowanou AVO, Deguenon HEJ, Balogoun KC, Daouda MMA, Aina MP. (17)	Aguas residuales domésticas con tratamiento primario	Estanque facultativo	
Mustafa HM, Hayder G (18)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	
Selvaraj D, Velvizhi G (19)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento por tandas Sistema de ingeniería ecológica (lecho de lago + aireador + carbón activado)	
Mustafa HM, Hayder G (1)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Sistema hidropónico	
Rijwana P, Kakoli Karar P (32)	Aguas residuales domésticas crudas de cocina	Tratamiento por tandas	
Kasmuri N, Malik SAA, Yaacob Z, Miskon MF, Ramli NH, Zaini N. (33)	Aguas residuales mixtas	Tratamiento de flujo discontinuo	

Autores	Tipo de agua residual	Sistema de fitorremediación	Plantas
Buta E, Borşan IL, Omotă M, Trif EB, Bunea CI, Mocan A, et al. (22)	Aguas residuales municipales	Tratamiento de flujo discontinuo	
Sathe SM, Munavalli GR (34)	Aguas residuales domésticas	Humedal Bio- Rack modificado Humedal Bio- Rack común	<i>Typha angustata</i> y <i>Canna indica</i>
Garad AD. (35)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo por tandas	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Colocasia Arabica</i> , <i>Canna sp.</i> , <i>Typha sp.</i>
Abou-Elela SI, Hellal MS, Elekhrawy MA (25)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	<i>Canna flaccida</i>
Pinninti R, Kasi V, Sallangi LKSVP, Landa SR, Rathinasamy M, Sangamreddi C, et al. (36)	Aguas residuales domésticas (aguas grises)	Humedal artificial de flujo vertical	<i>Canna Indica</i>
Arivukkarasu D., Sathyanathan R. (37)	Aguas residuales domésticas y municipales	Humedales de tratamiento flotantes	
Phewnil O, Chunkao K, Prabhuddham P, Pattamapitooon T. (38)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo vertical (5 días alimentación 2 días de secado)	
Abou-Elela SI, Hellal MS, Elekhrawy MA. (25)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	<i>Cyperus papyrus</i>
Ayala Tocto RY, Calderón Ordoñez E, Rascón J, Collazos Silva R (30)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas	<i>Nymphoides humboldtiana</i>
Ayala Tocto RY, Calderón Ordoñez E, Rascón J, Collazos Silva R (30)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas	<i>Nasturtium officinale</i>
Amare E, Kebede F, Mulat W (15)	Aguas domésticas, textiles y de destilería en proporción (18:3:1 respectivamente)	Tratamiento por tandas o lotes	<i>Lemna minor</i>
Akowanou AVO, Deguenon HEJ, Balogoun KC, Daouda MMA, Aina MP. (17)	Aguas residuales domésticas con tratamiento primario	Estanque facultativo	
Mustafa HM, Hayder DG. (20)	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Tratamiento en tanques de flujo discontinuo	
Buta E, Borşan IL, Omotă M, Trif EB, Bunea CI, Mocan A, et al (22)	Aguas residuales municipales	Tratamiento de flujo discontinuo	
Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo	
Phewnil O, Chunkao K, Prabhuddham P, Pattamapitooon T (38)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo vertical (5 días alimentación 2 días de secado)	<i>Heliconia psittacorum</i>
Abid Maktoof A, AL-Enazi MS. (5)	Aguas residuales domésticas, aguas de restaurante e industriales	Tratamiento por tandas	<i>Hordeum vulgare</i>
Aalam T, Arias CA, Khalil N. (26)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	<i>Sagittaria sagittifoli</i>

Autores	Tipo de agua residual	Sistema de fitorremediación	Plantas
Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF. (3)	Aguas residuales domésticas	Humedal artificial de flujo horizontal altura 35 cm Humedal artificial de flujo horizontal altura 45 cm	<i>Scipus grossus</i>
Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF (39)	Aguas residuales domésticas (aguas negras y grises)	Tratamiento de flujo discontinuo	
Osama OA, Abdullah SRS, Hasan HA, Othman AR, Ewadh HM, Al-Baldawi IA, et al (40)	Aguas residuales domésticas	Humedal de flujo continuo subterráneo	
Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF. (3)	Aguas residuales domésticas	Humedal artificial de flujo horizontal altura 35 cm Humedal artificial de flujo horizontal altura 45 cm	<i>Lepironia articulata</i>
Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF (39)	Aguas residuales domésticas (aguas negras y grises)	Tratamiento de flujo discontinuo	
Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF. (3)	Aguas residuales domésticas	Humedal artificial de flujo horizontal altura 35 cm Humedal artificial de flujo horizontal altura 45 cm	<i>Scipus grossus</i> y <i>Lepironia articulata</i>
Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF (39)	Aguas residuales domésticas (aguas negras y grises)	Tratamiento de flujo discontinuo	
Rahman MA, Rahaman MH, Yasmeen S, Rahman MM, Rabbi FM, Shuvo OR, et al. (41)	Aguas residuales domésticas	Humedal artificial de subterráneo vertical	<i>Schumannianthus dichotomus</i>
Kabbour A, Mouhir L, Benrahmane L, Bendaoud A, Laaouan M, El Hafidi M. (42)	Aguas residuales domésticas	Humedal artificial de flujo de marea	<i>Alpinia galanga</i>
Arivukkarasu D, Sathyanathan R (37)	Aguas residuales domésticas y municipales	Humedales de tratamiento flotantes	<i>Ocimum tenuiflorum</i>
Arivukkarasu D, Sathyanathan R (37)	Aguas residuales domésticas y municipales	Humedales de tratamiento flotantes	<i>Chrysopogon zizanioides</i>
Arivukkarasu D, Sathyanathan R (37)	Aguas residuales domésticas y municipales	Humedales de tratamiento flotantes	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>
Selvaraj D, Velvizhi G. (19)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento por tandas Sistema de ingeniería ecológica (lecho de lago + aireador + carbón activado)	<i>Hydrilla verticillate</i>
Aalam T, Arias CA, Khalil N (26)	Aguas residuales municipales	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	<i>Iris spp.</i>
Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo	<i>Polygonum hydropiperoides</i>
Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)	Aguas residuales domésticas	Tratamiento de flujo discontinuo	<i>Lemna minor</i> , <i>Polygonum hydropiperoides</i> y <i>Pistia stratiotes</i>

3. REVISIÓN

3.1. Aguas residuales domésticas y municipales

Las aguas residuales son las que traen consigo impurezas provenientes de vertidos de varios orígenes, por lo que estas, pueden contener elementos contaminantes producidos por desechos urbanos y/o industriales, las cuales deben ser tratadas para alcanzar un cierto nivel de calidad y posteriormente ser reutilizadas (43).

Las aguas municipales y domésticas son aquellas generadas en un espacio geográfico residencial e institucional, estas aguas se originan a partir de las actividades domésticas diariamente realizadas como son el aseo personal, la limpieza del hogar, lavar y cocinar, también llegan a estas aguas municipales las aguas de escuelas y hospitales incrementando la carga de contaminantes y volviendo más compleja la composición del agua a tratar (44). La carga de contaminantes de estas aguas está asociada a él aumento de la población y el desarrollo urbano (29). Estas aguas por lo general tienen desechos orgánicos, heces, orina, residuos de alimentos, aceites vegetales, grasas, jabones, detergentes e incluso otro tipo de compuestos nocivos para la el ambiente y la salud humana (28).

Teniendo en cuenta su origen estas aguas contienen una gran cantidad de nutrientes siendo los principales el nitrógeno en su forma orgánica y como amoniaco y el fosforo en su forma de ion fosfato. De esta manera las aguas domésticas contienen entre un 50 y 80 % de fosforo y un 75% de nitrógeno provenientes en gran parte de la orina humana. Además, contienen micronutrientes como hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), Zinc (Zn) y níquel (Ni). Estos nutrientes liberados en el medio ambiente provocan la eutrofización de los cuerpos de agua que consiste en el agotamiento de oxígeno, proliferación de cianobacterias y plantas acuáticas invasoras que destruyen los ecosistemas acuáticos, es por eso que se plantea que estos nutrientes podrían ser recuperados a través de técnicas de fitorremediación y luego aplicados en la elaboración de nuevos productos de uso agrícola y energético (28,45).

También es relevante la presencia de jabones y detergentes ya que se estima que el 35% de los residuos líquidos domésticos proviene de actividades en las que son utilizados y luego descartados en el agua. El dodecibencenosulfonato de sodio (NaDBS) y el tripolifosfato de sodio (STPP) son los principales componentes de los detergentes y son muy difíciles de degradar naturalmente causando daños medioambientales al formar precipitados

con metales alcalinotérreos y metales de transición (46). Por otro lado, los jabones y champús generan contaminantes como los xenobióticos poniendo en peligro la salud (29).

Figura 5. Dodecibencenosulfonato de sodio (NaDBS) (a) y estructura de barras y esferas (b)

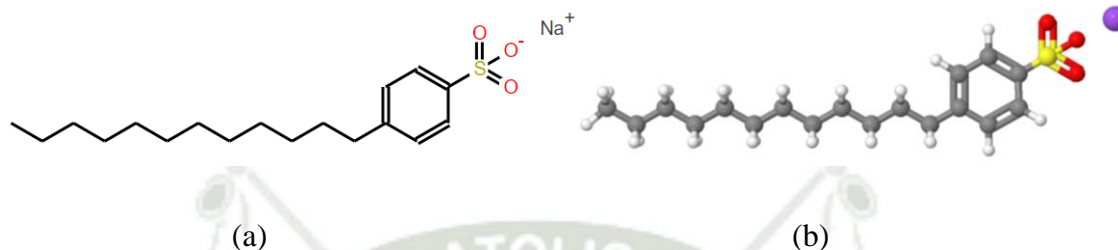
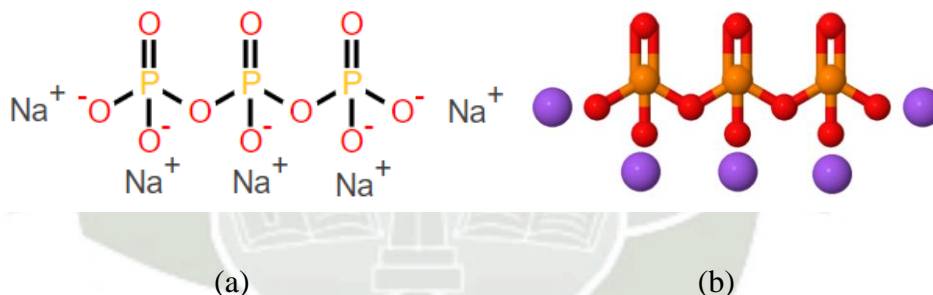


Figura 6. Tripolifosfato de sodio (STPP) (a) y estructura de barras y esferas (b)



Otro contaminante que encontramos en las aguas municipales son los metales pesados, son aguas que provienen de drenajes mixtos, mezclando aguas domésticas con algunas industriales como la provenientes de pequeños talleres en zonas urbanas, esto debido al deficiente sistema de drenaje y a infraestructuras de apoyo poco desarrolladas que permiten que estas aguas se incorporen a los flujos municipales aumentando su complejidad y que en consecuencia no sea posible tratarlas adecuadamente al no contar con la tecnología necesaria para su remediación (47).

Pero, el contenido no solo se limita a macro nutrientes, micronutrientes, materia orgánica y metales, recientemente se han detectado otros tipos denominados contaminantes de preocupación emergente (CPE), debido a que se encuentran en las aguas pero en cantidades casi imperceptibles por lo que la mayoría los ignora a pesar de que se usan en grandes cantidades diariamente, el problema se presenta cuando como mencionamos

anteriormente estos micro contaminantes alteran la fisiología de sus receptores provocando consecuencias negativas como la neurotoxicidad, toxicidad en el desarrollo y reproducción e interferencia metabólica (48).

3.1.1. Productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP)

Son en la actualidad los contaminantes de origen antropogénico más detectados en cuerpos de agua y en las plantas de tratamiento de aguas de origen residencial y doméstico, donde a pesar de pasar por tratamientos primario y secundario no han podido ser eliminados (49). Los PPCP representan un riesgo ante la posibilidad de provocar alteraciones en la transcripción de bacterias y la creación de bacterias resistentes a antibióticos que pongan en peligro la salud pública o afectando el equilibrio natural inhibiendo el crecimiento de microorganismos en determinados ambientes (48,13).

Otros posibles efectos son teratogénicos, cancerígenos y alteraciones endocrinas, así como su actividad biológica en organismos acuáticos como peces, mosquitos, peces dorados y microalgas como *Pseudokirchneriella subcapitata* (50). Estos micro contaminantes adversos para la salud tienen efectos neurotóxicos, dificultan el desarrollo y la reproducción e interfieren en el metabolismo. El problema radica en que estos productos contaminantes son consumidos en exceso diariamente iniciando su recorrido en las aguas residuales domésticas al usar el agua para lavarse o con los desechos corporales, los cuales una vez que llegan a los desagües se unen a las aguas municipales, además a estas aguas se unen las aguas hospitalarias que contienen en su mayoría fármacos y agentes patógenos que se unen a las aguas municipales sin tratamiento previo alguno al igual que las industriales (48,51).

Los PPCP más comunes suelen ser almizcle sintético, filtros UV o protector solar, jabones, pastas de dientes, lociones, champús, cosméticos, humectantes, desodorantes, repelentes de insectos y otros productos básicos, al igual que productos farmacéuticos como antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, antialérgicos, betabloqueantes y hormonas para el tratamiento de enfermedades siendo comunes el paracetamol y el ibuprofeno (48,49,50). En el caso específico de los antibióticos, como se mencionaba anteriormente representan un gran peligro como contaminantes al crear bacterias resistentes a los antibióticos esto se debe a que se generan genes de resistencia a estos poniendo en riesgo la salud humana y el equilibrio medioambiental (52). La dificultad del tratamiento de aguas con este tipo de contaminantes es que al tratarse de trazas los métodos convencionales no tienen la capacidad

de eliminarlos. Se han probado tecnologías como la filtración que separa los contaminantes por su tamaño o la adsorción y electrocoagulación que separan los fármacos por su carga.

También se han probado con otros métodos químicos y biológicos mucho más complejos como la ozonización, tratamiento ultravioleta, grafeno /óxido de grafeno, ultrafiltración, osmosis inversa, nanotubos de carbón, oxidación de fenton, radiación ionizante, carbón activado, filtración por membrana, consorcios bacterianos, lodos activados y biorreactor de membrana que a pesar de dar buenos resultados resultan muy costosos no solo en su implementación sino también en la contratación de personal capacitado para su manejo. Es en este contexto que se busca un método que sea rentable, eficiente y sostenible y sobre todo que tenga la capacidad de eliminar PPCP, siendo el método a investigar la fitorremediación, así como las plantas y sistemas a aplicar (48). Es así que se consideran de interés los resultados obtenidos en humedales artificiales como el de flujo superficial libre que demuestra tener las condiciones óptimas para el tratamiento y eliminación de fármacos como el ibuprofeno y ketoprofeno que son sensibles a fotólisis (51).

3.1.2. Contaminantes disruptores endocrinos (EDC)

Son otro de los tipos de contaminantes que se encuentran en aguas residuales municipales y domésticas. Su peligrosidad se debe a los efectos que tienen en el medio ambiente, animales y seres humanos. Por ejemplo, los estrógenos libres en agua provocan cáncer, afectan el sistema reproductivo e inmunológico, son neurotóxicos, afectan cambios puberales y dañan los riñones, mamas y próstata. En animales se ha observado que hormonas sintéticas como el etinilestradiol causo feminización de 84% de peces en edad larvaria mientras, la progestina levonorgestrel usada en la producción de anticonceptivos causo la masculinización de los peces afectando su capacidad reproductiva (53).

3.2. Fitorremediación

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) la fitorremediación es el uso eficiente de las plantas para eliminar, desintoxicar o inmovilizar contaminantes ambientales (54).

La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o

sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo (55).

Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo (56). Esta es una de las alternativas de tratamiento con más alcance económico para aguas residuales en cuanto a operación y mantenimiento, en vista que no requiere de energía, como las convencionales, es amigable con el ambiente y eficiente para reducir la carga contaminante de las aguas residuales a niveles bajos, para así cumplir con las exigencias de las normas ambientales (57).

Este es un tratamiento donde se aprovechan los procesos biológicos de las plantas acuáticas y microorganismos (adsorción, degradación, reacciones redox, acumulación, etc.) para tratar el agua residual (58,59).

3.3. Mecanismos de la fitorremediación

La limpieza o eliminación de contaminantes se realiza a través de la aplicación de alguno de estos mecanismos:

- La fitoextracción o fitoacumulación, es la absorción de contaminantes por las raíces, es la capacidad de algunas macrófitas flotantes para acumular elementos contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en plantas que acumulan metales (60).
- La rizofiltración, se utilizan plantas crecidas en cultivos hidropónicos, con raíces de plantas terrestres de alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar contaminantes (60).
- La fitoestimulación o rizodegradación, las plantas generan exudados radiculares que estimulan el crecimiento de los microorganismos nativos capaces de degradar compuestos orgánicos xenobióticos (61).
- La fitoestabilización, utiliza la planta para desarrollar un sistema denso de raíces que le permite reducir la biodisponibilidad y la movilidad de los contaminantes evitando el transporte a capas subterráneas o a la atmósfera (61).

- La fitovolatilización, se da a medida que, las plantas en crecimiento absorben agua junto con los contaminantes orgánicos solubles. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse a la atmósfera (61).
- La fitodegradación utiliza plantas y microorganismos asociados y se pueden utilizar para degradar los agentes contaminantes del agua, es un proceso mediante el cual las plantas degradan o descomponen contaminantes orgánicos (60).

Se documenta que el porcentaje de éxito de la fitorremediación depende ante todo de la cuidadosa selección de las especies vegetales y su viabilidad en el clima de la zona geográfica donde se llevara a cabo el procedimiento; además, se requiere que las plantas seleccionadas para la fitorremediación sean resistentes a las elevadas concentraciones de los contaminantes por remediar, que puedan crecer en suelos pobres, sean de rápido y alto crecimiento, producción de biomasa, y tengan sistemas de raíces densos y profundos. Así mismo se considera más beneficiosa la selección de plantas nativas que la utilización de otras especies no pertenecientes al ecosistema y que por lo tanto pueden provocar alteraciones (8).

Esto es sumamente importante porque un mal manejo o aplicación de estos organismos acuáticos puede generar graves repercusiones sobre todo si tenemos en cuenta que en un entorno natural son consideradas como especies invasoras que representan una amenaza para los ecosistemas acuáticos razón por la cual deben estar correctamente confinados durante el proceso ya sea por medios mecánicos, físicos, biológicos o químicos que ayuden a controlar posibles invasiones de macrófitos acuáticos (54).

Aplicando las medidas de control correctas podemos aplicar esta tecnología de la cual se reporta se han obtenido excelentes resultados con plantas tropicales nativas en diversos estudios como el uso de *Scirpus grossus*, *Azola pinnate* y *Salvinia molesta* en el tratamiento de aguas residuales de la industria papelera donde se logró reducir el color de las muestras tratadas en un 50.28%, 43.09% y 49.7% respectivamente y eliminar la DQO en un 100% (28). Dentro de esta importante selección son notables las plantas hiperacumuladoras cuya capacidad para absorber altas concentraciones de metales pesados sin alterar sus operaciones de biotransformación las hacen potencialmente elegibles para la fitorremediación (6).

Por ejemplo, como factores de interés para la selección de plantas se tiene a la profundidad de las raíces, el tipo de contaminante, la superficie o profundidad de las aguas afectadas y el tiempo transcurrido entre la contaminación y la implementación de la

fitorremediación; que permiten seleccionar las especies más adecuadas según el contexto (8). Además, se debe tener en cuenta que la planta seleccionada deberá ser adecuadamente aclimatada antes de su utilización en la ubicación establecida. También es importante que las plantas se mantengan en óptimas condiciones para lo cual es necesario un monitoreo constante que permita fijar el tiempo preciso para la cosecha, así evitaremos tener plantas dañadas y daremos espacio para nuevas plantas saludables que mejoren la efectividad del tratamiento (62).

Como otro factor de importancia en esta fitotecnología tenemos la simbiosis entre las plantas y los microorganismos que se albergan en sus raíces entre las cuales están las rizobacterias, levaduras y hongos que ayudan al crecimiento de la planta y a la vez favorecen la eliminación de contaminantes (48). Entre los microorganismos benéficos tenemos a las rizobacterias que se encuentran en la superficie de la raíz y a las bacterias endofíticas que penetran y viven dentro de la planta, pero sin provocar infección, la particularidad de estas bacterias es su capacidad para degradar compuestos químicos tóxicos en CO_2 y H_2O que las plantas eliminan o utilizan sin que les provoque daño (63).

Además, tienen la particularidad de producir sideróforos y fitohormonas, fijar nitrógeno y solubilizar fosfato. Los sideróforos se unen a Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} y Zn^{2+} protegiendo a la planta de su acción tóxica, mientras que las fitohormonas como el ácido indol acético estimulan el crecimiento de raíces. En compuestos orgánicos las bacterias endofíticas reducen la evapotranspiración y disminuyen la toxicidad en las plantas. Al observar el efecto positivo de las rizobacterias promotoras en el crecimiento de las plantas y la reducción de estas cuando entran en contacto con aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes sobre todo del tipo metales pesados se plantea la inoculación de bacterias rizosféricas y endofíticas para mejorar el crecimiento de plantas usadas en fitorremediación (47,64,65).

Finalizando con los factores que intervienen en el éxito de la fitorremediación tenemos a las condiciones climáticas. Al trabajar con organismos vivos como las plantas es natural que estas se vean afectadas por variaciones en las condiciones climáticas aumentando o reduciendo su productividad de acuerdo con la temporada y las variaciones de humedad y temperatura (36).

A pesar de contar con beneficios en cuanto a lo económico y facilidad de instalación es importante tomar en cuenta las desventajas inherentes a esta tecnología, al trabajar con plantas no es posible transferir o cambiar la ubicación del sistema ya que el cambio de clima y tipo de aguas residuales afecta directamente al metabolismo y equilibrio de la planta. Otro factor que ha visto limitada esta tecnología es la característica de las aguas tratadas que en su mayoría son mixtas y no provenientes de un campo específico y la deficiencia en el diseño y gestión de los sistemas. Por ejemplo, se observa en varias investigaciones la aplicación de la fitorremediación en aguas residuales específicas y con plantas seleccionadas en un ambiente altamente controlado en laboratorio, pero en general la mayoría de las aguas residuales que se busca tratar tienen origen mixto o tienen características físico químicas que hacen inviable el crecimiento de macrófitos o microalgas haciendo en consecuencia que no puedan ser tratados por ellos como es el caso de aguas residuales provenientes de textilera y destilerías (15).

Otra problemática existente es la de los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) que representan una importante fuente de contaminación de agua, por lo general estos productos después de su uso son desechados en las aguas de municipales, domésticas, ganaderas e industriales; en estos casos las plantas de tratamiento convencionales han resultado poco efectivas debido a su elevado costo que impide su aplicación a gran escala, es por esto que la fitorremediación aparece como una posible solución, a pesar de que requiere mayor investigación es posible desarrollar más esta tecnología y extender su alcance a estos campos específicos siendo posible su aplicación como un tratamiento in situ para la eliminación de estos contaminantes (13).

3.4. Identificación de plantas comúnmente utilizadas

Generalmente las plantas requieren de ciertos nutrientes e incluso de determinadas cantidades de metales pesados para lograr un adecuado crecimiento y desarrollo, pero una vez superado este límite estos compuestos orgánicos y metales se vuelven tóxicos, a pesar de esto algunas plantas tienen una mayor resistencia a la toxicidad de estos compuestos debido a su contenido de antocianinas, tioles y antioxidantes, estas plantas son las que tienen aplicación biotecnológica como agentes fitorremediadores de las cuales se han reconocido aproximadamente unas 400 especies que cuentan con la característica de la hiperacumulación entre las cuales tenemos especies como *Lemna*, *Wolfia*, *Azolla*, *Spirodela*,

Wolfialla, *Hydrilla*, *Eichhornia*, *Typha*, *Pistia*, *Crinum*, *Alternanthera*, *Phragmites* y *Crysopogon* (54).

Dentro de estas especies son relevantes las plantas acuáticas por su amplia disponibilidad, rendimiento, facilidad de almacenamiento y cosecha. Las plantas acuáticas se pueden diferenciar en plantas flotantes como *Pistia stratiotes*, *Salvinia molesta*, *Lemna sp.*, *Azolla pinnata*, *Landoltia punctata*, *Spirodela polyrhiza*, *Marsilea mutica*, *Eichhornia crassipes* y *Riccia fluitans*, que conservan completamente sobre la superficie a excepción de sus raíces; plantas sumergidas como *Hygrophilla corymbosa*, *Najas marina*, *Ruppia maritima*, *Hydrilla verticillata*, *Egeria densa*, *Vallisneria americana*, *Ceratophyllum* y *Myriophyllum aquaticum*, que están completamente bajo el agua; y plantas emergentes como *Distichlis spicata*, *Cyperus sp.*, *Imperata cylindrical*, *Iris virginica*, *Nuphar lutea*, *Justicia americana*, *Diodia virginiana*, *Nymphaea sp.*, *Typha sp.*, *Scirpus*, *Phragmites australis*, *Eleocharis*, *Zizania* y *Hydrochloa caroliniensis*, cuyas raíces se mantienen ancladas en el suelo mientras que algunas partes son visibles en la superficie ; todas estas ya documentadas como plantas aplicables para fitorremediación. Además de la clasificación observada tenemos a los macrófitos “amphiphyte” caracterizados por estar sumergidos solo en algunas ocasiones para luego regresar a la superficie (45,28).

Conocer la clasificación es importante porque de esto dependerá la elección y uso de la planta, en donde se acumule o en que parte de la planta se metabolizan más activamente los contaminantes. Por ejemplo, es común encontrar almacenamiento de los contaminantes en las hojas de plantas sumergidas ya que, estas están en contacto directo con estos como es el caso de *Echinodorus Horemanii*. Por otro lado, plantas flotantes como *Eichhornia crassipes* almacenan mayor cantidad de contaminantes en sus raíces al ser estas las que en mayor contacto entran con los compuestos (13).

La clasificación de las plantas también nos permite saber qué sistema es más adecuado para cada tipo de planta, como es el caso de las plantas emergentes que se desarrollan mejor en un humedal de flujo superficial libre o en un humedad de flujo subterráneo ya sea horizontal o vertical; mientras que las plantas sumergidas y las flotantes son más adecuadas en una sistema de flujo superficial libre, por último los macrófitos “amphiphyte” pueden ser mejor controlados en sistemas de flujo subterráneo tanto horizontal como vertical (45).

3.4.1. Plantas Flotantes

3.4.1.1. *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua, buchón de agua)

Integrante de la familia *Pontederiaceae* y de orden *Comeliness* (47). La *Eichhornia crassipes* es un macrófito flotante, es una planta que se desarrolla en la superficie del agua, siendo una importante característica sus raíces las cuales permanecen bajo el agua sin adherirse a soporte alguno. Son de importante aplicación en sistemas de humedales artificiales donde desempeñan funciones de aireación, absorción de nutrientes y eliminación de contaminantes. Esta capacidad se basa principalmente en su sistema de raíces mediante el cual absorbe, concentra y convierte los contaminantes, realizando así un proceso de purificación del agua contaminada (31).

