

Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte

Floating macrophytes on the wastewater treatment: a state of the art review

Macrófitas flutuantes no tratamento de águas residuais: uma revisão do estado da arte

Jorge Martelo¹, Jaime A. Lara Borrero²

Recepción: 05-oct-2011/Modificación: 30-abr-2012/Aceptación: 10-may-2012
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Los tratamientos de aguas residuales que involucran macrófitas flotantes han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio. Su importancia radica en su aptitud para ser empleados en núcleos rurales debido a su bajo consumo de energía convencional y la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento. Aun así, todavía no se han esclarecido rigurosamente los procesos que tienen lugar en la depuración de aguas residuales con macrófitas flotantes.

El presente artículo pretende hacer un recorrido por la literatura existente sobre macrófitas flotantes, identificando los aspectos generales, ventajas y des-

¹ Ingeniero ambiental, jmartelo@javeriana.edu.co, estudiante-investigador, Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, Maestría en Hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia.

² PhD, laraj@javeriana.edu.co, profesor asociado. Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, Director Maestría en Hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia.

ventajas del uso de estas plantas para depurar aguas residuales. De igual manera se identifican los antecedentes de mayor relevancia desde los inicios de esta aplicación. Serán descritos los modelos de diseño con macrófitas y los criterios generalmente aceptados, revisando rigurosamente las eficiencias de remoción de distintas especies de macrófitas flotantes. Por último serán abordadas según lo analizado las perspectivas actuales y retos futuros para el desarrollo de esta técnica.

Palabras claves: Macrófitas flotantes, plantas flotantes, tratamientos naturales de aguas residuales, sistemas blandos, fitoremediación, humedales, jacinto de agua.

Abstract

The wastewater treatments with floating macrophytes have proven effective in the remediation of waters with nutrient content, organic matter and toxic substances such as arsenic, zinc, cadmium, copper, lead, chromium, and mercury. Its importance lies in its ability to be used in rural communities due to their low consumption of conventional energy and practicality in the assembly and operation of treatment systems. Still, it has not been clarified thoroughly the processes taking place in the purification of wastewater with floating macrophytes.

This article attempts to review the existing literature on floating macrophytes, thus identifying the general aspects, advantages and disadvantages of using these plants for treating wastewater. Similarly, identify the most important background since the beginning of this application. There will be described models and design criteria mostly employed, rigorously reviewing removal efficiencies of different species of floating macrophytes. Finally it will be addressed as discussed current perspectives and future challenges for the development of this technique.

Key words: Floating macrophytes, floating plants, natural wastewater treatment, soft systems, phytoremediation, wetlands, water hyacinth.

Resumo

Os tratamentos de águas de residuais que envolvem macrófitas flutuantes tem demonstrado ser eficientes na remediação de águas com conteúdos de nutrientes, material orgânico e substâncias tóxicas como arsênico, zinco, cádmio, cobre, chumbo, cromo, e mercúrio. Sua importância reside na sua capacidade para ser utilizado em comunidades rurais devido ao seu baixo consumo de energia convencional e praticidade na montagem e operação dos sistemas de tratamento. Porém, ainda não foram esclarecidos completamente os processos que ocorrem no tratamento de águas residuais com macrófitas flutuantes.

O presente artigo pretende fazer um análise da literatura sobre macrófitas flutuantes, identificando aspectos gerais, vantagens e desvantagens do uso dessas

plantas para o tratamento de águas residuais. Do mesmo modo identificam-se os antecedentes de maior relevância desde os inícios deste aplicativo. Vão ser descritos os modelos de design com macrófitas e os critérios geralmente aceites, revendo rigorosamente as eficiências de remoção das diferentes espécies de macrófitas flutuantes. Finalmente serão abordadas, segundo o analisado, as perspectivas atuais e futuros desafios para o desenvolvimento desta técnica.

Palavras chaves: macrófitas flutuantes , plantas flutuantes , tratamentos naturais de águas residuais, soft Systems , fitorremediação, wetlands(pantanal), jacinto-de-água

1 Introducción

Toda actividad humana tiene asociada una generación de aguas residuales que deben ser sometidas a un tratamiento que garantice la continuidad del ciclo de consumo del recurso. Fernández [1] denomina "sistemas blandos" o extensivos, a los sistemas de tratamientos de agua residuales empleados en núcleos rurales debido a que consumen menos energía, y suelen ser menos costosos y sofisticados que los sistemas de tratamiento convencionales o intensivos, sin comprometer la eficacia en la depuración del agua residual. Entre estos sistemas blandos se encuentran los fitosistemas, caracterizados por el empleo de energía solar a través de los procesos biológicos naturales (fotosíntesis). Estos sistemas emergen como un intento de emular o aprovechar las capacidades de autodepuración de los hidrosistemas naturales que cuentan con plantas acuáticas [2], y han sido comúnmente implementados bajo esquemas de sistemas de humedales para el tratamiento de aguas residuales.

Para el año 2000, el 4 % de 2255 artículos científicos desarrollados a partir de estudios relacionados con sistemas de tratamientos de aguas residuales, hacían referencia a humedales construidos [3]. Según esta revisión bibliográfica, alrededor del 33 % de estas investigaciones, abordaron aplicaciones con plantas acuáticas. Aun así, las plantas acuáticas o macrófitas, no han sido muy estudiadas como sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales [4, 5]. No obstante, es ampliamente conocida su destacada habilidad para la asimilación de nutrientes y la creación de condiciones favorables para la descomposición de materia orgánica [6, 2, 7, 8]. Estas características hacen propicias a las macrófitas para su uso en sistemas de tratamientos de aguas residuales.

