

Implementación de un sistema natural para tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Estudio de caso para una institución educativa del municipio de Malambo - Colombia.

Implementation of a natural system for wastewater treatment in rural areas. Case study for an educational institution in the municipality of Malambo - Colombia.

doi:<http://doi.org/10.23850/23899573.2382>

Recibido: 7.09.2019 Aceptado: 27.11.2020

José José Palacin Salcedo
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
josepalacin@misena.edu.co
Colombia

Jorge Luis Tanus
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
jltanus@misena.edu.co
Colombia

Iván David López Hoyos
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
idoopez81@misena.edu.co
Colombia

Cómo Citar:

Palacin, J., Tanus, J., López, I. (2020) Implementación de un sistema natural para tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Estudio de caso para una institución educativa del municipio de Malambo - Colombia. Revista SENNOVA: Revista del Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación, 5 (1), 92-103. doi: <http://doi.org/10.23850/23899573.2382>

RESUMEN

La presión que sufren los recursos hídricos ha generado una problemática muy amplia y compleja en todo el mundo. Los ecosistemas acuáticos han sido severamente afectados como consecuencia del estrés impuesto de forma directa o producida por las actividades antrópicas, lo que conlleva a consecuencias graves para la salud humana y el desarrollo económico. Esta afectación económica y social se da principalmente en las poblaciones más marginadas, sobre todo en aquellas que viven en zonas suburbanas o en aquellas zonas rurales que dependen directamente del consumo de agua de fuentes cercanas. Por esta razón, es prioritario que se investiguen nuevas tecnologías sostenibles o apropiadas de bajo costo que puedan influir en el desarrollo de la comunidad, estimulando los procesos de participación, aumentando los conocimientos técnicos de sus miembros y creando el sentimiento de apoderamiento de la tecnología, dando lugar a un mayor interés en su mantenimiento. Por esta razón, en el presente trabajo de investigación se empleó como ejemplo de tecnología de tratamiento los sistemas basados en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSSH) como alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales del municipio de Malambo, Atlántico. Estos sistemas, a lo largo de este estudio, demostraron ser eficientes para la remoción de materia orgánica y nutrientes, por lo que pueden constituirse en una estrategia para la mitigación de contaminantes en los principales afluentes de abastecimiento del municipio de Malambo.

Palabras Claves: *contaminación hídrica, reúso del agua, carga contaminante, salubridad, sostenibilidad ambiental.*

ABSTRACT

The pressure on water resources globally has generated a very broad and complex problem throughout the world. Aquatic ecosystems have been severely affected as a consequence of stress imposed directly or produced by anthropic activities. Which leads to serious consequences for human health and economic development. This economic and social impact occurs mainly in the most marginalized populations, especially in those who live in suburban areas or in those rural areas that depend directly on the consumption of water from nearby sources. For this reason, it is a priority to research new sustainable or appropriate, low-cost technologies that can influence the development of the community by stimulating participation processes, increasing the technical knowledge of its members and creating the feeling of ownership of technology, leading to increased interest in their maintenance. For this reason, in this research work, systems based on constructed horizontal subsurface flow wetlands (HC-FSSH) were used as an example of treatment technology, as a natural

alternative for wastewater treatment in rural areas of the Malambo municipality. - Atlantic. These systems throughout this study proved to be efficient for the removal of organic matter and nutrients, which is why they can become an alternative treatment for the mitigation of organic pollutants present in wastewater from small communities, as a strategy to reduce pollutants. in the main supply tributaries of the Malambo municipality.

Key words: *water pollution, water reuse, pollutant load, sanitation, environmental sustainability.*

INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para la vida, y el acceso a ella y al saneamiento no solo es un derecho humano sino que se considera un factor indispensable en cualquier análisis relacionado con la pobreza, pues un servicio inadecuado de agua y saneamiento aumenta los costos de subsistencia para la población más marginada, disminuyendo su potencial de ingresos y aumentando los riesgos para su vida. Más de 2.000 millones de personas en el mundo carecen de acceso a los servicios básicos de agua y saneamiento, asegura un informe mundial de la ONU sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWAP, 2019). De acuerdo con Bretas (2020), se estima que en América Latina menos del 28% del agua residual es tratada adecuadamente y muchos hogares, sobre todo en el medio rural, no están conectados a redes de drenaje, significando esto serios problemas ambientales y, por lo tanto, sociales y económicos en la región (Navarro, 2013).

