

Artículo de Investigación

Evaluación de un sistema a escala laboratorio, de un filtro de macrófitas en flotación como tratamiento de aguas residuales de un autolavado

Evaluation of a laboratory-scale system of a floating macrophyte filter as wastewater treatment of a car wash

Avaliação de sistema em escala de laboratório, de um filtro de macrófitas flutuantes como tratamento de águas residuais de um centro de lavagem automática

Geraldine Isabel Garavito Bermúdez^{a,*} | Laura Vanessa Ospina Romero^b | Diana Carolina Ospina Mora^c

^a <https://orcid.org/0000-0003-1892-4204>

^b <https://orcid.org/0000-0003-1302-4450>

^c <https://orcid.org/0000-0002-3635-0307>
Universidad Libre, Bogotá, Colombia

- **Fecha de recepción:** 2019-07-19
- **Fecha concepto de evaluación:** 2019-11-12
- **Fecha de aprobación:** 2019-11-18
<http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v12i1.977>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Garavito Bermúdez, G. I., Ospina Romero, L.V., & Ospina Mora, D. C. (2020). Evaluación de un sistema a escala laboratorio, de un filtro de macrófitas en flotación como tratamiento de aguas residuales de un autolavado. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 12(1), 10-20. <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v12i1.977>

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos de un sistema de filtro que emplea macrófitas en flotación a escala de laboratorio, usando aguas provenientes de un autolavado. Se utilizaron el Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) y Lenteja de Agua (*Lemna minor*), y se realizó un monitoreo durante un mes de las concentraciones de DBO5, DQO, SST y SS en el efluente del sistema. En cuanto a la reducción de los parámetros analizados empleando Jacinto de Agua, hubo un máximo de 91,11% de remoción de DBO5 y 97,32% de DQO. En el caso de la Lenteja de Agua se obtuvo 97% de remoción de DBO5 y 83,67% para DQO. Finalmente, el sistema demostró un desempeño óptimo y eficiencias de remoción superiores al 44,4% en cuanto a materia orgánica, sólidos sedimentables y suspendidos

Palabras clave: tratamiento biológico, agua residual, vertimiento, plantas macrófitas



* Autor para correspondencia. Correo electrónico: geraldinei-garavitob@unilibre.edu.co

SUMMARY

This study aims to evaluate the efficiency of the removal of organic matter and solids from a filter system that uses macrophytes in flotation on a laboratory scale, using water from a car wash. Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Water Lentil (*Lemna minor*) were used, and the BOD₅, COD, OSS and SS concentrations were monitored for one month in the system's effluent. In relation to the reduction of the parameters analyzed using Water Hyacinth, there was a maximum of 91.11% removal of BOD₅ and 97.32% removal of COD. In the case of the Water Lentil, 97% removal of BOD₅ and 83.67% for COD was obtained. Finally, the system demonstrated optimum performance and removal efficiencies greater than 44.4% in terms of organic matter, sedimentable and suspended solids.

Keywords: biological treatment, wastewater, dumping, macrophyte plants

SUMÁRIO

Este estudo tem como objetivo avaliar a eficiência da remoção de matéria orgânica e sólidos de um sistema de filtragem que usa macrófitas flutuantes em escala de laboratório, utilizando a água de um centro de lavagem automática. Foram utilizados o Jacinto-de-água (*Eichhornia crassipes*) e a Lentilha-de-água (*Lemna minor*) e as concentrações de DBO₅, DQO, SST e SS foram monitoradas por um mês no efluente do sistema. Em relação à redução dos parâmetros analisados utilizando Jacinto-de-água, houve um máximo de 91,11% de remoção de DBO₅ e 97,32% de DQO. No caso da Lentilha-de-água, foram obtidas 97% de remoção de DBO₅ e 83,67% de DQO. Finalmente, o sistema demonstrou desempenho ótimo e eficiências de remoção superiores a 44,4% em termos de matéria orgânica, sólidos sedimentáveis e em suspensão.

Palavras-chave: tratamento biológico, água residual, descarga, plantas macrófitas

En el mundo, más del 80% del agua residual se vierte al medioambiente sin ningún tipo de tratamiento y en países de altos ingresos se tratan alrededor del 70% de las aguas residuales municipales e industriales (WWAP, 2017). En Colombia, la afectación a la calidad del agua se atribuye a las descargas de agua residual generadas tanto por el sector doméstico como el industrial, en donde este último representa el 22% DBO₅, 67% DQO, 10% SST y 1% de nutrientes de la carga contaminante de las mismas (IDEAM, 2018).

Una de las actividades económicas industriales que ha contribuido a la afectación del recurso hídrico y de la red de saneamiento de la ciudad de Bogotá, son los autolavados que de acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente (2010), consumen un promedio de agua de 100 m³/mes. Asumiendo que 92 establecimientos pidieron permiso de vertimientos ante la Secretaría Distrital de Ambiente (El Tiempo, 2019), entonces se generan aproximadamente

(desconociendo los porcentajes de recirculación) 9.200 m³/mes de vertimientos a la red de la ciudad.

A su vez, este sector económico también incumple desde el punto de vista normativo, los valores máximos permisibles que se establecen para las descargas de agua residual al sistema de alcantarillado público, como resultado de los productos que se emplean para esta actividad y los procesos de lavado que se llevan a cabo. Lo anterior, teniendo en cuenta los resultados presentados por la Secretaría Distrital de Ambiente (2011) a los efluentes industriales, se determina que los parámetros de mayor incumplimiento legal por parte de los autolavados son grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno.