Debido a la habilidad que tienen las macrófitas acuáticas para asimilar hasta cierto punto, todos los constituyentes del agua considerandos como contaminantes, estas se han empleado en la detección y remoción de sustancias en efluentes de aguas residuales domesticas e industriales [5]. Novotny y Olem, citados por [9] afirman que el uso de las plantas acuáticas en tratamientos secundarios y terciarios de aguas residuales, han demostrado ser eficientes en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas, así como nutrientes y metales pesados. Existe evidencia de que las macrófitas pueden incluso, absorber sustancias radioactivas, como es el caso de la *Eleocharis dulcis*, en la cual se encontró que acumula grandes cantidades de uranio en sus raíces [9]. El presente trabajo pone especial atención en un tipo particular de macrófitas; las macrófitas flotantes. Estas especies, no soportan sus raíces sobre un sustrato y mantienen sus órganos asimiladores flotando sobre la superficie del agua [2, 10]. Han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica y sustancias toxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio, a través de los diferentes procesos de fitoremediación: fitoextracción, fitoestabilización, fivolatilización, fitotransformación, fitoestimulacion, fitodegradacion, y rizo-filtración [9, 11, 12].

A través de una revisión del estado del arte, se pretende abordar generalidades de las macrófitas flotantes como sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como el desarrollo histórico que ha tenido esta aplicación, y los diversos criterios encontrados en la respectiva bibliografía, relacionados con el diseño y eficiencias de remoción. Por último se pretende señalar las perspectivas actuales y retos posibles hacia el futuro.

2 Aspectos generales

Las macrófitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas, entre las que se destacan el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), la salvinia (*Salvinia Spp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna Spp.*, *Spirodella Spp.*) [2, 10, 13].

La morfología de las macrófitas flotantes difiere dependiendo de la especie. Por ejemplo, el jacinto de agua (especie predominante en los sistemas de

tratamiento) es una planta perenne de agua dulce, con desarrollo ascendente, de tallo vegetativo sumamente corto, hojas de color verde brillante y espigas de flores de lavanda. Los pecíolos de las planta son elongados y abultados de aire que contribuye a la flotabilidad de la planta [14]. La Figura 1 ilustra las anteriores características.

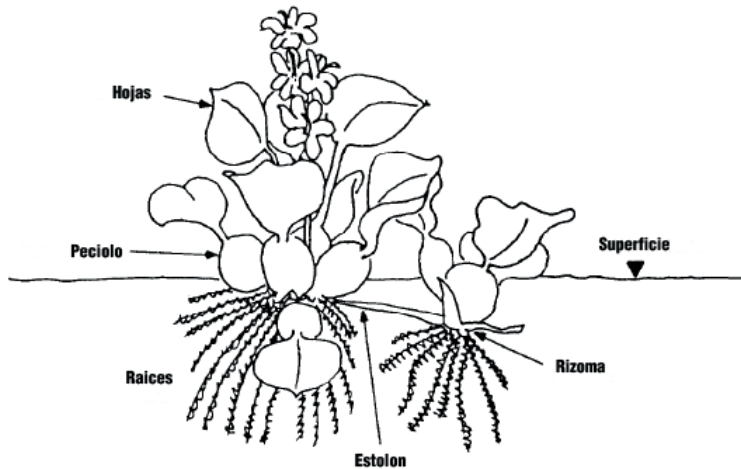


Figura 1: Morfología de una macrófita flotante (*Eichhornia crassipes*). Adaptado de [14]

De acuerdo con [15, 10], los procesos que tienen lugar para la depuración de contaminantes con macrófitas flotantes se dan a través de tres mecanismos primarios:

- Filtración y sedimentación de sólidos.
- Incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado.
- Degradación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismos facultativos asociados a las raíces de las plantas; y en los detritos del fondo de la laguna, dependiendo del diseño.

Durante la etapa de crecimiento, las macrófitas absorben e incorporan los nutrientes en su propia estructura [16] y funcionan como sustrato para los

microorganismos [2] que promueven la asimilación de estos nutrientes a través de transformaciones químicas, incluyendo nitrificación y desnitrificación [8, 17].

Estos sistemas de tratamiento (acuáticos) se basan en el mantenimiento de una cobertura vegetal de macrófitas flotantes sobre la lámina de agua, y se disponen a modo de estanques o canales en serie, debidamente aislados, en los que discurre el influente [1]. Su diseño contempla la remoción periódica de las plantas.

En la fotosíntesis, las macrófitas flotantes emplean el oxígeno y dióxido de carbono disponible en la atmósfera. Los nutrientes son tomados de la columna de agua a través de las raíces, las cuales constituyen también un excelente medio para la filtración/adsorción de sólidos suspendidos [14] (Figura 1). El desarrollo de raíces es función de la disponibilidad de nutrientes en el agua y de la demanda de nutrientes por parte de la planta. Por consiguiente, la densidad y profundidad del medio filtrante (raíces), depende en gran medida de factores como la calidad del agua, temperatura, régimen de cosecha, etcétera [14].

Los sistemas acuáticos con macrófitas flotantes, reducen significativamente el paso de la luz solar y restringen la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua. Como consecuencia estos sistemas tienden a permanecer libres de algas y en condiciones anaeróbicas, en la medida dada por algunos parámetros de diseño como la carga orgánica, el tiempo de retención, el tipo de especies seleccionadas y la densidad de las mismas en el agua [14]. Pero así mismo, esta condición puede resultar en bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua, que eventualmente sería útil para sustancias que lo demandan [17]; la eliminación microbiana de algunos compuestos tiene lugar gracias al oxígeno que las plantas transportan desde la atmósfera hasta el sistema radicular [18]. Conforme a lo anterior, [19] señalan que la eficiencia en remoción de contaminantes aumenta significativamente en sistemas con aireación y circulación, es decir, en sistemas que operan bajo condiciones aerobias.

Por otra parte, la estacionalidad ha demostrado tener una importante incidencia en los desempeños de las macrófitas flotantes para remoción de contaminantes [20, 21, 22]; según la investigación adelantada por Hadad y Maine [23], en una planicie de inundación de la cuenca media del río Paraná (Argentina), durante los meses de verano, especies flotantes de pequeño tamaño son capaces de remover cantidades significativas de fósforo, mientras que en

los meses de invierno, debido a la disminución de la biomasa, la capacidad de acumulación decrece.

La principal ventaja que ofrecen estos sistemas es la gran superficie de contacto que tienen sus raíces con el agua residual, ya que ésta les baña por completo, lo que permite una gran actividad depuradora de la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos a dicha superficie o por las propias raíces directamente [24]. No obstante, la acumulación de bacterias en las raíces de las macrófitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha [9].