Colombia posee 1.900 ciénagas con un área total de 478.418 ha, siendo el complejo cenagoso del río Magdalena el más importante, cubriendo unas 320.000

ha. Dentro de este complejo de ciénagas se encuentra la ciénaga de Malambo, que está ubicada en el departamento del Atlántico, con coordenadas geográficas 10°51'19" de latitud norte y a 74°45'23" de longitud oeste. Este recurso hídrico guarda un alto nivel de contaminación por la desembocadura del arroyo Caracolí, El Sapo y San Blas; sin embargo, es utilizada por la población de la zona para su consumo y llevar a cabo tareas domésticas (Meza, 2018).

El municipio de Malambo, como otros territorios del departamento del Atlántico, es vulnerable a la contaminación de las fuentes de agua debido a que presenta ciertas presiones que han ocasionado el deterioro de su ecosistema, como es el caso de la ciénaga de Malambo, que, debido a la sobrecarga de materia orgánica producida por los vertimientos de aguas residuales domésticas no tratadas, a la construcción de terraplenes sobre los canales de intercambio de agua, a las basuras y vertimientos que arrastran los arroyos temporales que desembocan en la ciénaga, ha visto disminuido su potencial de uso (CRA, 2012).

La contaminación del agua puede definirse como la alteración de sus condiciones naturales por la introducción

de sustancias, formas de energía o la combinación de ellas, que causen desequilibrio ecológico, por causas naturales o derivadas de la actividad humana que representa severos riesgos para los ecosistemas y la salud humana (Marrugo y Restrepo, 2014). Los ríos siempre han sido los más importantes recursos de agua dulce, y la mayoría de las actividades de desarrollo siguen siendo dependientes de ellos. Como ecosistemas, son intensamente modificados y contaminados por la actividad humana; los problemas de la calidad de sus aguas se han intensificado por el crecimiento de la población y la industria, además de cambios indiscriminados en el uso del suelo y la deforestación de sus riberas. Esto último incrementa la contaminación difusa, con la pérdida de la capa útil del suelo y la incorporación de fertilizantes químicos a las corrientes (Ramos y Aguilera, 2014). El agua contaminada es un vehículo importante para el transporte de patógenos, cada vez más resistentes a los antibióticos por el uso indiscriminado de estos y su presencia en el medio acuático (Ramos y Aguilera, 2014). Además de los contaminantes orgánicos persistentes, la presencia de productos de uso personal pone en la atención de académicos, políticos y público en general la seguridad química, indisolublemente ligada al desarrollo sostenible.

Para una gestión integral y sostenible del agua es fundamental tener en cuenta el reuso de aguas, que cuando se sustenta en el proceso de tratamiento, tiene como objetivo devolver al agua su calidad inicial de forma

parcial o total. Una vez las aguas son habilitadas, son especialmente indicadas para una gran variedad de usos industriales, agrícolas, domésticos y para la recarga de acuíferos. El reuso de aguas es una opción que ayuda a promover un uso sostenible del agua. Mediante la reutilización de agua se fomenta el uso racional del agua potable, diferenciando entre la calidad del agua necesaria para el consumo humano directo y la destinada para funciones de limpieza y transporte de residuo. En todo proyecto de reutilización de aguas se debe tener en cuenta los riesgos sanitarios para la salud pública, por este motivo es fundamental determinar los niveles de calidad adecuados para cada uso, así como el proceso de tratamiento para regenerar el agua con la finalidad de alcanzar los niveles de calidad establecidos previamente (García *et al.*, 2003).

Conciliar la aspiración a mejorar el bienestar de todos con el reconocimiento y respeto a los límites del entorno natural, de manera que se garantice su conservación, exige no solo un giro en los objetivos de esta política, sino un cambio en las escalas de valor y en la cultura que impregnan nuestra sociedad (Arrojo y Martínez, 1999; Arrojo, 2001). La llamada “Nueva Cultura del Agua” asume un nuevo enfoque holístico e integrador de valores en la gestión del agua. Este compromiso ético pasa por construir alternativas y ejemplos prácticos que se basen en la recuperación y conservación de los ecosistemas hídricos. En definitiva, se trata de vivir mejor con menos recursos, pero de mejor calidad y más equitativamente repartidos (Arrojo y Martínez, 1999; Arrojo, 2001; Grande *et al.*, 2001).