Esta planta acuática de verano es altamente tolerante a metales pesados, fenoles, formaldehidos, ácidos fórmicos, ácidos acéticos y ácidos oxálicos en alta concentración (54). Tiene la capacidad para reducir la temperatura de las aguas en tratamiento gracias a el grosor y tamaño de sus hojas que proporcionan sombra siendo posible la reducción de hasta 3.9°C, también demuestran su efectividad en la regulación de parámetros como el pH y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (30). También se tiene información acerca de su capacidad de eliminación de nitrógeno entre un 60% y 80% y del potasio en un 69%, así como de bioacumular Cd y Zn y remediar aguas con cromo hexavalente, Pb, Ni (54). En contaminantes como los fármacos el jacinto de agua ha demostrado la capacidad de absorber cafeína y medicamentos antiinflamatorios no esteroides (AINE) como el ibuprofeno para luego transferirlos a distintas partes de la raíz tallo y hojas eliminándolos de los cuerpos de agua (65).

El jacinto de agua es de crecimiento rápido, se considera que su crecimiento es incluso más rápido que el de *Salvinia molesta*. (19) En un periodo de entre 5 y 15 días *E. crassipes* puede duplicar su población alcanzando incluso un peso de 25 kg de biomasa por metro cuadrado, además sus semillas pueden permanecer viables en agua o barro por hasta 15 años (62). Debido a esta habilidad de replicación y supervivencia *Eichhornia crassipes* es considerada como invasora a nivel mundial debido a la dificultad de su erradicación; sin embargo, gracias a las cualidades anteriormente descritas, ahora se utiliza en procesos de fitorremediación debido a su resistencia y alta capacidad de absorción de contaminantes en cuerpos de agua (8).

Por otro lado, a pesar de sus características positivas y gran resistencia, una elevada concentración de contaminantes podría causar la reducción del crecimiento, clorosis, marchitez, disminución de altura y longitud de las raíces y en casos más extremos la muerte de la planta (54).

3.4.1.2. *Pistia stratiotes* (lechuga de agua)

Pistia stratiotes es un macrófito flotante perteneciente a la familia *Araceae* de plantas de hoja perenne y única especie del género monotípico *Pistia*, es considerada como la especie invasora más prolífica del mundo. Crece con gran facilidad en aguas contaminadas debido a su alto contenido de nutrientes y puede soportar temperaturas desde los 21 a 30 °C, aunque también se ha reportado que puede crecer a temperaturas mínimas de 15°C, debido a su tamaño es de fácil cosecha (62,28).

Su tasa de crecimiento presenta variación respecto al clima o la estación en la que se encuentre, es así que presenta un rápido crecimiento en ausencia de lluvias durante la temporada seca y un descenso de este en temporada de lluvias debido a la falta de radiación solar (62,17). Se caracteriza por crecer en colonias flotantes las cuales pueden ser perjudiciales si no se controlan adecuadamente. Por su particularidad para sobrevivir en medios eutrofizados ha mostrado gran eficacia eliminando los nutrientes orgánicos de aguas residuales. También ha demostrado su acción como agente fitorremediador absorbiendo nanopartículas de metales pesados y eliminado fosfatos y nitrógeno en formas de nitrato y nitrógeno amoniacal. Se ha documentado también su capacidad para liberar toxinas que eliminan microorganismos patógenos como lo coliformes. Resultados de investigaciones demuestran que su rendimiento aumenta a más plantas y tiempo de exposición en el sistema. En cuanto a su aplicación en aguas residuales domésticas se considera que su utilización en el postratamiento de aguas residuales es beneficioso y representa un muy buen complemento. Otro punto de interés es su viabilidad para la producción de biogás la cual se informa puede alcanzar un rendimiento de 9,66733 m³ en 45 días de digestión (28).

3.4.1.3. *Salvinia molesta*

Salvinia molesta, es una macrófita flotante de crecimiento rápido perteneciente a la familia *Salviniaceae* usualmente se encuentra en aguas de flujo tranquilo (lagos y presas) con alto contenido de nutrientes, pero tiene la capacidad para adecuarse y desarrollarse en aguas con pocos nutrientes y absorber compuestos tóxicos en aguas residuales. Forma parte

de la familia monogenética habiéndose identificado 12 especies de *Salvinia molesta* en el mundo. En cuanto a su morfología se caracteriza por tener en sus hojas una recubierta de pelos aterciopelados y un diámetro foliar pequeño de entre 2 y 4 cm, pero con una raíz larga y gruesa, permitiendo así cumplir con su función remediadora sin impedir el ingreso de la luz en las aguas. Al tratarse de una planta con clorofila realiza la fotosíntesis favoreciendo la liberación de oxígeno e incrementando el OD de las aguas tratadas. Su mecanismo de acción se basa en su capacidad de adsorción, absorción acumulación y degradación. Estudios han demostrado que *Salvinia molesta* tiene un mayor desempeño en sistemas de tratamiento con mayor peso de plantas logrando una mejora significativa de la calidad en muestras de agua residuales en parámetros como el color, DBO₅, DQO y pH eliminando el 96.8% (color), el 91% (DBO₅) y el 82.6% (DQO). De esta manera cuanto mayor sea la cantidad de plantas y raíces podrá absorber mayor contenido de materia orgánica en aguas domésticas. Esto se debe a que las raíces de *Salvinia molesta* actúan conjuntamente con microorganismos de rizosfera degradadores. *Salvinia molesta* tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de nutrientes aproximadamente 8mg de nutrientes por gramo de tejido seco por día, esta capacidad le permite absorber elementos tóxicos como el plomo, mercurio y arsénico (1,2,7).

Como otra característica de interés tenemos el contenido lipídico de *Salvinia molesta* que esta entre 15.72 y 19.97% que la convierten en biomasa útil para su uso en producción de biodiesel una vez concluida su función remediadora (2).

3.4.1.4. *Azolla filiculoides* (helecho de agua)

Azolla filiculoides es una planta considerada como invasora o incluso indeseable pero que aplicada en la fitorremediación es de gran utilidad esto debido a características como su rápida proliferación, fuerte fijación de nitrógeno, rendimiento superior de biomasa, considerable extensión de su sistema radicular, fácil cosecha y alta tolerancia a un amplio espectro de metales pesados que le permiten vivir en cuerpos de agua contaminados. En cuanto a su morfología es un helecho que consta de un vástago central que cubre la superficie del agua, con hojas y raíces adventicias accidentales en períodos frecuentes hacia adelante del vástago. Sus propiedades la hacen de interés para su aplicación en bio cultivo y producción de bio energía en zonas contaminadas. *A. filiculoides* se desarrolla en ríos, humedales y arrozales de flujo lento de zonas templadas a tropicales que facilitan su proliferación. A pesar de sus bajas tasas de degradación de surfactantes *A. filiculoides* se

desarrolla con normalidad por su capacidad para resistir condiciones anaeróbicas o microaerófilas (6).

3.4.1.5. *Lemnaceae*

Conocidas generalmente como lentejas de agua las plantas que conforman este grupo se caracterizan por un rápido crecimiento y desarrollo de biomasa, pudiendo duplicarse en aproximadamente 24 h y llegar a producir entre 39 y 105 toneladas de biomasa en peso seco por hectárea anual, esta biomasa se produce mediante su capacidad de absorber distintos contaminantes y nutrientes de cuerpos de agua y transformarlos. Estas características les confieren capacidades fitorremediadoras para tratar aguas residuales municipales, agrícolas e industriales con alto contenido de nitrógeno, fosforo, compuestos orgánicos, PPCP, metales pesados y metaloides. Además, se ha reportado su potencial uso como materia prima para biocombustible, para la alimentación de animales e incluso como alimento para humanos debido a su alto contenido de proteínas y almidón. Actualmente están clasificadas en los géneros *Spirodela*, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella* y *Wolffia* (68).

3.4.1.6. *Lemna minor* (lenteja de agua)

Lemna minor es una planta monocotiledónea que se caracteriza morfológicamente por ser una planta flotante sin tallo y de pocas hojas con una única raíz que en conjunto se suelen ver como una manta verde que frecuentemente aparecen en aguas con muchos nutrientes como es el caso de cuerpos de agua eutrofizados, causando preocupación. A pesar de esto han demostrado eficientes resultados como agentes remediadores (62).

Son ampliamente eficientes para la reducción de DBO₅, DQO, metales pesados, nitrógeno, fósforo, eliminar nutrientes y mejor la calidad de aguas textiles o con tintes azules. También se reporta su eficacia en la eliminación de sales solubles, abundancia de algas, materia orgánica y coliformes, soportando altas cargas de materia orgánica y micronutrientes. Como otra característica positiva pueden reducir los olores e inhibir la reproducción y presencia de mosquitos, teniendo acción insecticida contra el mosquito *Culex pipiens*. Tienen la capacidad de crecer en toda estación soportando climas fríos aumentando rápidamente su biomasa la cual es aprovechable para los procesos de fitorremediación. Ante una concentración de contaminantes superior a la fisiológicamente tolerable *Lemna minor* responde con una reducción en su actividad enzimática, fotosintética, clorofila y en el crecimiento de raíces y nuevos brotes (54,15).

Como característica negativa la lenteja de agua es considerada como invasiva por su rápido crecimiento por eso es importante tener un adecuado control de esta planta para evitar posibles repercusiones negativas (62).

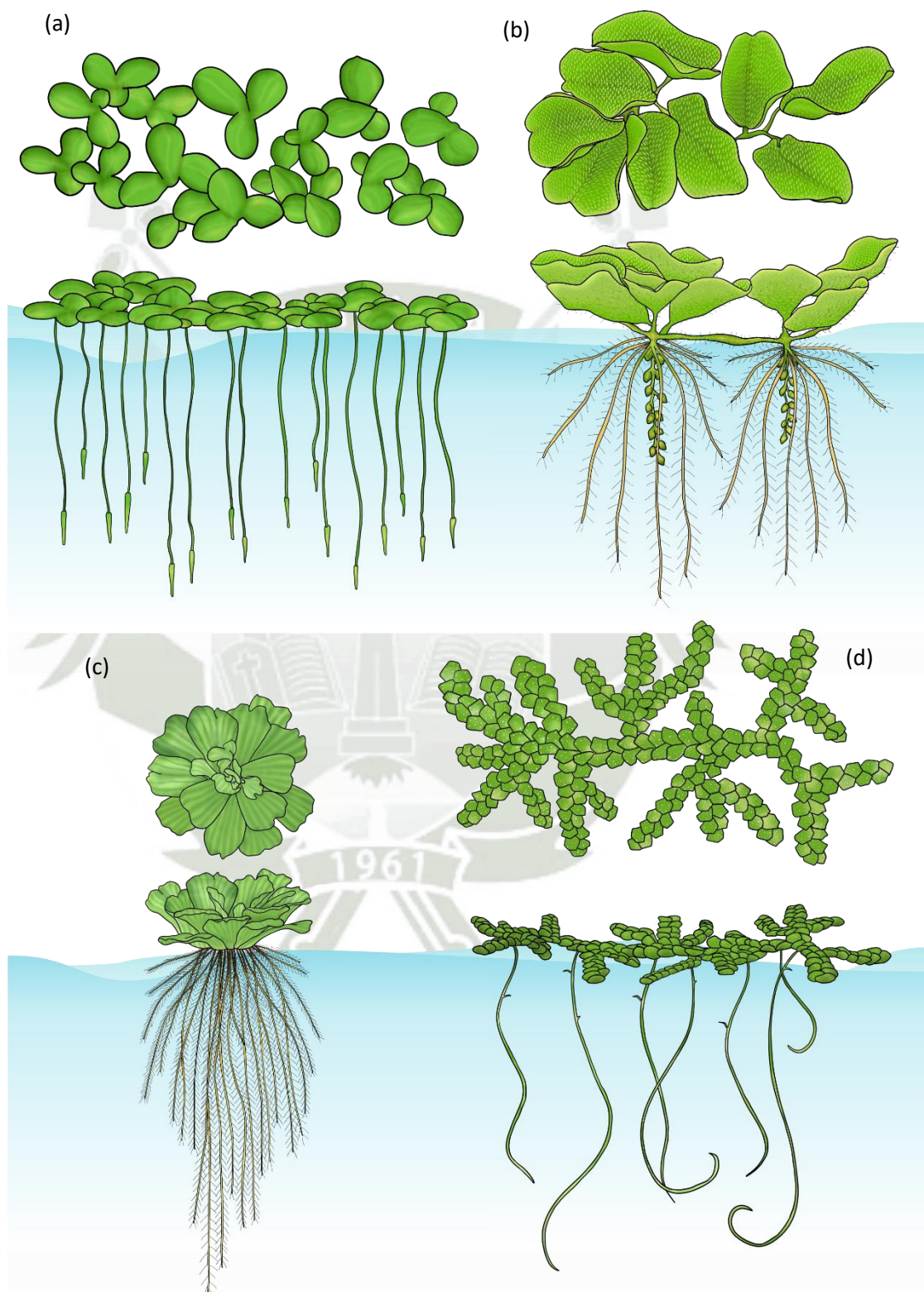
3.4.1.7. *Lemna minuta*

Compuestas por foliolos flotantes y raíces sumergidas, crecen en aguas con alto contenido de nutrientes ya sea estancadas o de flujos lentos y en temperaturas tropicales y templadas. Se les considera de utilidad para la fitorremediación debido a su capacidad para acumular contaminantes orgánicos e inorgánicos, así como metales pesados y fenoles, precisamente esta capacidad para absorber rápidamente los nutrientes disponibles es la que les permite tener un rápido crecimiento. En comparación con otras especies de *Lemna* como *Lemna minor* tiene una tasa de crecimiento superior lo cual es directamente proporcional a su capacidad remediadora. A pesar de esto hay que tener en cuenta algunas previsiones para su utilización. En primer lugar, las *Lemna* tienen a formar esteras flotante densas que al llegar a ser demasiado gruesas provocan la muerte y formación de capas necróticas en la superficie inferior de la estera aumentando así la presencia de macroorganismos que facilitan la descomposición y que liberan nuevamente nutrientes en el agua paralizando e incluso revirtiendo la fitorremediación, esto se puede evitar realizando una recolección periódica de las plantas que favorezca un crecimiento exponencial y evite la necrosis. En segundo lugar, es necesario tener en cuenta que esta especie es considerada como invasora por lo que para su aplicación es necesario tomar las previsiones necesarias para tener el máximo control sobre esta especie vegetal evitando así provocar un grave impacto en otros ecosistemas acuáticos, la instalación de rejillas de malla fina en la salida y superficie de los sistemas con *Lemna minuta* que evitarían su dispersión indeseada podría ser la solución recomendada (69).

3.4.1.8. *Nymphoides humboldtiana* (ninfoides sudamericana)

Se reporta su capacidad para reducir la temperatura de cuerpos de agua en tratamiento hasta en 3.9 °C gracias a su morfología foliar. Cuenta con un sistema radicular con microorganismos simbióticos capaces reducir parámetros físicos y remover compuestos orgánicos, siendo efectiva para la eliminación de microorganismos patógenos (30).

Figura 7. Plantas acuáticas *Lemna minor* (a), *Salvinia molesta* (b), *Pistia stratiotes* (c) y *Azolla filiculoides* (d)



3.4.2. Plantas emergentes

3.4.2.1. *Phragmites australis* (carrizo)

Phragmites australis más conocida como carrizo es una planta ampliamente difundida en todo el mundo y muy común de encontrar en humedales, es por esto que ha sido utilizada en la fitorremediación de aguas residuales, lodos y suelos desde la década de los 70s, esto debido a su ya documentada capacidad para absorber metales pesados en altas concentraciones, así como de eliminar medicamentos veterinarios, fármacos, sílice, colorantes, pesticidas y contaminantes fluorados (70).

3.4.2.2. *Scirpus grossus*

Respecto a *Scirpus grossus* esta demostró una alta eficiencia para la reducción de hasta el 98% de DQO y nitrógeno total en tratamientos de aguas residuales municipales (3).

3.4.2.3. *Typha angustifolia*

Es considerada como una planta hiperacumuladora apta para su uso en fitorremediación siendo capaz de soportar concentraciones de metales pesados como Mn, Cu, Zn, Ni, Pb y Fe hasta 100 o 1000 veces más que una planta no hiperacumuladora. Acumula la mayoría de los contaminantes en sus brotes siendo su mecanismo de acción la rizofiltración y fitofiltración (71).

3.4.2.4. *Brachiaria mutica*

Tiene la capacidad de remover contaminantes orgánicos e inorgánicos de efluentes, siendo especialmente útil en humedales (8).

3.4.2.5. *Canna indica*

Pertenece a la familia *Cannaceae* y del orden *Zingiberales* (47), *Canna indica* es una planta que se caracteriza por su rápido incremento en biomasa que en consecuencia absorbe una mayor cantidad de nutrientes siendo resistente a la variación de su concentración. Además, se sabe que su requerimiento hídrico es de 3 a 5 veces mayor que otras plantas de humedal. Estas características la convierten en una opción viable para su aplicación en fitorremediación (36).

3.4.2.6. *Chrysopogon zizanioides* (Vetiver)

El vetiver es una planta perenne tropical originaria de la India a pesar de esto puede crecer en varios tipos de suelo y es apta para cualquier clima. Su punto de acción se centra en las raíces cuyo diámetro varía entre 0.5 y 1.0 mm y pueden alcanzar profundidades de 3 a 4 m en tan solo un año, dichas raíces tienen un buen volumen y muchos capilares pequeños que las hacen un ambiente adecuado para el desarrollo de microorganismos y micorrizas encargadas de la nitrificación que tendrá un efecto relevante en la adsorción y eliminación de contaminantes y materia orgánica. En cuanto a su tallo este puede medir hasta 3 metros convirtiéndose en una cerca flotante que retiene partículas en suspensión del agua. Es de rápido crecimiento, resistente a plagas, incendios, sequías, puede ser cultivada en sistemas hidropónicos y es muy resistente a temperaturas extremas incluso menores a -22°C y superiores a 50°C , aunque su máximo crecimiento se presenta a 25°C , así como a pH de entre 3.5 y 12.5 y alta salinidad del medio (66,67). El pasto Vetiver es apto para la fitorremediación de aguas residuales por su capacidad para absorber nutrientes como nitrógeno y fósforo, metales pesados como plomo, cobre, zinc y níquel. Además, se reportan otras aplicaciones como la conservación de tierras agrícolas, la estabilización de riberas y la rehabilitación de represas, minas y tierras contaminadas (67).

3.4.2.7. *Cortaderia selloana* (Hierba de la pampa)

Pertenece a la familia *Poaceae* y género *Cortaderia*, es una planta de hojas perennes, largas, delgadas y afiladas, alcanza una longitud de entre 1 y 2 metros, es tolerante al estrés, altos niveles de contaminantes, frío, calor, luz intensa y deficiencia de nutrientes. Se puede encontrarla en costas, llanuras y en zonas urbanas (67).

3.4.2.8. *Hordeum vulgare*

Hordeum vulgare contiene en su estructura celular grupos carboxilo, fenol y fenol hidroxilo que constituyen una importante función al eliminar mecánicamente los metales pesados ya que estos grupos activos los secuestran (5).

3.4.2.9. *Lepironia articulata*

Se tiene información acerca de la capacidad de *Lepironia articulata* para eliminar sólidos totales suspendidos en un 88.49%, la DQO en un 77.62%, el fósforo en 88.68%, el

NH₄ en un 96.34% y coliformes hasta en un 99%, todo esto implementándola en el sistema de humedales artificiales (3).

3.4.2.10. *Nephtylis podophyllum*

Nephtylis podophyllum es una planta comúnmente de uso ornamental perteneciente a la familia de las Aráceas. Morfológicamente tiene hojas largas con punta de flecha de 3 lóbulos, tallo verde trepador y raíces adventicias a través de las cuales se propaga formando nudos en los tallos de los cuales crecen raíces aéreas que luego forman una nueva planta (4).

3.4.2.11. *Schoenoplectus litoralis*

Es una planta con alta tolerancia a metales pesados y nutrientes, su acción remediadora consiste en su capacidad de absorción y concentración de metales pesados y nutrientes que almacena en sus tejidos (5).

3.4.2.12. *Schumannianthus dichotomus*

Schumannianthus dichotomus conocida también como Murta es una macrófita emergente de crecimiento rápido y abundante en humedales naturales y en tierras bajas razón que la facultaría para reducir nutrientes, estas características la hacen de interés para su aplicación en fitorremediación de aguas residuales en sistemas de humedales artificiales. Además, tienen valor económico como materia prima para artesanías (41).

3.4.3. Plantas sumergidas

3.4.3.1. *Echinodorus radicans*

Son plantas con flores blancas de pétalos delgados y estambres amarillos, debido a su resistencia y capacidad para florecer en cualquier estación no requiere de algún cuidado especial. El habitat natural de estas plantas se ha ido extendiendo desde Brasil, Perú, México y Uruguay. Se ha demostrado que estas plantas tienen una buena resistencia a contaminantes de aguas domésticas como los detergentes no siendo afectadas morfológicamente por lo que son adecuadas para su uso en fitorremediación en concentraciones de detergente de 0.15 gramos por litro (46).

3.4.3.2. *Nasturtium officinale* (berro de agua)

Al tratarse de una especie vegetal acuática tiene la característica de producir actividades biológicas favorables que incrementan su eficacia para descomponer y biodegradar materia orgánica, disminuyendo en consecuencia el pH (30).

3.4.3.3. *Sagittaria lancifolia*

Suelen tener un crecimiento rígido y erguido llegando a alcanzar el metro de altura, sus hojas varían de forma de flecha o lanza ligeramente ovaladas y estrechas a con forma de cintas alargadas, su color es de un verde brillante y son notorios los peciolos. Sus flores son blancas y están conformadas por 3 botones florales cada uno compuesto por 3 pétalos redondeados y están distribuidas en vórtice a lo largo del tallo. Pueden soportar sin cambios morfológicos una concentración de 0.1 gramos por litro de detergentes siendo eficaz su utilización en fitorremediación de aguas domésticas con este contaminante (46).



Figura 8. Plantas acuáticas *Canna indica* (a), *Thypha angustifolia* (b) y *Eichornia crassipes*

(c)

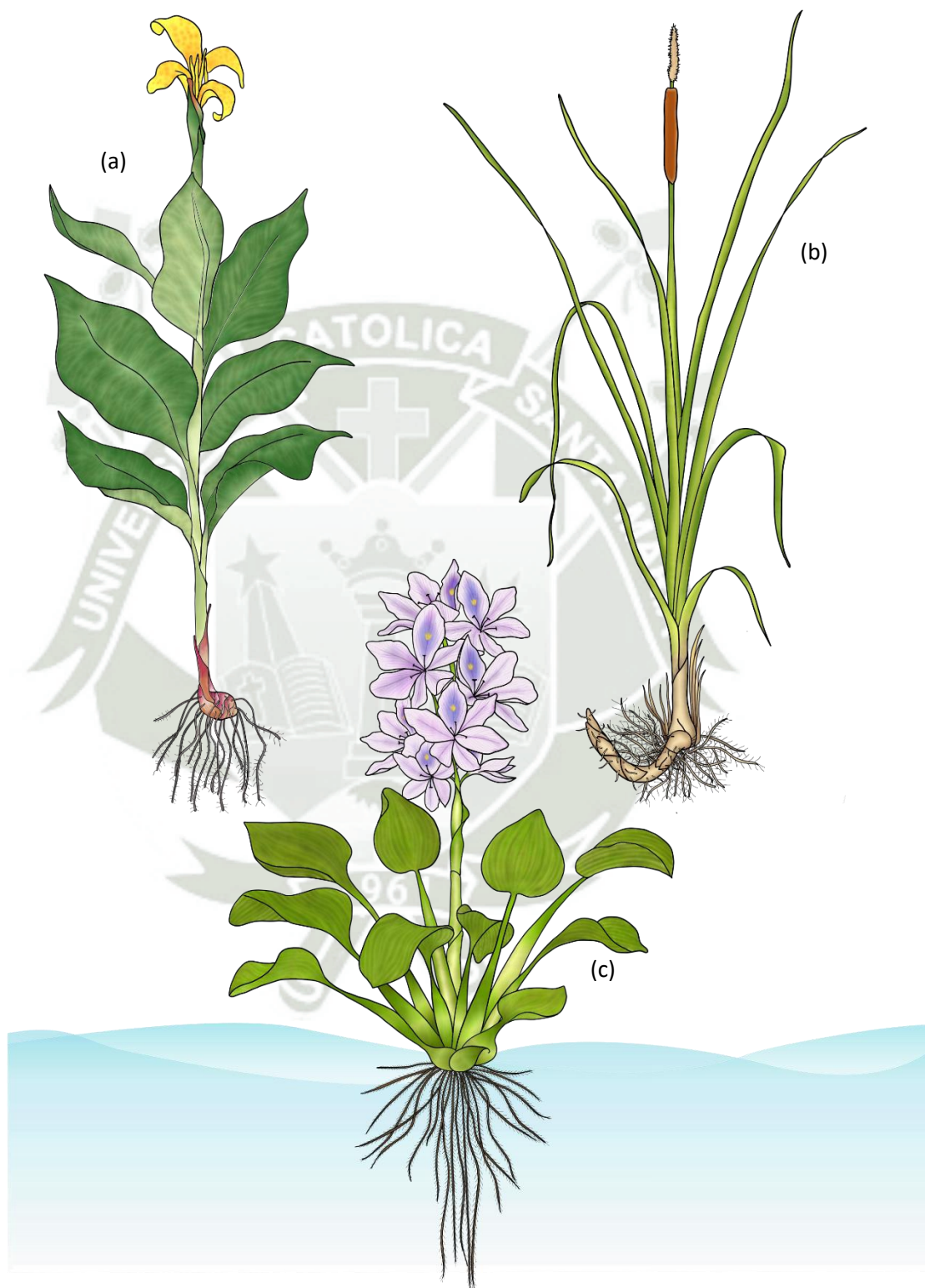


Tabla 3. Plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Frecuencia	
	Nº	%
<i>Azolla pinnata</i>	2	3.76
<i>Pistia stratiotes</i>	8	15.08
<i>Typha latifolia</i>	2	3.76
<i>Salvinia Molesta</i>	7	13.20
<i>Eichhornia crassipes</i>	9	16.96
<i>Canna indica</i>	1	1.88
<i>Nymphoides humboldtiana</i>	1	1.88
<i>Nasturtium officinale</i>	1	1.88
<i>Lemna minor</i>	3	5.72
<i>Scipus grossus</i>	2	3.76
<i>Lepironia articulata</i>	3	5.72
<i>Schumannianthus dichotomus</i>	1	1.88
<i>Alpinia galanza</i>	1	1.88
<i>Hydrilla verticillate</i>	1	1.88
<i>Polygonum hydropiperoides</i>	1	1.88
<i>Azolla filiculoides</i>	1	1.88
<i>Nephthylis podophyllum</i>	1	1.88
<i>Ocimum tenuiflorum</i>	1	1.88
<i>Typha angustata</i> y <i>Canna indica</i>	2	3.76
<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Colocasia arabica</i> , <i>Canna sp</i> y <i>Typha sp.</i>	1	1.88
<i>Scipus grossus</i> y <i>Lepironia articulata</i>	3	5.72
<i>Lemna minor</i> , <i>Polygonum hidropiperoides</i> y <i>Pistia stratiotes</i>	1	1.88
Total	53	100.00

Se utilizaron en la fitorremediación de aguas residuales domésticas un total de 53 tipos de plantas, siendo las más empleadas *Eichhornia crassipes* en 16.96%, *Pistia stratiotes* en 15.08% y *Salvinia Molesta* en 13.20 % y en porcentajes menores que van de 5.72% a 1.88% otros tipos de plantas. Así mismo, también se puede apreciar que algunas plantas se usaron en forma combinada, siendo la *Scipus grossus* y *Lepironia articulata* las que más se combinaron en 5.72%.