La principal desventaja de los sistemas con macrófitas flotantes es la capacidad limitada de acumular biomasa, por lo que se deben hacer retiros periódicos de la misma para permitir el crecimiento de las plantas, y esto encarece el proceso en lo que a mano de obra se refiere [1]. Otra desventaja es la proliferación de mosquitos como vectores transmisores de enfermedades [17], lo que condiciona la ubicación de los sistemas lejos de centros poblados.

3 Desarrollo histórico

Las primeras exploraciones con macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales, según Crites y Tchobanoglous citados por Bolaños, Casas y Aguirre [5], se llevaron a cabo en la década de los 70's en el centro espacial de la National and Space Administration -NASA-, como potencial sistema de tratamiento de aguas residuales en viajes espaciales.

La efectividad de las macrófitas flotantes en la depuración de aguas residuales con contenidos de materia orgánica y nutrientes ha sido estudiada por varios autores. Para el año 1973 en la Universidad de la Florida, Harvey y Fox ensayaron con *Lemna minor* en la remoción de nutrientes, obteniendo resultados de 89 % y 67 % para nitrógeno y fósforo respectivamente. Dos décadas después, Rodríguez, Díaz, Guerra, y Hernández [25], adelantan en Cuba un estudio comparativo de la capacidad depuradora de cinco especies de macrófitas flotantes. Los resultados demostraron buenas eficiencias en la remoción de este tipo de contaminantes. También se observó una importante influencia del tamaño de la planta y de su sistema radicular en la remoción de los contaminantes. Por su parte Nahlik y Mitsch [17], a través de la implemen-

tación de cinco sistemas de tratamientos dominados por macrófitas flotantes, compararon los desempeños en remoción de materia orgánica y nutrientes en la cuenca del río Parismina al este de Costa Rica. Los niveles de amoníaco y fosfatos fueron reducidos hasta en un 92 %. Para el mismo año se publicó el trabajo de Zimmels, Kirzhner, y Malkovskaja [26], donde se estudió a escala piloto el comportamiento de dos macrófitas flotantes (*Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*) en la disminución de la demanda biológica de oxígeno -DBO-, demanda química de oxígeno -DQO-, turbidez, y sólidos suspendidos totales -SST- del agua residual urbana en Israel. Los resultados indicaron que en términos de estos parámetros, el efluente cumple con los estándares para el uso en sistemas de riego. Por otro lado, Sooknah y Wilkies [27] en el 2004, evaluaron además de la disminución de contaminantes comunes, el comportamiento de variables fisicoquímicas a lo largo del tratamiento de aguas residuales provenientes de un digestor anaerobio de un efluente lechero. Las especies de macrófitas empleadas fueron *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*, e *Hydrocotyle umbellata*.

Los metales pesados también han sido objeto de numerosos estudios. Por ejemplo, la *Salvinia rotundifolia* demostró una gran eficiencia en el tratamiento de plomo [28]; *S. herzogii* de la Sota (*Salviniaceae*) y *Eichhornia crassipes* (*Pontederiaceae*) resultaron excelentes bioabsorbedores de cadmio, níquel, cobre, zinc, cromo y plomo [29, 30]; y *Pistia stratiotes* L. (*Araceae*) presentó una alta capacidad en el tratamiento de efluentes industriales con varios metales [31, 32]. En el año 1999, Boniardi, Rota, y Nano [33], estudiaron la efectividad de la especie acuática *Lemna gibba*, en el tratamiento de riles con contenidos de metales pesados. Se encontró que concentraciones relativamente altas de Fe^{3+} , Zn^{2+} , y Al^{3+} , no afectaron el rendimiento de la *Lemna gibba* como purificador, mientras que bajas concentraciones de cromo y cobre, si lo hicieron. Maine, Duarte, y Suñé [32], en el año 2001, estudiaron la capacidad de cuatro macrófitas flotantes (*Salvinia herzogii*, *Pistia stratiotes*, *Hydromistia stolonifera*, y *Eichhornia crassipes*) para la extracción de cadmio en aguas residuales durante la época más fría del año, donde se obtuvieron buenas respuestas de cada una ellas destacándose, la *Pistia stratiotes* por su gran desarrollo. En una experiencia de invernadero en Santa Fe, Argentina, Paris, Hadad, Maine, y Suñé [23, 32] presentan los desempeños de remoción de contenidos de cromo, cadmio, y plomo, en dos macrófitas flotantes: *Pistia stratiotes* y *Salvinia herzogii*, las cuales demostraron ser eficientes para la remoción de estos

contaminantes tanto aislada como combinadamente.

Los filtros de macrófitas en flotación -FMF- se implementaron en el año 2002 como proyecto pionero concedido por la Comisión Europea al Ayuntamiento de Lorca, España. Esta novedosa alternativa fue desarrollada por la Universidad Politécnica de Madrid y empleada posteriormente en experiencias en África, Estados Unidos y varios países europeos (HIDROLUTION FMF®, 2011).

Para el 2004, Meerhoff y Mazzeo [34] intentan elucidar los procesos con macrófitas flotantes intervinientes en la conservación de humedales en Sudamérica, encontrando que la densidad de coberturas vegetales con estas macrófitas tiene una incidencia directa en la turbidez del agua, asociada a sólidos suspendidos y comunidades fitoplanctónicas, que a su vez propicia el desarrollo de comunidades de macroinvertebrados, que encuentran soporte en las raíces de las plantas, y constituyen una fuente fundamental de alimento para peces y aves, jugando un papel importante en la ocurrencia y distribución espacial de estos. Estudios profundos en esta área aún no se desarrollan.

En 1996 se desarrolla el primer antecedente con macrófitas flotantes en Colombia registrado por la literatura; se determinó la efectividad de la *Eicchornia crassipes* en la depuración de aguas residuales en zonas cálidas del valle Sinuano del departamento de Córdoba. Los resultados obtenidos reflejan una remoción altamente significativa en términos de las variables analizadas [35]. Luego, para el 2002, en la Universidad del Valle (Cali, Colombia), a escala laboratorio se evaluó la remoción de hierro en diferentes concentraciones por medio de la *Lemna spp.*, arrojando como resultado que a mayores concentraciones la remoción disminuye, debido, posiblemente a procesos de saturación [36].