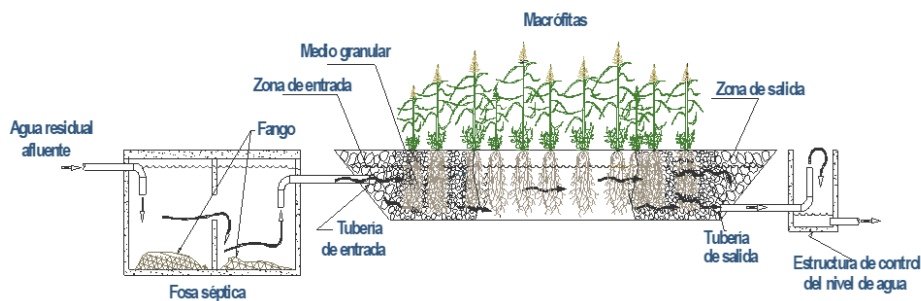


Figura 1. Diagrama de un humedal construido de flujo subsuperficial mostrando un tanque séptico como tratamiento primario y las estructuras de control del nivel del agua.

Fuente: Elaboración propia.

En entornos naturales, un conjunto de plantas, microorganismos, medio granular y agua residual constituyen el escenario donde se llevan a cabo los procesos de remoción de contaminantes. Los HC pueden ser de flujo superficial cuando el agua residual está en contacto con la atmósfera y de flujo subsuperficial si el agua circula por un manto de grava sin salir a la superficie. En los de flujo subsuperficial el caudal puede aplicarse en sentido vertical (desde arriba hacia abajo o viceversa) u horizontal (el agua circula horizontalmente desde una zona de entrada hasta una zona de salida). En la Figura 1 se pueden reconocer las estructuras típicas de un humedal construido de flujo horizontal.

La remoción de contaminantes en humedales construidos (HC) se atribuye a diferentes procesos, tanto bióticos como abióticos, que actúan simultáneamente e influyen unos en otros, por lo que resulta difícil la comprensión del sistema como un todo. Los mecanismos dependen considerablemente de las condiciones hidráulicas, el tipo y número de microorganismos presentes, las propiedades del agua que se trata y otras condiciones

ambientales. No obstante, predominan los procesos biológicos de remoción. Se considera también que las plantas juegan un papel positivo en el trabajo del humedal a través de diversos mecanismos de fitorremediación (Diordo *et al.*, 2011).

En varias regiones del mundo la aplicación de HC para mitigar el impacto por contaminantes en ríos y aguas superficiales ha revelado que el tratamiento de un río contaminado con HC debe focalizarse sobre la reducción de contaminantes de sus afluentes, precisamente en las tierras de inundación cerca de la confluencia de un afluente mayor (Zheng *et al.*, 2013). La aplicación de humedales construidos en países en vías de desarrollo con clima tropical se ha considerado una opción sostenible por las condiciones ambientales presentes que permiten una mayor actividad biológica y productiva que se ve reflejada en una mayor eficiencia en el tratamiento (Dong *et al.*, 2015).

En Taipei (China), Teng *et al.*, (2012) evaluaron los beneficios económicos y ambientales de un HC para tratar el agua municipal de una cuenca hidrográfica

urbana, concluyendo que los costos de dicha implementación estarían comprendidos entre 0.42 y 3.621 dólares por cada kg de DBO eliminada, mostrando un beneficio adicional sobre la recreación y educación ambiental respecto de un sistema convencional de tratamiento. Igualmente, en la China Central, como un estudio demostrativo, se evaluó el potencial ecológico de un HC para la restauración del río Jialu, considerando un área total de 7400 m², una carga hidráulica de 14 cm/d y una configuración que contempló plantas acuáticas emergentes, sumergidas y flotantes. Los resultados de este estudio revelaron eficiencias superiores al 70% en nutrientes y sólidos suspendidos, mejorando sustancialmente la calidad del agua (Wang *et al.*, 2012).