Tabla 4. Plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales municipales

Plantas	Frecuencia	
	Nº	%
<i>Pistia stratiotes</i>	1	8.33
<i>Phragmites australis</i>	3	25.03
<i>Eichhornia crassipes</i>	1	8.33
<i>Canna indica</i>	1	8.33
<i>Cyperus papyrus</i>	1	8.33
<i>Lemna minor</i>	1	8.33
<i>Heliconia psittacorum</i>	1	8.33
<i>Canna flaccida</i>	1	8.33
<i>Sagittaria sagittifoli</i>	1	8.33
<i>Iris spp</i>	1	8.33
TOTAL	12	100.00

La planta más utilizada para la fitorremediación de aguas residuales municipales es la *Phragmites australis* en un 25.03%, también se usaron otras en porcentaje de 8.33%.

Tabla 5. Plantas utilizadas para la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales

Plantas	Frecuencia	
	Nº	%
<i>Azolla filiculoides</i>	1	8.33
<i>Typha sp</i>	1	8.33
<i>Salvinia Molesta</i>	1	8.33
<i>Schoenoplectus litoralis</i>	1	8.33
<i>Eichhornia crassipes</i>	2	16.70
<i>Canna indica</i>	1	8.33
<i>Lemna minor</i>	1	8.33
<i>Hordeum vulgare</i>	1	8.33
<i>Ocimum tenuiflorum</i>	1	8.33
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	1	8.33
<i>Hibiscus rosasinensis</i>	1	8.33
TOTAL	12	100.00

Se emplearon 12 tipos de plantas en la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales, siendo la *Eichhornia crassipes* la que se utilizó en 2 (16.70%) experimentos y otras 10 (8.33%) en solo un estudio cada una.

En el presente trabajo de revisión sistemática, se pudo encontrar que las especies de plantas más utilizadas en la fitorremediación de aguas residuales domésticas fue la *Eichhornia Crassipes* en 16.96%, *Pistia Stratiotes* en 15.08% y la *Salvinia Molesta* en 13.20%; en aguas residuales municipales fue la *Phragmites Australis* en 25.03%; mientras que la *Eichhornia Crassipes* en 16.70% también fue la más requerida en el tratamiento de aguas domésticas y municipales.

La *Eichhornia Crassipes* es una planta acuática, muy abundante, que se desarrolla muy bien en aguas muy contaminadas, el inconveniente con esta planta acuática es su reproducción vegetativa y rápida tasa de crecimiento (72), provocando alteraciones en el flujo de agua, bloqueo de la luz solar evitando que esta llegue a las plantas acuáticas nativas, lo que acarrea una disminución del oxígeno, alteración de la estructura y función del ecosistema e interrupción de la cadena alimentaria y el ciclo de nutrientes (73,74). Es una

especie con alta capacidad adaptativa y reproductiva, ha sido clasificada dentro de las cien malezas más invasoras del mundo (75). Su crecimiento acelerado contribuye al fenómeno de eutrofización de los cuerpos de agua y su lenta descomposición genera malos olores y bajo nivel de higiene, lo cual ocasiona que dichas aguas no sean aptas para el consumo (76).

El jacinto de agua o lirio acuático se considera una maleza nociva, provoca un fuerte impacto al ambiente, a la salud humana y al desarrollo económico (77). Ha invadido los sistemas de agua dulce en los cinco continentes y, según los modelos de cambio climático, su distribución puede expandirse a latitudes más altas a medida que aumentan las temperaturas (78,79,80). Sin embargo, esta maleza es considerada un recurso de inmenso potencial. La enorme biomasa se ha empleado en el tratamiento de aguas residuales, la remediación de metales pesados, la eliminación de tinte, como fuente de biocombustible, en la generación de electricidad, las industrias, en alimentos humanos y antioxidantes, en medicamentos, en la alimentación animal, la agricultura, la alelopatía y la fabricación de artículos del hogar (81).

Hay que destacar los importantes recursos económicos que son gastados en el control de esta planta acuática, a través de la aplicación de herbicidas a las aguas superficiales (82,83). Por citar un ejemplo, el costo anual de la gestión de *E. crassipes* en Florida, Estados Unidos, asciende los cinco millones de dólares (82).

Entonces la implementación de sistemas de fitorremediación utilizando la *Eichornia Crassipes* va a requerir de métodos de control, los cuales han sido insuficientes para contener la propagación agresiva del lirio acuático (84). Se debe analizar la implementación de estos sistemas, debido a que por ejemplo el control mecánico va a requerir de personal que se encargue de cortar y desechar las plantas muertas con el fin de aclarar el lugar para la entrada del sol. El control químico, que conlleva al uso de desinfectantes y se supone que la remediación de aguas residuales es con el fin de rehusó, por lo tanto, la utilización de desinfectantes es un albur. El control biológico es una técnica clásica que implica el uso de insectos, bacterias y hongos para eliminar el lirio acuático (82,85).

3.5. Sistemas de tratamiento

3.5.1. Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas o batch system

Este método consiste en la creación de un estanque por sistema, donde se estanca el agua simulando una pequeña laguna, de tal manera que sea posible cultivar la especie vegetal seleccionada. Se considera importante para el monitoreo de este método, contar con un sistema extra que sirva a modo de control, en el cual no se cultivara planta alguna. Los sistemas de tratamiento constan de un depósito que funciona a modo de estanque donde se coloca arena, piedras y tierra fertilizada, así como el agua a tratar y las especies vegetales requeridas, el sistema se protege de factores externos con ayuda de una malla plástica que simule un vivero (30). Es importante tomar en cuenta los tamaños de grava a utilizar ya que, si las capas son muy gruesas o rugosas los contaminantes de las aguas se filtrarán rápidamente a través de esta sin dar oportunidad a las plantas para realizar el tratamiento (5). Otra forma de realizar el sistema de flujo discontinuo es empleando biorreactores con parameros controlados, en uno se colocará el agua a remediar y la planta u organismo remediador y en otra el agua sin agente remediador alguno a modo de control, de esta manera al finalizar el proceso se recolecta el producto ya tratado (15).

3.5.2. Lagunas de estabilización o humedales artificiales de flujo horizontal o vertical o Short-term pilot reed bed system

Este sistema es uno de los más popularmente usado debido a su alta capacidad de eliminación, facilidad de operación, bajo costo y viabilidad para el reciclaje de nutrientes y agua (13). Se diferencia del sistema de lotes porque se trata de un sistema semi discontinuo (3). Su funcionamiento se basa en tres elementos el sustrato o medio de cultivo, las plantas y los microorganismos que interactúan con estas eliminando los contaminantes (86). Es considerado uno de los métodos más amigables con el ambiente al tener como principio lograr la similitud de condiciones de un humedal natural en el cual orgánicamente se dan tratamientos físico y bio químicos gracias al suelo, plantas y microorganismos correspondientes a la rizosfera de la planta los cuales necesitan de oxígeno por eso se recomienda que las plantas seleccionadas sean de tipo junco que se caracterizan por su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y habilidad para captar el oxígeno del ambiente y transferirlo a su rizosfera (39).

Su mecanismo de acción se resume en 5 pasos: Primero se sedimentan los sólidos no disueltos, luego, cuando el agua entra en contacto con el sustrato se inicia la filtración y precipitación química de los compuestos orgánicos para seguir con la transformación química que se produce con la adsorción e intercambio iónico entre las plantas y el sustrato. Después, la simbiosis de plantas y microorganismos inicia la descomposición y transformación para finalizar con la adsorción y transformación de nutrientes (62).

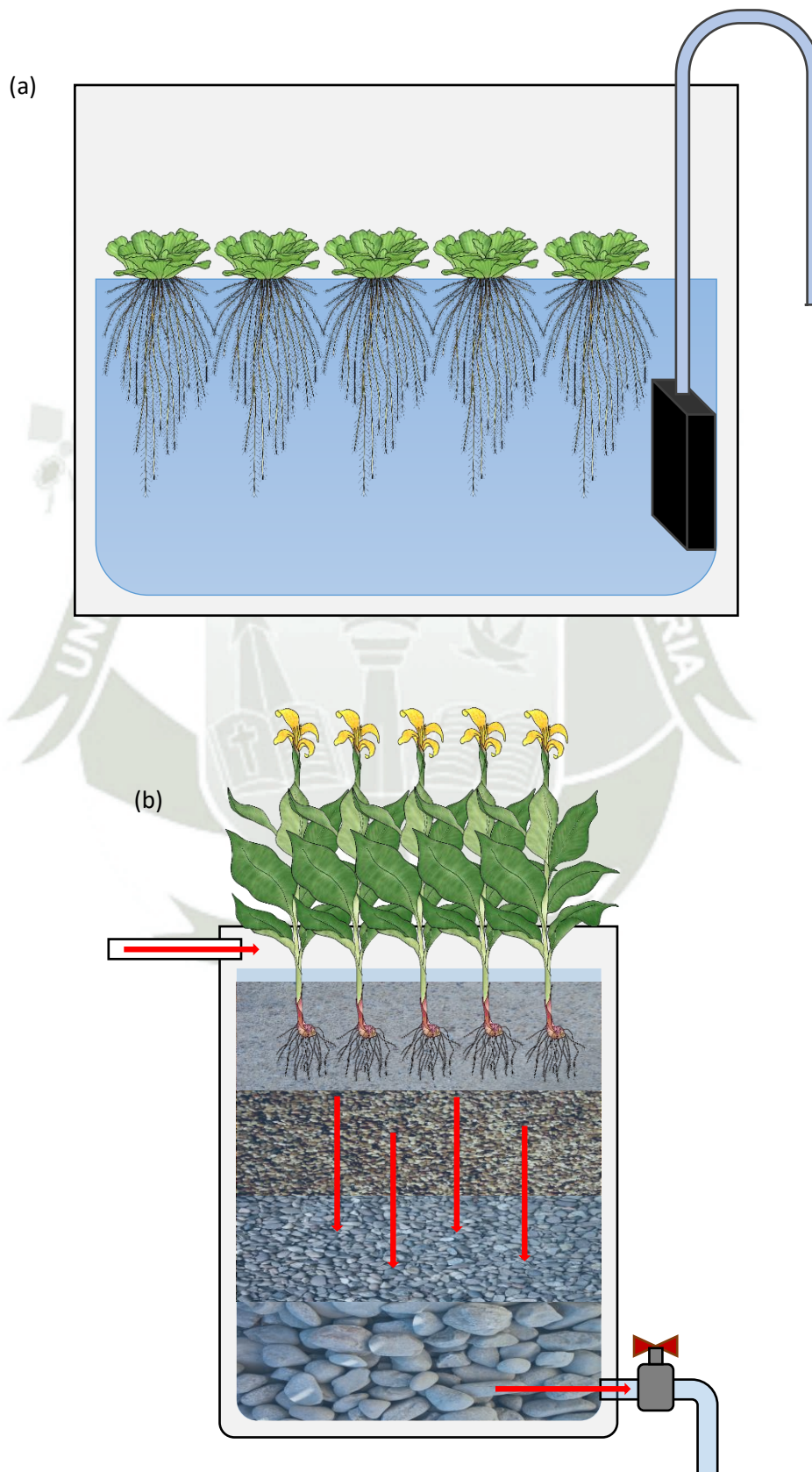
Este sistema permite depurar aguas de metales pesados, sustancias contaminantes y bacterias patógenas, así como la conversión de compuestos bajo parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno total (TN) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Además, cabe señalar que los humedales artificiales se pueden construir en cuerpos de agua con o sin tratamiento primario y se pueden realizar utilizando tanto plantas flotantes como subacuáticas (31,86). A pesar de esto son más comúnmente utilizados para tratamientos secundarios o terciarios (44).

3.5.2.1. Humedal artificial de flujo superficial libre (HFS)

Está compuesto por estanques o cuencas de poca profundidad que contienen una profundidad de agua aproximada de 0.4 m. Este sistema debe su efectividad a la interacción y simbiosis que se origina entre las plantas y la biopelícula que lleva facilitando la degradación aerobia y anaerobia de los contaminantes. El problema respecto a este sistema es que requiere de una gran superficie para lograr el saneamiento a gran escala siendo su uso más aplicable a volúmenes menores. Además, en algunas ocasiones puede reportarse pérdida de agua por evapotranspiración o por infiltración. Entre las plantas comúnmente utilizadas para este sistema tenemos a *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, *Juncus effusus*, *Scirpus lacustris* y *Scirpus californicus*. En base a sus características, su aplicación es más adecuada como tratamiento complementario o terciario (13,48).

Respecto a este tipo de sistemas se reporta su efectividad, por sobre otro tipo de humedales, en la remoción de fármacos y antibióticos de sulfonamida, tetraciclinas, macrólidos y fluoroquinonas a escala piloto por lo que es necesario investigar más al respecto para lograr los resultados deseados a una mayor escala (52).

Figura 9. Sistema de tratamiento de flujo discontinuo provisto de sistema de aireación (a) y Sistema de humedal artificial de flujo subterráneo vertical (b)



3.5.2.2. Humedales de flujo superficial vertical

Su diseño permite una mayor ventilación y un tiempo más prolongado de retención hidráulica esto debido a que los materiales de sustrato o empaque de la cuenca suelen tener una conductividad hidráulica alta y prolongan el paso de las moléculas de agua por todas las capas del sistema (24).

3.5.2.3. Humedales Bio Rack

Son de utilidad para el tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas de río poco contaminado, el flujo de este tipo de humedales es similar al de humedales de flujo horizontal libre, pero tiene una característica que los diferencia y este es el bio rack o estante conformado por tubos perforados que permiten el flujo uniforme del agua que brindara soporte a la vegetación sin la necesidad de utilizar un sustrato o cualquier otro método de soporte. En este sistema el agua se ingresa por la parte inferior y recoge en la salida ubicada en la parte superior (34).

3.5.2.4. Humedales Bio Rack modificados

La modificación de un Humedal Bio Rack consistiría en la utilización de deflectores que provocarían un movimiento ascendente y descendente de las aguas residuales creando un tipo de flujo pistón. Además, las plantas se ubicarán en tubos separados permitiendo que se utilicen múltiples especies vegetales sin que estas se mezclen y permitiendo así una mejor distribución radicular y mayor variedad microbiana que favorecerán la eliminación de contaminantes. En cuanto al ingreso y salida del agua, se ingresará el agua al sistema por la parte superior central. Luego por acción de los deflectores el agua cambiara su dirección de flujo en varias ocasiones hasta salir por la válvula ubicada a un lado de la parte superior del sistema (34).

3.5.2.5. Humedales de tratamiento flotantes (HTF)

Este sistema se diferencia de otros al no necesitar de un sustrato o medio, su estructura consiste en el cultivo de plantas emergentes sobre una estera flotante en la cual enraízan creando una amplia superficie radicular para el crecimiento de microorganismos que ayudaran en el tratamiento (48,13). Para mantener la flotabilidad del sistema se construyen esteras flexibles pero resistentes que puedan anclarse y tener un bajo peso como es el caso de las esteras inorgánicas cuyas opciones de material más comunes son el poliéster, tubos de

PVC y fibra de vidrio u opciones más naturales como la madera y el bambú, donde se incorporan elementos como espuma y componentes huecos sellados que mejoraran la flotabilidad de la balsa, además de mallas que servirán de soporte para las plantas que también tendrán características especiales. Para este tipo de humedales la aplicación de plantas que puedan proporcionar flotabilidad adicional es estimada, es por esto que se utilizan plantas con tejido vegetal de baja densidad llamadas aerenquimatosas y plantas helofíticas que suelen almacenar gases en sus rizomas mejorando la flotabilidad (63,87).

Su método de acción se fundamenta en los procesos físicos y biológicos que ocurren en sus raíces, rizomas y las biopelículas que forman que, están en contacto con el agua a tratar y realizan los procesos de absorción y descomposición de micro contaminantes. Además, este sistema es estéticamente agradable ya que su función original era ornamental y ya posteriormente se le dio aplicación en el tratamiento de aguas (13,48). Además, gracias a que las plantas están inmovilizadas en la estera flotante su proliferación es controlada a diferencia de otras especies vegetales que flotan libremente como es el caso del jacinto de agua y lenteja de agua que pueden llegar a replicarse excesivamente infestando el medio y provocando efectos negativos en otros seres vivos que habiten en ese ecosistema (63).

3.5.2.6. Humedal artificial de flujo subterráneo

Se realiza llenando una cavidad de aproximadamente 0.6 m con capas de arenas, grava o roca triturada en la cual se plantan plantas de humedal. Se puede realizar en dos sistemas de flujo horizontal o vertical que corresponde a el flujo en el que se desplazara el agua a través del sistema. Su estructura permite que dentro del humedal se encuentren sincrónicamente zonas anaerobias, semiaerobias y aerobias (raíces y rizomas) en el suelo mejorando la eliminación de fosforo y nitrógeno, favoreciendo la desnitrificación y permitiendo mejorar parámetros como el DBO₅ y DQO. Un factor a tomar en cuenta es la profundidad del humedal ya que se ha demostrado que una menor profundidad mejora la eficiencia y facilita el trabajo de las plantas remediadoras (13).

- Humedales artificiales de flujo subterráneo horizontal

Su tamaño depende de la cantidad de agua que se quiera tratar y del espacio disponible, pero en medidas generales se recomienda que tenga una profundidad de entre 30 y 60 cm siendo 40 cm la profundidad más óptima. Está conformado por un sustrato de grava y arena en el cual se planta la vegetación, recibe este nombre porque el flujo del agua se

dará de forma horizontal atravesando el sistema entre la grava y arena a la vez que es tratada por las plantas y microorganismos que residen en sus raíces (48).

Este método ha obtenido muy buenos resultados en el tratamiento de aguas residuales, pero tiene una desventaja ligada a su diseño, al ser un flujo horizontal no da oportunidad de lograr una adecuada aireación disminuyendo su efectividad (53). Así mismo se ha reportado la obstrucción del sistema a gran escala que provocaría una falla temprana de este, esta obstrucción consiste en la acumulación de sólidos inorgánicos y orgánicos en las cavidades porosas del lecho del sistema de humedal de flujo subterráneo horizontal limitando el contacto de las aguas a tratar con la biopelícula ubicada en las raíces de las plantas reduciendo así su efectividad (88).

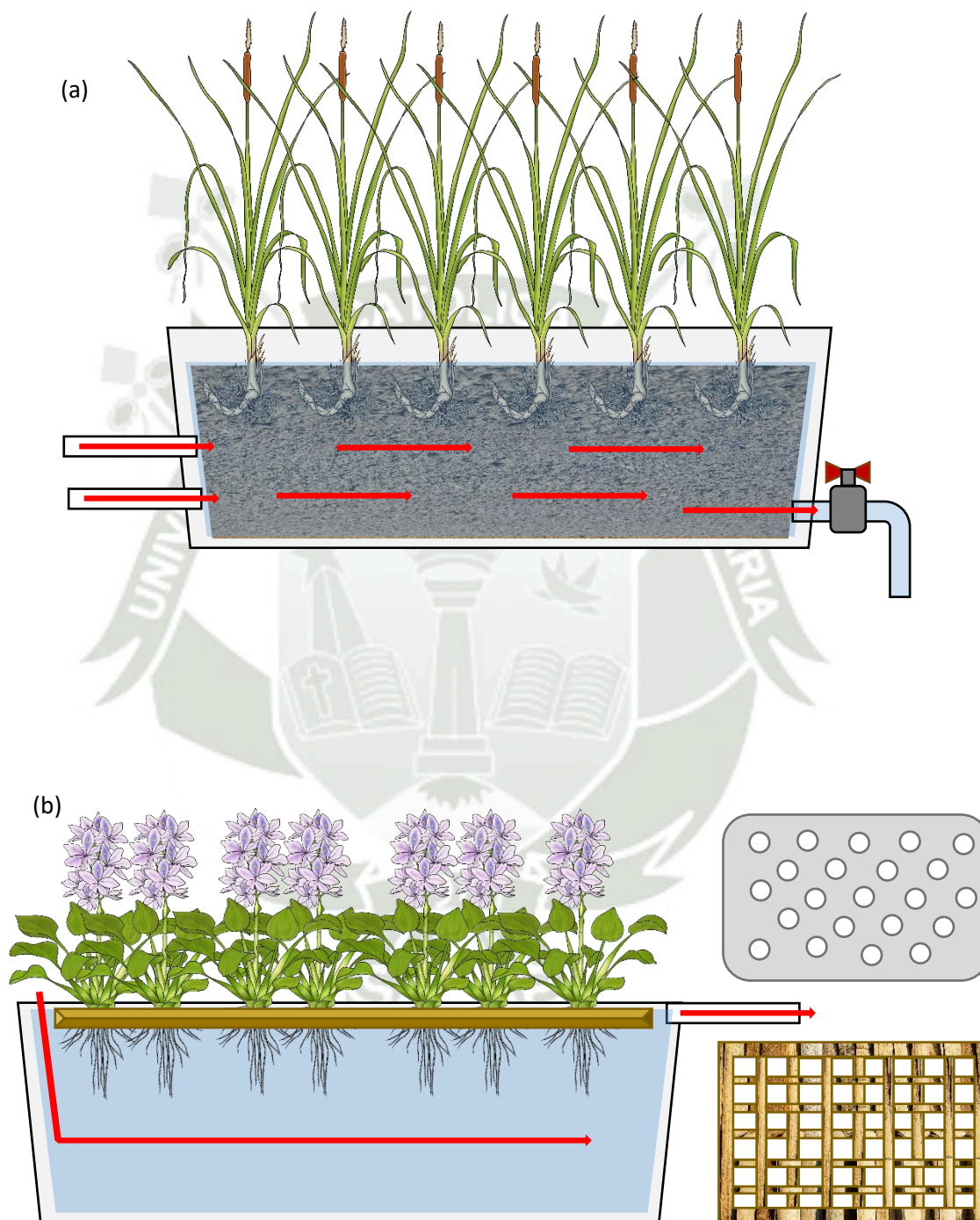
- **Humedales artificiales de flujo subterráneo vertical**

Como su nombre lo indica en este tipo de humedal las aguas residuales ingresan verticalmente atravesando el sistema, la entrada ubicada en la parte superior distribuye las aguas uniformemente en toda la superficie del sistema, al entrar en contacto con el sustrato y las plantas remediadoras será tratado y recolectado en la parte inferior del sistema. Dadas las características de su estructura dentro del sistema se crean tanto zonas aerobias como anaerobias facilitando la eliminación de nitrógeno y fósforo (48).

Su ventaja más relevante es su aireación que a diferencia de los sistemas de flujo horizontal logran una mejor transferencia de oxígeno. En contraparte también presenta desventajas como la obstrucción física que afecta la eficiencia del tratamiento al degradar también a macrófitos afectando la calidad del agua tratada (62).

Un ejemplo de humedal de flujo subterráneo vertical es el humedal de flujo de marea (27). Humedales artificiales de flujo de marea son aptos para competir con tecnologías convencionales debido a su mejor circulación de oxígeno que, mejora el rendimiento mediante el llenado y drenado continuo de la celda del humedal artificial con aguas residuales e introduciendo a la vez oxígeno adicional. Se ha comprobado que estos tipos de humedales son eficientes en la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos de aguas residuales municipales, pero es importante tener en cuenta que para obtener los resultados esperados la planta seleccionada debe cumplir con características como el rápido crecimiento, la hiperacumulación y la resistencia a la toxicidad de metales pesados (42).

Figura 10. Sistema de humedal artificial de flujo subterráneo horizontal (a) y Sistema de humedales de tratamiento flotantes (HTF) con esteras flexibles de bambú, poliéster o PVC (b)



3.5.2.7. Humedales artificiales híbridos

En general los humedales artificiales de una sola etapa solo tienen la capacidad de proporcionar condiciones aeróbicas o anaeróbicas que, por la naturaleza mixta de las aguas no siempre será adecuado para el tratamiento de compuestos específicos, significando una limitante para su aplicación. Es por eso que se plantea crear humedales híbridos que puedan cubrir más ampliamente las necesidades que representan el tratamiento de aguas residuales complejas. El diseño más básico de humedad artificial está compuesto por humedales de flujo subterráneo horizontal y humedales de flujo subterráneo vertical que son dispuestos en serie, este acoplamiento permite que se produzcan reacciones redox que influyen positivamente en la eliminación de una mayor cantidad de contaminantes (13). Al mismo tiempo esta combinación permite cubrir las debilidades que presentan cada uno de los sistemas singularmente mejorando su rendimiento de forma conjunta (62).

3.5.2.8. Sistema de ingeniería ecológica (EES)

Este sistema experimental tiene como punto de interés la consideración de factores de diversificación ecológica permitiendo la adecuación del sistema en distintos ambientes, su estructura consiste de un tanque rectangular fabricado en metacrilato, el cual es ocupado en un 20% con lecho de lago que funciona a modo de inculo al activarse los microorganismos que este contiene, como otro punto de diferencia este sistema cuenta con una bomba de aireación que logra una distribución adecuada del oxígeno y por ende la eficiencia del sistema al descomponer los contaminantes en compuestos más simples y menos tóxicos que se degradan con mayor facilidad, como ultima adición tenemos al carbón activado que actúa como solvente y catalizador de las reacciones. Todas estas modificaciones actúan en conjunto con plantas remediadoras logrando una mayor eficiencia en la remoción y eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos (19).

3.5.3. Filtros verticales

Este sistema consiste en la utilización de una especie vegetal que conformará parte de este filtro, para su armado se colocará la planta como paja en la parte central del tubo y este se cerrará por ambos extremos con algodón o lana de vidrio, en la parte inferior del tubo se colocará gasa médica con el fin de proteger la válvula que controla la salida del agua mientras que por la parte superior se ingresará el agua residual para su tratamiento y se protegerá la

entrada con una capa de algodón. Finalmente, antes de iniciar el proceso se lavarán los sistemas repetidamente con agua de grifo y luego con agua destilada (5).

3.5.4. Sistema hidropónico

Este sistema consta de la utilización de tubos cilíndricos de aproximadamente 0.33 m de diámetro y 1.55 m de largo en los cuales se apertura agujeros grandes de 0.12 m donde se colocarán las plantas y orificios pequeños de 0.05 m que cumplirán con la función de aireación de las raíces. Estos tubos se mantendrán fijos durante todo el proceso y se ubicarán de manera escalonada para permitir el flujo del agua a través de estos. Este sistema puede utilizarse por etapas de manera que una vez el agua ingrese a uno de los tubos puede retenerse por un tiempo para luego pasar al siguiente tubo donde recibirá el mismo tratamiento por el mismo periodo de tiempo y así sucesivamente hasta su recolección (4).