Por lo anterior, es importante plantear mecanismos que permitan el manejo integral del recurso hídrico y el tratamiento que debe gestionarse a los vertimientos realizados por esta actividad económica. El World Bank Group (2018) establece soluciones para que las ciudades

que quieran adoptar estrategias, incentiven el consumo óptimo del recurso mediante técnicas de reutilización que exigen niveles de tratamiento más bajos, lo que se traduce en un mínimo costo; además, pueden implementarse en actividades con fines urbanos como el riego paisajístico, procesos de lavado y limpieza y en algunas etapas de procesos industriales, que no requieran una calidad especial en el agua, logrando así disminuir la generación de impactos ambientales y evitando soluciones de final de tubo.

Por consiguiente, en este artículo de investigación se evaluó un tipo de sistema que permita la reutilización del agua para ser usada en los procesos productivos del autolavado. Como lo indican Ceschin, Sgambato, Ellwood y Zuccarello (2019), los filtros con plantas macrófitas son una alternativa sostenible de tratamiento al ser factibles y eficaces; su mantenimiento y operación resulta práctico y presenta un bajo costo en su montaje en comparación con los sistemas de tratamiento convencional, que por lo general implican el uso de compuestos químicos.

En estos sistemas, la biomasa vegetal impide el paso del sedimento manteniendo una actividad microbiana constante en el funcionamiento del sistema y se incorpora al paisaje agregando un valor estético y natural (Ramos, Rodríguez & Martínez, 2007). Este sistema puede proporcionar un tratamiento secundario y terciario al agua residual por medio de la acción microbiana desarrollada en las macrófitas (Al-Khafaji, Al-Ani & Ibrahim, 2018; Amare, Kebede & Mulat, 2018; Teles, Mohedano, Tonon, Belli-Filho & Costa, 2017).

Se ha mostrado que se obtienen reducciones entre el rango de 21% y 91% para SST y DBO_5 , entre 95%-90,2% para la DQO (Martelo & Lara, 2012). Además, han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, mercurio, lo cual puede ocurrir mediante reacciones en las cuales intervienen los microorganismos adheridos al sistema radicular de las plantas (Shah, Hashmi & Ghumman, 2014).

Según Daud et al. (2018), la Lenteja de Agua (*Lemna minor*) presenta alta eficacia para la extracción de metales pesados, materia orgánica, y sólidos en suspensión de las aguas residuales. De igual manera, es adaptable a climas fríos y cuenta con una alta tasa de crecimiento, vive en un rango de temperatura de 6 °C a 33 °C, pH de 6 a 7,5 y 0,5 m de profundidad para el estanque donde se sitúa

dicha planta (Ekperusi, Sikoki & Nwachukwu, 2019). Como lo explican Hasan y Chakrabarti (2009), los sistemas que utilizan estas plantas pueden eliminar el 99% de los nutrientes, DBO_5 y sólidos disueltos por el método de bioacumulación. Por otra parte, el Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*), de acuerdo con Newete y Byrne (2016), tiene la capacidad de adaptarse y desarrollarse a niveles considerables de nutrientes en el medio acuático, sobrevive en un rango de temperaturas de 1 °C a 40 °C con un crecimiento favorable ente 25 °C y 27,5 °C y en un pH de 6 a 8 (Koutika & Rainey, 2014). Por ello, es utilizado para tratar aguas residuales con trazas de metales pesados y otros contaminantes inorgánicos y orgánicos derivados de descargas industriales.

Con base en lo anterior, a través de la evaluación experimental del filtro de macrófitas con Lenteja de Agua y Jacinto, se analizó la variación en la reducción de SS, SST, DQO, DBO_5 , y pH con agua residual de un autolavado en la ciudad de Bogotá.

■ Materiales y métodos

Teniendo en cuenta los componentes del filtro de macrófitas en flotación, se determinó la metodología experimental a partir de las variables que condicionan el funcionamiento del sistema como lo son el agua residual, el Jacinto de Agua y la Lenteja de Agua, el diseño técnico y el análisis de los parámetros objeto de monitoreo.

Se realizó el diseño del sistema de macrófitas en flotación usando vidrio y piezas de PVC, con base en los cálculos de un tiempo de retención hidráulico de 10 días. Las plantas se recolectaron del vivero “Sembramos” un mes antes de su contacto con el agua residual.

■ Agua residual

El agua residual se obtuvo de un autolavado ubicado en el barrio Florencia al noroccidente de la ciudad de Bogotá, Colombia. Según la ubicación del establecimiento, en la IDECA (Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital, 2018) está ubicado en uso del suelo residencial, vertiendo el agua residual directamente a la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá.

Para determinar el día del muestreo del análisis del agua residual, de manera coordinada se estableció con la

administración del autolavado, los días en los que se había presentado la mayor cantidad de los servicios de limpieza de vehículos, y con base en esos días (miércoles y viernes), se realizó la recolección de las muestras a partir del instructivo para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM (TI 0187).

■ Plantas macrófitas en flotación

Para este estudio se utilizaron el Jacinto de Agua y la Lenteja de Agua por las características descritas anteriormente, por su amplia disponibilidad en los humedales de la ciudad de Bogotá y las condiciones ambientales severas que soportan (Sukumaran, 2013). Dichas macrófitas se sometieron a un proceso de aclimatación durante un mes en contacto con agua limpia para evitar falsos positivos durante la prueba con el agua del autolavado.