Las experiencias en Colombia han corroborado que los HC son una opción importante para considerar el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en zonas con clima tropical, donde se pueden obtener buenas eficiencias por presentar condiciones propicias para una mayor actividad biológica y productividad en comparación con climas templados. Estos sistemas hoy en día resultan ser una alternativa adecuada para el tratamiento de aguas residuales en países en vías de desarrollo, ya que son de bajo costo de construcción, de fácil operación y requieren de poco mantenimiento. Además, estos sistemas no requieren del consumo de combustibles fósiles ni reactivos químicos para su operación, lo que aumenta su sustentabilidad.

El presente trabajo de investigación plantea el uso de los sistemas naturales

de tratamiento de aguas residuales de humedales construidos (HC) como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales del municipio de Malambo, Atlántico. El estudio consideró la conveniencia de analizar a escala de mesocosmos la eficacia de los humedales construidos como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales del municipio de Malambo. En este caso, se reporta información relevante sobre la remoción de un grupo de compuestos (DQO, PO₄, NO₂, NO₃ y NH₄), mediante sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSSH) en las instalaciones de la institución educativa Eva Rodríguez Araujo de Malambo.

MATERIALES Y MÉTODOS

• Área de estudio

El área de estudio seleccionada para este proyecto correspondió a la Institución Educativa Eva Rodríguez Araujo, localizada en el municipio de Malambo, Colombia, en las coordenadas geográficas 10°51'30'' Norte y 74°46'40.00'' Oeste, como se muestra en la Figura 2. Malambo es un municipio del departamento del Atlántico, de tierras planas regadas por el río Magdalena, en las cuales se practica la ganadería y la agricultura, representada en el cultivo del algodón, el arroz, el mijo y la yuca. Cuenta con temperaturas entre 32°C con precipitaciones en promedio de 30% y su sistema de saneamiento básico y servicio de agua están a cargo de la empresa Aguas de Malambo S.A. E.S.P.

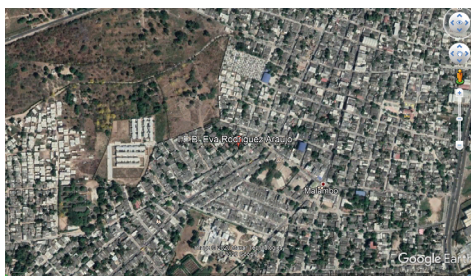


Figura 2. Localización del área de estudio

Diseño, montaje y operación del sistema

El diseño del sistema experimental consistió en dos humedales de flujo subsuperficial horizontal (HC-FSSH), consistente en tres contenedores plásticos de 0.02 m³ distribuidos en paralelo, tal y como lo muestra la Figura 3

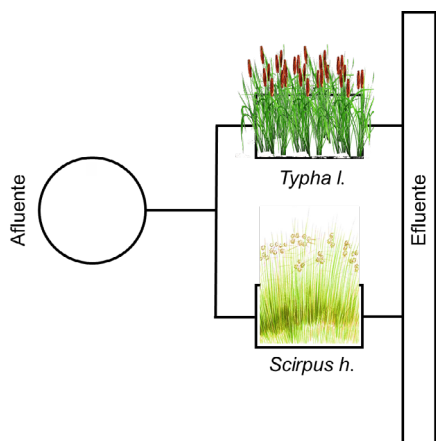


Figura 3. Diseño experimental con humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal

Los contenedores fueron rellenos con grava de río y plantados con *Scirpus holoschoenus* y *Typha latifolia*, las cuales fueron extraídas de áreas cercanas al área de estudio y transportadas hasta las instalaciones de la institución educativa para su aclimatación. Después de un mes de

adaptación y cuando las plantas adquirieron una altura de 0.30 m, fueron sembradas en los HC con una densidad de 8 plantas por humedal. In situ se midieron pH, temperatura (T °C) y turbiedad (UNF). El agua afluente con la materia orgánica y los nutrientes fue suministrada a los contenedores plásticos por gravedad desde un tanque plástico de 0.06 m³ de capacidad, mediante tubería PVC de 1/2 pulgada. Los sistemas fueron alimentados diariamente manejando caudales para mantener Tiempos de Residencia Hidráulica (TRH) de 1 y 3 días. En cada cambio de caudal se dejó un tiempo de adaptación y descanso para un período total de experimentación de 40 días. Esta campaña de muestreo fue repetida de forma idéntica para efectos de análisis de la eficiencia de tratamiento de materia orgánica y nutrientes. En el laboratorio se determinaron las concentraciones para la materia orgánica (DQO), nutrientes PO₄³⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ y NH₄⁺ de acuerdo con el Standard Methods (APHA, 2012), tanto en agua afluente como para cada uno de los efluentes. Las diferencias de los caudales de entrada y salida de los sistemas permitieron calcular la evapotranspiración, observada como la diferencia entre el agua de entrada y el de salida. El cálculo de las eficiencias de remoción se basó en la carga superficial de la materia orgánica expresada en mg m⁻² d⁻¹ para materia orgánica, nutrientes y sulfato.

