

Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae)

• Jhan Carlos Charris • Aracelly Caselles-Osorio* •
Universidad del Atlántico, Colombia

*Autor para correspondencia

Resumen

Charris, J. C., & Caselles-Osorio, A. (noviembre-diciembre, 2016). Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(6), 93-103.

Este estudio evaluó la eficiencia de eliminación de materia orgánica (DQO), nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^-) ortofosfatos, y coliformes totales y fecales en cuatro humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto usando dos especies de plantas locales. Dos sistemas fueron plantados con *Cyperus ligularis* y dos con *Echinochloa colonum*. El experimento constó de un tanque de almacenamiento de 760 litros (tratamiento primario), desde donde se vertió el agua residual, mediante tubería de PVC, al sistema de humedales. Cada humedal fue rellenado con grava granítica de unos 8 mm de diámetro y porosidad de 0.4. Una vez al día y durante cuatro meses, se adicionó a los humedales un caudal de 42 L.día⁻¹, para mantener un tiempo de residencia hidráulico de tres días. Las muestras de agua residual (afluente y efluente) se recolectaron tres veces por semana para determinar la concentración de DQO y nutrientes. Una vez por semana se determinó coliformes fecales y totales. La eliminación de DQO, amonio, nitrato y ortofosfatos fue de 93, 65, 71 y 32%, respectivamente, para *C. ligularis*, y de 85, 54, 67 y 57%, respectivamente, para *E. colonum*. La eficiencia de eliminación de bacterias coliformes fue de 99.9% para ambas especies. Los resultados indicaron que hubo una diferencia significativa ($P < 0.05$) en la eliminación de los principales contaminantes en el humedal plantado con *C. ligularis*, indicando una mayor capacidad de esta especie para el tratamiento del agua residual doméstica.

Palabras clave: DQO, amonio, coliformes, aguas residuales, macrófitas, humedales construidos de flujo subsuperficial.

Abstract

Charris, J. C., & Caselles-Osorio, A. (November-December, 2016). Contaminant Removal Efficiency from Domestic Wastewater Using Experimental Constructed Wetlands Planted with *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(6), 93-103.

This study evaluated the removal efficiency of organic matter (COD), nitrogen (NH_4^+ , NO_3^-) orthophosphate and total and fecal coliforms in four horizontal subsurface flow pilot scale constructed wetlands using two species of local plants. Two systems were planted with *Cyperus ligularis* and two *Echinochloa colonum*. The experiment consisted of sedimentation tank of 760 L (primary treatment) from where water was poured, through PVC pipe to constructed wetlands system. Each wetland was filled with gravel of a diameter of 8 mm and porosity of 0.4. Once a day during four months, wetlands added a flow rate of 42 L.day⁻¹ to maintain a hydraulic residence time of three days. Wastewater samples (influent and effluent) were collected three times by week for COD and nutrients concentrations. Once a week the fecal and total coliforms were analyzed. Removal efficiency of COD, ammonium, nitrate and orthophosphate were of 93%, 65%, 71% and 32% respectively for *C. ligularis* and of 85%, 54%, 67% and 57% respectively for *E. colonum*. Removal efficiency of total and fecal coliforms was on 99.9% for both species. The results indicated no significant difference ($P < 0.05$) in the removal of principals contaminants in the wetland planted *C. ligularis* indicating higher ability of this species for the treatment of domestic wastewater

Keywords: COD, ammonia, coliforms bacteria, wastewater, macrophytes, and horizontal subsurface flow constructed wetlands.

Recibido: 18/07/2014
Aceptado: 15/03/2016

Introducción

En los países de América Latina se presentan marcadas diferencias socioeconómicas, ambientales y tecnológicas, por lo que se pueden evidenciar regiones que carecen totalmente de saneamiento básico y otras que alcanzan niveles aceptables de tratamiento del agua residual (ONU, 2003). Los problemas de saneamiento en Latinoamérica son más acentuados en zonas rurales y poblaciones aisladas, donde es inaccesible tanto la disposición de redes de alcantarillado como sistemas convencionales de tratamiento. En estas zonas, los sistemas de tratamiento natural son los más recomendables, dados los bajos costos de operación y mantenimiento, y las altas eficiencias de eliminación de contaminantes que se pueden alcanzar (Kadlec & Wallace, 2009). Entre tales sistemas se incluyen lagunas de oxidación, macrófitas flotantes y enraizadas, y humedales construidos (Reed, Crites, & Middlebrooks, 1995). Los humedales construidos presentan varias ventajas e inconvenientes, en comparación con otros sistemas de tratamiento (cuadro 1). Debido a su simplicidad de operación y bajo consumo energético, se convierten en una opción para reducir la contaminación por aguas residuales en comunidades pequeñas y zonas rurales (Vymazal, 2013). Además, para el caso de los humedales construidos de flujo subsuperficial (HC FSS), en donde el agua residual circula por el lecho

granular en forma subterránea, se evitan malos olores y producción de mosquitos causantes de enfermedades (García & Corzo, 2008).