4 Diseño

El uso de macrófitas flotantes, históricamente ha sido desarrollado bajo diversos esquemas de sistemas de tratamiento. En ese sentido, hay una amplia gama de diseños en función de las características de cada uno de los sistemas [14]; el más comúnmente empleado es el sistema de humedales. Así, un diseño con macrófitas flotantes puede ser considerado bajo criterios de sistemas de humedales, que la literatura referencia como humedales con plantas flotantes, y humedales con macrófitas emergentes en flotación [1]. Ambos operando co-

mo humedales de flujo libre superficial. A continuación serán abordadas las consideraciones de diseño para cada uno de estos sistemas.

4.1 Sistemas con especies flotantes

Consiste en estanques con profundidad variable (0,4 a 1,5 m) [10], donde las macrófitas se desarrollan naturalmente. Entre las especies más empleadas se encuentran el jacinto de agua (*Eicchornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna spp.*) [1]. Estos sistemas son semejantes a las lagunas de estabilización, pero con la gran diferencia de la presencia de macrófitas en lugar de algas, además de las profundidades someras [14] (ver Figura 2).

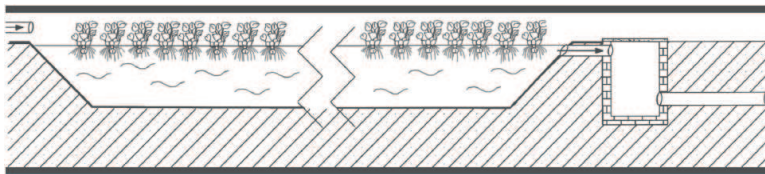


Figura 2: Esquema de sistema con especies flotantes. Tomado de Fernández [1]

La US Environmental Protection Agency -EPA- [14] desarrolló un procedimiento para el diseño de sistemas con especies flotantes para el caso específico del jacinto de agua, dado que esta macrófita representa la mayoría de los sistemas con especies flotantes que han sido construidos, debido a su alta capacidad de asimilación y su alta proliferación [37]. En primera instancia, la EPA [14] clasifica los sistemas de acuerdo con el contenido de oxígeno disuelto y el método de aireación empleado, teniendo así: sistemas aeróbicos con jacintos sin aireación suplementaria, en los cuales se lleva a cabo tratamiento secundario y remoción de nutrientes, dependiendo de la carga orgánica; sistemas aeróbicos con jacintos con aireación suplementaria, lo que provee la ventaja de tolerar altas cargas orgánicas, y los requerimientos de área son menores; y por último, los sistemas con jacintos que operan bajo altas cargas orgánicas, con el propósito de lograr tratamientos secundarios. Este último sistema, así como el primero, tienen las desventajas de generación de olores y mosquitos. El parámetro determinante en el diseño y operación de estos sistemas es sin duda la carga orgánica. Los criterios de diseño para los tres

sistemas están dispuestos en la Tabla 1. Otros valores de diseño son indicados por Romero [38] de acuerdo con estudios hechos en la India (Tabla 2).

Tabla 1: Criterios de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas con jacintos. Tomado de EPA [14]

| Criterio | Tipo de sistema | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Aerobio sin aireación | Aerobio sin aireación | Aerobio con aireación |
| Tipo de afluente | Primario | Secundario | Primario |
| DBO afluente, mg/L | 130-180 | 30 | 130-180 |
| Carga orgánica, kg DBO/ha.d | 40-80 | 10-40 | 150-300 |
| Efluente esperado, mg/L | | | |
| DBO ₅ | < 30 | < 10 | < 15 |
| SS | < 30 | < 10 | < 15 |
| NT | < 15 | < 5 | < 15 |
| Profundidad, m | 0,5 – 0,8 | 0,6 – 0,9 | 0,9 – 1,4 |
| Tiempo de retención, d | 10 – 36 | 6 – 18 | 4 – 8 |
| Carga hidráulica, m ³ /ha.d | > 200 | < 800 | 550 – 1000 |
| Frecuencia de cosecha | Anual | 2 veces por mes | Mensual |

Tabla 2: Criterios de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales crudas con jacintos (India). Tomado de Romero [38]

| Criterio | Valor de diseño | Calidad esperada |
|--|-----------------|------------------|
| Carga orgánica, kg DBO/ha.d | ≤ 220 | DBO < 30 mg/L |
| Tiempo de retención, d | 10 | SST < 30 mg/L |
| Carga hidráulica, m ³ /ha.d | 1000 | |
| Área de lagunas individuales, ha | 0,4 | |
| Profundidad, m | ≤ 1,5 | |
| Relación longitud/ancho | > 3 : 1 | |
| Temperatura del agua, °C | > 10 | |

Las necesidades de cosecha de las macrófitas, están en función de los objetivos de calidad del agua, de la tasa de crecimiento de las plantas, o de la acción de predadores. De cualquier forma, el interés consiste en mantener un cultivo con un metabolismo de alta captura de nutrientes [14].

4.2 Sistemas con macrófitas emergentes en flotación

En este tipo de sistemas se emplean macrófitas emergentes, que a través de mecanismos diversos se hacen flotar. De estos sistemas el más destacado es el recientemente desarrollado “Filtros de Macrófitas en Flotación” -FMF- [10]. También son destacados los “Floating Treatment Wetlands Planted with Emergent Macrophytes” -FTWs- o humedales de tratamiento flotante con macrófitas emergentes [39, 40], cuyas características se evidenciarán más adelante.

4.2.1 Filtros de Macrófitas en Flotación -FMF- Debido al problema que experimentan algunos sistemas a raíz de la colmatación, el Grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal, Botánica, de la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid, desarrolló este modelo. Su implementación se ha extendido hasta África, Estados Unidos y varios países de Europa. [10].