Análisis estadístico de la información

La medición de la concentración de materia orgánica y nutrientes en agua afluente y efluente fue relacionada con los caudales medidos en la entrada y salida de cada humedal para establecer la carga superficial

de materia orgánica y nutrientes aplicada a los sistemas experimentales. Para determinar la influencia de las plantas, el TRH y el sustrato en la eliminación de materia orgánica y nutrientes se realizó un análisis de ANOVA factorial, corroborando la normalidad de los datos. La homogeneidad de varianzas se calculó a partir de cada combinación de tratamientos usando una prueba de rangos LSD a un nivel de significancia del 95%. Todos los análisis estadísticos fueron desarrollados usando el paquete estadístico STATISTICA 12 (Statsoft, US).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

• Influencia del tratamiento en algunos índices físico-químicos

Para ilustrar la efectividad general del sistema de tratamiento utilizado, en la Tabla 1 se describen los valores de pH,

turbiedad, temperatura, materia orgánica y nutrientes registrados en agua afluyente y efluente. Los resultados del ANOVA mostraron que tanto el sustrato como las plantas influyen significativamente en los valores de pH con tendencia hacia la neutralidad ($p=0.0345$ y $p=0.0000$). Este hecho resulta un factor importante para la degradación de materia orgánica en condiciones anaeróbicas, ya que las bacterias trabajan a pH entre 6.5 y 7.5, y variaciones de este rango pueden detener su función en sistemas de HC-FSSH. Las variaciones de turbiedad estuvieron relacionadas con el tipo de planta y el TRH ($p=0.0476$).

Los análisis de ANOVA sobre la eficiencia de remoción de DQO demostraron que esta estuvo principalmente influenciada por la presencia de las plantas y por el TRH, no así por el sustrato. (Tabla 2).

Tabla 1.

Valores promedios de pH, T °C, Turbiedad, materia orgánica, nutrientes observados en los sistemas de HC-FSSH evaluados en este estudio. Nota: 1 y 3 corresponden a los TRH en días

Parámetro	Afluente	HC-FSSH <i>Scirpus h</i>		HC-FSSH <i>Typha l.</i>	
		TRH 1 día	TRH 3 días	TRH 1 día	TRH 3 días
pH	8.3	7.1	7.0	7.0	7.0
T °C	30.5	25.4	26.7	26.5	24.0
Turbiedad UNT	12.9	1.8	1.3	0.9	0.7
DQO mg L ⁻¹	500	300	80.8	70.2	45.1
PO ₄ ³⁻ mg L ⁻¹	10	7.0	2.2	1.8	2.0
NO ₂ ¹⁻ mg L ⁻¹	0.3	0.1	0.08	0.06	0.03
NO ₃ ¹⁻ mg L ⁻¹	5.2	3.8	3.1	2.7	2.1
NH ₄ ⁺ mg L ⁻¹	12	4.0	3.6	3.8	3.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.
Resultados del ANOVA ($p < 0.05$) sobre los efectos de los factores (una vía) y sus interacciones (dos vías) sobre la eficiencia de eliminación de DQO. Diferencias estadísticamente significativas*

DQO	Sustrato	Tipo de planta empleada Plantas	TRH	Sustrato $\times$ Plantas	Sustrato $\times$ TRH	Plantas $\times$ TRH
	0.38506	0.0011*	0.0000	0.1000	0.3965	0.0058*

Fuente: Elaboración propia.