■ Diseño del sistema de filtro de macrófitas en flotación

El filtro de macrófitas en flotación reúne características de dos modelos de tratamiento por medio de mecanismos naturales como lo son los humedales artificiales de flujo superficial y los sistemas acuáticos. Este modelo fue desarrollado y patentado por el Grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal de la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid en el 2001 (Beascoechea, Muñoz, Fernández & Fernández, 2001).

Para el presente proyecto el sistema estuvo compuesto por tres tanques con una inclinación de 2% con el fin de que el sistema trabajara por gravedad. En el tanque del tercer nivel estuvo depositada el agua residual a tratar del autolavado, en el segundo nivel el tanque estuvo dividido en dos (un lado para la Lenteja de Agua y otro para el Jacinto) y en el tanque del último nivel, caía el agua tratada a partir de dicho filtro. Lo anterior se observa en la figura 1 y en la foto 1.

Se eligió un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 10 días, según lo descrito por Medina, Ortega de Miguel y Salas (2012) y la Escuela de Organización Industrial (2016). De esta forma, el caudal de tratamiento fue de 8 L/día y una superficie de plantación de 0,160 m², funcionando en tres tandas (o batches), de construcción propia. El flujo del agua se controló con una llave de paso.

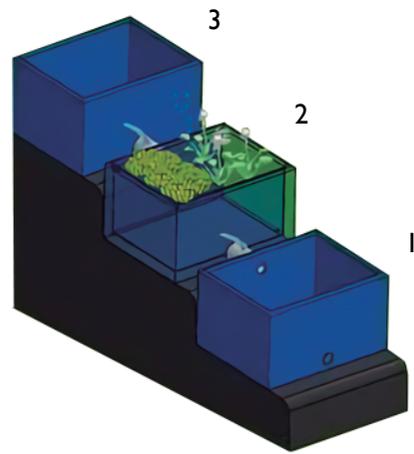


Figura 1. Diseño de filtro de macrófitas en flotación.



Foto 1. Montaje del filtro de macrófitas en flotación.

■ Análisis del agua residual

La caracterización físico-química del agua tanto al inicio de las pruebas como en los controles de los dos efluentes (efluente de la Lenteja y efluente del Jacinto), se determinó utilizando las técnicas del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Los parámetros analizados se fundamentaron en el desempeño principal que tienen las plantas macrófitas utilizadas en la remoción

de contaminantes y en los que han conllevado un mayor incumplimiento normativo en vertimientos al alcantarillado por el sector económico evaluado, los cuales se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de evaluación y análisis

Parámetro	Técnica de análisis	Método de referencia
DQO	Micro DQO: reflujo abierto	Standard methods 5220B
DBO ₅	Incubación cinco días y oxímetro	Standard methods 4500 – O-G
pH	Electrométrico	Standard methods 4500- H+
SST	Gravimétrico 103-105C	Standard methods 2540 D
SS	Cono Imhoff	Standard methods 2540 F

Fuente: *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 22ª edición, 2012.

Índice de biodegradabilidad

La relación DBO₅/DQO es un factor que indica la biodegradabilidad de las aguas residuales y de acuerdo con el valor obtenido se clasifica en biodegradabilidad baja ($\leq 0,2$), normal (0,2-0,4) y alta ($\geq 0,4$). Cuanto menor es este índice, mayor es la fracción de componentes difícilmente biodegradables (Barrera et al., 2018).

Resultados

A partir de la implementación del sistema de filtro de macrófitas en flotación empleando el Jacinto de Agua y la Lenteja de Agua, se realizó la caracterización físico-química del agua residual en los tres batches (días 0, 10, 21), es decir, tres secuencias de tratamiento con un TRH = 10 días.

pH

De manera general, el pH disminuyó aproximadamente 1,5 unidades para cada una de las tandas para ambas plantas.

En el caso de la Lenteja de Agua el menor valor obtenido fue 6,55 unidades de pH a los 32 días de tratamiento; que comparado con lo reportado por Daud et al. (2018) de 6,8 para el tratamiento de lixiviado de vertedero. Por otro lado, a los 10 días se obtuvo una reducción de 0,68 unidades, siendo una disminución mayor que la reportada en este mismo tiempo por Priya, Avishek y Pathak (2012), el cual fue de 0,33 unidades.

Además, para el Jacinto de Agua en el primer batch el valor obtenido fue de 7,24, este valor es menor al reportado por Mello et al. (2019), los cuales obtuvieron un valor de 7,34, ambos comenzando en las mismas unidades de pH 8.

Con estas variaciones, ambas plantas mostraron ser resistentes a la variación del pH, al menos en 1,5 unidades (véase figura 2).

Demanda química de oxígeno (DQO)

Para el caso de este estudio se presentaron reducciones máximas del 83,67% y 97,32% para el sistema que contenía Lenteja de Agua y Jacinto de Agua, respectivamente, durante los 32 días de tratamiento. En lo que corresponde a la Lenteja de Agua y de acuerdo con lo reportado por autores como Daud et al. (2018), establecieron que la Lenteja