Este sistema combina las ventajas de los humedales de flujo libre superficial y de los sistemas acuáticos. Su principal particularidad es el manejo de macrófitas emergentes como macrófitas flotantes, las cuales están soportadas en una estructura flotante que permite el entrelazado de sus raíces y órganos sumergidos, formando un tapiz filtrante que está permanentemente bañado por el agua residual. Los mecanismos de remoción brindados por la vegetación son más eficientes, conservando procesos similares que se dan en un FWS; el flujo de agua ocurre superficialmente en estanques debidamente aislados [1, 10] (Figura 3).

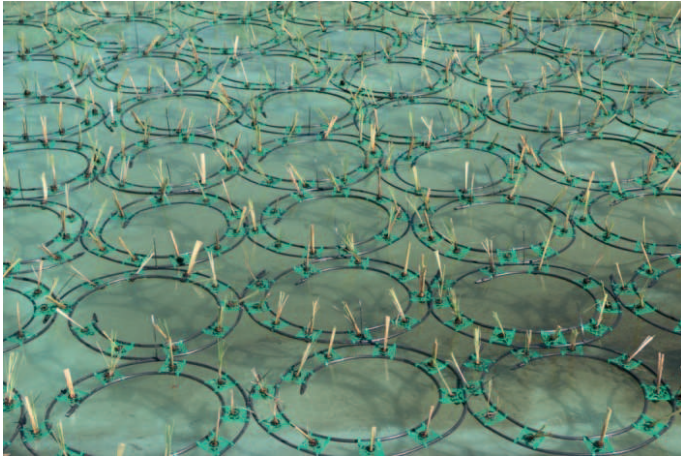


Figura 3: Sistema FMF. Tomado de www.aserpas.com

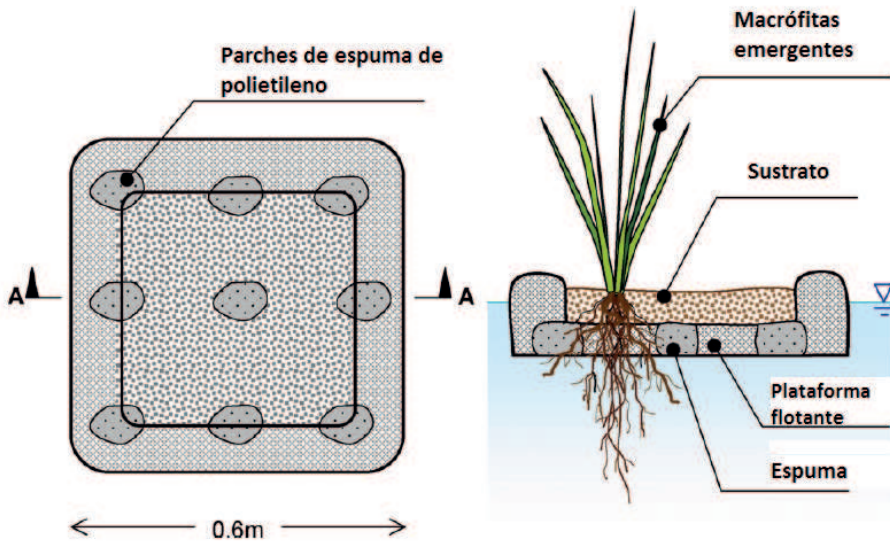


Figura 4: Estructura de un FTW experimental. Adaptado de Tanner y Headley [40]

4.2.2 Humedales de tratamiento flotante con macrófitas emergentes –FTW’s- Estos sistemas similares a los FMF, manejan macrófitas emergentes flotando en la superficie del estanque, a través de una estructura flotante (Figura 4). La diferencia fundamental entre los dos sistemas, consiste en el montaje de las macrófitas, que tienen lugar en estructuras diferentes.

Las principales aplicaciones reportadas de estos sistemas han sido para el tratamiento de aguas pluviales, aguas residuales, aguas provenientes de sistemas combinados (aguas residuales - pluviales), y efluentes de industria minera, avícola, y porcina [39].

5 Eficiencia

El uso de macrófitas flotantes ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales. Una cantidad importante de especies ha sido empleada en sistemas de tratamiento, y en ejercicios investigativos a escala real y a escala laboratorio, siendo el jacinto de agua, la macrófita de mayor interés dada las características ya señaladas. Esta especie, de acuerdo con los reportes de la literatura, alcanza reducciones de DBO_5 en el orden de 95 %, y hasta 90,2 % para la DQO. En el caso de los sólidos suspendidos se registran disminuciones con valores que se encuentran en el rango de 21 % y 91 %. En cuanto al fósforo total y nitrógeno total, se alcanzaron máximas remociones de 91,7 % y 98,5 % respectivamente, siendo este último, el contaminante con mayor remoción. Los metales también han sido objeto de remoción, encontrándose porcentajes de máxima remoción desde 85 % hasta 95 % para el hierro, cobre, zinc, cadmio y cromo. Estos valores, así como los valores de eficiencias correspondientes a todas las especies revisadas en el marco de esta investigación, se encuentran consignados en la Tabla 3. Así mismo están identificadas las referencias a partir de las cuales se elaboró la tabla.

Tabla 3: Eficiencias de remoción de contaminantes en sistemas con distintas macrófitas flotantes