Tabla 6. Sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Sistemas	Frecuencia	
	Nº	%
Tanques hidropónicos	13	22.41
Ingeniería ecológica	2	3.45
Tratamiento de flujo discontinuo	26	44.84
Estanque facultativo	3	5.17
Humedal artificial de flujo vertical	4	6.90
Humedales de tratamiento	2	3.45
Humedal artificial de flujo horizontal	6	10.34
Humedal bio-rack modificado	1	1.72
Humedad bio-rack común	1	1.72
TOTAL	58	100.00

Se han experimentado con diferentes sistemas de fitorremediación de aguas residuales domésticas, siendo el tratamiento de flujo discontinuo el más empleado en 44.84%, otro sistema que también destaca es el de tanques hidropónicos con 22.41%, seguido en porcentajes muy menores por el sistema humedad artificial del flujo horizontal y vertical en

10.34% y 6.90% respectivamente. También se han utilizado otros sistemas como ingeniería ecológica, estanque facultativo, humedales de tratamiento y el humedal bio-rack común y modificado.

Tabla 7. Sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de aguas residuales municipales

Sistemas	Frecuencia	
	Nº	%
Tratamiento de flujo discontinuo	3	25.00
Humedal artificial de flujo vertical	3	25.00
Humedal artificial de flujo horizontal	6	50.00
TOTAL	12	100.00

El sistema con el que más se ha experimentado en la fitorremediación de aguas residuales municipales es el humedal artificial de flujo horizontal en 50% de los artículos, mientras que el de flujo vertical y el tratamiento de flujo discontinuo se emplearon en 3 artículos (25% cada uno).

Tabla 8. Sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales

Sistemas	Frecuencia	
	Nº	%
Humedales artificiales de flujo de marea	1	8.33
Tratamiento de sistema de flujo discontinuo	6	50.00
Humedal artificial	1	8.33
Humedales de tratamiento flotantes	4	33.34
TOTAL	12	100.00

Se observa que, en 6 artículos (50%) referidos a la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales emplearon el sistema de flujo discontinuo. También utilizaron humedales de tratamiento flotantes en 4 (33.34%) artículos.

Respecto a los sistemas de tratamiento utilizados en la fitorremediación de las aguas residuales domésticas, y en las domésticas y municipales el más utilizado para tal fin fue el de flujo discontinuo con 44.84% y en 50% respectivamente, aunque en la literatura se señala que los humedales artificiales horizontales o verticales son los presentan mejores características en su construcción, aplicación y resultados, que si se han utilizado en las investigaciones de fitorremediación de aguas residuales municipales en 75%.

3.6. Eficiencia de la fitorremediación

3.6.1. Parámetros de Calidad del Agua

- **Temperatura**, la temperatura es un parámetro de campo que se mide en el lugar de muestreo y determina el desarrollo de la actividad microbiana. La temperatura óptima para el desarrollo de bacterias es de 25 a 35°C. Si la temperatura es menor a 5°C, hay inhibición de la actividad microbiana, pero si se acerca a 50°C, los procesos de nitrificación y digestión aerobia se interrumpen (89). La temperatura de las aguas contaminadas es mayor que la de las aguas no contaminadas, esto se debe a las descargas de las aguas residuales a altas temperaturas o a que, al degradar la materia orgánica, se producen reacciones bioquímicas y se libera energía (90).
- **pH**, es un indicador de la acidez (rango de 1 a 7) o alcalinidad (rango de 7 a 14) de cualquier solución acuosa, sin embargo, cuando es 7 se considera pH neutro (91). Este parámetro indica la toxicidad de los efluentes y suelos, los cuales modifican el pH del medio acuático y pueden ocasionar daños a los ecosistemas presentes en él. El pH, a su vez, influye en la actividad de los microorganismos, en la degradación de la materia orgánica y en que los elementos presentes en el agua no permanezcan en porcentajes adecuados (91). En tratamientos biológicos, el crecimiento de hongos y bacterias se da en pH menores a 6 (92).
- **Oxígeno Disuelto**, es la cantidad de oxígeno presente en un cuerpo de agua (16). Su concentración varía a lo largo del día y de la estación climática del lugar; asimismo, se encuentra en mayor concentración en la superficie de los cuerpos de agua, y en profundidades puede llegar a ser nula (93). Este parámetro es de suma importancia para la actividad biológica y química ya que, si hay oxígeno disuelto en el agua residual, impide que se generen malos olores. La cantidad de oxígeno disuelto está

condicionada por distintos factores como la altitud, la temperatura, la actividad biológica y química, entre otros (90).

- **Sólidos Disueltos Totales**, se componen por iones disueltos en agua y moléculas orgánicas e inorgánicas. Poseen un tamaño menor a 0.0001 mm y se relacionan con la cantidad de minerales, metales y sales que el agua ha disuelto (89,94).
- **Sólidos Suspendidos Totales**, representan la cantidad de materia insoluble en las aguas residuales (95). Se pueden percibir a simple vista; existen sólidos flotantes y sólidos que se sedimentan en el fondo de los cuerpos de agua. Estos últimos son indicadores de la cantidad de lodos a eliminar (90). Los lodos normalmente contienen hasta el 97% de agua, lo que los hace ligeros (95).
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**, es la cantidad de oxígeno que se necesita para degradar químicamente la materia orgánica biodegradable y no biodegradable en CO_2 y H_2O presente en el agua (90). El agente oxidante utilizado en la determinación de la DQO es el dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en medio ácido. Esta determinación permite medir la toxicidad de las aguas residuales y la degradabilidad de la materia orgánica antes de la descarga de los efluentes (50).
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)**, es un indicador de calidad de aguas tanto residuales como superficiales (92,90). Consiste en medir el oxígeno disuelto que los microorganismos utilizan para degradar la materia orgánica biodegradable a los 5 días, a una temperatura de 20°C , en condiciones aerobias y anaerobias (90,92).

Tabla 9. Eficacia del sistema de tratamiento de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia				Referencias
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
<i>Pistia stratiotes</i>	6.74		725.0	633	6.86		466.11	547.04	0.0 ácido		35.71	13.58	(Selvaraj & Velvizhi, 2021)
	6.96	412	149.38	588	7.77	275	41.32	509.75	0.0 alcalino	33.25	72.34	13.31	(Shafi, y otros, 2024)
<i>Eichhornia crassipes</i>	8.78	71.57	79.52	2.57	7.10	10.93	12.11	0.49	21.41 alcalino	84.72	99.77	80.0	(Ayala Tocto & Calderón Ordoñez, 2018)
	6.74		725	633	7.01		455.74	535.33	0.0 alcalino		37.14	15.43	(Selvaraj & Velvizhi, 2021)
<i>Eichhornia crassipes, Colocasia arábica, Cannna sp y Typha sp</i>	6.5	140	224	92.8	7.9	29.00	76	7.5		79.29	66.07	19.18	(Garad, 2022)
<i>Nymphoides humboldtiana</i>	8.78	71.57	79.52		7.28	12.80	14.22		18.70 alcalino	88.12	82.12		(Ayala Tocto & Calderón Ordoñez, 2018)
<i>Nasturtium officinale</i>	8.78	71.57	79.52	2.57	7.15	11.32	12.57		19.3 alcalino	84.19	84.77		
<i>Lemna minor</i>	6.96	412	149.38	588	7.88	241	51.65		0.0 alcalino	65.43	12.59		(Shafi, y otros, 2024)
<i>Scipus grossus</i>		106.5	231.3			0.52	8.67			99.5	96.3		(Al-Ajalín, Idris, Abdullah, Kurniawan, & Imron, 2020)
<i>Lepironia articulata</i>		102.13	240			0.31	7.33			99.7	96.9		
<i>Scipus grossus y lepironia articulata</i>		104.02	233.3			0.5	8.0			99.5	96.6		
<i>Hidrilla verticillate</i>	6.74		725	633	6.82				0.0 ácido	34.29	11.73		(Selvaraj & Velvizhi, 2021)
<i>Polygonum hydropiperoides</i>	6.96	412	149.38	588	7.63	455	39.26	483.75	0.0 alcalino		10.59		(Shafi, y otros, 2024)
<i>Lemna minor, Polygonum hydropiperoides y Pistia stratiotes</i>	6.96	412	149.38	588	7.63	455	39.26	525.75	0.0 alcalino		10.59		

El sistema de flujo discontinuo empleando las diferentes plantas mencionadas en la respectiva Tabla para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, estas muestran mayormente en el pretest pH ácidos, transformándose en el postest en alcalinos, y solo en dos experimentos con *Pistia stratiotes* e *Hidrilla verticillate* se mantuvieron ácidos.

En cuanto a la demanda biológica de oxígeno (DBQ₅), esta ha disminuido en el postest respecto al pretest (84.72%), pero en cuanto a la eficiencia del sistema, este ha sido eficiente empleando la *Eichhornia crassipes* (84.72%), *Nymphoides humboldtiana* (82.12%), *Nasturtium officinale* (84.19%), *Scipus grossus* en (99.5%), *Lepironia articulata* (99.7%) y en la combinación de la *Scipus grossus* con la *Lepironia articulata* (99.5%).

En lo referente a la demanda química de oxígeno DQO, se puede observar que este parámetro también disminuye en el postest en comparación al pretest en este sistema de fitorremediación utilizando las diferentes plantas; pero la eficiencia sólo la han presentado utilizando *Eichhornia crassipes* (99.77%), *Nymphoides humbltdiana* (82.12%), *Nasturtium officinale* (84.77%), *Scipus grossus* (96.3%), *Lepironia articulata* (96.9%) y la combinación de *Scipus grossus* con *Lepironia articulata* (96.6%).

Los sólidos disueltos totales (TDS) siguen la misma tendencia que los anteriores parámetros descritos, resultando que este sistema empleando la *Polygonum hydropiperoides* alcanzó la cifra de 500 mg/L, considerándose como aceptable.

Tabla 10. Eficacia del sistema de tanques hidropónicos para la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia			Referencias	
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L		TDS mg/L
<i>Azolla pinnata</i>	8.06	635.67	843.67	3.30	8.04	510.67	729.33	2.57	0.2	19	13	22	(Kausar, Zahra, Kiran, Asim, & Raza, 2023)
<i>Typha latifolia</i>	8.41		651.67	8.87	7.83	67.0	497.33	2.46	0.0	23	20.0	72	
<i>Salvinia molesta</i>	8.83	625	830.33	1.82	8.23	473.33	695.33	2.15	6.7	24	16	0.0	

Las aguas residuales domésticas mostraron en el pretest un pH alcalino, y luego del tratamiento con el sistema de tanques hidropónicos empleando tres diferentes plantas este se mantuvo en alcalino. La demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO) disminuyeron en el postest respecto del pretest, a pesar de esto esta diferencia al ser mínima se traduce en no eficiencia del sistema de tanques hidropónicos al ser menor a 80%.

Acerca de los sólidos disueltos totales, estos aumentaron en el postest en comparación al pretest.

Tabla 11. Eficacia del sistema humedal artificial de flujo horizontal en la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia				Referencias
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
<i>Scipus grossus</i>	6.35	118.10	234		7.21	0.57	8.78		99.52	96.25			(Al-Ajalin, Idris, Abdullah, Kurniawan, & Imron, 2020)
	6.35	118.10	234		7.21	2.93	17.09		97.52	92.7			
<i>Lepironia articulata</i>	6.35	118.10	234		7.21	0.35	7.17		99.70	96.94			
	6.35	118.10	234		7.21	3.67	15.45		96.9	93.4			
<i>Scipus grossus</i> y <i>Lepironia articulata</i>	6.35	118.10	234		7.21	0.57	8.03		99.52	96.57			
	6.35	118.10	234		7.21	3.90	15.68		96.70	93.3			

El sistema humedal artificial de flujo horizontal ha empleado la *Scipus grossus* y a la *Lepironia articulata* en forma individual y combinadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, mostrando estas en el pretest un pH ácido, el cual luego del tratamiento se transformó en alcalino. La DBO₅ y DQO de las aguas residuales domésticas después de la fitorremediación disminuyeron en gran cantidad, generando una eficiencia que supera el 80%.

Tabla 12. Eficiencia del sistema humedal artificial de flujo vertical en la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia				Referencias
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
<i>Canna indica</i>		220	330			30	12			86	91		(Pinninti, y otros, 2024)
<i>Schumannianthus dichotomus</i>	7.62	21.4	98		6.8	8.22	27			61.60	53.98	13.90	(Rahman, y otros, 2022)

La fitorremediación de aguas residuales domésticas tratadas con el sistema humedal artificial de flujo vertical, con la *Canna indica* y *Schumannianthus dichotomus*, mostraron disminución del DBO₅ y DQO en el postest respecto del pretest, generando una eficiencia mayor a 80% solo cuando se utiliza la *Canna indica* más no cuando se emplea *Schumannianthus dichotomus*.

Tabla 13. Eficiencia del sistema humedal artificial bio-rack común y modificado en la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia				Referencias
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
<i>Typha angustata</i> y <i>Canna indica</i>	7.35				7.39				0.0	56.95	55.63		(Sathe & Munavalli, 2019)
	7.35				7.45				0.0	65.23	63.25		

El sistema humedal artificial bio rack común y modificado empleo a la *Typha Angustata* y *Canna indica* en forma combinada para el tratamiento de aguas residuales domésticas, cuyo pH desde el pretest era alcalino, manteniéndose en el postest. El artículo no cuenta con datos acerca de DBO₅ y DQO, pero si sobre los porcentajes de eficiencia, los cuales fueron menores a 80%.

Tabla 14. Eficiencia del sistema de ingeniería ecológica en la fitorremediación de aguas residuales domésticas

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia				Referencias
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
<i>Pistia stratiotes</i>	6.74		725	633	7.05		145	460			80	27.26	(Selvaraj & Velvizhi, 2021)
<i>Eichhornia crassipes</i>	6.74		725	633	7.05		103.11	438.74			85.71	30.69	

La Fitorremediación de aguas residuales domésticas tratadas con el sistema de ingeniería ecológica empleando a la *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes*, mostró acerca del pH un cambio de ácido a neutro (7.05), la demanda de oxígeno (DQO) y los sólidos disueltos totales (TDS) en general disminuyeron en las aguas residuales domésticas, generado una eficiencia mayor a 80% en el parámetro DQO, más no en el TDS.

Tabla 15. Eficiencia de los sistemas de fitorremediación en aguas residuales domésticas con tratamiento primario

Sistemas	Plantas	pH	Pretest			pH	Postest			pH	Eficacia			Referencias
			DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L		DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L		DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
Estanque facultativo	<i>Pistia stratiotes</i>	60	90.6	430	24	48	225	60	47	48	(Akowanou, Deguenon, Balogoun, Daouda, & Aina, 2023)			
	<i>Eichhornia crassipes</i>	140	228.8	700	60	90.6	430	57	60	39				
	<i>Lemna minor</i>	24	48	225	17.6	9	120	63	63	47				
Tratamiento de flujo discontinuo	<i>Azolla filiculoides</i>	160	360		59.5	47		62	87		(Rezooqi, Mouhamad, & Jasim, 2021)			

La cantidad de DBO₅, DQO y TDS ha sido menor en el postest respecto del pretest en la fitorremediación de aguas residuales domésticas con tratamiento primario empleando la *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, siendo su porcentaje de eficiencia menor a 80%.

El tratamiento de flujo discontinuo con *Azolla filiculoides* para la fitorremediación de estas aguas residuales dio como resultado la disminución de la cantidad de DBO₅ y DQO en el postest respecto al pretest, dando lugar a una eficiencia mayor a 80% solo en DQO.

Tabla 16. Eficiencia de los sistemas de fitorremediación de aguas residuales domésticas con tratamiento secundario

Sistemas	Plantas	Pretest			Postest				Eficacia			Referencias			
		pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L		DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
Hidropónico	<i>Pistia stratiotes</i>	6.7	30	74		6.9	16.6	46		0.2 ácido	46.7	37.8		(Mustafa & Hayder, 2021) (Kaushal & Mahajan, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021) (Mustafa & Hayder, 2021)	
	<i>Nephtylis podophyllum</i>	7.12	39	3.2		7.42	14.04	5.5		0.30 alcalino	65	76			
	<i>Salvinia molesta</i>	5.97	41.8	63		7.42	4	23		1.45 alcalino	91	82.6			
	<i>Salvinia molesta</i>	6.7	30	74		7.1	12	42		0.4 alcalino	60	43.2			
	<i>Salvinia molesta</i>	6.6	50	84		6.5	28	38		0.1 ácido	66.7	72.2			
	<i>Salvinia molesta</i>	7.1	51.6	84.3		6.7	36.2	16		0.0 ácido	74.7	81.0			
	<i>Eichhornia crassipes</i>	6.7	30	74		6.8	14.1	48		0.1 ácido	53	35.1			
			6.6	50	84		6.7	22	40			70	61.1		
			7.1	51.6	84.3		6.4	39.4	53		0.0 ácido	58	67.2		
Tanques de flujo discontinuo	<i>Pistia stratiotes</i>			152				121				49		(Mustafa & Hayder, 2021)	
	<i>Lemna minor</i>			152				115				46			

Para la fitorremediación de aguas residuales domésticas con tratamiento secundario se utilizó mayormente el sistema hidropónico con diferentes plantas, mostrando un pH alcalino solo con las plantas *Nephtylis podophyllum*, *Salvinia molesta* en dos experimentos 7.42 y 7.1.

La cantidad de la demanda bioquímica de oxígeno disminuyó hacia el postest en la totalidad de los estudios, la demanda química de oxígeno también disminuyó hacia el postest, a excepción al usar la planta *Nephtylis podophyllum* (de 3.2 en el pretest a 5.5 en el postest).

La eficiencia se dio al emplear la *Salvinia molesta* en DBO₅ y DQO en 91% y 82.6% respectivamente. También la *Salvinia molesta* presentó eficiencia de 81% en DQO en un estudio.

La fitorremediación de aguas residuales domésticas con tratamiento secundario, empleando las plantas *Pistia stratiotes* y *Lemna minor* mostro disminución de DQO en el postest (121 y 115 mgO₂/L) respectivamente, siendo su eficiencia de 49% y 46%, ambas eficiencias menores a 80%.

Tabla 17. Eficiencia de los sistemas de fitorremediación de aguas residuales domésticas al 25% y 50%

Sistemas	Plantas	Pretest				Postest				Eficacia			Referencias	
		pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L		TDS mg/L
Tanques de flujo discontinuo	<i>Pistia stratiotes</i>	7.2	114	226						97.2	99.8		(Imron, y otros, 2023)	
Hidropónico	<i>Azolla pinnata</i>	8.1	294	465	2.74	7.9	185	281.3	2.99	2.5	37	39	9	(Kausar, Zahra, Kiran, Asim, & Raza, 2023)
	<i>Typha latifolia</i>	8.4	464.3	327.3	4.26	8.2	335.6	112.3	2.90	2.3	65	27	31	
	<i>Salvinia molesta</i>	8.7	276.3	445.3	3.75	8.1	136.6	358.3	2.77	6.1	50	19	26	

Las aguas residuales disueltas al 25% y 50% mostraron un pH alcalino (8.1 y 8.7) en el pretest y luego del tratamiento con el sistema hidropónico conjuntamente con la *Azolla pinnata*, *Typha latifolia* y *Salvinia molesta* siguieron siendo alcalinos en el postest con alguna pequeña variación en los valores (7.9 a 8.1) respecto del pretest

Respecto de DBO₅ y DQO, sus cantidades después de la fitorremediación de las aguas residuales, disminuyeron, generando una eficiencia de 97.2%, 37%, 65% y 50%.

Tabla 18. Eficiencia del sistema de tratamiento de tanques de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales domésticas pretratadas

Plantas	Pretest			Postest			Eficacia			Referencias			
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH		DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L
<i>Salvinia molesta</i>			49	900			21	153			56.47	83	(Alawadhi & Hayder, 2021)
<i>Eichhornia crassipes</i>			49	900			25	684			48.81	24	

La fitorremediación de aguas residuales domésticas pretratadas empleando el sistema tanques de flujo discontinuo con *Eichhornia crassipes*, generó disminución del DQO y TDS disminuyeron a 25 mgO₂/L y 684 mg/L respectivamente, siendo su eficiencia de 48.81% y 24% respectivamente.

Utilizando el mismo sistema, pero con *Salvinia molesta*, los parámetros DQO y TDS disminuyeron en cantidad hacia el postest (21 y 153) respectivamente, alcanzando una eficiencia de 56.47% y 83%.

El sistema de tratamiento de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando la *Eichhornia Crassipes*, *Nymphoides humboldtiana*, *Nasturtium officinale*, *Scipus grossus*, *Lepironia articulata* fue eficiente y cuando estas últimas se utilizaron en conjunto se tuvo una eficiencia mayor al 80%, las mismas plantas con el sistema humedal artificial de flujo horizontal obtuvieron una eficiencia mayor a 90%, en cambio en el de flujo vertical solo la *Canna indica* sobrepaso el 80% de eficiencia, y el sistema de Ingeniería ecológica utilizando la *Eichhornia crassipes* solo alcanzo eficiencia en DQO; mientras que, en los sistemas hidropónico y los humedales artificiales Bio Rack común y modificado no fueron eficaces.

Tabla 19. Eficiencia del sistema de tratamiento de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales municipales

Plantas	Pretest						Postest						Eficiencia						Referencias
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	P	Fe	Cr	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	P	Fe	Cr	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	P	Fe	Cr	
<i>Pistia stratiotes</i>	0.54	0.02	31.45	0.64	0.42	0.61	0.05	0.01	0.17	0.03	0.05	0.09	90	51	99	95	88	86	(Buta, y otros, 2023)
<i>Eichhornia crassipes</i>	0.54	0.02	31.45	0.64	0.42	0.61	0.04	0.03	5.62	0.16	0.04	0.19	93	0.0	82	75	90	68	
<i>Lemna minor</i>	0.54	0.02	31.45	0.64	0.42	0.61	0.04	0.01	0.22	0.03	0.03	0.06	92	48	99	95	92	90	

En las aguas residuales municipales tratadas con el sistema de flujo discontinuo conjuntamente con *Pistia stratiotes* y *Lemna minor*, los valores de NH₄⁺, NO₂⁻, P, Fe y Cr disminuyeron hacia el postest respecto del pretest, generando eficiencias entre 51% y 99% (*Pistia stratiotes*), y entre 48% y 99% (*Lemna minor*). Este mismo sistema empleando *Eichhornia crassipes* también muestra disminución en las cantidades de los parámetros evaluados, excepto en NO₂⁻ que, siendo 0.02 en el pretest paso a 0.03 en el postest, mostrando eficiencias que van de 0% a 93%.

Tabla 20. Eficiencia del sistema de tratamiento humedales de flujo horizontal en la fitorremediación de aguas residuales municipales

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia			Referencias	
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	SST mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	SST mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L		SST mg/L
<i>Phragmites australis</i>	7.2	175.7	304.4	102.4		19.2	33	16		88.6	89.1	84.3	(Abou-Elela, Hellal, & Elekhawy, 2019)
	7.68	51.07	123.4	259.1	7.58	11.61	31.38	55.84		77	74	78	(Aalam, Arias, & Khalil, 2022)
<i>Cyperus papyrus</i>	7.2	175.7	304.4	102.4		23.5	38.5	20		86.9	87.5	80.4	(Abou-Elela, Hellal, & Elekhawy, 2019)
<i>Sagittaria sagittifoli</i>	7.68	51.07	123.4	259.1	7.68	11.81	30.12	41.7		77	75	83	(Aalam, Arias, & Khalil, 2022)
<i>Iris spp</i>	7.68	51.07	123.4	259.1	7.75	17.34	50.21	73.79		66	59	70	

Las aguas residuales municipales tratadas en humedales de flujo horizontal utilizando *Phragmites australis* en dos experimentos muestran disminución de DBO₅ (19.2 mgO₂/L y 11.61 mgO₂/L) respecto de pretest y DQO (33 mgO₂/L y 31.38 mgO₂/L), generando eficiencias de 88.6% y 77% (DBO₅) y de 84.1% y 74% (DQO).

La misma tendencia a la disminución de las cantidades de DBO₅ y DQO muestran las aguas residuales municipales tratadas con este sistema y con *Cyperus papyrus*, *Sagittaria sagittifoli* e *Iris spp*. La eficiencia para *Cyperus papyrus* es de 86.9% (DBO₅) y 87.5% (DQO); de *Sagittaria sagittifoli* de 77% y 75% para DBO₅ y DQO respectivamente y para *Iris spp*. de 66% (DBO₅) y 59% (DQO).

Tabla 21. Eficiencia del sistema de tratamiento humedales de flujo vertical en la fitorremediación de aguas residuales municipales

Plantas	Pretest				Postest				Eficacia				Referencias
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	
<i>Phragmites australis</i>	7.6	160	390	2645	8.8	40	140	2100	0,0	75	64.1	20.6	(Karaghool & Ismaeel, 2022)
<i>Canna indica</i>		31.2	49.7			25	3.9			90.5	75.5		(Phewnil, Chunkao, Prabhuddham, & Pattamapitton, 2024)
<i>Heliconia psittacorum</i>		31.2	49.7			3.8	5.7			86.9	75.3		

Las aguas residuales municipales tratadas en humedales de flujo vertical conjuntamente con *Phragmites australis* muestran disminución en las cantidades de DBO₅, DQO y TDS hacia el postest 40 mgO₂/L, 140 mgO₂/L y 2100 mg/L produciendo una eficiencia de 75%, 64.1% y 20.6%; con *Canna indica* el DBO₅ paso a 2.5 mgO₂/L y DQO a 3.9 mgO₂/L, generando una eficiencia de 90.5% y 75.5% respectivamente ; con *Heliconia psittacorum* DBO₅ llegó a 3.8 mgO₂/L y DQO a 5.7 mgO₂/L, siendo su eficiencia de 86.9% y 75.3% respectivamente.

Tabla 22. Eficiencia de los sistemas de humedales de tratamiento flotantes y de flujo vertical en la fitorremediación de aguas residuales domésticas y municipales

Plantas	Pretest									Postest							Eficacia					Referencias			
	pH	DBO ₅ mgO ₂ /L	DQO mgO ₂ /L	TDS mg/L	K mgO ₂ /L	Na mgO ₂ /L	P mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	pH	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	TDS mg/L	K mg/L	Na mg/L	P mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	pH	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	TDS mg/L	K mg/L		Na mg/L	P mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L
<i>Canna indica</i>	5.8	92	230.8	1285	13	96	8.2	11.3	7.03	5.4	17	720	7.4	57	2.1	0.5	0.0	88.28	85.07	28.8	33.33	28.54	66.46	77.73	(Arivukkarasu & Sathyanathan, 2023)
<i>Ocimum tenuiflorum</i>	5.8	92	230.8	1285	13	96	8.2	11.3	6.1	9.8	30	950	6.8	57.2	2.3	1.75	0.0	87.21	85.08	23.4	44.26	31.37	61.50	44.32	
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	5.8	92	230.8	1285	13	96	8.2	11.3	7.22	4.5	14	658	3.3	45	1.2	2.26	0.0	83.55	78.59	35.6	66.95	39.53	72.15	75.27	
<i>Hibiscus rosasinensis</i>	5.8	92	230.8	1285	13	96	8.2	11.3	6	19.6	61.5	942	7.3	51	2.8	6.1	0.0	57.79	46.91	19.3	32.82	35.28	53.25	34.37	
Flujo vertical																									
<i>Canna indica</i>		220	330				14.5			30	12				0.6		86	91					95	(Pinninti, y otros, 2024)	

Las aguas residuales domésticas y municipales tratadas con humedales flotantes conjuntamente con *Canna indica*, *Ocimum tenuiflorum*, *Chrysopogon zizanioides* e *Hibiscus rosasinensis* mostraron en el pretest en pH ácido, transformándose en alcalino (7.03 y 7.22) solo en la 1ra y 4ta planta mencionada.