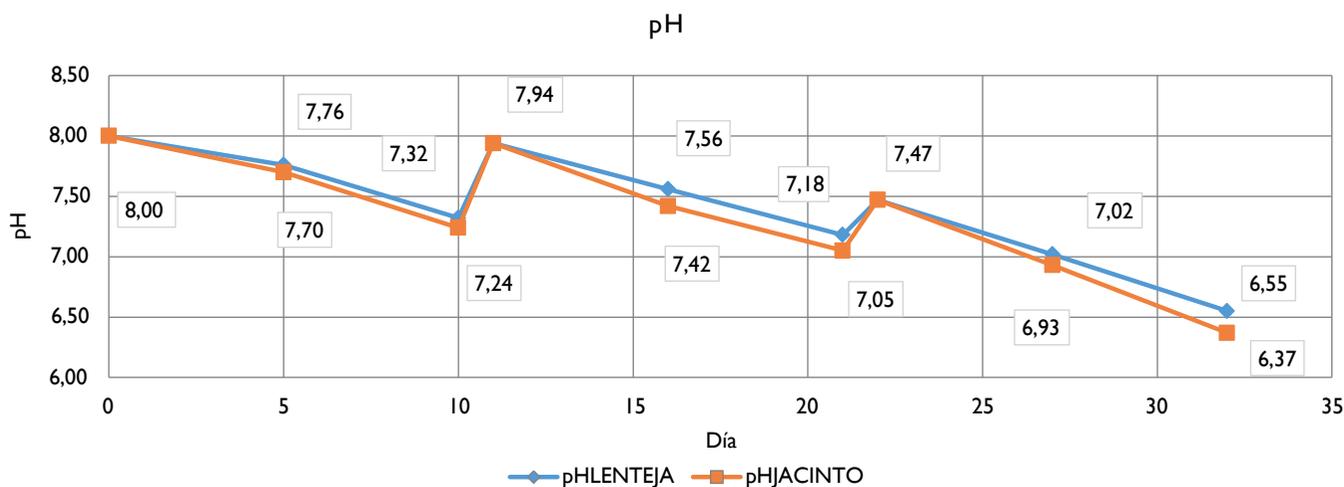


Figura 2. Variación del pH. Fuente: elaboración propia (2019).

de Agua presentó una reducción del 39% al efectuar el tratamiento de lixiviados de vertedero, lo que demuestra que para el tratamiento del agua residual de los autolavados se presenta un mejor desempeño (véase figura 3).

En cuanto al Jacinto de Agua, se obtuvo una reducción superior a la reportada por Martelo y Lara (2012), que fue del 72,6% para el tratamiento de agua residual industrial. Por otra parte, Mello et al. (2019) presentaron una reducción del 62%, por lo que puede inferirse que para este tipo de agua residual de autolavados el Jacinto de Agua representa una posibilidad favorable respecto al tratamiento que puede efectuar.

Por otra parte, se evidencia que en el día 5 del primer batch se obtuvo una remoción mayor que el equivalente al día 5 del segundo batch (día 16 en la gráfica), debido a que se presentó pérdida de biomasa en las plantas empleadas, manifestada en marchitamiento y amarronamiento de las mismas y además hubo olores, debido a una variación en las condiciones de oxígeno disuelto en los reactores. Luego de esa variación, los valores de remoción se incrementaron aproximadamente en 45,28 unidades porcentuales.

■ Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

Para el primer batch, se evidenció la mayor remoción de la DBO₅ (91,11% y 97% para Jacinto y Lenteja de Agua, respectivamente). Esto se atribuye a una mayor disponibilidad de oxígeno por la menor cobertura por parte de

las macrófitas en la superficie del tanque que permite una mayor eliminación aeróbica y, a su vez, existe una menor concentración de compuestos orgánicos y nutrientes adheridos al sistema radicular de las plantas macrófitas (véase figura 4).

De manera similar, en el segundo batch disminuyó el porcentaje de remoción, pero en este caso cayó la remoción hasta en 57,41% para el Jacinto de Agua y en 44,40% para la Lenteja de Agua. No obstante, durante el tercer batch aumentó el porcentaje de remoción respecto al segundo, seguramente debido al proceso de reaclimatación por parte de las plantas.

Al final del tercer batch, se obtuvo una reducción de 79,56% de la DBO₅ empleando la Lenteja de Agua y del 86,69% para el caso del Jacinto de Agua durante 32 días. Dichos porcentajes de reducción son similares en comparación con otros estudios como el de Priya et al. (2012), donde se registró una disminución del 94,45% de la DBO₅ en presencia de la Lenteja de Agua para el tratamiento de agua residual doméstica e industrial en un sistema de flujo continuo; y, por último, el estudio de Lagos (2005) el cual determinó una reducción entre el 62,5% y 75% de dicho parámetro a los 21 días de tratamiento de un efluente industrial empleando Jacinto de Agua en un sistema que operaba por batches.

En las fotos 2, 3 y 4 se evidencia la variación del agua cruda del autolavado y el cambio que tuvo al emplearse el filtro con la Lenteja de Agua y el Jacinto en el día 32.