Los principales mecanismos para la eliminación de contaminantes en los humedales incluyen una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos, donde los microorganismos, el sustrato, el agua y las plantas realizan la eliminación de materia orgánica, nutrientes, patógenos y otros contaminantes del agua residual (Kadlec & Wallace, 2009). Uno de los aspectos más estudiados en estos sistemas ha sido la participación de las macrófitas en el proceso de eliminación. Varios estudios han informado que las plantas son capaces de absorber los nutrientes, transportar oxígeno a la zona de las raíces, y mitigar los efectos del viento y la radiación solar sobre las reacciones que se producen en el agua (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2013). Asimismo, algunos autores han señalado que podría haber una diferencia en la eficacia del tratamiento en relación con el tipo de planta sembrada (Brisson & Chazarenc, 2009; Leto, Tuttolomondo, Labella, Leone, & Licata, 2013). Por ejemplo, Carballeira, Ruiz y Soto (2016) reportaron que la eficiencia de eliminación de DQO estuvo relacionada con el tipo de planta y la carga orgánica suministrada. De acuerdo con Vymazal (2013), las especies más comúnmente usadas en el mundo corresponden a *Typha* spp., *Scirpus* spp., *Phragmites australis* y *Juncus* spp. Brisson & Chazarenc (2009) afirman que no se

Cuadro 1. Algunas ventajas e inconvenientes de la tecnología de humedales construidos para la depuración de aguas residuales. Tomado de García y Corzo (2008).

Ventajas	Inconvenientes
Facilidad en la operación y mantenimiento (no requiere invertir mucho tiempo ni personal capacitado)	Requieren superficies relativamente grandes (entre 20 y 80 veces más que otros sistemas)
Gasto energético mínimo (para las lagunas de oxidación se requiere máximo 0.19 kWh/m ³)	El alcance de su eficiencia puede durar varios meses
No hay manejo de residuos	Deben diseñarse acorde con cada proyecto en particular
Buena integración con el medio ambiente	La acumulación de sólidos en el lecho granular acelera su colmatación
Posibilidad de recuperar y/o crear zonas de humedales	

puede generalizar sobre la selección de la especie de macrófita en HC, pues cada especie puede responder a las condiciones exactas donde se lleva a cabo el proceso de depuración. En este sentido, Guittonny-Philippe *et al.* (2015) resaltan la importancia de hacer énfasis en estudios de laboratorio con especies nativas que crecen a corta distancia de los vertidos industriales, ya que serían buenas indicadoras de tolerancia a mezclas de contaminantes orgánicos. En las regiones tropicales, si bien existe una gran diversidad de macrófitas acuáticas (Velásquez, 1994), poco se sabe acerca del potencial de eliminación que pueden tener muchas de estas especies, principalmente en la capacidad para desarrollar y mantener condiciones aeróbico/anaeróbicas en zona de raíces, favoreciendo procesos de depuración de contaminantes (Caselles-Osorio, Villafañe, Caballero, & Manzano, 2011). Esta investigación buscó evaluar el efecto de las macrófitas locales: *Cyperus ligularis* y *Echinochloa colonum*, en la reducción de contaminantes del agua residual doméstica producida por la comunidad estudiantil en la Universidad del Atlántico en Barranquilla, Colombia. Los experimentos se llevaron a cabo

en un sistema piloto que operó bajo condiciones tropicales.

Metodología

Humedales construidos experimentales de flujo subsuperficial horizontal (HC FSSH)

Los HC FSSH se caracterizan porque el agua circula por el medio granular desde una zona de entrada hasta una zona de salida en forma horizontal, a diferencia de los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (HC FSSV), en los que el agua residual se adiciona desde la superficie hasta el fondo del lecho con periodos intercalados de llenado y vaciado. Para llevar a cabo el presente experimento, se instalaron en la Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colombia), cuatro HC FSSH, consistentes en contenedores de hormigón dispuestos en paralelo y conectados a un tanque de sedimentación del agua residual de 500 litros de capacidad (figura 1). Cada una de las unidades de tratamiento de humedales tuvo una dimensión de 1.0 l × 0.6 A × 0.6 m de profundidad y fueron rellenos con grava granítica de diámetro entre 8 y 10 mm