| Especie | Porcentaje de remoción | | | | | | | | | | | | | Referencia |
|--------------------------------|------------------------|-------------|---------|--------------|--------------|----|------------|------------|-----------|------------|-----------|---------|---------|--|
| | DBO | DQO | SS | P to- tal | N To- tal | As | Fe | Mn | Pb | Cu | Cr | Cd | Zn | |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | 37 – 95,1 | 72,6– 90,25 | 21 - 92 | 42,3– 98,5 | 72,4– 91,7 | 80 | 78,6– 90,1 | | | 86 - 95 | 60 - 89 | 40 - 85 | 48 - 95 | [14, 27, 12, 41, 26, 19, 42, 25, 32, 29, 43, 35, 44, 21, 18] |
| <i>Pistia stratiotes</i> | 57 – 91,9 | 70,7– 93,47 | 80,6 | 25 – 64,2 | 51,7– 87,6 | | 78,3– 95 | 86,8– 98,4 | 90 – 99,7 | 68 – 97,3 | 64 – 99,6 | 63 - 87 | 82 - 92 | [45, 5, 46, 41, 19, 32, 25, 26, 18] |
| <i>Lemna minor</i> | 94,4 | | | 67 | 89 | 5 | 78,47 | 95,20 | 98,55 | 77 – 90,41 | 96,94 | | 97,56 | [46, 12, 47, 48, 49, 50] |
| <i>Lemna gibba</i> | 50 – 95,7 | 64,7 | 30 - 92 | | | | 54,4 | | | | | | | [36, 14, 51, 52, 53] |
| <i>Hydrocotyle umbellata</i> | 88,7 | 72,2 | 74,3 | 69 – 71,3 | 42,9– 87,5 | | | | | | | | | [27, 22, 18] |
| <i>Spirodela polyrrhiza</i> | | | | | | | 77,5– 83,5 | | | 76- 91 | 62- 83 | 63- 71 | 82- 92 | [41] |
| <i>Spirodela intermedia</i> | | | | | | | 80,23 | 96,91 | 98,22 | 91,7 | 33,88 | | 95,73 | [46] |
| <i>Salvinia natans</i> | 73,6– 83,8 | 76,6– 87,1 | | 10,3– 31,3 | | | | | | | | | | [19] |
| <i>Salvinia herzogii</i> | | | | | | | | | 90 | | 64 | 84 | | [45, 32] |
| <i>Salvinia rotundifolia</i> | | | | | | | | | 85- 95 | | | | | [28] |
| <i>Azolla</i> | 69.6 | | | 60 | 52,4 | 60 | | | | | | | | [25, 12] |
| <i>Egeria densa</i> | | 79,8– 92,5 | | | | | | | | | | | | [12, 5] |
| <i>Phragmites communis</i> | | 58,82 | | | | | | | | | | | | [51] |
| <i>Dryan</i> | | 83,4 | | 90,4 | 84,0 | | | | | | | | | [54] |
| <i>Waseyutaka</i> | | 80,7 | | 89,9 | 79,6 | | | | | | | | | [54] |
| <i>Tachimasari</i> | | 85,4 | | 88,3 | 80,3 | | | | | | | | | [54] |
| <i>Hydromistia stolonifera</i> | | | | | | | | | | | | 76 | | [32] |

6 Cosecha

Entre las limitaciones de los sistemas con macrófitas flotantes se encuentra la capacidad limitada de acumular biomasa. Esto obliga a hacer retiros periódicos de las mismas para permitir el crecimiento de las plantas emergentes, y optimizar la captura de algunos componentes del agua residual [1]. En la literatura se han señalado posibles usos para la biomasa, tales como la incorporación como fertilizante en la tierra o compost, la manufactura de cartón, la producción de combustibles, o también el uso como material absorbente de colorantes y metales pesados [9].

Algunas plantas pueden ser cosechadas fácilmente, y una vez cosechadas proveer algún recurso económico [47], empleando alguna de las prácticas señaladas. La *Lemna minor* por ejemplo, posee un gran potencial como recurso económico, ya que por su alta digestibilidad es tan buena o mejor que el pasto para nutrición de animales. Además, su pequeño tamaño y su naturaleza flotante facilitan la cosecha, traducándose en bajos costos. Los regímenes de cosecha también pueden tener efectos positivos en el proceso de tratamiento; [55] demostraron que la *Lemna minor* es altamente eficiente en la remoción de ortofosfatos, si se cosecha de manera frecuente. Se encontró máxima remoción con periodos de cosecha de 8 días.

Por otra parte, el *jacinto de agua* puede ser sometido a digestión anaerobia para producir metano; a compostaje para disposición posterior sobre el suelo; a secado al aire y disposición en un relleno sanitario; a incineración; o puede regarse y ararse para mejoramiento del suelo.

La producción de biomasa (*Eichhornia crassipes*) puede alcanzar según Chassany M. [56], valores de 69,5 t/ha.año.

Un manejo inadecuado de la biomasa cosechada puede representar un problema. La acumulación de bacterias en las raíces de las macrófitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha [9].

7 Retos

Aunque ya es reconocida la gran eficacia de las macrófitas flotantes en la depuración de aguas residuales, aun el área es susceptible de mayor exploración científica [3] orientada a necesidades específicas que suponen retos a futuro.

Miglio & Mellisho [4] ponen de manifiesto que resulta imperante ensayar sistemas con macrófitas flotantes en diferentes zonas geográficas (costa, sierra, selva) y en diferentes épocas del año, esto permitirá elucidar los rendimientos de acuerdo a las condiciones ambientales. Así mismo, es necesario orientar esfuerzos en determinar la viabilidad de la implementación de estos sistemas en climas templados y fríos.

Estudios adicionales son necesarios para comprender de mejor manera el efecto de las cosechas en la sucesión y desarrollo de los humedales con macrófitas; estudios enfocados en determinar regímenes óptimos de cosecha, especialmente para maximizar la asimilación de nutrientes [17]. Paralelamente, potenciar el valor de la biomasa resultante del proceso como insumo para otras actividades tales como la obtención de energía, compostaje, fabricación de papelería, etcétera [9].

Teniendo en cuenta que empleando aireación y recirculación en sistemas con macrófitas flotantes, se obtienen mejores rendimientos [19], los retos a futuro deberían apuntar a maximizar la eficacia de estos sistemas implementando tecnologías que puedan ser empleadas a escala real. Las medidas tecnológicas deberán ser también útiles en la capacidad de control y reducción de los costos de los dispositivos y maquinaria existente en la actualidad para mantener la vegetación en los niveles deseados [34].