En cuanto a los parámetros de análisis, todos sufrieron disminución hacia el postest respecto del pretest. Así mismo la eficiencia mostrada por este sistema y cada una de las plantas es mayor en DBO₅, DQO y TDS.

En general, el sistema de flujo discontinuo en la fitorremediación de aguas residuales municipales, utilizando *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* obtuvo una eficiencia mayor al 90%; los humedales de flujo horizontal utilizando *Phragmites australis* y *Cyperus papyrus* alcanzaron una eficiencia mayor a 80%; el humedal de flujo vertical con *Canna indica* y *Heliconia psittacorum* también alcanzo eficiencia en 90.5% y 86.9% respectivamente. En el tratamiento de aguas mixtas (domésticas y municipales) los humedales de tratamiento flotantes de flujo vertical mostraron eficiencia mayor al 80% solo en DBO₅ y DQO utilizando *Canna indica* y *Ocimum temiflorum*.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

4.1. Economía circular y Biomasa

Bajo el concepto de la economía circular es importante considerar el manejo que se le puede dar a las plantas cosechadas después del proceso de fitorremediación, con el fin de prevenir la generación de residuos al reducirlos, reutilizarlos, reciclarlos, recuperarlos o restaurarlos para obtener energía (96,45).

Una de las opciones viables es la de utilizar estas plantas como biomasa para la producción de biocombustibles (1). También es posible la utilización de la biomasa para la producción de briquetas de carbón, papel, tableros de fibra o como abono agrícola y complemento alimenticio, sin embargo, es necesario realizar mayores estudios para determinar los posibles peligros al tratarse de plantas que han absorbido metales pesados y otras contaminantes tóxicos porque este sería uno de las principales limitantes para la aplicación de la biomasa cosechada, además de la evaluación de viabilidad económica en relación a la cantidad de biomasa necesaria y la energía que se obtendría de esta (15,96).

Para la producción de biocombustibles se tiene en cuenta la posibilidad de obtener bioetanol, biohidrógeno, biogás y biodiesel a partir de biomasa vegetal. El bioetanol se obtiene a partir de biomasa con alto contenido en almidón, las plantas que han presentado un mejor rendimiento al respecto son *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* que lograron un rendimiento de entre 0.14 y 0.17 gramos de etanol por gramo de biomasa, también han resultado de utilidad *Azolla filiculoides* y *Alternanthera sessilis*. En cuanto al biohidrógeno su producción se basa en la glucosa que pueda obtenerse a partir de la biomasa, como muestra de su viabilidad observamos un rendimiento de 2.2 mol de hidrogeno por mol de glucosa obtenidas a partir de la fermentación de *Azolla sp.* y en la misma cantidad de *Pistia*

stratiotes. El biogás es sintetizado a partir de biomasa con alto contenido lipídico, proteico y de carbohidratos como la celulosa y hemicelulosa, para este fin se han utilizado plantas como *Acorus calamus Linn*, *Canna indica*, *Colocasia tonoiimo Nakai*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Pontederia cordata*, *Thalia dealbata* y *Typha orientalis* que mediante el uso de un digester anaeróbico pueden producir biogás con un rendimiento de 2.75 mL de biogás por gramo de biomasa al día. Finalmente, para la producción de biodiesel se considera que el uso de plantas acuáticas es apto porque a diferencia de otras materias primas utilizadas para este fin no es comestible y ya se han obtenido resultados con *Azolla filiculoides* que puede producir 150 mg de biodiesel por gramo de biomasa (45).

Desde el punto de vista agrícola se observa que como elemento clave de la mayoría de fertilizantes tenemos al fósforo y nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales en apreciables cantidades es por eso que su extracción de estas con la aplicación de plantas remediadoras daría una opción futura a usarlas como biomasa para fertilizantes que se encuentran en escases y elevado precio en la actualidad (2).

Otra opción es la fabricación de bio carbón a partir de la biomasa de plantas acuáticas el cual podrá ser utilizado para la recuperación de la fertilidad del suelo. Teniendo en cuenta que ya se han tenido resultados favorables con plantas acuáticas como *Ceratophyllum demersum L.*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Myriophyllum verticillatum L.* y *Oenanthe javanica* con un rendimiento de entre 360 y 460 mg de bio carbón por gramo de biomasa, se le puede considerar como una opción viable (45).

4.2. Innovación tecnológica

En cuanto a la mejora de sistemas de tratamiento se evalúa la utilización de tecnologías híbridas como la combinación de humedales artificiales y celdas de combustible biológicas (MFC), esta integración no solo mejoraría el tratamiento de aguas residuales si no que permitiría la recuperación de bioelectricidad al mismo tiempo. Actualmente, esta tecnología se encuentra en desarrollo primario habiéndose probado únicamente con aguas residuales sintéticas (44).

Observando otras posibilidades de tratamiento de aguas, tenemos a la adsorción para la cual es necesario contar con adsorbentes que generalmente tienen un precio elevado que la hacen poco accesible es por eso que es necesario sintetizar adsorbentes de bajo costo y efectividad. Para esto podríamos una vez más aplicar los residuos de biomasa vegetal que mediante pirolisis y activación química y física pueden funcionar como excelentes

adsorbentes, como prueba de ello tenemos a *Scripus grossus* e *Ipomoea* acuática cuya biomasa convertida en adsorbente han tenido excelentes resultados en la eliminación de azul de metileno y violeta de metilo 2B, respectivamente (45). De la misma manera se considera importante el tratamiento y estabilización de los lodos de aguas residuales municipales para lo cual la fitorremediación con plantas como *Echinochloa crus galli* e *Hibiscuscannabinus* es recomendable (97). Empleando estos nuevos métodos podríamos lograr un proceso remediador más completo y con la menor cantidad de residuos y contaminantes posibles.

4.3. Biotecnología y Genética

Desde el punto de vista de la genética e ingeniería molecular, se considera la aplicación de biotecnología vegetal para el mejoramiento de plantas para aumentar su resistencia y capacidad de degradación de contaminantes. Para este fin se evalúa la utilización de enzimas como las nucleasas con dedos de zinc (ZFN), Nucleasa efectora de tipo activador de la transcripción (TALEN) o nucleasa 9 (CRISPR-Cas9) para incluir características y vías catabólicas para la degradación de contaminantes de microorganismos como bacterias y hongos en plantas en futuras investigaciones. Esto podría significar una mayor producción de enzimas catalíticas, una mejora en la capacidad para absorber, transportar y metabolizar contaminantes reduciendo o eliminando su toxicidad. Por otra parte, es importante evaluar las repercusiones posibles por lo que se plantea utilizar malezas venenosas para la transformación genética de esta manera nos aseguramos que la planta modificada no ingrese a la cadena alimentaria y pueda generar efectos futuros. En cuanto a el punto de vista ético, observamos que se ha logrado expresar genes humanos en plantas mejorando así su metabolización de contaminantes orgánicos, aun cuando se han obtenido excelentes resultados es preferible evitar el uso de genes humanos en el desarrollo de plantas transgénicas (13).

4.4. Producción Alimentaria y Ornamentales

Por otra parte, no es imposible la producción de alimentos que sean comestibles y a la vez traten aguas residuales. De acuerdo con Magwaza S. es posible producir tomates a partir de un sistema hidropónico alimentado con aguas residuales domésticas previamente tratadas de modo que este nuevo sistema realice un tratamiento secundario o terciario que brinde a las aguas niveles más aceptables y a la vez obtenga un valor agregado mediante la producción de cultivos que obtendrán los nutrientes necesarios de estas aguas. Además, expone investigaciones previas que demostrarían el potencial de las aguas residuales para la producción de hortalizas como la lechuga, espinaca y remolacha, conocida en nuestro país

como beterraga; frutas como los tomates, berenjenas y pimientos e incluso plantas ornamentales como rosas y claveles (98).

Como una mejora desde un punto de vista estético se ha planteado y estudiado la utilización de plantas ornamentales con flores las cuales no son propias de los humedales naturales pero que aplicadas en pequeñas comunidades brindarían un incentivo para la aplicación de este sistema de tratamiento, para lograr los resultados esperados se aplicarían especies vegetales como *Canna hybrids*, *Alpinia purpurata*, *Hedychium coronarium*, *Anthurium spp.*, *Heliconiaceae spp.*, *Zantedeschia aethiopica* y *Spathiphyllum wallisii* que además de brindar un mejor aspecto al humedal no afectarían la capacidad de remoción y eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos pudiendo lograr un porcentaje de eficiencia del 80 %, esta opción aún se encuentra en desarrollo puesto que se ha observado que en algunas de las plantas ornamentales a pesar de lograr una buena eliminación de contaminantes dejan de florecer o disminuyen su crecimiento debido a la exposición y saturación a las altas concentraciones de contaminantes (99).

4.5. Limitaciones

Todos estos métodos son aplicables siempre y cuando se haya evaluado previamente ante qué clase de agua residual han estado expuestas las plantas, si estas han estado en contacto con metales pesados y productos farmacéuticos o de cuidado personal (PPCP) y compuestos disruptores endocrinos (EDC) no podrán ser utilizadas para fines agrícolas o de alimentación de ganado evitando así que ingresen en la cadena alimenticia y generen mayores perjuicios, aun así podrían ser utilizadas para otros fines en los que no intervengan en la cadena alimenticia (45).

Se ha observado también la posibilidad de usar organismos vivos para determinar la efectividad de la fitorremediación en aguas residuales y así evaluar su comportamiento y toxicidad posterior al tratamiento. Este es el caso del tratamiento terciario de aguas residuales domésticas y textiles con *Lemna minor* y su posterior examen de ecotoxicidad en *Daphnia magna*, un pequeño crustáceo planctónico en el cual los contaminantes de aguas residuales domésticas son altamente tóxicos, el estudio demostró la efectividad de *Lemna minor* no solo en la reducción de parámetros como DQO sino también en la toxicidad del agua en organismos acuáticos como *Daphnia magna* (100).

Finalmente, a pesar de todas las ventajas que se podría obtener del tratamiento de aguas residuales a través de la fitorremediación, este es un método que en la mayoría de los casos

necesita gran cantidad de área para la construcción de la infraestructura, que sería insuficiente para la cantidad de agua residual producida, por lo que consideró que se podría utilizar en poblados pequeños, los cuales en la realidad son los que más adolecen de la falta de tratamiento de aguas residuales.



5. CONCLUSIONES

Se identificaron como las plantas de uso más recurrente en aguas residuales domésticas a *Eichhornia crassipes* (16.96%), *Pistia stratiotes* (15.08%) y *Salvinia Molesta* (13.20%); en aguas residuales municipales a la *Phragmites australis* (25.03%), mientras que en aguas mixtas nuevamente tuvo relevancia *Eichhornia crassipes*. Estas plantas se caracterizan por su rápido crecimiento, capaz de duplicar su población en un corto periodo de tiempo como es el caso de *Eichhornia crassipes*, alta resistencia a contaminantes, como metales pesados, nutrientes orgánicos, pesticidas, colorantes y medicamentos, y capacidad para absorberlos y transformarlos o eliminarlos.

Los sistemas más empleados en aguas residuales domésticas fueron el tratamiento de flujo discontinuo (44.84%), el de tanques hidropónicos (22.41%,) y los sistemas de humedal artificial del flujo horizontal (10.34%) y humedal artificial del flujo vertical (6.90%). En aguas residuales municipales primero el humedal artificial de flujo horizontal en un 50%. En aguas mixtas domésticas y municipales se empleó el sistema de flujo discontinuo y es sistema de humedales flotantes. En general los sistemas se caracterizaron por su factibilidad económica y facilidad de instalación, siendo su punto de diferenciación La dirección en el flujo del agua, así como el material de sustrato orientado a mejorar el proceso remedidor ya sea filtrando o mejorando la aireación y condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Como conclusión final en base a la revisión sistemática de los artículos, la especie *Eichhornia crassipes* es la más usada en la fitorremediación realizada con el sistema de flujo discontinuo en el tratamiento de aguas residuales domésticas; de aguas municipales fue la *Phragmites australis* con el sistema humedal artificial de flujo horizontal; y en aguas mixtas el sistema de fitorremediación fue el de flujo discontinuo y la planta fue la *Eichhornia crassipes*. Así mismo, si bien es cierto se produjo disminución de los parámetros DBO₅, DQO, TDS en todas las investigaciones realizadas, la gran mayoría no alcanzo la eficiencia del 80%, infiriéndose que, la aplicación de la fitorremediación como tecnología para el tratamiento de aguas ha mostrado significativos resultados y avances, pero es necesario un mayor conocimiento e investigaciones por parte de las autoridades gubernamentales, regionales y locales con el fin de considerar esta tecnología como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mustafa H, Hayder G. Performance of *Salvinia molesta* plants in tertiary treatment of domestic wastewater. *Heliyon*. 2021; 7(1).
2. Mustafa H, Hayder G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(1): p. 355–65.
3. Al-Ajalin F, Idris M, Abdullah S, Kurniawan S, Imron M. Effect of wastewater depth to the performance of short-term batching-experiments horizontal flow constructed wetland system in treating domestic wastewater. *Environ Technol Innov*. 2020; 20: p. 101106.
4. Kaushal J, Mahajan P. Design and evaluation of hydroponic system for tertiary treatment of STP wastewater: An eco friendly approach. *Mater Today Proc*. 2021; 45: p. 4914–8.
5. Abid Maktoof A, AL-Enazi M. Use of two plants to remove pollutants in wastewater in constructed wetlands in southern Iraq. *Egypt J Aquat Res*. 2020; 46(3): p. 227–33.
6. Rezoqi A, Mouhamad R, Jasim K. The potential of *Azolla filiculoides* for in vitro phytoremediation of wastewater. *J Phys Conf Ser*. 2021; 1853(1): p. 012014.
7. Munfarida I, Auvaria S, Suprayogi D, Munir M. Application of *Salvinia molesta* for water pollution treatment using phytoremediation batch system. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2020; 493(1): p. 012002.
8. Velásquez J. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 2017; 8(1): p. 151-68.
9. Gavilánez F. Influencia de *Eichhornia crassipes* y microorganismos eficientes sobre contaminantes químicos y orgánicos de las aguas residuales de Naranjito, Ecuador. *Ekp*. 2015; 13(3): p. 1576-1580.

10. Pérez E. Diseño de un Sistema de Tratamiento Biológico para las Aguas Residuales de la Cabecera Parroquial de Sevilla Don Bosco Cantón Morona provincia De Morona Santiago. Tesis de Pregrado. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2019.
11. Qin H, Zhang Z, Liu M, Liu H, Wang Y, Wen X, et al. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. *Ecological Engineering*. 2016; 95: p. 753-762.
12. Qin H, Zhang Z, Liu M, Liu H, Wang Y, Wen X, et al. Responses of phytoremediation in urban wastewater with water hyacinths to extreme precipitation. *Journal of Environmental Management*. 2020 febrero; 271(45): p. 110948.
13. Kurade M, Ha Y, Xiong J, Govindwar S, Jang M, Jeon B. Phytoremediation as a green biotechnology tool for emerging environmental pollution: A step forward towards sustainable rehabilitation of the environment. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 415.
14. Rezaia S, Ponraj M, Talaiekhosani A, Mohamad S, et al. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2015; 163: p. 125-133.
15. Amare E, Kebede F, Mulat W. Wastewater treatment by Lemna minor and Azolla filiculoides in tropical semi-arid regions of Ethiopia. *Ecol Eng*. 2018; 120: p. 464–73.
16. Kausar A, Zahra N, Kiran H, Asim S, Raza A. The Ability of Some Aquatic and Terrestrial Plants to Purify Domestic Wastewater. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*. 2023 junio; 92(8): p. 2245-60.
17. Akowanou A, Deguenon H, Balogoun K, Daouda M, Aina M. The combined effect of three floating macrophytes in domestic wastewater treatment. *Sci Afr*. 2023 julio; 20.

18. Mustafa H, Hayder G. Evaluation of water lettuce, giant salvinia and water hyacinth systems in phytoremediation of domestic wastewater. *H2Open Journal*. 2021; 4(1): p. 167–81.
19. Selvaraj D, Velvizhi G. Sustainable ecological engineering systems for the treatment of domestic wastewater using emerging, floating and submerged macrophytes. *J Environ Manage*. 2021 mayo; 286(112253).
20. Mustafa H, Hayder D. Comparison of Pistia Stratiotes and Lemna Minor Plants Potentials in Bioremediation of Domestic Wastewater. 2021 Dec 29;82(1). *The Journal of The Institution of Engineers, Malaysia*. 2021 diciembre; 82(1).
21. Imron M, Firdaus A, Flowerainsyah Z, Rosyidah D, Fitriani N, Kurniawan S. Phytotechnology for domestic wastewater treatment: Performance of Pistia stratiotes in eradicating pollutants and future prospects. *Journal of Water Process Engineering*. 2023 febrero; 51(1034429).
22. Buta E, Borşan I, Omotă M, Trif E, Bunea C, Mocan A. Comparative Phytoremediation Potential of Eichhornia crassipes, Lemna minor, and Pistia stratiotes in Two Treatment Facilities in Cluj County, Romania. *Horticulturae*. 2023 abril; 9(4).
23. Shafi J, Waheed K, Mirza Z, Chatta A, Khatoon Z, Rasheed T. Green Solution for Domestic Wastewater Treatment: Comparing Phytoremediation Potential of Four Macrophytes. *Water Air Soil Pollut*. 2024 enero; 235(1).
24. Karaghool H, Ismaeal N. Using A Subsurface Vertical Flow System to Remediate Municipal Wastewater. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2022 octubre; 13(3): p. 107–13.
25. Abou-Elela S, Hellal M, Elekhrawy M. Phytoremediation of municipal wastewater for reuse using three pilot-scale HFCW under different HLR, HRT, and vegetation: A case study from Egypt.. 2019 Feb 1;140:80–90. *Desalination Water Treat*. 2019 febrero; 1(140): p. 80-90.

26. Aalam T, Arias C, Khalil N. Physicochemical and Biological Contribution of Native Macrophytes in the Constructed Wetlands to Treat Municipal Wastewater: A Pilot-Scale Experiment in a Sub-Tropical Climate Region. *Journals Recycling*. 2022 febrero; 7(8).
27. Chand N, Suthar S, Kumar K. Wastewater nutrients and coliforms removals in tidal flow constructed wetland: Effect of the plant (Typha) stand and biochar addition. *Journal of Water Process Engineering*. 2021; 43.
28. Mustafa H, Hayder G. Cultivation of *S. molesta* plants for phytoremediation of secondary treated domestic wastewater. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021 setiembre; 12(3): p. 2585-92.
29. Alawadhi N, Hayder G. Effectiveness of phytoremediation treatment of pre-treated domestic wastewater. [Internet]. 2021;22(1):124–34. Available from: <https://doi.org/10.12912/27197050/132086>. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2021; 22(1): p. 124-34.
30. Ayala Tocto R, Calderón Ordoñez ,ERJCSR. Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*. 2018; 2(3): p. 48-53.
31. Araque Niño I, Britto Aponte M, Cuellar Rodríguez L, Perico Granados N. Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista de Tecnología*. 2020; 17(1): p. 37–48.
32. Rijwana P, Kakoli Karar P. Efficiency of *Eichhornia crassipes* in the treatment of raw kitchen wastewater. *SN Appl Sci*. 2019 ABRIL; 1(381).
33. Kasmuri N, Malik S, Yaacob Z, Miskon M, Ramli N, Zaini N. Application of Water Hyacinth in Phytoremediation of Wastewater. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2023; 1135(012008).

34. Sathe S, Munavalli G. Domestic wastewater treatment by modified bio-rack wetland system. *Journal of Water Process Engineering*. 2019 abril; 1(28): p. 240–9.
35. Garad A. Phytoremediation of Domestic Wastewater. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2022 enero; 10(5): p. 73-5.
36. Pinninti R, Kasi V, Sallangi L, Landa S, Rathinasamy M, C S. Performance of Canna Indica based microscale vertical flow constructed wetland under tropical conditions for domestic wastewater treatment. *Int J Phytoremediation*. 2024; 24(7).
37. Arivukkarasu D, Sathyanathan R. Phytoremediation of domestic sewage using a floating wetland and assessing the pollutant removal effectiveness of four terrestrial plant species. *H2Open Journal*. 2023 junio; 6(2): p. 173.
38. Phewnil O, Chunkao K, Prabhuddham P, Pattamapitoon T. Application of different aquatic plants in an alternated fill and drain wetland system of Phetchaburi municipal wastewater treatment in Thailand. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024 enero; 31(1): p. 1304-13.
39. Al-Ajalin F, Idris M, Abdullah S, Kurniawan S, Imron M. Evaluation of short-term pilot reed bed performance for real domestic wastewater treatment. *Environ Technol Innov*. 2020.
40. Osama O, Abdullah S, Hasan H, Othman A, Ewadh H, Al-Baldawi I. Elimination of mixed ibuprofen and paracetamol from spiked domestic wastewater via a pilot continuous aerated sub-surface constructed wetland system. *Journal of Water Process Eng*. 2022 diciembre; 50(103308).
41. Rahman M, Rahaman M, Yasmeen S, Rahman M, Rabbi F, Shuvo O. Phytoremediation potential of *Schumannianthus dichotomus* in vertical subsurface flow constructed wetland. *Environmental Challenges*. 2022 diciembre; 9: p. 100631.

42. Kabbour A, Mouhir L, Benrahmane L, Bendaoud A, Laaouan M, El Hafidi M. Domestic wastewater treatment using tidal flow constructed wetlan. *Desalination Water Treat.* 2022 mayo; 1(1): p. 1-5.
43. Ecomar Fundación. ¿Qué son las aguas residuales? [Online].; 2020 [cited 2024 abril 12]. Available from: <https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/>.
44. Daverey A, Pandey D, Verma P, Verma S, Shah V, Dutta K. Recent advances in energy efficient biological treatment of municipal wastewater. *Bioresour Technol Rep.* 2019 setiembre; 1(7).
45. Kurniawan S, Ahmad A, Said N, Imron M, Abdullah S, Othman A. Macrophytes as wastewater treatment agents: Nutrient uptake and potential of produced biomass utilization toward circular economy initiatives. *Science of the Total Environment.* 2021; 790: p. 148-219.
46. Adistiara V, Kustiyaningsih E, Irawanto R. Phytoremediation of domestic wastewater (detergent) with arrowhead and burhead plants in Purwodadi Botanic Garden. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Institute of Physics Publishing. 2019 enero; 12(4).
47. Zhang X, Wang T, Xu Z, Zhang L, Dai Y, Tang X. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal. *Chemical Engineering Journal.* 2020 enero; 1: p. 379.
48. AL Falahi O, Abdullah S, Hasan H, Othman A, Ewadh H, Kurniawan S. Occurrence of pharmaceuticals and personal care products in domestic wastewater, available treatment technologies, and potential treatment using constructed wetland: A review. *Process Safety and Environmental Protection.* Institution of Chemical Engineers. 2022; 168: p. 1067-88.
49. Kumar M, Silori R, Mazumder P, Tauseef S. Screening of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) along wastewater treatment system equipped with

- root zone treatment: A potential model for domestic waste leachate management. *J Environ Manage.* 2023 junio; 1(335).
50. Kumar S, Pratap B, Dubey D, Kumar A, Shukla S, Dutta V. Constructed wetlands for the removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: origin, impacts, treatment methods, and SWOT analysis. *Environ Monit Assess.* 2022 diciembre; 194(885).
 51. Al-Baldawi I, Mohammed A, Mutar Z, Abdullah S, Jasim S, Almansoori A. Application of phytotechnology in alleviating pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater: Source, impacts, treatment, mechanisms, fate, and SWOT analysis. *Journal of Cleaner Production, Elsevier Ltd;* 2021. 2021 enero; 319.
 52. McCorquodale-Bauer K, Grosshans R, Zvomuya F, Cicek N. Critical review of phytoremediation for the removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in wastewater. *Science of the Total Environment. Elsevier B.V.* 2023; 870.
 53. Ghosh S, Biswas A. Emerging contaminants in municipal wastewater: Occurrence, characteristics, and bioremediation. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Bioremediation of Endocrine Disrupting Pollutants in Industrial Wastewater. Elsevier.* 2023.
 54. Ansari A, Naeem M, Gill S, AlZuaibr F. Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. [Internet]. 2020;46(4):371–6. *Egypt J Aquat Res.* 2020; 46(4): p. 371-6.
 55. Velásquez García J, Cobeña Navarrete H. Fitorremediación como alternativa en remoción de metales pesados del suelo: Una revisión teórica. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios.* 2022 JUNIO; 9(2).
 56. Caviedes Rubio D, Muñoz Calderón R, perdomo Gualtero A. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. *Revista Ingeniería y Región.* 2015; 13(1): p. 73-80.

57. Mendoza Guerra Y, Castro Echavez F, Marín Leal J, Hedwig Behling E. Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia). *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*. 2016; 39(2): p. 071-079.
58. Cai T, Park S, Li Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 19: p. 360-369.
59. Vymazal J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development. *Wat. Res*. 2013; 47: p. 4795-4811.
60. Amaya A, et al. Fitorremediación De Contaminantes Orgánicos. *ResearchGate*. 2015.
61. Peña M. Tratamiento de Aguas Residuales en Mexico. *Revista de Estudios Territoriales*. 2018; 12(5).
62. Justin L, Olukanni D, Babaremu K. Performance assessment of local aquatic macrophytes for domestic wastewater treatment in Nigerian communities: A review. *Heliyon*. Elsevier Ltd. 2022; 8.
63. Joshi H, Singh Y, Bhatt M, Prakash O. Domestic wastewater treatment using floating raft techniques. In: *Synergistic Approaches for Bioremediation of Environmental Pollutants: Recent Advances and Challenges*. Elsevier. 2022; 12(4): p. 53-64.
64. Sarawaneeyaruk S, Lorliam W, Krajangsang S, Pringsulaka O. Enhancing plant growth under municipal wastewater irrigation by plant growth promoting rhizospheric *Bacillus* spp. *J King Saud Univ Sci*. 2019 julio; 31(3): p. 384–9.
65. Qu Y, Yang Y, Sonne C, Chen X, Yue X, Gu H. Phytosphere purification of urban domestic wastewater. *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd. 2023; 336.

66. Javaheri-Tehrani M, Mousavi S, Abedi-Koupai J, Karami H. Treatment of domestic wastewater using the combination of porous concrete and phytoremediation for irrigation. *Paddy and Water Environment*. 2020 octubre; 18(4): p. 729–42.
67. Mirzaee M, Zakerinia M, Farasati M. Performance evaluation of vetiver and pampas plants in reducing the hazardous ions of treated municipal wastewater for agricultural irrigation water use. *Water Pract Technol*. 2022 mayo; 17(5): p. 1002–18.
68. Zhou Y, Stepanenko A, Kishchenko O, Xu J, Borisjuk N. Duckweeds for Phytoremediation of Polluted Water. *Plants*. MDPI. 2023; 12: p. 586.
69. Ceschin S, Crescenzi M, Iannelli M. Phytoremediation potential of the duckweeds *Lemna minuta* and *Lemna minor* to remove nutrients from treated waters. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020 mayo; 27(13): p. 15806–14.
70. Ferrario C, Peruzzi C, Cislighi A, Polesello S, Valsecchi S, Lava R. Assessment of Reed Grasses (*Phragmites australis*) Performance in PFAS Removal from Water: A Phytoremediation Pilot Plant Study. *Water (Switzerland)*. 2022 marzo; 14: p. 946.
71. Sandeep K, Ritambhara K, Upadhyay V, Kenate Worku D. Phytoremediation Potential of Macrophytes of Urban Waterbodies in Central India. *J Health Pollut*. 2019; 9(24).
72. Havel J, Kovalenko K, Thomaz S, Amalfitano S, Kats L. Aquatic invasive species: challenges for the future. *Hydrobiologia*. 2015; 750: p. 147-170.
73. Bhattacharya A, Pawan K. Water hyacinth as a potential biofuel crop. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*. 2010; 9(1): p. 112-122.
74. Khanna S, Santos M, Ustin S, Haverkamp P. An integrated approach to a biophysiological based classification of floating aquatic macrophytes. *International Journal of Remote Sensing*. 2011; 32: p. 1067-1094.