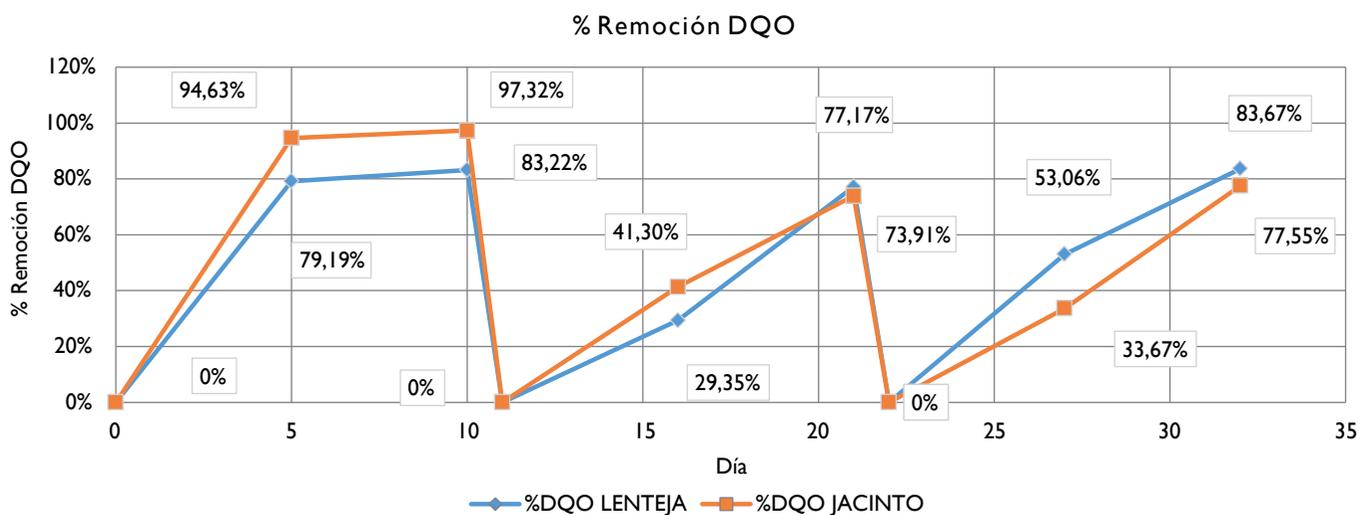


Figura 3. Porcentaje de remoción DQO.

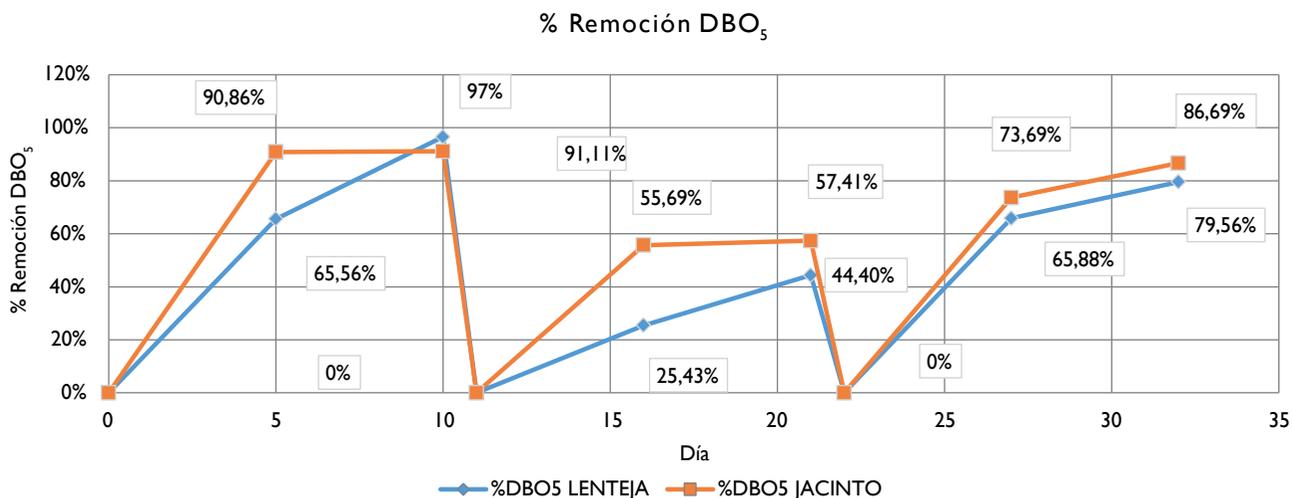


Figura 4. Porcentaje de remoción DBO₅.

Sólidos suspendidos totales (SST)

Mediante el proceso de filtración y adsorción de las raíces de las plantas macrófitas (tapiz filtrante) se obtuvo una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales con la Lenteja de Agua del 69,23% y del 84,62% para el tratamiento del agua residual con Jacinto de Agua. Esta última registró un porcentaje superior de remoción, puesto que sus raíces son más largas y, por ende, tienen un mayor contacto con el agua residual a tratar en comparación con la Lenteja de Agua. Estos valores de remoción se confron-

taron con la investigación de Martelo y Lara (2012), la cual establece disminuciones que se encuentran entre el rango del 21% y 91% para las dos plantas macrófitas empleadas para agua residual doméstica e industrial, y el estudio de Magar (2017) determinó una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales del 70,11% en el tratamiento de agua residual doméstica, utilizando Jacinto de Agua, lo que demuestra que el valor obtenido para este caso de estudio es óptimo frente al tratamiento de este tipo de agua residual con dicha macrófita (véase figura 5).



Foto 2. Montaje del filtro de macrófitas en flotación día 1.



Foto 3. Montaje del filtro de macrófitas en flotación día 10.