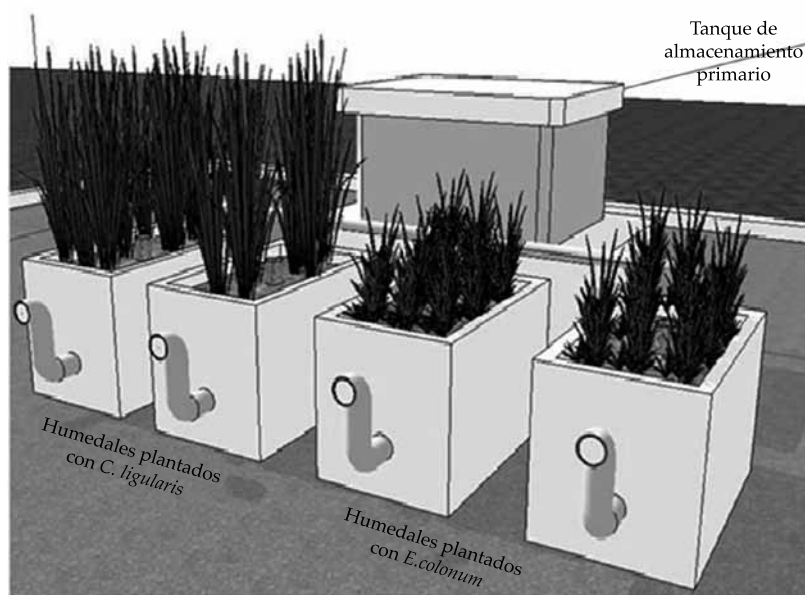


Figura 1. Diagrama de los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal evaluados y plantados con *C. ligularis* y *E. colonum*.

hasta una altura de 0.5 m; el agua residual alcanzó los 0.4 m de profundidad. Dos de los cuatro humedales fueron plantados con rizomas de *Cyperus ligularis* y dos con plántulas de *Echinochloa colonum*. Se sembró un total de 25 plántulas en cada humedal en el mes de julio de 2013 y se monitorizaron durante cuatro meses a partir de agosto de 2013. El agua residual clarificada se adicionó a cada humedal mediante tubería PVC perforada, con un caudal de 42 l.día⁻¹, el cual proporcionó un tiempo de retención hidráulica de unos tres días.

Crecimiento de las plantas y control de calidad del agua residual

Las macrófitas *C. ligularis* y *E. colonum* se colectaron en arroyos cercanos a la ciudad de Barranquilla y aclimatadas durante un mes con agua residual antes de ser plantadas en los humedales. El crecimiento de las plantas se evaluó midiendo periódicamente (de 2 a 3 veces al mes) la altura de las plantas a través de una cinta métrica (3 m). Al final del estudio, se colectaron muestras de hojas, tallos y raíces para estimar la producción de biomasa. La calidad del agua residual, afluente y efluente se realizó tomando tres muestras semanales en horas de la mañana durante cuatro meses, y analizadas para DQO, amonio, nitrato, nitrito, ortofosfato y bacterias coliformes. Los análisis de las muestras de agua se hicieron según las descripciones de APHA-AWWA-WEF (2012). Para el análisis de coliformes totales y fecales se usó el método de filtración por membrana, con filtros de 0.45 micras de tamaño de poro (Millipore Corp) y agar selectivos, EMB (eosina-azul methylen). Los parámetros como potencial redox (ORP), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica y temperatura se midieron *in situ* utilizando una sonda WTW multi 3420. Los valores de las características fisicoquímicas registradas en los efluentes del sistema de humedales fueron contrastados con la normativa legal vigente para vertidos líquidos en Colombia (Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible).

Análisis estadísticos

El análisis de resultados sobre la eliminación de contaminantes en los humedales fue realizado mediante un ANOVA a una vía. Para ello, se llevaron a cabo pruebas de Kolmogorov-Smirnov para establecer la normalidad de los datos y cuando el supuesto de normalidad no fue evidenciado, los datos fueron transformados. El nivel de significancia fue de 0.05 en todos los casos. Los análisis estadísticos fueron alcanzados usando *Statgraphic Centurion XV-2*.

Análisis y discusión de resultados

Crecimiento y desarrollo de las plantas

C. ligularis es una planta perenne, mientras que *E. colonum* tiene un ciclo de vida de un año (USDA, 2016). En el estudio realizado, ambas especies crecieron rápidamente en los sistemas de humedales, alcanzando una cobertura de 100% en los primeros dos meses de crecimiento. *C. ligularis* alcanzó alturas máximas de 69.7 ($\pm$ 34.0) cm en el tercer mes de muestreo y *E. colonum* de 48.1 ($\pm$ 17.6) cm en el segundo mes del mismo periodo de estudio. Las características herbáceas y ciclo de vida corto de *E. colonum* permitieron colectar una biomasa seca total de 2.5 k/m² en el segundo mes de muestreo, mientras que *C. ligularis* de tallos rígidos y duros, y de crecimiento continuo, no permitió obtener un valor de biomasa para el periodo de muestreo donde se llevó a cabo este experimento. Sin embargo, fue posible determinar que el crecimiento y longitud de las raíces fue superior en *C. ligularis* (30 cm) con respecto al área radicular de *E. colonum* (22 cm).

Características fisicoquímicas del agua residual afluente y efluente

En el cuadro 2 se presentan los valores promedio de los factores fisicoquímicos de calidad del agua residual de los efluentes de los HC de FS-SH plantados con *C. articulatus* y *E. colonum*. Las características fisicoquímicas del agua residual efluente fueron similares para ambos sistemas.