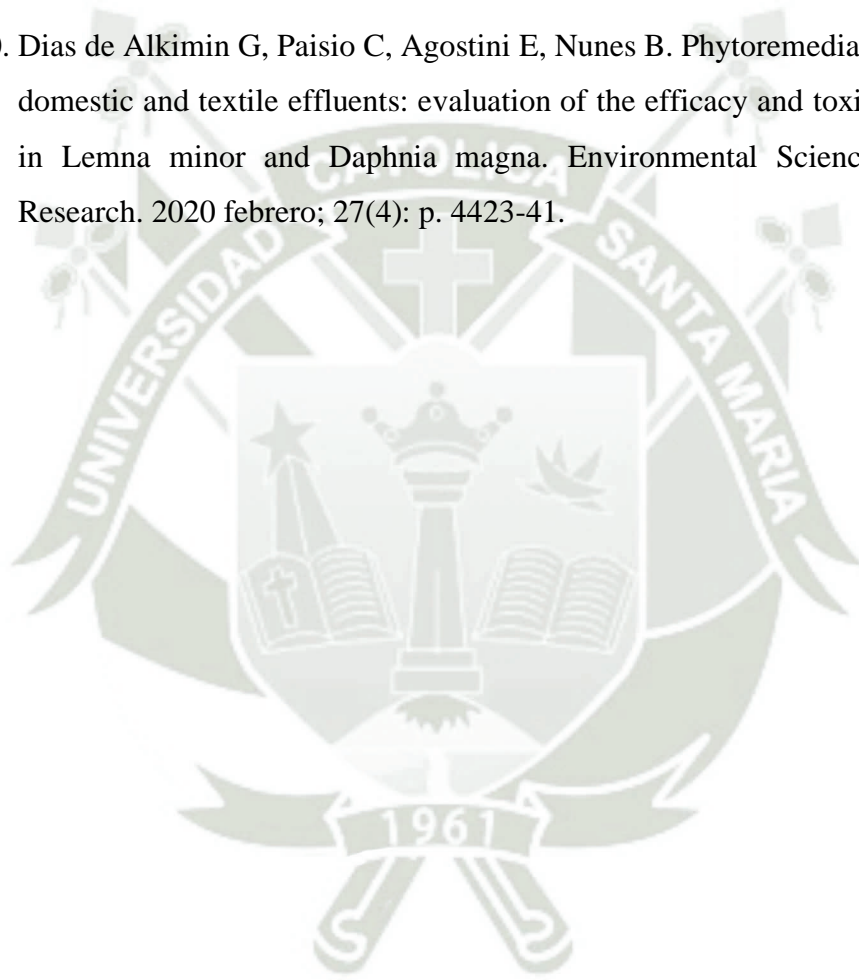
75. Nesslage G, Wainger L, Harms N, Cofrancesco A. Quantifying the population response of invasive water hyacinth, *Eichhornia crassipes*, to biological control and winter weather in Louisiana. USA. *Biological Invasions*. 2016; 18(7): p. 2107-2115.
76. Gaertner M, Larson B, Irlich U, Holmes P, Stafford L, Van Wilgen B, et al. Managing invasive species in cities: A framework from Cape Town, South Africa. *Landscape and Urban Planning*. 2016; 151: p. 1-9.
77. Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth. *Environment International*. 2007; 33(1): p. 122-138.
78. Hellmann JJ, BJE, BBG, & DJ. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*. 2008; 22(3): p. 534-543.
79. Rahel FJ, & OJD. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology*. 2008; 22(3): p. 521-533.
80. Rodríguez-Gallego L, Mazzeo N, Gorga J, Meerhoff M, Clemente J, Kruk C, et al. The effects of a subtropical, hypertrophic lake on the restoration of an artificial wetland dominated by free-floating plants. *Lakes & Reservoirs*. 2004; 9: p. 203-215.
81. Patel S. Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed *Eichhornia crassipes*: an overview. *Reviews Environment Science of Biotechnology*. 2012; 11: p. 249-259.
82. Gopalakrishnan A, Rajkumar M, Sun J, Parida A, Venmathi Maran B. Integrated biological control of water hyacinths, *Eichhornia crassipes* by a novel combination of grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (valenciennes, 1844), and the weevil, *Neochetina* spp. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2011; 29(1): p. 162-166.
83. Greenfield B, Siemerin G, Andrews J, Rajan M, Andrews S, Spencer D. Mechanical shredding of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Effects on water quality in the

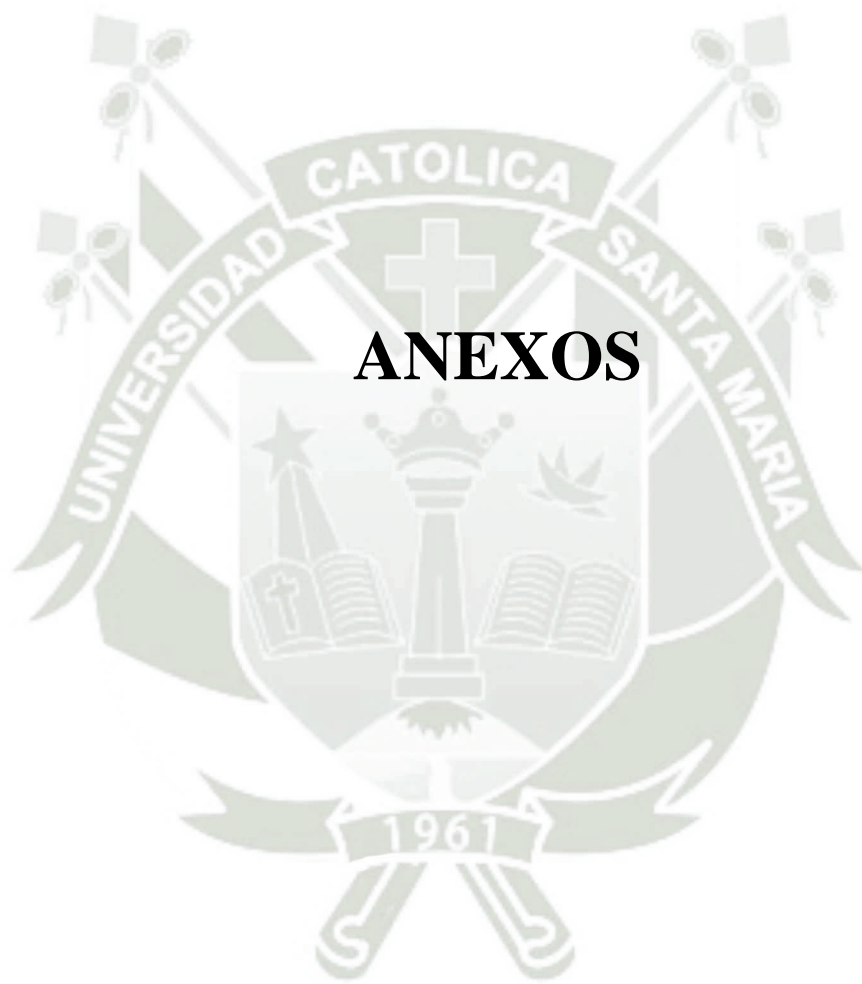
- Sacramento-San Joaquin river delta, California. *Estuaries and Coasts*. 2007; 30(4): p. 627-640.
84. Fleming J, Dibble E. Ecological mechanisms of invasion success in aquatic macrophytes. *Hydrobiologia*. 2015; 746(1): p. 23-37.
 85. Coetzee J, Byrne M, Hill M. Predicting the distribution of *Eccritotarsus catarinensis*, a natural enemy released on water hyacinth in South Africa. *Entomologia Experimentalis Applicata*. 2007; 125: p. 237-247.
 86. Al-Ajalin F, Idris M, Abdullah S, Kurniawan S, Imron M. Design of a reed bed system for treatment of domestic wastewater using native plants. *Journal of Ecological Engineering*. 2020 agosto; 21(6): p. 22-8.
 87. Arslan M, Wilkinson S, Naeth M, Gamal El-Din M, Khokhar Z, Walker C. Performance of constructed floating wetlands in a cold climate waste stabilization pond. *Science of the Total Environment*. 2023 Julio; 1.
 88. Ergaieg K, Haythem Msaddek M, Kallel A, Trabelsi I. Monitoring of horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of municipal wastewater. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021; 14.
 89. Delgadillo O. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. [Online].; 2010 [cited 2024 enero 12. Available from: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>.
 90. Canales H, Sevilla A. Evaluación del uso de microorganismos eficaces en el tratamiento de efluentes domésticos residuales del Distrito de Pátapo. Tesis para optar el Título de Ingeniero Químico. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; 2016.
 91. Zeballos J. Determinación de parámetros fisicoquímicos en efluentes industriales de curtiembres de la asociación de pequeñas y medianas empresas de curtiembres, fábricas de cola y derivados del cuero (apymeco) - Parque industrial de Rio Seco

- (PIRS), Cerro Colorado. Tesis para optar por el Título de Biólogo. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín; 2014.
92. Delgado J. Influencia de los microorganismos eficaces (Em agua) en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente del biorreactor en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Concepción. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Ambiental. Huancayo: Universidad Continental; 2018.
93. Beltrán T, Campos C. Influencia de microorganismos eficaces sobre la calidad de agua y lodo residual, planta de tratamiento de Jauja. Tesis para optar por el Título en Ingeniero Forestal y Ambiental. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú; 2016.
94. Bauder J, Sigler A. Alcalinidad, pH y sólidos disueltos totales. [Online].; 2014 [cited 2024 enero 20. Available from: http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS2012-11-15-SP.pdf.
95. Pineda J, Bocardo E. Evaluación del potencial de fitorremediación de *Isolepis cernua* y *Nasturtium aquaticum* para el tratamiento secundario de efluentes de curtiembre del parque industria Río Seco-Arequipa. Tesis para el Título en Ingeniero Ambiental. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín; 2019.
96. Mustafa H, Hayder G, Mustapa S. Circular Economy Framework for Energy Recovery in Phytoremediation of Domestic Wastewater. *Energies* (Basel). 2022 mayo; 15(9).
97. Almasi A, Mohammadi M, Kazemitabar Z, Hemati L. Phytoremediation potential of *Echinochloa crus galli* and *Hibiscus cannabinus* in the stabilization of municipal wastewater sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021 agosto; 18(8): p. 2137-44.
98. Magwaza S, Magwaza L, Odindo A, Mditshwa A, Buckley C. Partially treated domestic wastewater as a nutrient source for tomatoes (*Lycopersicum solanum*)

grown in a hydroponic system: effect on nutrient absorption and yield. *Rev Heliyon*. 20 diciembre.

99. Sandoval-Herazo L, Alvarado-Lassman A, López-Méndez M, Martínez-Sibaja A, Aguilar-Lasserre A, Zamora-Castro S. Effects of Ornamental Plant Density and Mineral/Plastic Media on the Removal of Domestic Wastewater Pollutants by Home Wetlands Technology. *Rev Molecules*. 2020 noviembre; 25(22): p. 5273.
100. Dias de Alkimin G, Paisio C, Agostini E, Nunes B. Phytoremediation processes of domestic and textile effluents: evaluation of the efficacy and toxicological effects in *Lemna minor* and *Daphnia magna*. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020 febrero; 27(4): p. 4423-41.





ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE DATOS

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
<i>Azolla filiculoides</i>	Aguas residuales con tratamiento primario	OD: 1.7 mg/L DBO ₅ : 160 mgO ₂ /L DQO: 360 mg/L NO ₃ ⁻ : 8.6 mg/L NH ₃ : 26 mg/L PO ₄ ³⁻ : 4.4 mg/L Cl ⁻ : 320 mg/L SO ₄ ²⁻ : 350 mg/L	OD: 3.2 mg/L DBO ₅ : 59.5 mgO ₂ /L DQO: 47 mg/L NO ₃ ⁻ : 2 mg/L NH ₃ : 6.8 mg/L PO ₄ ³⁻ : 0.72 mg/L Cl ⁻ : 58 mg/L SO ₄ ²⁻ : 59.5 mg/L	OD: 87% DBO ₅ : 62% DQO: 87% NO ₃ ⁻ : 76% NH ₃ : 74% PO ₄ ³⁻ : 84% Cl ⁻ : 76% SO ₄ ²⁻ : 83%	28 días	Tratamiento por tandas	Rezooqi AM, Mouhamad RS, Jasim KA. (6)
	Aguas domésticas, textiles y de destilería en proporción (18:3:1 respectivamente)	OD: 0.15 ± 0.02 mgO ₂ /L DBO ₅ : 15493 ± 35 mgO ₂ /L DQO: 34133 ± 3695 mgO ₂ /L SO ₄ ²⁻ : 1619 ± 123 mg/L P: 1505 ± 2 mg/L N: 5134 ± 603 mg/L	OD: 3.96 ± 0.40 mgO ₂ /L DBO ₅ : 1500 ± 100 mgO ₂ /L DQO: 1291 ± 58 mgO ₂ /L SO ₄ ²⁻ : 117 ± 38 mg/L P: 34 ± 7 mg/L N: 348 ± 100 mg/L	DBO ₅ : 96% DQO: 90% SO ₄ ²⁻ : 92.8% P: 98% N: 93.2%	28 días	Tratamiento por tandas o lotes	Amare E, Kebede F, Mulat W. (15)
<i>Azolla pinnata</i>	Aguas residuales domésticas 100%	pH: 8.0633 DBO ₅ : 635.6667 mgO ₂ /L DQO: 843.6667 mgO ₂ /L TDS: 3.30 mg/L	pH: 8.040 DBO ₅ : 510.6667 mgO ₂ /L DQO: 729.3333 mgO ₂ /L TDS: 2.57 mg/L	pH: 0.2% DBO ₅ : 19% DQO: 13% TDS: 22%	30 días	Tanques hidropónicos	Kausar, A; Zahra, N; Kiran, H; Asim, S; Raza, A (16)
	Aguas residuales domésticas 50%	pH: 8.1833 DBO ₅ : 294 mgO ₂ /L DQO: 465 mgO ₂ /L TDS: 2.74 mg/L	pH: 7.9700 DBO ₅ : 185 mgO ₂ /L DQO: 281.3333 mgO ₂ /L TDS: 2.99 mg/L	pH: 2.5% DBO ₅ : 37% DQO: 39% TDS: 9%			
<i>Pistia stratiotes</i>	Aguas residuales domésticas con tratamiento primario	DBO ₅ : 60 ± 2.9 mg O ₂ /L DQO: 90.6 ± 3.2 mg O ₂ /L SST: 430 ± 8.3 mg/L TKN: 71.3 ± 2.8 mg/L P-PO ₄ ³⁻ : 6.5 ± 0.1 mg/L	DBO ₅ : 24 ± 2.2 mg O ₂ /L DQO: 48 ± 3.2 mg O ₂ /L SST: 225 ± 8.3 mg/L TKN: 39.5 ± 2.1 mg/L P-PO ₄ ³⁻ : 4.6 ± 0.2 mg/L	DBO ₅ : 60% DQO: 47% SST: 48% TKN: 45% P-PO ₄ ³⁻ : 29%	8 días	Estanque facultativo	Akowanou, A; Deguenon, H; Balogoun, K; Daouda, M; Aina, M (17)
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	pH: 6.7 ± 0.1 DBO ₅ : 30 ± 0 mg/L DQO: 74 ± 1 mg/L Color: 222 ± 1 Pt-Co	pH: 6.9 ± 0 DBO ₅ : 166 ± 1 mg/L DQO: 46 ± 0 mg/L Color: 110 ± 0 Pt-Co	DBO ₅ : 46.7% DQO: 37.8% Color: 50.5%	14 días (THR 6 horas)	Sistema hidropónico	Mustafa, HM; Hayder, G. (18)
		pH: 6.6 ± 0.1 DBO ₅ : 50 ± 1 mg/L	pH: 6.7 ± 0.1 DBO ₅ : 24 ± 0 mg/L	DBO ₅ : 77.1% DQO: 74.6%	14 días (THR 12 horas)		

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
		DQO: 84 ± 1 mg/L Color: 451 ± 1 Pt-Co	DQO: 43 ± 1 mg/L Color: 222 ± 1 Pt-Co	Color: 57.2%			
		pH: 7.1 ± 0.5 DBO ₅ : 51.6 ± 0.1 mg/L DQO: 84.3 ± 0.6 mg/L Color: 445 ± 2 Pt-Co	pH: 6.6 ± 0.1 DBO ₅ : 40.4 ± 0 mg/L DQO: 25 ± 1 mg/L Color: 175 ± 2 Pt-Co	DBO ₅ : 53.2% DQO: 70.3% Color: 76.7%	14 días (THR 24 horas)		
	Aguas residuales domésticas	pH: 6.74 OD: 2.7 ppm6 Turbidez: 122.3 NTU TDS: 633 mg/L DQO: 725 mg/L NO ₃ ⁻ : 105.97 mg/L	pH: 6.86 OD: 3.6 ppm	Turbidez: 33.93% TDS: 13.58% DQO: 35.71% NO ₃ ⁻ : 28.27% SO ₄ ²⁻ : 22.14% PO ₄ ³⁻ : 40.91%	TRH 24 horas	Tratamiento por tandas	Selvaraj, D; Velvizhi, G (19)
		pH: 6.74 OD: 2.7 ppm Turbidez: 122.3 NTU TDS: 633 mg/L DQO: 725 mg/L NO ₃ ⁻ : 105.97 mg/L	pH: 7.08 OD: 8.7 ppm	Turbidez: 69.85 % TDS: 27.26 % DQO: 80 % NO ₃ ⁻ : 57.44 % SO ₄ ²⁻ : 52.72 % PO ₄ ³⁻ : 52.72 %		Sistema de ingeniería ecológica (lecho de lago + aireador + carbón activado)	
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Turbidez: 22.8 NTU Fosfatos: 5.08 mg/L Nitrógeno amoniacal: 18.23 mg/L Nitratos: 7.05 mg/L	Turbidez: 7.58 NTU Fosfatos: 3.97 mg/L Nitrógeno amoniacal: 15.10 mg/L Nitratos: 2.74 mg/L	Turbidez: 72.7% Fosfatos: 34.28% Nitrógeno amoniacal: 20.41% Nitratos: 77.55%	14 días (THR 6 horas)	Sistema hidropónico	Mustafa HM, Hayder G (1)
		Turbidez: 28.9 NTU Fosfatos: 5.50 mg/L Nitrógeno amoniacal: 20.01 mg/L Nitratos: 8.52 mg/L	Turbidez: 9.97 NTU Fosfatos: 4.38 mg/L Nitrógeno amoniacal: 13.62 mg/L Nitratos: 3.6 mg/L	Turbidez: 66.2% Fosfatos: 32.36% Nitrógeno amoniacal: 71% Nitratos: 68.38%	14 días (THR 12 horas)		
		Turbidez: 39.9 NTU Fosfatos: 11.01 mg/L Nitrógeno amoniacal: 21.26 mg/L Nitratos: 12.05 mg/L	Turbidez: 7.1 NTU Fosfatos: 4.46 mg/L Nitrógeno amoniacal: 9.08 mg/L Nitratos: 4.03 mg/L	Turbidez: 91% Fosfatos: 81.2% Nitrógeno amoniacal: 88.66% Nitratos: 83.6%	14 días (THR 24 horas)		
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Turbidez: 22.3 ± 0.57 NTU DQO: 152 ± 0.5 mg/L Fosfato: 4.84 ± 0.01 mg/L Nitrógeno amoniacal: 18.58 ± 0.8 mg/L Nitrato: 8 ± 0.1 mg/L	Turbidez: 4 ± 0.52 NTU DQO: 121 ± 0 mg/L Fosfato: 3.72 ± 0.05 mg/L Nitrógeno amoniacal: 3.78 ± 0.17 mg/L Nitrato: 2.3 ± 0.17 mg/L	Turbidez: 91.9% DQO: 49% Fosfato: 68% Nitrógeno amoniacal: 79.6% Nitrato: 71%	10 días (THR 24 horas)	Tratamiento en tanques de flujo discontinuo	Mustafa HM, Hayder DG (20)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
	Aguas residuales domésticas disueltas al 25 %	pH: 7.2 DO: 0.06 mg/L DQO: 226 mg/L DBO ₅ : 114 mg/L Amoniaco NH ₃ : 4.4 mg/L Nitrato NO ₃ -N: 0.087 mg/L Nitrito NO ₂ : 21.3 mg/L TP: 0.06 mg/L		DQO: 99.8% DBO ₅ : 97.2% Amoniaco NH ₃ : 46.4% Nitrato NO ₃ -N: 100% Nitrito NO ₂ : 100% TP: 80.4	14 días	Tratamiento en tanques de flujo discontinuo	Imron MF, Firdaus AAF, Flowerainsyah ZO, Rosyidah D, Fitriani N, Kumiawan, SB (21)
	Aguas residuales municipales	NH ₄ ⁺ : 0.54 ± 0.10 mg/L NO ₂ ⁻ : 0.02 ± 0 mg/L NO ₃ ⁻ : 31.45 ± 3.53 mg/L Fosforo: 0.64 ± 0.34 mg/L Hierro: 0.42 ± 0.38 mg/L Cromo: 0.61 ± 0.11 µg/L	NH ₄ ⁺ : 0,05 ± 0,01 mg/L NO ₂ ⁻ : 0,01 ± 0 mg/L NO ₃ ⁻ : 0.17 ± 0.07 mg/L Fosforo: 0.03 ± 0.02 mg/L Hierro: 0.05 ± 0 mg/L Cromo: 0.09 ± 0.01 µg/L	NH ₄ ⁺ : 90% NO ₂ ⁻ : 51% NO ₃ ⁻ : 99% Fosforo: 95% Hierro: 88% Cromo: 86%	7 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Erzsebet Buta, Ionut Lucian Borsan, Mariana Omota, Emil Bogdan Trif, Claudiu Ioan Bunea, Andrei Mocan, Florin Dumitru Bora, Sándor Rózsa, Alexandru Nicolescu (22)
	Aguas residuales domésticas	pH: 6.96 ± 0 DBO ₅ : 412.0 ± 4.24 mgO ₂ /L DQO: 149.38 ± 0.88 mgO ₂ /L TDS: 588 ± 0 mg/L Fosforo: 2.82 ± 0 mg/L	pH: 7.77 ± 0.09 DBO ₅ : 275.0 ± 9.90 mgO ₂ /L DQO: 41.32 ± 11.69 mgO ₂ /L TDS: 509.75 ± 8.13 mg/L Fosforo: 2.04 ± 0.03 mg/L	--	14 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T (23)
<i>Nephtylis podophyllum</i>	Aguas residuales con tratamiento secundario	pH: 7.12 OD: 3.2 mg/L DBO ₅ : 39 mgO ₂ /L Turbidez: 17.2 UNT Cloruro: 160 mg/L Dureza: 175 mg/L	pH: 7.42 OD: 5.5 mg/L DBO ₅ : 14.04 mgO ₂ /L Turbidez: 2.06 UNT Cloruro: 132.8 mg/L Dureza: 127.75 mg/L	DBO ₅ : 64% DQO: 76% Turbidez: 88% Cloruro: 17% Dureza: 27%	1 día (24h)	Sistema hidroponico	Kaushal, J; Mahajan, P (4)
<i>Phragmites australis</i>	Aguas residuales municipales	pH: 7.6 TDS: 2645 mg/L SST: 500 mg/L DBO ₅ : 160 mgO ₂ /L DQO: 390 mgO ₂ /L	pH: 8.8 TDS: 2100 mg/L SST: 175 mg/L DBO ₅ : 40 mgO ₂ /L DQO: 140 mgO ₂ /L	TDS: 20.6% SST: 65% DBO ₅ : 75% DQO: 64.1%	4 semanas	Humedales de flujo superficial vertical	Karaghoor HAK, Ismaeal NN. (24)
	Aguas residuales municipales	pH: 7.2 SST: 102.4 mg/L DBO ₅ : 175.7 mgO ₂ /L DQO: 304.4 mgO ₂ /L NH ₃ : 22.7 mg/L	SST: 16 mg/L DBO ₅ : 19.2 mgO ₂ /L DQO: 33 mgO ₂ /L NH ₃ : 8.5 mg/L TKN: 17.4 mg/L	SST: 84.3% DBO ₅ : 88.6% DQO: 89.1% NH ₃ : 62.5% TKN: 57.6%	TRH 4.8 días	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	Abou-Elela SI, Hellal MS, Elekhrawy MA (25)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
		TKN: 41.07 mg/L					
	Aguas residuales municipales	pH: 7.68 ± 0.67 OD: 1.40 ± 0.41 mgO ₂ /L SST: 259.1 ± 49.75 mg/L DBO ₅ : 51.07 ± 5.23 mgO ₂ /L DQO: 123.4 ± 13.76 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 1.74 ± 0.42 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 15.84 ± 3.84 mg/L TN: 25.16 ± 4.14 mg/L TP: 4.20 ± 0.93 mg/L	pH: 7.58 ± 0.63 OD: 1.45 ± 0.49 mgO ₂ /L SST: 55.84 ± 13.13 mg/L DBO ₅ : 11.61 ± 5.07 mgO ₂ /L DQO: 31.38 ± 6.66 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 0.68 ± 0.25 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 4.97 ± 1.74 mg/L TN: 14.54 ± 3.56 mg/L TP: 2.07 ± 0.53 mg/L	SST: 78% DBO ₅ : 77% DQO: 74% NO ₃ -N: 61% NH ₄ ⁺ -N: 66% TN: 41% TP: 50%	8 meses	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	Aalam T, Arias CA, Khalil N (26)
<i>Typha sp.</i>	Aguas mixtas	pH: 8.08 ± 0.89 DBO: 164.08 ± 5.68 mgO ₂ /L DQO: 360.08 ± 2.12 mgO ₂ /L N ₃ -N: 27.76 ± 0.61 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 20.88 ± 1.46 mg/L PO ₄ ⁻ : 128.03 ± 1.38 mg/L SO ₄ ²⁻ : 84.54 ± 0.85 mg/L TN: 59.58 ± 1.28 mg/L Coliformes: 3000 NMP/100 ml	pH: 8.03 ± 2.09 DBO: 6.5 ± 2.50 mgO ₂ /L DQO: 18.83 ± 2.84 mgO ₂ /L N ₃ -N: 9.97 ± 0.45 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 2.97 ± 0.77 mg/L PO ₄ ⁻ : 36.22 ± 1.12 mg/L SO ₄ ²⁻ : 18.92 ± 0.91 mg/L TN: 20.72 ± 1.95 mg/L Coliformes: 81 ± 21.01 NMP/100 ml	DQO: 99.77% DBO ₅ : 96.07% NH ₄ ⁺ -N: 85.65% NO ₃ -N: 64.05% PO ₄ ⁻ : 71.69% SO ₄ ²⁻ : 77.61% Coliformes: 97.27%	9 días con 24h de descanso cada 3 días	Humedales artificiales de flujo de marea con Biochar	Chand N, Suthar S, Kumar K. (27)
		pH: 8.08 ± 0.89 DBO: 164.08 ± 5.68 mgO ₂ /L DQO: 360.08 ± 2.12 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 27.76 ± 0.61 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 20.88 ± 1.46 mg/L PO ₄ ⁻ : 128.03 ± 1.38 mg/L SO ₄ ²⁻ : 84.54 ± 0.85 mg/L TN: 59.58 ± 1.28 mg/L Coliformes: 3000, NMP/100 ml	pH: 7.49 ± 1.88 DBO: 11.83 ± 2.56 mgO ₂ /L DQO: 55 ± 3.00 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 15.25 ± 1.40 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 5.55 ± 0.34 mg/L PO ₄ ⁻ : 46.81 ± 1.21 mg/L SO ₄ ²⁻ : 33.45 ± 1.16 mg/L TN: 34.09 ± 0.77 mg/L Coliformes: 415 ± 17.65 NMP/100 ml	DQO: 84.72% DBO ₅ : 92.81% NH ₄ ⁺ -N: 73.27% NO ₃ -N: 45.03% PO ₄ ⁻ : 63.43% SO ₄ ²⁻ : 60.42% Coliformes: 86.161%			
<i>Typha latifolia</i>	Aguas residuales domésticas 100%	pH: 8.4133 DBO: mgO ₂ /L DQO: 651.6667 mgO ₂ /L TDS: 8.87 mg/L	pH: 7.8300 DBO: 67 mgO ₂ /L DQO: 497.3333 mgO ₂ /L TDS: 2.46 mg/L	pH: 6.8% DBO: 23% DQO: 20% TDS: 72%	30 días	Tanques hidropónicos	Kausar A, Zahra N, Kiran H, Asim S, Raza A, Raza A (16)
	Aguas residuales domésticas 50%	pH: 8.4900 DBO: 464.3333 mgO ₂ /L DQO: 327.3333 mgO ₂ /L TDS: 4.26 mg/L	pH: 8.2900 DBO: 335.6667 mgO ₂ /L DQO: 112.3333 mgO ₂ /L TDS: 2.90 mg/L	pH: 2.3% DBO: 65% DQO: 27% TDS: 31%			