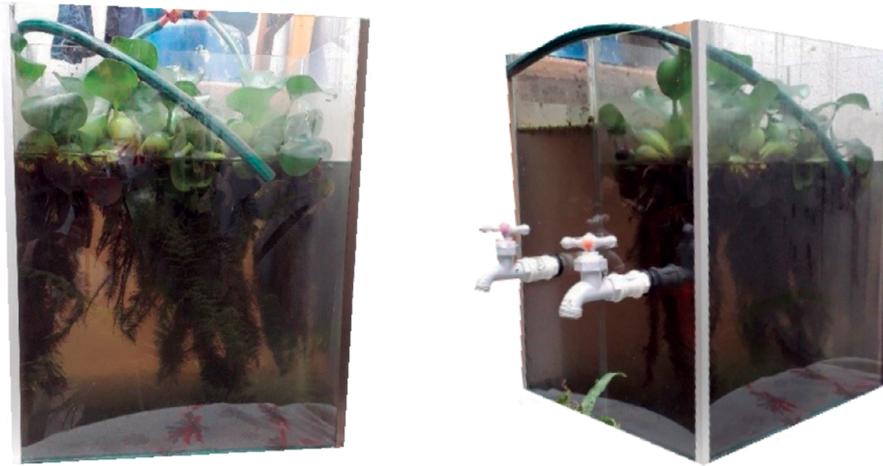


Foto 4. Montaje del filtro de macrófitas en flotación día 32. Fuente: autoría propia (2019).

En el día 5 del primer batch, el Jacinto de Agua eliminó una menor cantidad de SST, tal vez porque no completaba su proceso de aclimatación en comparación con la Lenteja de Agua. A partir del segundo batch, el Jacinto tuvo un rendimiento óptimo y constante.

■ Sólidos sedimentables (SS)

Con respecto a la remoción de los sólidos sedimentables, tanto el sistema radicular como el TRH actuaron de manera importante. En ambos reactores, en los tres batches se obtuvo una remoción promedio de 99,44% (los resultados fueron inferiores a 0,01 ml/L). De modo que este tipo de sistemas de tratamiento para el agua residual de autolavados representa una alternativa factible con un óptimo rendimiento en cuanto a la remoción de estas partículas sólidas (véase figura 6).

En las fotos 5, 6 y 7 se puede apreciar la decantación de sólidos dentro del tanque, en la medición del día 15 y los sólidos adheridos a las raíces.

■ Índice de biodegradabilidad

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de DBO₅ y DQO del agua cruda en los tres batches, se procedió a calcular el índice de biodegradabilidad para el agua residual del autolavado, con el fin de establecer la concentración de materia orgánica presente en el agua y la fracción de componentes que tendrán una mayor o menor biodegradabilidad, lo que dio como resultado (véase tabla 2).

Tabla 2. Índice de biodegradabilidad de agua cruda del autolavado de Florencia

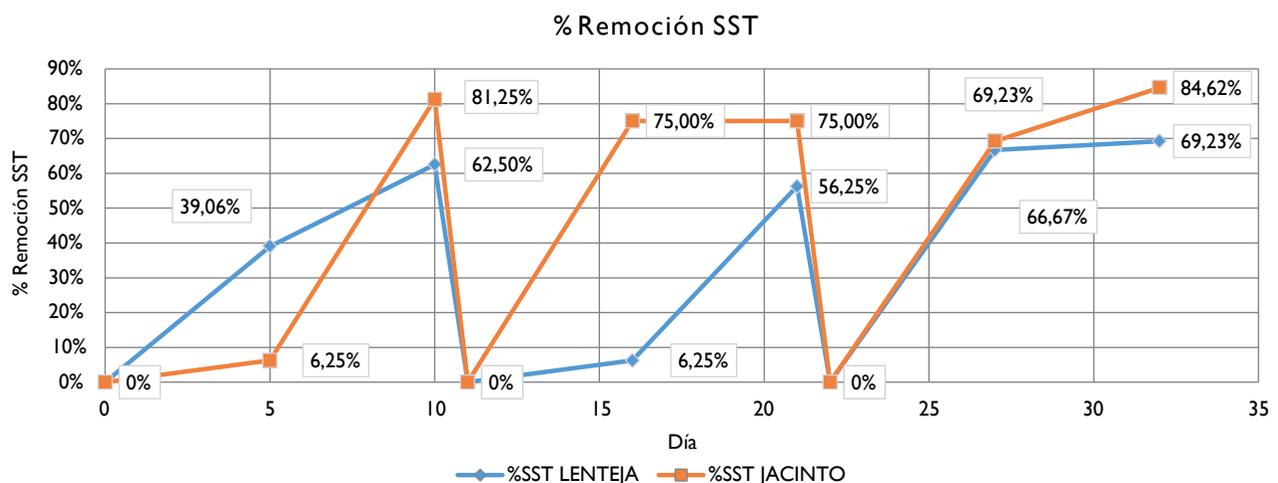


Figura 5. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales.