Los valores de potencial redox y conductividad eléctrica fueron ligeramente mayores en los HC plantados con *E. colonum*. Estos valores son mucho mayores con respecto a los resultados reportados por Caselles-Osorio *et al.* (2011) para *Eleocharis mutata* y *Eriochloa aristata*, en HC construidos experimentales similares. Tal como lo sugieren Brisson y Chazarenc (2009), el tratamiento puede estar influenciado por el tipo de macrófita acuática y las distintas condiciones de experimentación; así, los valores altos de la conductividad eléctrica se relacionan con las altas tasas de evapotranspiración de las especies (cuadro 2), la cual concentra las sales disueltas. En este caso coinciden la mayor evapotranspiración con la alta conductividad eléctrica del humedal plantado con *E. colonum*.

Eliminación de contaminantes del agua residual

Las concentraciones de DQO en el afluente promediaron 246.1 ($\pm$ 78.8) mg.l⁻¹ y 19.4 ($\pm$ 8) y 40.7 ($\pm$ 23.3) para los efluentes de *C. ligularis* y *E. colonum*, respectivamente. Las concentraciones de DQO en el agua afluente son más bajas que las reportadas para aguas residuales domésticas (Metcalf & Eddy, 2003), probablemente como consecuencia de un eficiente tratamiento primario (tanque de sedimentación) o por las

bajas concentraciones de este contaminante en el agua producida por la comunidad universitaria. El decreto 3930 de 2010 establece que los valores máximos permisibles de vertimiento para DQO, 180 000 mg.l⁻¹, los efluentes están cumpliendo con lo estipulado por la norma debido a que las concentraciones son más bajas que las reportadas.

En la figura 2 se muestra el comportamiento de los valores de carga orgánica superficial para ambas especies. La carga orgánica del afluente fue de 17.2 g m².d⁻¹ y la de los efluentes de 1.16 y 2.37 g m².d⁻¹ para *C. ligularis* y *E. colonum*, respectivamente. Así, la disminución de la carga orgánica fue de 16 y 14 g DQO m².d⁻¹ para *C. ligularis* y *E. colonum*, respectivamente. Estos valores son similares a los reportados por Konnerup, Koottatep y Brix (2009) en HC de FSSH plantados con *Canna* y *Heliconia* en climas tropicales, donde se alcanzaron reducciones de 20 g DQO m².d⁻¹ para ambas especies ornamentales.

La eficiencia de eliminación de la carga orgánica (DQO) para *C. ligularis* fue de 92% y de 83% para *E. Colonum* (figura 3). Los resultados del análisis de varianza indicaron diferencias significativas entre estas dos especies ($P < 0.000$). La mayor eficiencia de eliminación de *C. ligularis* es concordante con lo reportado por Leto *et al.* (2013) para *C. alternifolius* en HC de FSSH, lo cual indica una eficiencia de este

Cuadro 2. Valores promedio y desviación estándar (en paréntesis) de los factores fisicoquímicos de calidad del agua residual afluente y efluente. Note que los valores del afluente corresponden con las características fisicoquímicas iniciales del agua residual a tratar. Los cálculos fueron basados entre 25 y 28 mediciones dependiendo del factor evaluado.

Factor	Afluente	<i>Cyperus ligularis</i>	<i>Echinochloa colonum</i>
DQO, mg.l ⁻¹	246 ($\pm$ 78.8)	19.4 ($\pm$ 7.98)	39.2 ($\pm$ 24.1)
Amonio, mg.l ⁻¹	69.2 ($\pm$ 46.0)	26.3 ($\pm$ 13.9)	35.2 ($\pm$ 14.3)
Ortofosfatos, mg.l ⁻¹	43.5 ($\pm$ 19.5)	34.3 ($\pm$ 16.9)	23.1 ($\pm$ 11.0)
Temperatura, °C	28.3 ($\pm$ 1.47)	27.7 ($\pm$ 2.1)	26.1 ($\pm$ 1.7)
Oxígeno disuelto, mg.d ⁻¹	1.08 ($\pm$ 0.45)	1.8 ($\pm$ 0.9)	1.9 ($\pm$ 0.9)
E_{H_2} mV	27.1 ($\pm$ 205)	247.6 ($\pm$ 70.8)	268.3 ($\pm$ 90.6)
pH,	8.0 ($\pm$ 0.92)	7.0 ($\pm$ 0.1)	7.0 ($\pm$ 0.1)
Conductividad eléctrica, uS.cm ⁻¹	856.0 ($\pm$ 171.8)	557.8 ($\pm$ 171.8)	646.6 ($\pm$ 258.1)
*Evapotranspiración observada, mm.d ⁻¹		9.9 (3.9)	12 (4.9)

*Corresponde a la diferencia en el volumen de agua aplicado con respecto al volumen de agua recogido.