Debido a la poca investigación, es usual desarrollar estos sistemas a través de ensayos de prueba y error o a través modelos de “caja negra”. Es menester la investigación orientada a entender los procesos internos y así orientar diseños más precisos y estar en control de los parámetros de diseño [20]. Brix y Schierup [2] señalan que es preponderante identificar entre diferentes diseños con macrófitas, el de mejor rendimiento, para así articularlo a diseños de sistemas integrados. Bajo un enfoque ecosistémico, es preciso orientar estudios para entender la influencia de estas plantas sobre otras comunidades, como las aves, y así determinar los posibles impactos ecológicos de sistemas de tratamiento con macrófitas flotantes [34]. Esto permitirá elucidar las potencialidades de integración de estos sistemas con el entorno, y constituirse

en un criterio para su desarrollo e implementación. El aumento en la temperatura provocado por el cambio climático puede promover la expansión geográfica de esta vegetación a zonas donde actualmente está limitada. Este escenario requiere de más investigaciones de campo y estudios experimentales para diseñar medidas de manejo o prevención adecuadas para los sistemas con macrófitas [34]. También se deberá poner mayor énfasis en la conservación y recuperación de los humedales naturales que cuentan con plantas flotantes [3], y garantizar así la permanencia del recurso.

En términos de competitividad con sistemas convencionales de tratamiento, es necesario no solo entender el funcionamiento sino también potenciar los mismos. En esto radica el éxito de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales [8].

8 Conclusión

Existe un amplio espectro de aplicaciones encontradas en la literatura que hacen referencia a las macrófitas flotantes como sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales. La mayoría ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales, siendo el jacinto de agua la especie de mayor uso.

Los criterios de diseño empleados en sistemas con macrófitas flotantes difieren dependiendo de qué modelo pueda ser empleado; sistema con especies flotantes; filtro de macrófitas en flotación; o humedales de tratamiento flotante con macrófitas emergentes.

Los retiros periódicos de las plantas son un requerimiento necesario para optimizar la eficiencia de remoción, que puede convertirse en una limitación para el proceso, si no se tiene una disposición adecuada de la cosecha.

Las perspectivas para el desarrollo de esta técnica, plantean que se requiere orientar esfuerzos científicos para entender y potenciar los mecanismos de depuración de estas especies.

Agradecimientos

A todos los colaboradores y actores del curso de tratamientos naturales de aguas residuales de la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad

Javeriana, y al Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, por brindar el marco de desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- [1] J. Fernández. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. Coordinada per Jesús Fernández González. Proyecto Life. Amb disponibilitat en. pdf a Internet: <http://www.macrophytes.info/documentacion/>, 2000. 223, 226, 227, 229, 230, 232, 236
- [2] H. Brix and H. Schierup. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control. In *Ambio. Stockholm*, volume 18, pages 100–107, 1989. 223, 224, 226, 237
- [3] M. Pérez and C. Rojo. Función depuradora de los humedales i: una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos. *Boletín SEHUMED*, 1:115–122, 2000. 223, 237, 238
- [4] R. Miglio and M. Mellisho. Evaluación de la capacidad depuradora de tres macrofitas acuáticas en pantanos artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Editorial Agraria*, page 158, 2003. 223, 237
- [5] S. Bolaños, J. Casas, and N. Aguirre. Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrófitas pistia stratiotes y egeria densa en un sistema batch. *Gestión y Ambiente*, 11(2):39–48, 2008. 223, 224, 227, 235
- [6] Lyon S. Goldman C. Gersberg R., Elkins B. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Research*, 20(3):363–368, 1986. 223
- [7] J. Ellis, R. Shutes, D. Revitt, and T. Zhang. Use of macrophytes for pollution treatment in urban wetlands. *Resources, conservation and recycling*, 11(1-4):1–12, 1994. 223
- [8] S. Peterson and J. Teal. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems. *Ecological Engineering*, 6(1-3):137–148, 1996. 223, 226, 238
- [9] Sandoval M. Celis J., Junod J. Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14:17–25, 2005. 224, 227, 236, 237
- [10] J. Fernández. Filtro autoflotante de macrofitas para la depuración de aguas residuales. pages 171–180, 2001. 224, 225, 230, 232
- [11] C. Frers. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental*, 11:301–305, 2008. 224

- [12] M. A Rahman and H. Hasegawa. Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere*, 85(5):633–646, 2011. 224, 235
- [13] N. Sáenz, M. Terrazas, L. Ortiz, M. Villavicencio, A. Figueroa, and M. Arce. Evaluación de dos parámetros bioquímicos en tres macrófitas acuáticas expuestas a cobre. *Polibotanica*, 26:149–158, 2008. 224
- [14] EPA. Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment| US EPA. <http://yosemite.epa.gov/water/owrcatalog.nsf>, 1988. 225, 226, 229, 230, 231, 232, 235
- [15] H. Brix. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35(5):11–18, 1997. 225
- [16] G. Henry-Silva, A. Camargo, and M. Pezzato. Growth of free-floating aquatic macrophytes in different concentrations of nutrients. *Hydrobiologia*, 610(1):153–160, June 2008. 225
- [17] A. Nahlik and W. Mitsch. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in costa rica. *Ecological Engineering*, 28(3):246–257, 2006. 226, 227, 237
- [18] DeBusk T. Reddy R., D’Angelo E. Oxygen transport through aquatic macrophytes: The role in wastewater treatment. *Journal of Environmental Quality*, 19(2):261–267, 1989. 226, 235
- [19] Y. Zimmels, F. Kirzhner, and A. Kadmon. Effect of circulation and aeration on wastewater treatment by floating aquatic plants. *Separation and Purification Technology*, 66(3):570–577, 2009. 226, 235, 237
- [20] K. R. Reddy and T. A. DeBusk. State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Water science and technology*, 19(10):61–79, 1987. 226, 237
- [21] K. R. Reddy and W. F. DeBusk. Growth characteristics of aquatic macrophytes cultured in nutrient-enriched water: II. azolla, duckweed, and salvinia. *Economic Botany*, 39(2):200–208, April 1985. 226, 235
- [22] Reddy K. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes. *Journal of Environmental Quality*, 14(4):459–462, 1985. 226, 235
- [23] Maine M. Hadad H. Phosphorous amount in floating and rooted macrophytes growing in wetlands from the middle paraná river floodplain (Argentina). *Ecological Engineering*, 31(4):251–258, 2007. 226, 228