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
Salvinia molesta	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	pH: 5.97 ± 0.02 DBO ₅ : 41.8 mgO ₂ /L DQO: 63 mgO ₂ /L	pH: 7.42 ± 0.17 DBO ₅ : 4 mgO ₂ /L DQO: 23 mgO ₂ /L	Color: 96.8% DBO ₅ : 91% DQO: 82.6%	14 días	Tanques hidropónicos	Mustafa HM, Hayder G (1)
	Aguas de rio con aguas residuales domésticas e industriales	TS: 4032 mg/L TDS: 1732 mg/L OD: 2.6 mg/L DBO: 5.27 mgO ₂ /L DQO: 31.6 mg/L	TS: 2756 mg/L TDS: 44 mg/L OD: 6.23 mg/L DBO: 3.85 mgO ₂ /L DQO: 8.16 mg/L	TS: 31.64% TDS: 97.45% OD: 58.26% DBO: 26.94% DQO: 74.14%	14 días	Tratamiento de sistema discontinuo	Munfarida, I; Auvaria, SW; Suprayogi, D; Munir, M (7)
	Aguas domésticas	Turbidez: 34.1 ± 0 UNT Fosfato: 3.76 ± 0 mg/L Nitrógeno amoniacal: 14.35 ± 0 mg/L Nitrato: 8.44 ± 0 mg/L	Turbidez: 2 ± 0 UNT Fosfato: 0.06 ± 0 mg/L Nitrógeno amoniacal: 0.27 ± 0 mg/L Nitrato: 2.56 ± 0 mg/L	Turbidez: 96.8% Fosfato: 99.7% Nitrógeno amoniacal: 99.8% Nitrato: 90.6%	14 días con 24 h de retención	Tratamiento de flujo discontinuo con 280 g de planta	Mustafa HM, Hayder G (28)
		Turbidez: 34.1 ± 0 UNT Fosfato: 3.76 ± 0 mg/L Nitrógeno amoniacal: 14.35 ± 0 mg/L Nitrato: 8.44 ± 0 mg/L	Turbidez: 2.65 ± 0 UNT Fosfato: 0.11 ± 0 mg/L Nitrógeno amoniacal: 1.94 ± 0 mg/L Nitrato: 2.69 ± 0 mg/L	Turbidez: 97.7% Fosfato: 99% Nitrógeno amoniacal: 98% Nitrato: 80.1%		Tratamiento de flujo discontinuo con 140 g de planta	
		Turbidez: 34.1 ± 0 UNT Fosfato: 3.76 ± 0 mg/L Nitrógeno amoniacal: 14.35 ± 0 mg/L Nitrato: 8.44 ± 0 mg/L	Turbidez: 2.8 ± 0 UNT Fosfato: 0.52 ± 0 mg/L Nitrógeno amoniacal: 6.41 ± 0 mg/L Nitrato: 2.08 ± 0 mg/L	Turbidez: 96.3% Fosfato: 96.4% Nitrógeno amoniacal: 99% Nitrato: 63.6%		Tratamiento de flujo discontinuo con 70 g de planta	
	Aguas residuales domésticas pretratadas	DQO: 49 mg/L TDS: 900 mg/L TN: 10.46 mg/L Turbidez: 17.70 UNT	DQO: 21 mg/L TDS: 153 mg/L TN: 5.01 mg/L Turbidez: 3.54 UNT	DQO: 56.47% TDS: 83% TN: 52.12% Turbidez: 79.98%	5 días	Sistema de tanques de flujo discontinuo	Alawadhi, N; Hayder, G (29)
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	pH: 6.7 ± 0.1 DBO ₅ : 30 ± 0 mg/L DQO: 74 ± 1 mg/L Color: 222 ± 1 Pt-Co	pH: 7.1 ± 0 DBO ₅ : 12 ± 0 mg/L DQO: 42 ± 0 mg/L Color: 132 ± 2 Pt-Co	DBO ₅ : 60% DQO: 43.2% Color: 40.5%	14 días (THR 6 horas) hr	Sistema hidropónico	Mustafa HM, Hayder G. (18)
		pH: 6.6 ± 0.1 DBO ₅ : 50 ± 1 mg/L DQO: 84 ± 1 mg/L Color: 451 ± 1 Pt-Co	pH: 6.5 ± 0.1 DBO ₅ : 28 ± 0 mg/L DQO: 38 ± 0 mg/L Color: 85 ± 1 Pt-Co	DBO ₅ : 66.7% DQO: 72.2% Color: 81.1%	14 días (THR 12 horas)		
		pH: 7.1 ± 0.5 DBO ₅ : 51.6 ± 0.1 mg/L DQO: 84.3 ± 0.6 mg/L Color: 445 ± 2 Pt-Co	pH: 6.7 ± 0 DBO ₅ : 36.2 ± 0 mg/L DQO: 16 ± 0 mg/L Color: 67 ± 0 Pt-Co	DBO ₅ : 74.7% DQO: 81.0% Color: 91.4%	14 días (THR 24 horas)		

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
	Aguas residuales domésticas 100%	pH: 8.8333 DBO: 625 mgO ₂ /L DQO: 830.3333 mgO ₂ /L TDS: 1.82 mg/L	pH: 8.2300 DBO: 473.3333 mgO ₂ /L DQO: 695.3333 mgO ₂ /L TDS: 2.15 mg/L	pH: 6.7% DBO: 24% DQO: 16% TDS: 23%	30 días	Tanques hidropónicos	Kausar A, Zahra N, Kiran H, Asim S, Raza A, Raza A (16)
	Aguas residuales domésticas 50%	pH: 8.7333 DBO: 276.6667 mgO ₂ /L DQO: 445.3333 mgO ₂ /L TDS: 3.75 mg/L	pH: 8.1900 DBO: 136.6667 mgO ₂ /L DQO: 358.3333 mgO ₂ /L TDS: 2.77 mg/L	pH: 6.1% DBO: 50% DQO: 19% TDS: 26%			
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Turbidez: 22.8 NTU Fosfatos: 5.08 mg/L Nitrógeno amoniacal: 18.23 mg/L Nitratos: 7.05 mg/L	Turbidez: 12.82 NTU Fosfatos: 4.29 mg/L Nitrógeno amoniacal: 16.33 mg/L Nitratos: 4.1 mg/L	Turbidez: 58.3% Fosfatos: 32.04% Nitrógeno amoniacal: 14.07% Nitratos: 55.29%	14 días (THR 6 horas)	Sistema hidropónico	Mustafa HM, Hayder G (1)
		Turbidez: 28.9 NTU Fosfatos: 5.50 mg/L Nitrógeno amoniacal: 20.01 mg/L Nitratos: 8.52 mg/L	Turbidez: 6.17 NTU Fosfatos: 4.11 mg/L Nitrógeno amoniacal: 14.60 mg/L Nitratos: 2.71 mg/L	Turbidez: 84.6% Fosfatos: 46.96% Nitrógeno amoniacal: 65% Nitratos: 82.9%	14 días (THR 12 horas)		
		Turbidez: 39.9 NTU Fosfatos: 11.01 mg/L Nitrógeno amoniacal: 21.26 mg/L Nitratos: 12.05 mg/L	Turbidez: 3.7 NTU Fosfatos: 5.45 mg/L Nitrógeno amoniacal: 9.05 mg/L Nitratos: 4.85 mg/L	Turbidez: 94% Fosfatos: 82.7% Nitrógeno amoniacal: 90.47% Nitratos: 92.1%	14 días (THR 24 horas)		
	<i>Schoenoplectus littoralis</i>	Aguas residuales domésticas, aguas de restaurante e industriales	pH: 7.36 ± 2.40 TDS: 3779 ± 230 mg/L SST: 799 ± 302 mg/L DBO ₅ : 17 ± 5.09 mgO ₂ /L DQO: 166 ± 89.08 mgO ₂ /L NO ₃ ⁻ : 3.86 ± 2.01 µg/L SO ₄ ²⁻ : 1966 ± 456.08 µg/L PO ₄ ³⁻ : 1.5 ± 0.89 µg/L Pb ²⁺ : 2.79 ± 0.99 mg/L Ni ²⁺ : 2.74 ± 1.00 mg/L Cu ²⁺ : 4.08 ± 1.89 mg/L Cd ²⁺ : 0.003 ± 0.001 mg/L	pH: 8.9 ± 2.27 TDS: 2120 ± 15.67 mg/L SST: 449 ± 231.03 mg/L DBO ₅ : 10.39 ± 5.03 mgO ₂ /L DQO: 35 ± 20.89 mgO ₂ /L NO ₃ ⁻ : 0.07 ± 0.03 µg/L SO ₄ ²⁻ : 114 ± 98.86 µg/L PO ₄ ³⁻ : 0.05 ± 0.02 µg/L Pb ²⁺ : 1.3 ± 0.99 mg/L Ni ²⁺ : 0.4 ± 0.01 mg/L Cu ²⁺ : 2.77 ± 1.20 mg/L Cd ²⁺ : 0.001 ± 0.0001 mg/L	--	14 días	Tratamiento por tandas
<i>Eichhornia crassipes</i>	Aguas residuales domésticas	Temperatura: 18.47 °C pH: 8.78 Turbidez: 300 UNT Solidos totales: 2.57 mg/L	Temperatura: 17.90 °C pH: 7.10 Turbidez: 33 UNT Solidos totales: 0.49 mg/L	Temperatura: - pH: 21.41% Turbidez: 90.33% Solidos totales: 80.87%	8 semanas	Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas	Ayala Tocto RY, Calderón Ordoñez E, Rascón J, Collazos Silva R.. (30)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
		DBO ₅ : 71.57 mgO ₂ /L DQO: 79.52 mgO ₂ /L Coliformes Totales: 260 NMP/100 mL Coliformes Fecales: 258 NMP/100 mL	DBO ₅ : 10.93 mgO ₂ /L DQO: 12.11 mgO ₂ /L Coliformes Totales: 21 NMP/100 mL Coliformes Fecales: 20 NMP/100 mL	DBO ₅ : 84.72% DQO: 99.77% Coliformes Totales: 91.92% Coliformes Fecales: 92.25%			
	Aguas residuales domésticas, industriales e institucionales	pH: 4.9 Turbidez: 1050 UNT Solidos suspendidos totales: 5090 mg/L OD: <0.04 mg O ₂ /L DBO ₅ : 1235 mg O ₂ /L DQO: 5515 mg O ₂ /L Nitrógeno total: 115 mg/L Fosforo particulado: 9.115 mg/L	pH: 5.1 Turbidez: 947 UNT Solidos suspendidos totales: 6050 mg/L OD: <0.08 mg O ₂ /L DBO ₅ : 1175 mg O ₂ /L DQO: 4515 mg O ₂ /L Nitrógeno total: 105 mg/L Fosforo particulado: 8.13 mg/L	pH: - Turbidez: - Solidos suspendidos totales: - OD: - DBO ₅ : 6.24% DQO: 10% Nitrógeno total: - Fosforo particulado: -	5 semanas	Humedal artificial	Araque Niño ID, Britto Aponte MC, Cuellar Rodríguez LA, Perico Granados NR (31)
	Aguas residuales domésticas pretratadas	DQO: 49 mg/L TDS: 900 mg/L TN: 10.46 mg/L Turbidez: 17.70 UNT	DQO: 25 mg/L TDS: 684 mg/L TN: 9.04 mg/L Turbidez: 14.18 UNT	DQO: 48.81% TDS: 24% TN: 13.56% Turbidez: 19.89%	5 días	Sistema de tanques de flujo discontinuo	Alawadhi NMS, Hayder G. (29)
	Aguas residuales domésticas con tratamiento primario	DBO ₅ : 140 ± 4 mg O ₂ /L DQO: 228.8 ± 3.2 mg O ₂ /L SST: 700 ± 5 mg/L TKN: 96 ± 4 mg/L P-PO ₄ ³⁻ : 8.2 ± 0.1 mg/L	DBO ₅ : 60 ± 2.9 mg O ₂ /L DQO: 90.6 ± 3.2 mg O ₂ /L SST: 430 ± 8.3 mg/L TKN: 71.3 ± 2.8 mg/L P-PO ₄ ³⁻ : 6.5 ± 0.1 mg/L	DBO ₅ : 57% DQO: 60% SST: 39% TKN: 26% P-PO ₄ ³⁻ : 21%	8 días	Estanque facultativo	Akowanou AVO, Deguenon HEJ, Balogoun KC, Daouda MMA, Aina MP. (17)
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	pH: 6.7 ± 0.1 DBO ₅ : 30 ± 0 mg/L DQO: 74 ± 1 mg/L Color: 222 ± 1 Pt-Co	pH: 6.8 ± 0.1 DBO ₅ : 14.1 ± 0 mg/L DQO: 48 ± 1 mg/L Color: 121 ± 1 Pt-Co	DBO ₅ : 53% DQO: 35.1% Color: 45.5%	14 días (THR 6 horas)	Sistema hidropónico	Mustafa HM, Hayder G (18)
pH: 6.6 ± 0.1 DBO ₅ : 50 ± 1 mg/L DQO: 84 ± 1 mg/L Color: 451 ± 1 Pt-Co		pH: 6.7 ± 0.1 DBO ₅ : 22 ± 0 mg/L DQO: 40 ± 1 mg/L Color: 172 ± 1 Pt-Co	DBO ₅ : 70% DQO: 61.1% Color: 61.9%	14 días (THR 12 horas)			
pH: 7.1 ± 0.5 DBO ₅ : 51.6 ± 0.1 mg/L DQO: 84.3 ± 0.6 mg/L Color: 445 ± 2 Pt-Co		pH: 6.4 ± 0.1 DBO ₅ : 39.4 ± 0.1 mg/L DQO: 53 ± 1 mg/L Color: 192 ± 2 Pt-Co	pH: 6.4-6.9 DBO ₅ : 58% DQO: 67.2% Color: 74%	14 días (THR 24 horas)			
	Aguas residuales domésticas	pH: 6.74 OD: 2.7 ppm Turbidez: 122.3 NTU	pH: 7.01 OD: 3.8 ppm	Turbidez: 33.44% TDS: 15.43% DQO: 37.14%	TRH 24 horas	Tratamiento por tandas	Selvaraj D, Velvizhi G (19)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
		TDS: 633 mg/L DQO:725 mg/L NO ₃ ⁻ : 105.97 mg/L		NO ₃ ⁻ : 42.49% SO ₄ ²⁻ : 31.63% PO ₄ ³⁻ : 52.73%			
		pH: 6.74 OD: 2.7 ppm Turbidez: 122.3 NTU TDS: 633 mg/L DQO:725 mg/L NO ₃ ⁻ : 105.97 mg/L	pH: 7.05 OD: 9.1 ppm	Turbidez: 72.57% TDS: 30.69% DQO: 85.71% NO ₃ ⁻ : 70.23% SO ₄ ²⁻ : 61.15% PO ₄ ³⁻ : 65.65%		Sistema de ingeniería ecológica (lecho de lago + aireador + carbón activado)	
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Turbidez: 22.8 NTU Fosfatos: 5.08 mg/L Nitrógeno amoniacal:18.23 mg/L Nitratos: 7.05 mg/L	Turbidez: 9.61 NTU Fosfatos: 3.65 mg/L Nitrógeno amoniacal:14.73 mg/L Nitratos: 3.47 mg/L	Turbidez: 58.88% Fosfatos: 48.7% Nitrógeno amoniacal: 35.92% Nitratos: 73.33%	14 días (THR 6 horas)	Sistema hidropónico	Mustafa HM, Hayder G (1)
		Turbidez: 28.9 NTU Fosfatos: 5.50 mg/L Nitrógeno amoniacal: 20.01 mg/L Nitratos: 8.52 mg/L	Turbidez: 9.80 NTU Fosfatos: 2.5 mg/L Nitrógeno amoniacal: 14.26 mg/L Nitratos: 3.45 mg/L	Turbidez: 74.6% Fosfatos: 70.45% Nitrógeno amoniacal: 50% Nitratos: 68.06%	14 días (THR 12 horas)		
		Turbidez: 39.9 NTU Fosfatos: 11.01 mg/L Nitrógeno amoniacal: 21.26 mg/L Nitratos: 12.05 mg/L	Turbidez: 5.93 NTU Fosfatos: 2.92 mg/L Nitrógeno amoniacal: 8.25 mg/L Nitratos: 3.95 mg/L	Turbidez: 89.3% Fosfatos: 88.5% Nitrógeno amoniacal: 89.11% Nitratos: 93%	14 días (THR 24 horas)		
	Aguas residuales domésticas crudas de cocina	pH: 4.30 ± 0.02 DBO ₅ : 953.33 ± 23.09 mg/L SST: 1397.33 ± 1.15 mg/L TDS: 874.67 ± 1.15 mg/L Nitrógeno amoniacal: 49.37 ± 0.15 mg/L Nitratos: 144.90 ± 2.10 mg/L	pH: 6.43 (día 12) DBO ₅ : 220.00 mg/L (día 6) SST: 44.64 mg/L (día 3) TDS: 874.67 mg/L (día 1) Nitrógeno amoniacal: 4.54 mg/L (día 15) Nitratos: 8.17 mg/L (día 6)	pH: 39.9 DBO ₅ : 76.92% (día 6) SST: 97.23% (día 12) TDS: 80.56% (día 21) Nitrógeno amoniacal: 90.81% (día 15) Nitratos: 92% (día 3)	21 días	Tratamiento por tandas	Rijwana P, Kakoli Karar P (32)
		pH: 4.31 ± 0.01 DBO ₅ : 926.67 ± 11.55 mg/L SST: 838.00 mg/L TDS: 965.33 ± 3.06 mg/L Nitrógeno amoniacal: 50.50 ± 0.30 mg/L Nitratos: 143.50 ± 1.21 mg/L	pH: 6.24 (día 12) DBO ₅ : 208.00 mg/L (día 6) SST: 46.00 mg/L (día 3) TDS: 965.33 mg/L (día 1) Nitrógeno amoniacal: 3.41 mg/L (día 15) Nitratos: 6.23 mg/L (día 6)	pH: 39.9 DBO ₅ : 77.55% (día 6) SST: 94.51% (día 3) TDS: 72.20% (día 21) Nitrógeno amoniacal: 93.24% (día 15) Nitratos: 92% (día 3)			