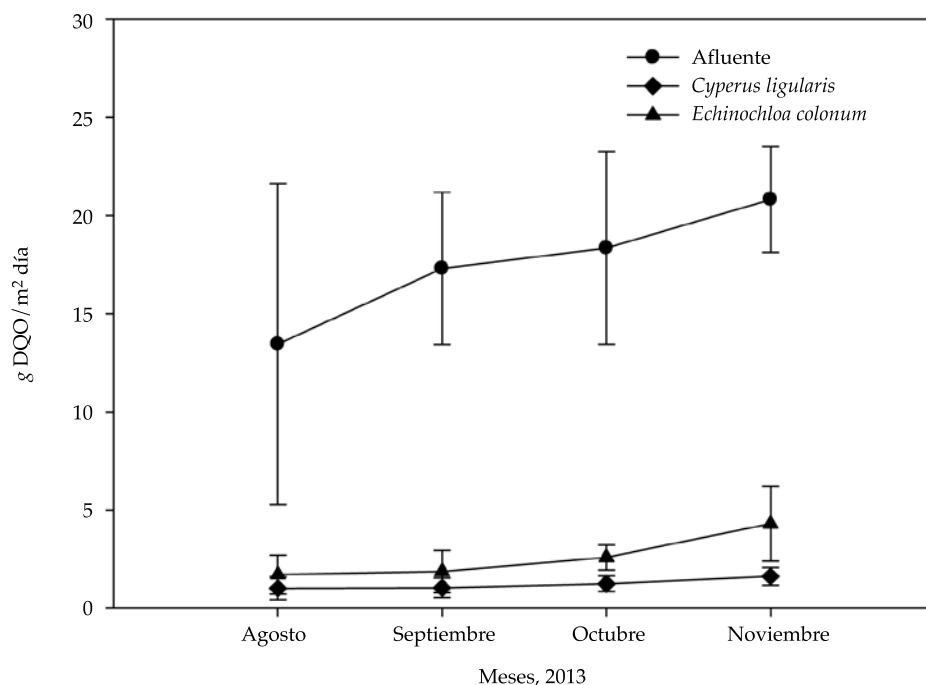


Figura 2. Valores promedio de la carga superficial de DQO eliminada en los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *C. ligularis* y *E. colonum* durante el periodo de estudio.

género de macrófita en procesos de fitodepuración. Algunos autores han reportado que el rápido crecimiento y la naturaleza invasora de las especies del género *Cyperus* pueden favorecer la eliminación de contaminantes del agua residual (Kyambadde, Kansime, & Dalhammar, 2005; Kantawanichkul, Kladprasert y Brix, 2009, citados en Leto *et al.*, 2013). Asimismo, Vega, Lancheros y Caselles-Osorio (2013), en estudios realizados en HC de FSSH similares, reportaron eficiencias de eliminación de DQO superior a 85% para *Cyperus articulatus*, comparado con un sistema no plantado.

La eliminación de nitrógeno en forma de amonio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitratos ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) y nitritos ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) varió respecto del tipo de macrófita evaluada. Las concentraciones de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en el agua afluente fueron de $69.3 (\pm 26.1)$ y de $26.9 (\pm 13.3)$ y $35.2 (\pm 14.3)$ para los efluentes de *C. articulatus* y *E. colonum*, respectivamente. Las concentraciones de nitratos en el afluente fueron de $0.9 (\pm 0.9)$ mg.l⁻¹ y de $1.9 (\pm 3.4)$ y $0.5 (\pm 0.3)$ en

los efluentes de *C. ligularis* y *E. colonum*, respectivamente. Con respecto al nitrito, se registraron concentraciones en el afluente de $0.02 (\pm 0.3)$ mg.l⁻¹ y de $0.01 (\pm 0.01)$ y $0.03 (\pm 0.04)$ mg.l⁻¹ para *C. ligularis* y *E. colonum*, respectivamente.

Las altas concentraciones de amonio en el agua afluente indican un agua muy concentrada respecto de lo reportado para aguas residuales domésticas, las cuales no exceden los 25 mg.l⁻¹ (Metcalf & Eddy, 2003). Es probable que el principal uso de la red sanitaria por la comunidad universitaria sea para deposición de orina, lo que origina un agua con mayor contenido de amonio. El comportamiento temporal de la eliminación de la carga superficial de amonio se muestra en la figura 4. Al igual que en la eliminación de DQO, la mayor eliminación de amonio se registró en el HC plantado con *C. ligularis* (60%) con respecto a *E. colonum* (45%). La disminución de la carga promedio eliminada en *C. ligularis* fue de $3.23 \text{ gNH}_4^+\text{-N m}^2\text{d}^{-1}$ y la de *E. colonum* fue $2.8 \text{ gNH}_4^+\text{-N m}^2\text{d}^{-1}$. Estas di-