Las interacciones fueron observadas entre las plantas y el TRH. Así, las mayores eliminaciones se logran en presencia de plantas y altos TRH (Tabla 2). Es conocido que la eficiencia que la remoción de materia orgánica en humedales construidos mejora con largos TRH (Zhang *et al.*, 2012). Kadlec y Wallace (2009) consideran que TRH entre 3 y 10 días son razonables para alcanzar mayores eficiencias en sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial. De otra parte, la presencia de las plantas puede estar permitiendo un mayor crecimiento de la biopelícula en sus raíces, favoreciendo una mayor remoción.

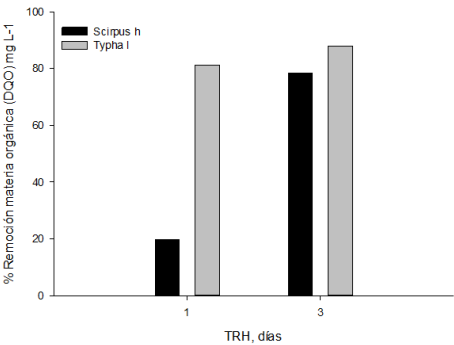


Figura 4. Eficiencia de remoción de materia orgánica (DQO) mg L⁻¹ observada en el sistema de HC-FSSH operado a TRH de 1 y 3 días

No obstante, las distintas rutas (físicas y químicas) de degradación de la materia orgánica pueden llevarse a cabo aun en ausencia de plantas, dado que el medio granular actúa como un filtro que puede atrapar la materia orgánica (Kadlec y Wallace, 2009).

Fosfatos

Las mayores eficiencias de remoción ocurrieron cuando el sistema fue operado a TRH de tres días. Estos resultados pueden estar relacionados con los mecanismos de remoción del fósforo que imperan en estos sistemas, como la adsorción, absorción por la planta y la asimilación microbiana. Además, las macrófitas pueden ejercer una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes (nitratos y fosfatos principalmente) (Delgadillo, 2010).

Nitrato y nitrato.

El análisis de ANOVA de efectos principales indicó que en las variables TRH, las plantas inciden significativamente sobre la eficiencia de remoción de nitrato. Este hecho puede estar atribuido al

efecto de asimilación de nitrógeno por parte de las plantas, quienes asimilan las formas inorgánicas del nitrógeno para formar compuestos orgánicos nitrogenados estructurales de la planta. Además, el nitrógeno es un macronutriente indispensable para las plantas; cuanto mayor es la tasa de crecimiento de la planta mayor es la extracción de nitrógeno (Möller, 2009).

Las mayores eficiencias de remoción (>50%) observadas ocurrieron en los sistemas plantados con *Typha l.* cuando estos sistemas fueron operados con TRH de 3 días. La eficiencia de variación de NO_3 en las muestras de agua efluente de los HC evaluados puede estar relacionada con procesos de nitrificación, debido a las reacciones de oxidación realizada por las bacterias del género *Nitrobacter*, quienes oxidan el NO_2 a NO_3 , que luego es absorbido por las plantas para sintetizar sus proteínas por medio de la fotosíntesis (Travis, 2012).

Amonio

El análisis de ANOVA para efectos principales indicó que la eficiencia de remoción NH_4 para los HC-FSSH evaluados puede estar relacionado con la presencia de plantas y el TRH. Es bien sabido que la remoción del NH_4 en sistemas de HC plantados está atribuida a la incorporación de oxígeno atmosférico a través de las plantas, que es transferido por medio del aerénquima al sistema de raíces, lo cual crea una zona aerobia en la rizósfera (Lim *et al.*, 2001). Este proceso favorece significativamente la nitrificación, la cual

ocurre en la rizósfera aerobia, donde el N amoniacal es oxidado a nitrato, el cual a su vez puede ser asimilado directamente por la planta o difundido en las zonas reductoras para ser convertido a NO_2 y N_2 vía desnitrificación heterótrofa (Vymazal *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

- Los resultados de este estudio demuestran, a manera de ejemplo, que el uso de sistemas HC-FSSH resulta ser eficiente para el tratamiento de aguas residuales, que puede ser adoptado por asentamientos de pequeñas comunidades en el municipio de Malambo como una alternativa para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes que afectan las fuentes de abastecimiento de este municipio.
- Las mayores remociones (> 85%) de materia orgánica en los sistemas de tratamiento estudiados se vio afectada por el tipo de planta utilizada (*T. latifolia*) y los mayores tiempos de retención hidráulico.
- El uso de plantas nativas como las evaluadas permiten demostrar que se adaptan con mucha más facilidad, lo que las hace idóneas para ser utilizadas a escala real y tratar aguas residuales con características similares. Lo expuesto es aplicable a otras regiones de Latinoamérica.