- [24] Condori L. Delgadillo M. Planta de tratamiento de aguas residuales con macrófitas para comunidades cercanas al lago titicaca. *Journal Boliviano de Ciencias*, 7(21):63–66, 2010. 227
- [25] C. Rodriguez, M. Diaz, L. Guerra, and J. Hernandez. Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. pages 1–5, 1996. 227, 235
- [26] Y. Zimmels, F. Kirzhner, and A. Malkovskaja. Application of eichornia crassipes and pistia stratiotes for treatment of urban sewage in israel. *Journal of environmental management*, 81(4):420–428, 2006. 228, 235
- [27] Wilkie A. Sooknah R. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecological Engineering*, 22(1):27–42, 2004. 228, 235
- [28] G. Banerjee and S. Sarker. The role of salvinia rotundifolia in scavenging aquatic pb (II) pollution: a case study. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 17(5):295–300, 1997. 228, 235
- [29] M. Delgado, M. Bigeriego, and E. Guardiola. Uptake of zn, cr and cd by water hyacinths. *Water Research*, 27(2):269–272, 1993. 228, 235
- [30] I. Schneider and J. Rubio. Sorption of heavy metal ions by the nonliving biomass of freshwater macrophytes. *Environmental Science & Technology*, 33(13):2213–2217, 1999. 228
- [31] G. Satyakala and K. Jamil. Studies on the effect of heavy metal pollution on pistia stratiotes l.(water lettuce). *Indian Journal of Environmental Health*, 39(1):1–7, 1997. 228
- [32] M. A Maine, M. V Duarte, and N. L Suñé. Cadmium uptake by floating macrophytes. *Water research*, 35(11):2629–2634, 2001. 228, 235
- [33] N. Boniardi, R. Rota, and G. Nano. Effect of dissolved metals on the organic load removal efficiency of lemna gibba. *Water Research*, 33(2):530–538, 1999. 228
- [34] M. Meerhoff and N. Mazzeo. Importancia de las plantas flotantes libres de gran porte en la conservación y rehabilitación de lagos someros de sudamérica. *Ecosistemas*, 13(2):13–22, 2004. 229, 237, 238
- [35] A. Flórez, A. Otero, A. Segura, and W. Sariego. Evaluación de macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales en un tramo del canal de drenaje de 1E de montería. *Temas Agrarios*, 1(2):61–70, 1996. 229, 235
- [36] L. Barba. Fitoremediación en el tratamiento de aguas residuales con metales pesados. *Universidad del Valle*, pages 1–17, 2002. 229, 235

- [37] Jovanovic L. Nesic N. Potential use of water hyacinth (*E. crassipes*) for wastewater treatment in serbia. *Journal of Wastewater treatment using Aquatic plant*, (13):1–8, 1996. 230
- [38] J. A Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 3 edition, 2004. 231
- [39] T. R. Headley and C. C. Tanner. Floating treatment wetlands: an innovative option for stormwater quality applications. 2008. 232, 234
- [40] C. C Tanner and T. R Headley. Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecological Engineering*, 37(3):474–486, 2011. 232, 233
- [41] V. K Mishra and B. D. Tripathi. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. *Bioresource technology*, 99(15):7091–7097, 2008. 235
- [42] S. Venkata Mohan, G. Mohanakrishna, P. Chiranjeevi, D. Peri, and P. N. Sarma. Ecologically engineered system (EES) designed to integrate floating, emergent and submerged macrophytes for the treatment of domestic sewage and acid rich fermented-distillery wastewater: Evaluation of long term performance. *Biore-source technology*, 101(10):3363–3370, 2010. 235
- [43] Isa M. Malakahmad A. Kutty S., Ngatenah S. Nutrients removal from municipal wastewater treatment plant effluent using eichhornia crassipes. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60:826–831, 2009. 235
- [44] B. Tripathi and C. Shukla. Biological treatment of wastewater by selected aquatic plants. *Environmental Pollution*, 69:69–78, 1991. 235
- [45] C. Paris, H. Hadad, M. A. Maine, and N. Suñe. Eficiencia de dos macrófitas flotantes libres en la absorción de metales pesados. *Limnetica*, 24(3-4):237–244, 2005. 235
- [46] P. Miretzky, A. Saralegui, and A. F Cirelli. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos aires, argentina). *Chemosphere*, 57(8):997–1005, 2004. 235
- [47] Fox J. Harvey R. Nutrient removal using lemna minor. *Water Pollution Control Federation*, 45(9):1928–1938, 1973. ArticleType: research-article / Issue Title: Annual Conference Issue / Full publication date: Sep., 1973 / Copyright 1973 Water Environment Federation. 235, 236
- [48] G. Rahmani and S. Sternberg. Bioremoval of lead from water using lemna minor. *Bioresource Technology*, 70(3):225–230, 1999. 235

- [49] A. Priya, K. Avishek, and G. Pathak. Assessing the potentials of lemna minor in the treatment of domestic wastewater at pilot scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011. 235
- [50] Y. Kara. Bioaccumulation of copper from contaminated wastewater by using lemna minor. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 72(3):467–471, 2004. 235
- [51] A. Hernández, R. Soto, A. Esquivel, J. Rangel, and P. Martínez. Desarrollo de un modelo a escala empleando macrófitas, para el tratamiento de aguas de los canales de xochimilco. Veracruz, Mexico, 2001. 235
- [52] N. Ran, M. Agami, and G. Oron. A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* l.) for treatment of domestic primary effluent in israel. *Water Research*, 38(9):2241–2248, 2004. 235
- [53] J. Zirschky and S. Reed. The use of duckweed for wastewater treatment. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 60(7):1253–1258, 1988. ArticleType: research-article / Full publication date: Jul., 1988 / Copyright 1988 Water Environment Federation. 235
- [54] Chen H. Chang Z. Zou H. Xian Q., Hu L. Removal of nutrients and veterinary antibiotics from swine wastewater by a constructed macrophyte floating bed system. *Journal of environmental management*, 91(12):2657–2661, 2010. 235
- [55] E. Ā-bek and H. Hasar. Role of duckweed (*Lemna minor* l.) harvesting in biological phosphate removal from secondary treatment effluents. *Fresenius Environmental Bulletin*, 11(1):27–29, 2002. 236
- [56] M. Chassany. *Eichhornia crassipes*: production in repeated harvest systems on waste water in the languedoc region (France). *Biomass*, 7(2):135–160, 1985. 236