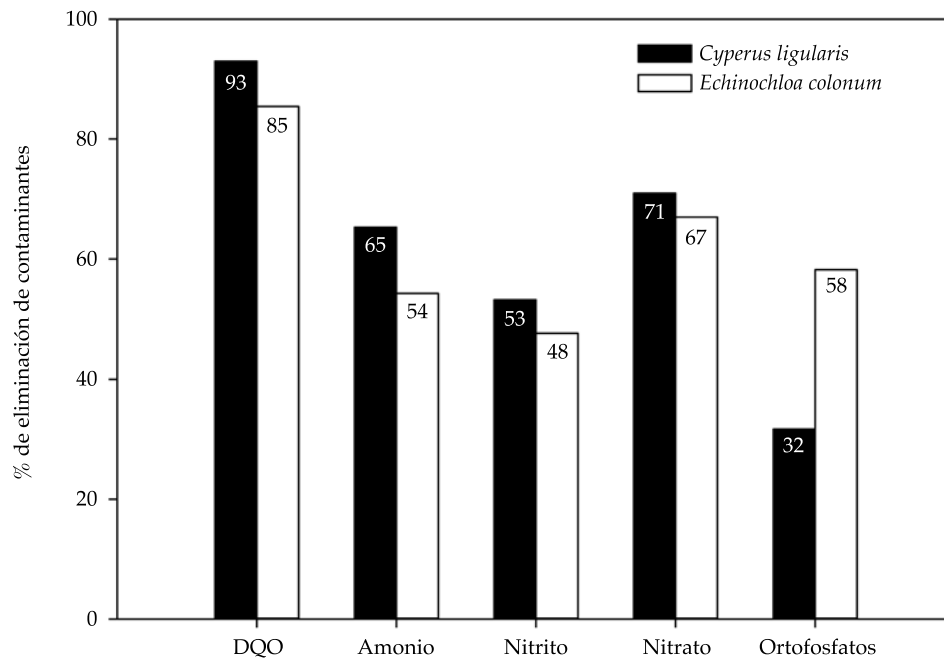


Figura 3. Porcentajes de eliminación de DQO, nitrógeno (amonio, nitrato y nitrito) y ortofosfatos en los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *C. ligularis* y *E. colonum* durante el periodo de estudio.

ferencias fueron estadísticamente significativas ($P = 0.012$), indicando la mayor eficiencia de *C. ligularis* para eliminar nitrógeno amoniacal (figura 3). Estos resultados son similares a los reportados por Caselles-Osorio *et al.* (2011), en sistemas de HC de FSSH experimentales similares, donde especies como *Eleocharis mutata* y *Eriochloa aristata* obtuvieron eficiencias de eliminación de amonio de 62 y 67%, respectivamente. Sin embargo, difieren de los registrados por Vega *et al.* (2013) para *Cyperus articulatus* en experimentos similares, quienes reportan eficiencias de eliminación de amonio de 90%. Tales autores argumentan que las características morfológicas particulares de *C. articulatus*, como rápido crecimiento y presencia de tallos huecos, podrían haber transferido más oxígeno hacia la zona de raíces, para promover condiciones aeróbicas que favorecieron los procesos de nitrificación en el sistema. Es probable que las características de crecimiento de raíces y desarrollo vegetativo de *C. ligularis* estén influenciando el mayor rendimiento de esta especie

con respecto a *E. colonum*. También se evidencia que la mayor eliminación de amonio ocurrió principalmente en los dos primeros meses de crecimiento de ambas especies, disminuyendo una vez se alcanzó un máximo de crecimiento. Estos resultados apoyan lo sugerido por Brisson y Chazarenc (2009) sobre la importancia en la selección de la especie de planta para procesos de fitodepuración con HC.

Tal como se ha demostrado para otras especies de macrófitas acuáticas ampliamente usadas en HC de FSSH, como *Typha* spp., *Phragmites australis* y *Scirpus* spp. (Vymazal, 2013; Leto *et al.*, 2013), *C. ligularis* y *E. colonum* demostraron tolerancia y adaptabilidad a las condiciones del agua residual doméstica. No obstante, *C. ligularis* tendría ventajas en la eficiencia de la eliminación.

La dinámica de eliminación de la carga de nitratos en el tiempo fue similar a la del amonio (figura 5) para ambas especies, a excepción del mes de agosto/13 cuando la carga en el efluente del humedal plantado con *C. ligularis* fue supe-