REFERENCIAS

- APHA (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. 22nd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Arrojo, P. (coord.). (2001). *El Plan Hidrológico Nacional a debate*. Zaragoza: Fundación Nueva Cultura del Agua. 2001 [1a. ed.] Colección Nueva cultura del agua; 8. Obra coeditada por Bakeaz.
- Arrojo, P. Martínez, F.J. (coord.) (1999). *El agua a debate desde la Universidad: hacia una nueva cultura del agua*. 1er Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas. Institución Fernando el Católico, 1999 [1a. ed.].
- Camacho-Oviedo, H., Campos-Núñez, D., Mercado Martínez, I., Cubillán-Acosta, N., & Castellar-Ortega, G. (2020). Uso de las cáscaras de papa (*Solanum tuberosum* L) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 8(1), 100-111. <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3572>
- Delgadillo, O. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. (O. Delgadillo, Ed.).
- García, J. (2004). Humedales construidos para controlar la contaminación: perspectiva sobre una tecnología en expansión, pp. 7-16. En: García, J., Morató, J. & Bayona, JMa. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. 1ª ed. Barcelona. Ediciones CPET.
- García, J., Vivar, J., Aromir, M., y Mujeriego, R. (2003). Role of hydraulic retention time and granular medium in microbial removal in tertiary treatment reed beds. *Wat. Res.*, 37, 2645-2653.
- Grande, N., Arrojo, P., y Martínez, F.J. (coord.) (2001). *Una cita europea con la nueva cultura del agua: perspectivas en Portugal y España / II Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas*. Institución "Fernando El Católico", 2001 [1a. ed.].
- Ghadouani A., y Coggins L., (2011). Science, technology and policy for Water Pollution Control at the Watershed Scale: Current issues and future challenges. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36, 9-11, 335-341.
- Kadlec, R.H. y S. D Wallace. (2009). *Treatment Wetlands*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1016 pp.
- Lim, P. E., Wong, T. F., & Lim, D. V. (2001). Oxygen demand, nitrogen and copper removal by free-water-surface and sub-surface-flow constructed wetlands under tropical conditions. *Environment International*, 26(5-6), 425-431. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00023-X)
- Marrugo, J.E., Restrepo, M. (2014). Hacia un contexto de las ciencias ambientales: Iberoamérica. Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental. Recuperado de <https://bit.ly/3mNaeCh>

- Möller, K., & Stinner, W. (2009). Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy*, 30(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.003>
- Navarro Frometa AE. (2017). *Empleo de Marcadores Químicos para Evaluar Impactos Antrópicos en el Ambiente*. In 2017. www.revistas.unicordoba.edu.co
- Navarro A., Herrera J., Caso L., Marrugo J., (2013). Calidad del agua del río Nexapa: Tendencias espacio-temporales y sus implicaciones. En M. Ramos., V. Aguilera., (eds.). *Ciencias Naturales y Exactas, Handbook* -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, pp. 83-97.
- Navarro A., Marrugo J., Cid S., Caso L. (2010). Calidad del agua, trazadores químicos y nivel de urbanización. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 26, sup. 1, 258. Memorias del IX Congreso Internacional y XV Nacional de Ciencias Ambientales (CD-ROM), Chetumal, Quintana Roo.
- Pérez, A. Carrillo, M., y Magrinyá, F. (2003). “*Tecnología para el Desarrollo Humano. Agua e infraestructura*”. Ingeniería Sin Fronteras; 2003.
- Ramos, M., Aguilera, V.(2013). Ciencias Naturales y Exactas. Handbook T-I. Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato. Recuperado de <https://bit.ly/2Jj2oTi>
- Ramos, M., Aguilera, V.(2014). Ciencias Naturales y Exactas. Handbook T-II. Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato. Recuperado de <https://bit.ly/3mLyZPp>
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science and Technology*, 45(1), 61–69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- WWAP (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos). (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. París, UNESCO.
- Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A., Li, J., ... Huang, H. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), 8472–8483. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1659-0>