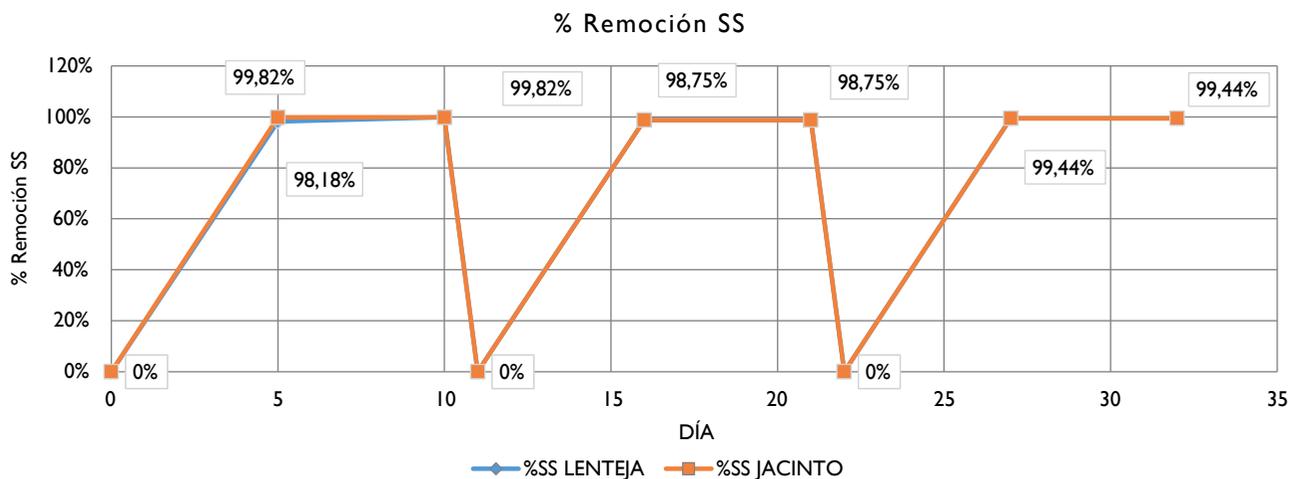


Figura 6. Porcentaje de remoción de sólidos sedimentables.

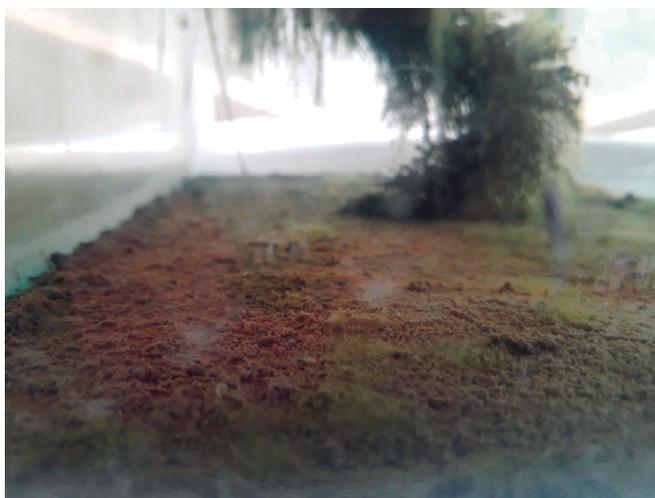


Foto 5. Sólidos sedimentados en el tanque de Jacinto de Agua.



Foto 7. Sólidos adheridos a las raíces de la Lenteja de Agua.



Foto 6. Sólidos sedimentados en el tanque de Lenteja de Agua.

BATCH	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	DQO (mg O ₂ /L)	IBD
Primer Batch	60,75	476,8	0,12741191
Segundo Batch	43,5	294,4	0,14775815
Tercer Batch	47,7	313,6	0,15210459

Esto indica que la materia orgánica presente en el agua residual fue difícil de degradar, en comparación con las condiciones óptimas que establece Metcalf y Eddy (2013), las cuales indican que este índice debe ser superior a 0,3 e inferior a 0,8. Dicho comportamiento puede evidenciarse en las figuras 3 y 4, en la operación del segundo batch en donde el porcentaje de remoción fue inferior respecto a los batches 1 y 3.

■ Conclusiones

El sistema empleado a escala laboratorio en batch con Lenteja de Agua y Jacinto de Agua demostró un desempeño óptimo y eficiencias de remoción superiores al 44,4% en cuanto a materia orgánica, sólidos sedimentables y suspendidos, debido a los procesos que se llevan a cabo en este tratamiento biológico como la filtración, adsorción y absorción.

Por otra parte, el índice de biodegradabilidad señala que el agua residual del autolavado presentaba dificultad para degradar la materia orgánica presente. Sin embargo, al realizar el tratamiento se obtuvo una reducción de la materia orgánica, sin observar muerte (o pérdida significativa) del Jacinto de Agua y de la Lenteja de Agua, así se demuestra que estas plantas son las indicadas para realizar el tratamiento.

En cuanto a la eficiencia de remoción, cada planta representa un valor superior a la otra dependiendo del parámetro de estudio. Para el caso de la DBO_5 con la Lenteja de Agua, se obtuvo una remoción máxima del 97%; mientras que con Jacinto de Agua fue del 91,11%. Con respecto a la DQO, la Lenteja tuvo una remoción del 83,67% y el Jacinto registró una disminución de 97,32%. Por último, para los sólidos suspendidos totales este valor representó una reducción del 69,23% empleando la Lenteja de Agua y del 84,62% para el tanque con Jacinto de Agua.

Este tipo de sistema con macrófitas flotantes representa una alternativa factible de implementación por su considerable eliminación de los principales parámetros evaluados por las autoridades ambientales; lo que, a su vez, permite integrar nuevamente el agua tratada al ciclo productivo mediante la reutilización de la misma en los diferentes procesos que se llevan a cabo en el autolavado, sin requerir mano de obra tecnificada ni compuestos químicos adicionales para el tratamiento. También disminuye la generación de impactos ambientales adicionales por el uso de este tipo de productos y los costos para el usuario del sistema.

Gracias a los óptimos resultados obtenidos en cuanto a remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables que se presentan con estos sistemas, hay potencial de adaptación a otros procesos industriales que manejen aguas residuales de características similares. Además, por su bajo costo de operación y montaje permite mayor accesibilidad a diversos sectores económicos, generando así una reducción de los vertimientos

de aguas residuales al alcantarillado y disminuyendo la crisis de abastecimiento hídrico que se viene presentando.