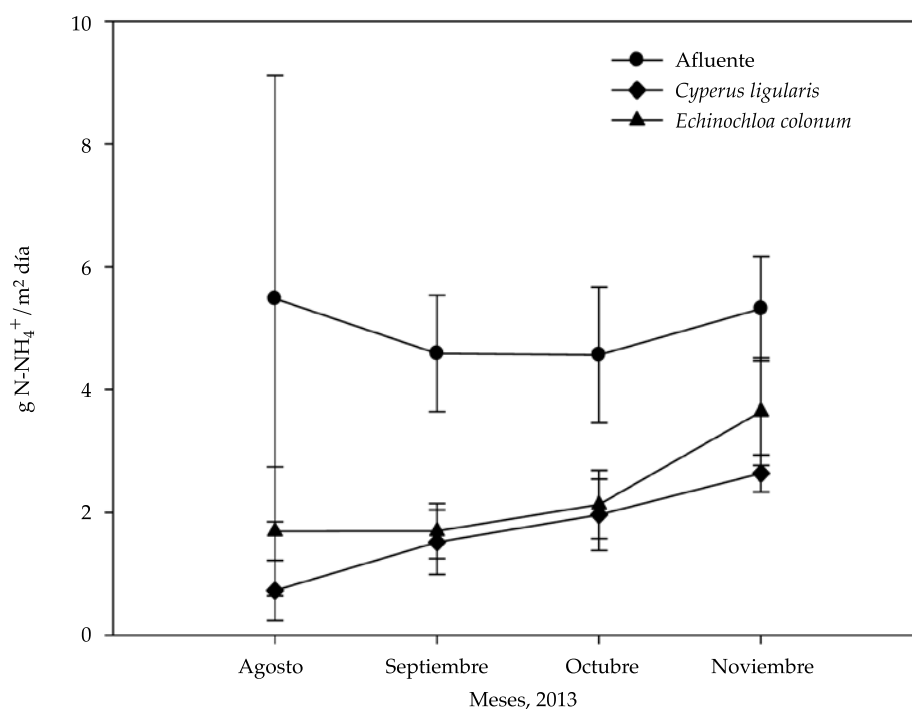


Figura 4. Valores promedio de la carga superficial de amonio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) en los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *C. ligularis* y *E. colonum* durante el periodo de estudio.

rior. La carga total afluyente tuvo un promedio de $0.06 (\pm 0.05) \text{ gNO}_3\text{-N m}^2\cdot\text{d}^{-1}$, para el efluente de *C. ligularis* de $0.11 (\pm 0.19)$ y para *E. colonum* de $0.02 (\pm 0.01)$. Es probable que las altas cargas de nitrato en el efluente de *C. ligularis* registradas en el primer mes de estudio correspondan a una eficiente nitrificación en el periodo de rápido crecimiento de la macrófita. Sin embargo, en los meses restantes, las concentraciones en el efluente descendieron, permitiendo una eficiencia promedio de 71% (figura 3). La eficiencia en la eliminación de nitratos en el humedal plantado con *E. colonum* fue de 67%. Estas eficiencias de eliminación de compuestos nitrogenados son superiores a las reportadas por Leto *et al.* (2013) para especies como *Typha latifolia* y *Cyperus alternifolius*.

Las concentraciones de ortofosfatos en el agua residual afluyente fueron de $43.6 (\pm 19.5) \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y de $34.3 (\pm 17)$ para el efluente de *C. ligularis* y de $23.1 (\pm 11.1)$ para el efluente de *E. colonum*. Contrario al comportamiento de la

eliminación de materia orgánica (DQO) y nitrógeno (amonio y nitrato), donde se presentó una mayor eficiencia de eliminación en *C. ligularis*, la remoción de ortofosfatos fue superior en el humedal plantado con *E. colonum*. En la figura 6 se describe el comportamiento de la carga de ortofosfatos para el afluyente y los efluentes de las dos macrófitas evaluadas, y en la figura 3 se muestra la eficiencia de eliminación (32% para *E. colonum* y 58% para *C. ligularis*). Aparentemente, esta alta eliminación parece corresponder a mayores requerimientos de fósforo para el crecimiento de *E. colonum*, sumado al afecto de adsorción por el sustrato, como otro mecanismo de eliminación (García & Corzo, 2008). La eficiencia de eliminación de fósforo en HC de FSSH, por lo general no supera el 30% (Kadlec & Wallace, 2009) y depende de los mecanismos de eliminación de fósforo, como la precipitación y adsorción en el medio de soporte; es por esto que cuando los humedales operan con bajas cargas o cuando están recién construidos, se ob-

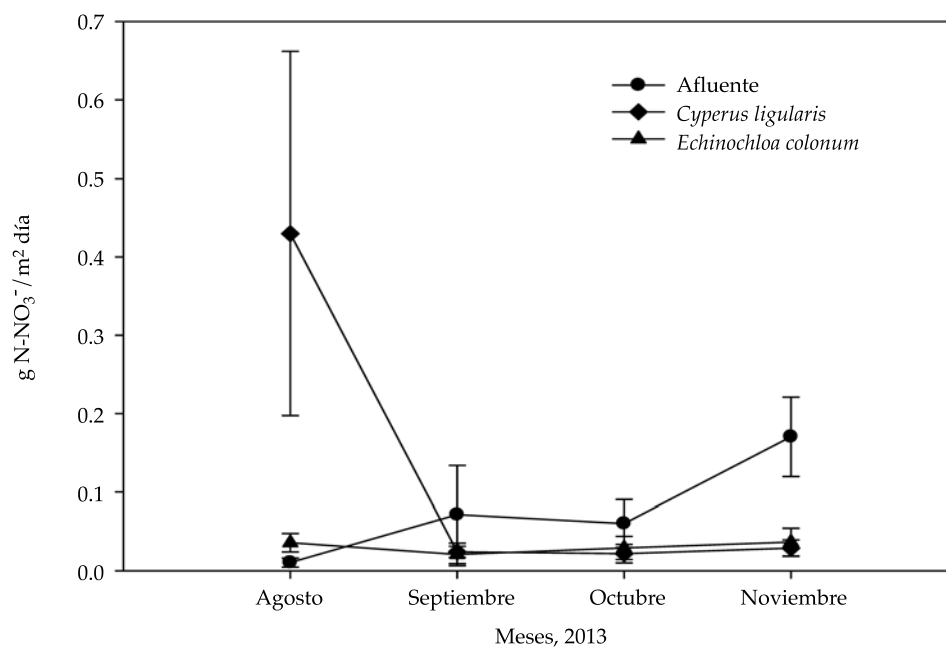


Figura 5. Valores promedio de la carga superficial de nitratos (NO₃-N) eliminada en los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *C. ligularis* y *E. colonum* durante el periodo de estudio.