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
	Aguas residuales mixtas	DBO ₅ : 11.4 mg O ₂ /L DQO: 93 mg O ₂ /L Nitrógeno amoniacal: 1.75 mg/L Fosforo: 3.72 mg/L E. Coli: > 2419.6 NMP/100 mL	DBO ₅ : 1.44 mg O ₂ /L DQO: 11 mg O ₂ /L Nitrógeno amoniacal: 0.09 mg/L Fosforo: 1.73 mg/L E. Coli: 1.0 NMP/100 mL	DBO ₅ : 87.37% DQO: 88.17% Nitrógeno amoniacal: 94.29% Fosforo: 53.49%	14 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Kasmuri N, Malik SAA, Yaacob Z, Miskon MF, Ramli NH, Zaini N. (33)
	Aguas residuales municipales	NH ₄ ⁺ : 0.54 ± 0.10 mg/L NO ₂ ⁻ : 0.02 ± 0 mg/L NO ₃ ⁻ : 31.45 ± 3.53 mg/L Fosforo: 0.64 ± 0.34 mg/L Hierro: 0.42 ± 0.38 mg/L Cromo: 0.61 ± 0.11 µg/L	NH ₄ ⁺ : 0.04 ± 0.01 mg/L NO ₂ ⁻ : 0.03 ± 0.02 mg/L NO ₃ ⁻ : 5.62 ± 2.59 mg/L Fosforo: 0.16 ± 0.13 mg/L Hierro: 0.04 ± 0.01 mg/L Cromo: 0.19 ± 0.08 µg/L	NH ₄ ⁺ : 93% NO ₂ ⁻ : 0% NO ₃ ⁻ : 82% Fosforo: 75% Hierro: 90% Cromo: 68%	7 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Buta E, Borşan IL, Omotă M, Trif EB, Bunea CI, Mocan A, et al. (22)
<i>Typha angustata</i> y <i>Canna indica</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 7.35 ± 0.45	pH: 7.45 ± 0.2	DQO: 63.25 ± 4% DBO ₃ : 65.23 ± 5% TKN: 51.93 ± 7% SST: 87.2 ± 4%	90 días de funcionamiento secuencial	Humedal Bio-Rack modificado	Sathe SM, Munavalli GR (34)
		pH: 7.35 ± 0.45	pH: 7.39 ± 0.2	DQO: 55.63 ± 3% DBO ₃ : 56.95 ± 4% TKN: 35.2 ± 8% SST: 85.49 ± 6%		Humedal Bio-Rack común	
<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Colocasia Arabica</i> , <i>Canna sp.</i> , <i>Typha sp.</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.5 OD: 3.2 mg/L DBO: 140 mgO ₂ /L DQO: 224 mgO ₂ /L Turbidez: 127 UNT TDS: 92.8 mg/L Calcio: 24 mg/L Magnesio: 11.6 mg/L Nitratos: 15.5 mg/L Hierro: 2.09 mg/L Sulfatos: 12.2 mg/L Fosfatos: 0.6 mg/L Manganeso: 0.02 mg/L	pH: 7.9 OD: 11.17 mg/L DBO: 29 mgO ₂ /L DQO: 76 mgO ₂ /L Turbidez: 16 UNT TDS: 75 mg/L Calcio: 12.4 mg/L Magnesio: 1 mg/L Nitratos: 1.2 mg/L Hierro: 0.16 mg/L Sulfatos: 0.9 mg/L Fosfatos: 0.01 mg/L Manganeso: 0 mg/L	-	3 meses	Tratamiento de flujo discontinuo por tandas	Garad AD. (35)
<i>Canna flaccida</i>	Aguas residuales municipales	pH: 7.2 SST: 102.4 mg/L DBO ₅ : 175.7 mgO ₂ /L DQO: 304.4 mgO ₂ /L NH ₃ : 22.7 mg/L TKN: 41.07 mg/L	SST: 25 mg/L DBO ₅ : 29.2 mgO ₂ /L DQO: 50.2 mgO ₂ /L NH ₃ : 16 mg/L TKN: 23.9 mg/L	SST: 84.3% DBO ₅ : 83.4% DQO: 83.5% NH ₃ : 29.5% TKN: 41.8%	TRH 4.8 días	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	Abou-Elela SI, Hellal MS, Elekhrawy MA (25)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
<i>Canna Indica</i>	Aguas residuales domésticas (aguas grises)	DQO: 330 mg/L DBO ₅ : 220 mg/L TN: 12 mg/L TP: 8.69 mg/L PO ₄ ³⁻ : 14.5 mg/L SO ₄ ²⁻ : 93 mg/L	DQO: 12 mg/L DBO ₅ : 30 mg/L TN: 0 mg/L TP: 0.1 mg/L PO ₄ ³⁻ : 0.6 mg/L SO ₄ ²⁻ : 7 mg/L	DQO: 91% DBO ₅ : 86% TN: 100% TP: 98% PO ₄ ³⁻ : 95% SO ₄ ²⁻ : 90%	TRH 7 días	Humedal artificial de flujo vertical	Pinninti R, Kasi V, Sallangi LKSVP, Landa SR, Rathinasamy M, Sangamreddi C, et al. (36)
	Aguas residuales domésticas y municipales	pH: 5.8 Turbidez: 15 UNT TDS: 1285 mg/L SST: 48 mg/L DBO ₅ : 92 mgO ₂ /L DQO: 230.8 mgO ₂ /L TN: 13.2 mg/L TP: 3.6 mg/L Potasio: 13 mg/L Sodio: 96 mg/L Fosfato: 8.2 mg/L Amonio: 11.3 mg/L E. Coli: 1600 NMP/100 mL	pH: 7.03 Turbidez: 1.1 UNT TDS: 720 mg/L SST: 1.7 mg/L DBO ₅ : 5.4 mgO ₂ /L DQO: 17 mgO ₂ /L TN: 5.1 mg/L TP: 0.06 mg/L Potasio: 7.4 mg/L Sodio: 57 mg/L Fosfato: 2.1 mg/L Amonio: 0.5 mg/L E. Coli: 870 NMP/100 mL	pH: - 28.48% Turbidez: 70.89% TDS: 28.79% SST: 85.97% DBO ₅ : 88.28% DQO: 85.07% TN: 36.87% TP: 82.13% Potasio: 33.33% Sodio: 28.54% Fosfato: 66.46% Amonio: 77.73% E. Coli: 35.67%	25 días	Humedales de tratamiento flotantes	Arivukkarasu D., Sathyanathan R. (37)
	Aguas residuales municipales	DBO ₅ : 31.2 ± 13.9 mgO ₂ /L DQO: 49.7 ± 20.1 mgO ₂ /L TN: 22.7 ± 5.3 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 19.5 ± 5.8 mg/L TP: 4.0 ± 0.1 mg/L	DBO ₅ : 2.5 ± 0.4 mgO ₂ /L DQO: 3.9 ± 0.6 mgO ₂ /L TN: 12.6 ± 2.4 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 9.5 ± 3.0 mg/L TP: 1.7 ± 0.3 mg/L	DBO ₅ : 90.5 ± 4.8% DQO: 75.5 ± 7.9% TN: 44.3 ± 5.3% NH ₄ ⁺ -N: 56.9 ± 13.4% TP: 56.7 ± 8.2%	4 meses	Humedal artificial de flujo vertical (5 días alimentación 2 días de secado)	Phewnil O, Chunkao K, Prabhuddham P, Pattamapitoon T. (38)
<i>Cyperus papyrus</i>	Aguas residuales municipales	pH: 7.2 SST: 102.4 mg/L DBO ₅ : 175.7 mgO ₂ /L DQO: 304.4 mgO ₂ /L NH ₃ : 22.7 mg/L TKN: 41.07 mg/L	SST: 20 mg/L DBO ₅ : 23.5 mgO ₂ /L DQO: 38.5 mgO ₂ /L NH ₃ : 7.1 mg/L TKN: 15.5 mg/L	SST: 80.4% DBO ₅ : 86.9% DQO: 87.5% NH ₃ : 68.7% TKN: 62.2%	TRH 4.8 días	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	Abou-Elela SI, Hellal MS, Elekhrawy MA. (25)
<i>Nymphoides humboldtiana</i>	Aguas residuales domésticas	Temperatura: 18.47 °C pH: 8.78 Turbidez: 300 UNT Solidos totales: 2.57 mg/L DBO ₅ : 71.57 mgO ₂ /L DQO: 79.52 mgO ₂ /L Coliformes Totales: 260 NMP/100 mL Coliformes Fecales: 258 NMP/100 mL	Temperatura: 18.80 °C pH: 7.28 Turbidez: 24 UNT Solidos totales: 0.44 mg/L DBO ₅ : 12.80 mgO ₂ /L DQO: 14,22 mgO ₂ /L Coliformes Totales: 260 NMP/100 mL Coliformes Fecales: 258 NMP/100 mL	Temperatura: - pH: 18.70% Turbidez: 92.00% Solidos totales: 83.02% DBO ₅ : 82.12% DQO: 82.12% Coliformes Totales: 93.46% Coliformes Fecales: 93.8%	8 semanas	Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas	Ayala Tocto RY, Calderón Ordoñez E, Rascón J, Collazos Silva R (30)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
<i>Nasturtium officinale</i>	Aguas residuales domésticas	Temperatura: 18.47 °C pH: 8.78 Turbidez: 300 UNT Solidos totales: 2.57 mg/L DBO ₅ : 71.57 mgO ₂ /L DQO: 79.52 mgO ₂ /L Coliformes Totales: 260 NMP/100 mL Coliformes Fecales: 258 NMP/100 mL	Temperatura: 18.98 °C pH: 7.15 Turbidez: 36 UNT Solidos totales: 0.72 mg/L DBO ₅ : 11.32 mgO ₂ /L DQO: 12.57 mgO ₂ /L Coliformes Totales: 24 NMP/100 mL Coliformes Fecales: 24 NMP/100 mL	Temperatura: - pH: 19.3% Turbidez: 89.00% Solidos totales: 70.03% DBO ₅ : 84.19% DQO: 84.77% Coliformes Totales: 90.77 % Coliformes Fecales: 90.7%	8 semanas	Tratamiento de flujo discontinuo o por tandas	Ayala Tocto RY, Calderón Ordoñez E, Rascón J, Collazos Silva R (30)
<i>Lemna minor</i>	Aguas domésticas, textiles y de destilería en proporción (18:3:1 respectivamente)	OD: 0.15 ± 0.02 mgO ₂ /L DBO ₅ : 15493 ± 35 mgO ₂ /L DQO: 34133 ± 3695 mgO ₂ /L SO ₄ ²⁻ : 1619 ± 123 mg/L P: 1505 ± 2 mg/L N: 5134 ± 603 mg/L	OD: 4.52 ± 0.13 mgO ₂ /L DBO ₅ : 1310 ± 10 mgO ₂ /L DQO: 2737 ± 110 mgO ₂ /L SO ₄ ²⁻ : 356 ± 28 mg/L P: 50 ± 2 mg/L N: 274 ± 48 mg/L	DBO ₅ : 92% DQO: 92 % SO ₄ ²⁻ : 77.9% P: 97% N: 94.6 %	28 días	Tratamiento por tandas o lotes	Amare E, Kebede F, Mulat W (15)
	Aguas residuales domésticas con tratamiento primario	DBO ₅ : 24 ± 2.2 mg O ₂ /L DQO: 48 ± 3.2 mg O ₂ /L SST: 225 ± 8.3 mg/L TKN: 39.5 ± 2.1 mg/L P-PO ₄ ³⁻ : 4.6 ± 0.2 mg/L	DBO ₅ : 17.6 ± 2.1 mg O ₂ /L DQO: 9 ± 0.8 mg O ₂ /L SST: 120 ± 2.5 mg/L TKN: 16.6 ± 1.2 mg/L P-PO ₄ ³⁻ : 2 ± 0.7 mg/L	DBO ₅ : 63% DQO: 63% SST: 47% TKN: 58% P-PO ₄ ³⁻ : 57%	8 días	Estanque facultativo	Akowanou AVO, Deguenon HEJ, Balogoun KC, Daouda MMA, Aina MP. (17)
	Aguas residuales domésticas con tratamiento secundario	Turbidez: 22.3 ± 0.57 NTU DQO: 152 ± 0.5 mg/L Fosfato: 4.84 ± 0.01 mg/L Nitrógeno amoniacal: 18.58 ± 0.8 mg/L Nitrato: 7.2 ± 0.11 mg/L	Turbidez: 2.8 ± 0.95 NTU DQO: 115 ± 0 mg/L Fosfato: 2.48 ± 0.01 mg/L Nitrógeno amoniacal: 3.32 ± 0.14 mg/L Nitrato: 3.2 ± 0.02 mg/L	Turbidez: 87.2% DQO: 46% Fosfato: 48.7% Nitrógeno amoniacal: 83% Nitrato: 56%	10 días (THR 24 horas)	Tratamiento en tanques de flujo discontinuo	Mustafa HM, Hayder DG. (20)
	Aguas residuales municipales	NH ₄ ⁺ : 0.54 ± 0.10 mg/L NO ₂ ⁻ : 0.02 ± 0 mg/L NO ₃ ⁻ : 31.45 ± 3.53 mg/L Fosforo: 0.64 ± 0.34 mg/L Hierro: 0.42 ± 0.38 mg/L Cromo: 0.61 ± 0.11 µg/L	NH ₄ ⁺ : 0.04 ± 0.01 mg/L NO ₂ ⁻ : 0.01 ± 0 mg/L NO ₃ ⁻ : 0.22 ± 0.27 mg/L Fosforo: 0.03 ± 0.02 mg/L Hierro: 0.03 ± 0.02 mg/L Cromo: 0.06 ± 0.01 µg/L	NH ₄ ⁺ : 92% NO ₂ ⁻ : 48% NO ₃ ⁻ : 99% Fosforo: 95% Hierro: 92% Cromo: 90%	7 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Buta E, Borşan IL, Omotâ M, Trif EB, Bunea CI, Mocan A, et al (22)
	Aguas residuales domésticas	pH: 6.96 ± 0 DBO ₅ : 412.0 ± 4.24 mgO ₂ /L DQO: 149.38 ± 0.88 mgO ₂ /L TDS: 588 ± 0 mg/L Fosforo: 2.82 ± 0 mg/L	pH: 7.88 ± 0.19 DBO ₅ : 241.0 ± 19.80 mgO ₂ /L DQO: 51.65 ± 20.45 mgO ₂ /L TDS: 514.25 ± 0 mg/L Fosforo: 2.28 ± 0.5 mg/L	--	14 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatra AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
<i>Heliconia psittacorum</i>	Aguas residuales municipales	DBO ₅ : 31.2 ± 13.9 mgO ₂ /L DQO: 49.7 ± 20.1 mgO ₂ /L TN: 22.7 ± 5.3 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 19.5 ± 5.8 mg/L TP: 4.0 ± 0.1 mg/L	DBO ₅ : 3.8 ± 0.5 mgO ₂ /L DQO: 5.7 ± 0.7 mgO ₂ /L TN: 13.9 ± 3.8 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 10.1 ± 4.6 mg/L TP: 2.1 ± 0.2 mg/L	DBO ₅ : 86.9 ± 7.3% DQO: 75.3 ± 9.0% TN: 38.7 ± 2.7% NH ₄ ⁺ -N: 50.0 ± 9.4% TP: 49.1 ± 7.3%	4 meses	Humedal artificial de flujo vertical (5 días alimentación 2 días de secado)	Phewnil O, Chunkao K, Prabhuddham P, Pattamapitton T (38)
<i>Hordeum vulgare</i>	Aguas residuales domésticas, aguas de restaurante e industriales	pH: 7.36 ± 2.40 TDS: 3779 ± 230 mg/L SST: 799 ± 302 mg/L DBO ₅ : 17 ± 5.09 mg/L DQO: 166 ± 89.08 mg/L NO ₃ ⁻ : 3.86 ± 2.01 µg/L SO ₄ ²⁻ : 1966 ± 456.08 µg/L PO ₄ ³⁻ : 1.5 ± 0.89 µg/L Pb ²⁺ : 2.79 ± 0.99 mg/L Ni ²⁺ : 2.74 ± 1.00 mg/L Cu ²⁺ : 4.08 ± 1.89 mg/L Cd ²⁺ : 0.003 ± 0.001 mg/L	pH: 8.19 ± 3.00 TDS: 2249 ± 456.79 mg/L SST: 559 ± 324.01 mg/L DBO ₅ : 12.4 ± 4.89 mg/L DQO: 12.4 ± 4.89 mg/L NO ₃ ⁻ : 1.15 ± 0.20 µg/L SO ₄ ²⁻ : 209 ± 99.78 µg/L PO ₄ ³⁻ : 0.03 ± 0.01 µg/L Pb ²⁺ : 1.7 ± 0.80 mg/L Ni ²⁺ : 0.3 ± 0.02 mg/L Cu ²⁺ : 2.76 ± 1.01 mg/L Cd ²⁺ : 0.001 ± 0.0001 mg/L	--	14 días	Tratamiento por tandas	Abid Maktoof A, AL-Enazi MS. (5)
<i>Sagittaria sagittifoli</i>	Aguas residuales municipales	pH: 7.68 ± 0.67 OD: 1.40 ± 0.41 mgO ₂ /L SST: 259.1 ± 49.75 mg/L DBO ₅ : 51.07 ± 5.23 mgO ₂ /L DQO: 123.4 ± 13.76 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 1.74 ± 0.42 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 15.84 ± 3.84 mg/L TN: 25.16 ± 4.14 mg/L TP: 4.20 ± 0.93 mg/L	pH: 7.68 ± 0.62 OD: 1.46 ± 0.53 mgO ₂ /L SST: 41.7 ± 15.23 mg/L DBO ₅ : 11.81 ± 5.08 mgO ₂ /L DQO: 30.12 ± 7.41 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 0.62 ± 0.25 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 4.58 ± 1.85 mg/L TN: 14.70 ± 4.04 mg/L TP: 1.63 ± 0.53 mg/L	SST: 83% DBO ₅ : 77% DQO: 75% NO ₃ -N: 64% NH ₄ ⁺ -N: 69% TN: 41% TP: 61%	8 meses	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	Aalam T, Arias CA, Khalil N. (26)
<i>Scipus grossus</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.35 ± 0.35 OD: 0.24 ± 0.03 mgO ₂ /L DBO ₅ : 118.10 ± 14.00 mg/L DQO: 234.00 ± 19.80 mg/L SST: 13.90 ± 2.97 mg/L NH ₄ ⁺ : 12.05 ± 0.21 mg/L PO ₄ ³⁻ : 5.04 ± 0.25 mg/L	pH: 7.21 ± 0.36 OD: 6.97 ± 0.35 mgO ₂ /L	DBO ₅ : 99.52% DQO: 96.25% SST: 98.93% NH ₄ ⁺ : 100.00% PO ₄ ³⁻ : 99.95%	5 días	Humedal artificial de flujo horizontal altura 35 cm	Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF. (3)
		pH: 6.35 ± 0.35 OD: 0.24 ± 0.03 mgO ₂ /L DBO ₅ : 118.10 ± 14.00 mg/L DQO: 234.00 ± 19.80 mg/L SST: 13.90 ± 2.97 mg/L NH ₄ ⁺ : 12.05 ± 0.21 mg/L PO ₄ ³⁻ : 5.04 ± 0.25 mg/L	pH: 7.21 ± 0.36 OD: 6.97 ± 0.35 mgO ₂ /L	DBO ₅ : 97.5% DQO: 92.7% SST: 85.1% NH ₄ ⁺ : 95.2% PO ₄ ³⁻ : 97.9%		Humedal artificial de flujo horizontal altura 45 cm	

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
	Aguas residuales domésticas (aguas negras y grises)	DBO ₅ : 106.5 mg/L DQO: 231.3 mg/L SST: 11.8 mg/L	DBO ₅ : 0.52 mg/L DQO: 8.67 mg/L SST: 0.13 mg/L	DBO ₅ : 99.5% DQO: 96.3% SST: 98.9%	5 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF (39)
		DBO ₅ : 106.5 mg/L DQO: 52 mg/L SST: 11.8 mg/L	DBO ₅ : 9.78 mg/L DQO: 9.33 mg/L SST: 2.47 mg/L	DBO ₅ : 90.8% DQO: 82.06% SST: 99.02%			
	Aguas residuales domésticas	Ibuprofeno: 600 µg/L Paracetamol: 60 µg/L	Ibuprofeno: 6 µg/L Paracetamol: 3.6 µg/L	Ibuprofeno: 99% Paracetamol: 94%	21 días (TRH 5 días)	Humedal de flujo continuo subterráneo	Osama OA, Abdullah SRS, Hasan HA, Othman AR, Ewadh HM, Al-Baldawi IA, et al (40)
<i>Lepironia articulata</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.35 ± 0.35 OD: 0.24 ± 0.03 mgO ₂ /L DBO ₅ : 118.10 ± 14.00 mg/L DQO: 234.00 ± 19.80 mg/L SST: 13.90 ± 2.97 mg/L NH ₄ ⁺ : 12.05 ± 0.21 mg/L PO ₄ ³⁻ : 5.04 ± 0.25 mg/L	pH: 7.21 ± 0.36 OD: 6.97 ± 0.35 mgO ₂ /L	DBO ₅ : 99.70% DQO: 96.94% SST: 99.02% NH ₄ ⁺ : 99.82% PO ₄ ³⁻ : 99.24%	5 días	Humedal artificial de flujo horizontal altura 35 cm	Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF. (3)
		pH: 6.35 ± 0.35 OD: 0.24 ± 0.03 mgO ₂ /L DBO ₅ : 118.10 ± 14.00 mg/L DQO: 234.00 ± 19.80 mg/L SST: 13.90 ± 2.97 mg/L NH ₄ ⁺ : 12.05 ± 0.21 mg/L PO ₄ ³⁻ : 5.04 ± 0.25 mg/L	pH: 7.21 ± 0.36 OD: 6.97 ± 0.35 mgO ₂ /L	DBO ₅ : 96.9% DQO: 93.4% SST: 85.6% NH ₄ ⁺ : 94.5% PO ₄ ³⁻ : 91.7%		Humedal artificial de flujo horizontal altura 45 cm	
	Aguas residuales domésticas (aguas negras y grises)	DBO ₅ : 102.13 mg/L DQO: 240 mg/L SST: 12.97 mg/L	DBO ₅ : 0.31 mg/L DQO: 7.33 mg/L SST: 0.13 mg/L	DBO ₅ : 99.7% DQO: 96.9% SST: 99.0%	5 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF (39)
	DBO ₅ : 102.13 mg/L DQO: 54.65 mg/L SST: 12.97 mg/L	DBO ₅ : 9.45 mg/L DQO: 6 mg/L SST: 1.75 mg/L	DBO ₅ : 90.7% DQO: 89.02% SST: 86.5%				
<i>Scipus grossus</i> y <i>Lepironia articulata</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.35 ± 0.35 OD: 0.24 ± 0.03 mgO ₂ /L DBO ₅ : 118.10 ± 14.00 mg/L DQO: 234.00 ± 19.80 mg/L SST: 13.90 ± 2.97 mg/L NH ₄ ⁺ : 12.05 ± 0.21 mg/L PO ₄ ³⁻ : 5.04 ± 0.25 mg/L	pH: 7.21 ± 0.36 OD: 6.97 ± 0.35 mgO ₂ /L	DBO ₅ : 99.52% DQO: 96.57% SST: 99.03% NH ₄ ⁺ : 99.75% PO ₄ ³⁻ : 99.56%	5 días	Humedal artificial de flujo horizontal altura 35 cm	Al-Ajalín FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF. (3)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
		pH: 6.35 ± 0.35 OD: 0.24 ± 0.03 mgO ₂ /L DBO ₅ : 118.10 ± 14.00 mg/L DQO: 234.00 ± 19.80 mg/L SST: 13.90 ± 2.97 mg/L NH ₄ ⁺ : 12.05 ± 0.21 mg/L PO ₄ ³⁻ : 5.04 ± 0.25 mg/L	pH: 7.21 ± 0.36 OD: 6.97 ± 0.35 mgO ₂ /L	DBO ₅ : 96.7% DQO: 93.3% SST: 86.7% NH ₄ ⁺ : 94.9% PO ₄ ³⁻ : 88.6%		Humedal artificial de flujo horizontal altura 45 cm	
	Aguas residuales domésticas (aguas negras y grises)	DBO ₅ : 104.02 mg/L DQO: 233.3 mg/L SST: 13.12 mg/L	DBO ₅ : 0.5 mg/L DQO: 8 mg/L SST: 0.13 mg/L	DBO ₅ : 99.5% DQO: 96.6% SST: 99.0%	5 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Al-Ajalin FAH, Idris M, Abdullah SRS, Kurniawan SB, Imron MF (39)
		DBO ₅ : 12.67 mg/L DQO: 70.67 mg/L SST: 13.12 mg/L	DBO ₅ : 0.46 mg/L DQO: 7.33 mg/L SST: 2.4 mg/L	DBO ₅ : 87.8% DQO: 89.63% SST: 81.7%			
<i>Schumannianthus dichotomus</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 7.62 ± 0.28 OD: 3.20 ± 1.77 mgO ₂ /L DBO ₅ : 21.4 ± 7.28 mg/L DQO: 98.00 mg/L	pH: 6.8 ± 0.16 OD: 5.15 ± 1.00 mgO ₂ /L DBO ₅ : 8.22 ± 2.46 mg/L DQO: 27 mg/L	OD: 62% DBO ₅ : 61.60 ± 2.85% DQO: 53.98 ± 2.85% TDS: 13.90 ± 2.97% NO ₃ ⁻ : 70.25 ± 15.33% NO ₂ ⁻ : 39.36 ± 30.85%	1 mes (TRH 24 horas)	Humedal artificial de subterráneo vertical	Rahman MA, Rahaman MH, Yasmeen S, Rahman MM, Rabbi FM, Shuvo OR, et al. (41)
<i>Alpinia galanga</i>	Aguas residuales domésticas	DBO ₅ : 170 mg/L DQO: 172 mg/L SS: 254 mg/L	DBO ₅ : 40 mg/L DQO: 43 mg/L SS: 59 mg/L	DBO ₅ : 70% DQO: 80% SS: 73%	10 semanas (TRH 5 horas)	Humedal artificial de flujo de marea	Kabbour A, Mouhir L, Benrahmane L, Bendaoud A, Laaouan M, El Hafidi M. (42)
<i>Ocimum tenuiflorum</i>	Aguas residuales domésticas y municipales	pH: 5.8 Turbidez: 15 UNT TDS: 1285 mg/L SST: 48 mg/L DBO ₅ : 92 mgO ₂ /L DQO: 230.8 mgO ₂ /L TN: 13.2 mg/L TP: 3.6 mg/L Potasio: 13 mg/L Sodio: 96 mg/L Fosfato: 8.2 mg/L Amonio: 11.3 mg/L E. Coli: 1600 NMP/100 mL	pH: 6.1 Turbidez: 0.7 UNT TDS: 950 mg/L SST: 8.1 mg/L DBO ₅ : 9.8 mgO ₂ /L DQO: 30 mgO ₂ /L TN: 6.8 mg/L TP: 0.21 mg/L Potasio: 6.88 mg/L Sodio: 57.2 mg/L Fosfato: 2.3 mg/L Amonio: 1.75 mg/L E. Coli: 1305 NMP/100 mL	pH: - 24.22% Turbidez: 89.33% TDS: 23.40% SST: 81.32% DBO ₅ : 87.21% DQO: 85.08% TN: 32.95% TP: 84.44% Potasio: 44.26% Sodio: 31.37% Fosfato: 61.50% Amonio: 44.32% E. Coli: 17.89%	25 días	Humedales de tratamiento flotantes	Arivukkarasu D, Sathyanathan R (37)

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Aguas residuales domésticas y municipales	pH: 5.8 Turbidez: 15 UNT TDS: 1285 mg/L SST: 48 mg/L DBO ₅ : 92 mgO ₂ /L DQO: 230.8 mgO ₂ /L TN: 13.2 mg/L TP: 3.6 mg/L Potasio: 13 mg/L Sodio: 96 mg/L Fosfato: 8.2 mg/L Amonio: 11.3 mg/L E. Coli: 1600 NMP/100 mL	pH: 7.22 Turbidez: 1.36 UNT TDS: 658 mg/L SST: 15.3 mg/L DBO ₅ : 4.5 mgO ₂ /L DQO: 14 mgO ₂ /L TN: 1.86 mg/L TP: 0.27 mg/L Potasio: 3.28 mg/L Sodio: 45 mg/L Fosfato: 1.2 mg/L Amonio: 2.26 mg/L E. Coli: 845 NMP/100 mL	pH: - 37.07% Turbidez: 78.58% TDS: 35.62% SST: 60.45% DBO ₅ : 83.55% DQO: 78.59% TN: 68.96% TP: 84.91% Potasio: 66.95% Sodio: 39.53% Fosfato: 72.15% Amonio: 75.27% E. Coli: 38.7%	25 días	Humedales de tratamiento flotantes	Arivukkarasu D, Sathyanathan R (37)
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	Aguas residuales domésticas y municipales	pH: 5.8 Turbidez: 15 UNT TDS: 1285 mg/L SST: 48 mg/L DBO ₅ : 92 mgO ₂ /L DQO: 230.8 mgO ₂ /L TN: 13.2 mg/L TP: 3.6 mg/L Potasio: 13 mg/L Sodio: 96 mg/L Fosfato: 8.2 mg/L Amonio: 11.3 mg/L E. Coli: 1600 NMP/100 mL	pH: 6 Turbidez: 4.10 UNT TDS: 942 mg/L SST: 30 mg/L DBO ₅ : 19.6 mgO ₂ /L DQO: 61.5 mgO ₂ /L TN: 7 mg/L TP: 0.8 mg/L Potasio: 7.3 mg/L Sodio: 51 mg/L Fosfato: 2.8 mg/L Amonio: 6.1 mg/L E. Coli: 1011 NMP/100 mL	pH: - 14.66% Turbidez: 40.56% TDS: 19.33% SST: 28.13% DBO ₅ : 57.79% DQO: 46.91% TN: 31.82% TP: 50.46% Potasio: 32.82% Sodio: 35.28% Fosfato: 53.25% Amonio: 34.37% E. Coli: 30.57%	25 días	Humedales de tratamiento flotantes	Arivukkarasu D, Sathyanathan R (37)
<i>Hydrilla verticillate</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.74 OD: 2.7 ppm Turbidez: 122.3 NTU TDS: 633 mg/L DQO: 725 mg/L NO ₃ ⁻ : 105.97 mg/L	pH: 6.82 OD: 4.0 ppm	Turbidez: 30.51% TDS: 11.73% DQO: 34.29% NO ₃ ⁻ : 24.44% SO ₄ ²⁻ : 20.03% PO ₄ ³⁻ : 39.09%	TRH 24 horas	Tratamiento por tandas	Selvaraj D, Velvizhi G. (19)
		pH: 6.74 OD: 2.7 ppm Turbidez: 122.3 NTU TDS: 633 mg/L DQO: 725 mg/L NO ₃ ⁻ : 105.97 mg/L	pH: 7.13 OD: 8.9 ppm	Turbidez: 68.81% TDS: 25.23% DQO: 77.14% NO ₃ ⁻ : 53.67% SO ₄ ²⁻ : 49.55% PO ₄ ³⁻ : 50.9%		Sistema de ingeniería ecológica (lecho de lago + aireador + carbón activado)	

Plantas	Tipo de agua residual	Pre-test (Inicial)	Post- test (Final)	Eficiencia	Periodo de tratamiento	Tipo de tratamiento	Autores
<i>Iris spp.</i>	Aguas residuales municipales	pH: 7.68 ± 0.67 OD: 1.40 ± 0.41 mgO ₂ /L SST: 259.1 ± 49.75 mg/L DBO ₅ : 51.07 ± 5.23 mgO ₂ /L DQO: 123.4 ± 13.76 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 1.74 ± 0.42 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 15.84 ± 3.84 mg/L TN: 25.16 ± 4.14 mg/L TP: 4.20 ± 0.93 mg/L	pH: 7.75 ± 0.62 OD: 1.45 ± 0.48 mgO ₂ /L SST: 73.79 ± 13.92 mg/L DBO ₅ : 17.34 ± 5.109 mgO ₂ /L DQO: 50.21 ± 7.75 mgO ₂ /L NO ₃ -N: 0.77 ± 0.28 mg/L NH ₄ ⁺ -N: 8.97 ± 1.91 mg/L TN: 16.00 ± 4.35 mg/L TP: 2.34 ± 0.61 mg/L	SST: 70% DBO ₅ : 66% DQO: 59% NO ₃ -N: 56% NH ₄ ⁺ -N: 41% TN: 36% TP: 44%	8 meses	Humedal artificial de flujo horizontal subterráneo	Aalam T, Arias CA, Khalil N (26)
<i>Polygonum hydropiperoides</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.96 ± 0 DBO ₅ : 412.0 ± 4.24 mgO ₂ /L DQO: 149.38 ± 0.88 mgO ₂ /L TDS: 588 ± 0 mg/L Fosforo: 2.82 ± 0 mg/L	pH: 8.39 ± 0.95 DBO ₅ : 388.50 ± 48.79 mgO ₂ /L DQO: 47.52 ± 20.45 mgO ₂ /L TDS: 483.75 ± 4.60 mg/L Fosforo: 2.57 ± 0.63 mg/L	--	14 días	Tratamiento de flujo discontinuo	Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)
<i>Lemna minor</i> , <i>Polygonum hydropiperoides</i> y <i>Pistia stratiotes</i>	Aguas residuales domésticas	pH: 6.96 ± 0 DBO ₅ : 412 ± 4.24 mgO ₂ /L DQO: 149.38 ± 0.88 mgO ₂ /L TDS: 588 ± 0 mg/L Fosforo: 2.82 ± 0 mg/L	pH: 7.63 ± 0.09 DBO ₅ : 455 ± 36.77 mgO ₂ /L DQO: 39.26 ± 14.61 mgO ₂ /L TDS: 525.75 ± 96.52 mg/L Fosforo: 2.36 ± 0.40 mg/L	--	14 días	Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)	Shafi J, Waheed KN, Mirza ZS, Chatta AM, Khatoon Z, Rasheed T, et al. (23)