■ Referencias

- Al-Khafaji, M. S., Al-Ani, F. H., & Ibrahim, A. F. (2018). Removal of some heavy metals from industrial wastewater by *Lemna minor*. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1077-1082. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-017-1112-x>
- Amare, E., Kebede, F., & Mulat, W. (2018). Wastewater treatment by *Lemna minor* and *Azolla filiculoides* in tropical semi-arid regions of Ethiopia. *Ecological Engineering*, 120, 464-473. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.005>
- Barrera, L., Díaz, A., López, E., Medina, E., Rivera, M., & Vallester, E. (2018). Evaluación del desempeño del filtro biológico de la Universidad Tecnológica de Panamá. <http://dx.doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1863>
- Beascoechea, E., Muñoz, J., Fernández, D., & Fernández, J. (2001). *Manual de fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ceschin, S., Sgambato, V., Ellwood, N. T. W., & Zuccarello, V. (2019). Phytoremediation performance of *Lemna* communities in a constructed wetland system for wastewater treatment. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 67-71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.007>
- Consulta realizada el día 26 de marzo del 2018 en el portal IDECA, Mapa de Referencia para el Distrito Capital, de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital – UAEC.
- Daud, M. K., Ali, S., Abbas, Z., Ihsan, E. Z., Muhammad, A. R., Malik, A., Hussain, A., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., & Shui, J. Z. (2018). Potential of duckweed (*Lemna minor*) for the phytoremediation of landfill leachate. *Journal of Chemistry*. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/3951540>
- Ekperusi, A. O., Sikoki, F. D., & Nwachukwu, E. O. (2019). Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere*, 223, 285-309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.025>
- El Tiempo. (2019). ¿Quién regula los lavaderos de vehículos en Bogotá? Recuperado de <https://www.eltiempo.com/bogota/quien-regula-los-lavaderos-de-carro-en-bogota-322934>.
- Escuela de Organización Industrial. (2016). *Filtros verdes. Humedales. Macrófitas. Módulo de gestión de aguas residuales y reutilización*. España: Escuela de Organización Industrial.

- Hasan, M., & Chakrabarti, R. (2009). *Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- IDEAM. (2018). *Reporte del Estudio Nacional del Agua ENA 2018*. Bogotá, D. C. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023846/Avance_ENA.pdf.
- Koutika, L. S., & Rainey, H. (2014). A review of the invasive, biological and beneficial characteristics of aquatic species *Eichhornia crassipes* and *Salvinia molesta*. *Applied Ecology and Environmental Research*, 263-275. http://dx.doi.org/10.15666/aer/1301_263275
- Lagos, C. (2005). *Utilización del Jacinto acuático (Eichhornia crassipes) ([Mart] Solms, 1883) como sistema de tratamiento para la eliminación de materia orgánica y color en efluente de celulosa Kraft* (Tesis de grado). Concepción: Universidad Católica de la Santísima Concepción. Facultad de Ciencias.
- Magar, R., Khan, A., & Honnutagi, A. (2017). *Waste water treatment using Water Hyacinth*. Conference: Innovation in engineering: Competitive strategy perspective, At 32nd Indian Engineering Congress, The Institution of Engineers (India).
- Martelo, J., & Lara-Borrero, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243.
- Medina, Y., Ortega de Miguel, E., & Salas, J. (2012). Tendencias actuales en las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. *Ingeniería Civil*, 131-143.
- Mello, D., Carvalho, K. Q., Passig, F. H., Freire, F. B., Borges, A. C., Lima, M. X., & Marcelino, G. R. (2019). Nutrient and organic matter removal from low strength sewage treated with constructed wetlands. *Environmental Technology*, 11-18. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2017.1377291>
- Metcalf & Eddy, I., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. 5th ed. McGraw-Hill Education.
- Newete, S. W., & Byrne, M. J. (2016). The capacity of aquatic macrophytes for phytoremediation and their disposal with specific reference to water hyacinth. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(11), 10630-10643. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6329-6>
- Priya, A., Avishek, K., & Pathak, G. (2012). Assessing the potentials of *Lemna minor* in the treatment of domestic wastewater at pilot scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 4301-4307. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-011-2265-6>
- Ramos-Espinosa, M. G., Rodríguez-Sánchez, L. M., & Martínez-Cruz, P. (2007). Uso de macrófitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo. *Hidrobiológica*, 17(Supl. 1), 7-15.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). *Guía para la gestión y manejo integral de residuos servicio de lavado de vehículos*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *VIII fase del programa de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá, D. C.* Bogotá. Recuperado de http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=d9f9aa45-8f74-4f56-99ba-2836cffb8983&groupId=10157.
- Shah, M., Hashmi, H. N., Ali, A., & Ghumman, A. R. (2014). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12, 1-12.
- Sukumaran, D. (2013). Phytoremediation of heavy metals from industrial effluent using 2308 constructed wetland technology. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 1, 92-97. <http://dx.doi.org/10.12691/aees-1-5-4>
- Teles, C. C., Mohedano, R. A., Tonon, G., Belli-Filho, P., & Costa, R. H. R. (2017). Ecology of duckweed ponds used for nutrient recovery from wastewater. *Water Science and Technology*, 75(12), 2926-2934. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2017.172>
- World Bank Group. (2018). *Water scarce cities - Thriving in a finite world*. Washington, D. C.: World Bank. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/281071523547385102/pdf/125187-REVISED-WP-WI7100.pdf>.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017. Aguas residuales: el recurso desaprovechado*. París.