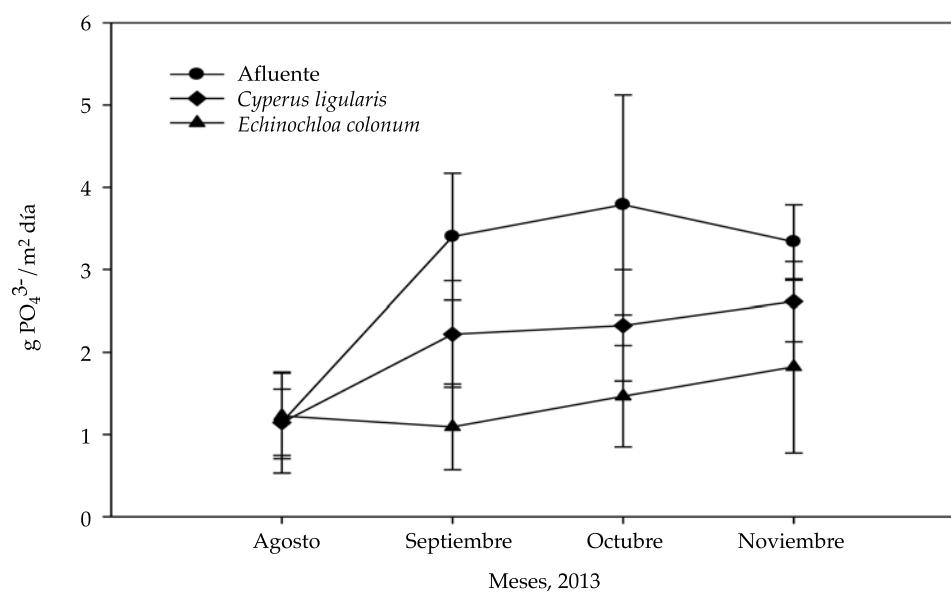


Figura 6. Valores promedio de la carga superficial de ortofosfatos (PO₄³⁻-P), eliminada en los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *C. ligularis* y *E. colonum* durante el periodo de estudio.

tienen altas remociones de ortofosfatos (García & Corzo, 2008).

A nivel de microorganismos coliformes, la eliminación fue de tres unidades logarítmicas, para ambos tipos de especies, alcanzando una eficiencia de eliminación de 99.9%. Estos resultados corroboran las altas eficiencias de los HC de FSSH para eliminar coliformes totales y fecales, tal como lo han reportado otros estudios bajo condiciones tropicales (García, Paredes, & Cubillos, 2013).

Por otra parte, los valores de las características fisicoquímicas de los efluentes de este estudio son concordantes con lo exigido en la normativa de vertimientos puntuales para aguas superficiales y alcantarillado de Colombia, principalmente para factores como pH y DQO, cuyos valores máximos permisibles están entre 6 y 9, y 200 mg.l⁻¹, respectivamente.

Conclusiones

La eficiencia de eliminación de bacterias coliformes, materia orgánica, amonio, nitrato y ortofosfatos estuvo entre 99.9, 93, 65, 71 y 32% para *E. ligularis*, y entre 99.99, 85, 54, 67 y 57% para *E. colonum*, respectivamente. *E. colonum* presentó las mayores eliminaciones de ortofosfatos, mientras que *C. ligularis* fue más eficiente en la eliminación de DQO, amonio y nitrato. Estos resultados permiten inferir que *C. ligularis* podría ser una especie de macrófita acuática recomendable en un sistema de humedales construidos a gran escala para el Caribe colombiano, dadas las altas eficiencias de eliminación de estos sistemas y la factibilidad de operación en zonas rurales donde no existen sistemas de tratamiento de agua residual.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico, que financió la ejecución del estudio, y al Centro de Estudios del Agua de la Universidad, que facilitó su laboratorio para el análisis de las muestras. Especial agradecimiento a los estudiantes de último semestre de ingeniería Química, Henry Casierra y Jafeth Casalins, por su interés y colaboración en la finalización de este trabajo.

Referencias

- APHA-AWWA-WEF (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed. Washington, DC: American Public Health Association.
- Brisson, J., & Chazarenc, F. (2009). Maximizing Pollutant Removal in Constructed Wetlands: Should We Pay More Attention to Macrophyte Species Selection? Universidad de Montreal, Québec, Canada. *Science of the Total Environment*, 407, 3923-3930.
- Carballeira, T., Ruiz, I., & Soto, M. (2016). Effect of Plants and Surface Loading Rate on the Treatment Efficiency of Shallow Subsurface Constructed Wetlands. *Ecological Engineering*, 90, 203-214.
- Caselles-Osorio, A., Villafañe, P., Caballero, V., & Manzano, Y. (2011). Efficiency of Mesocosm-Scale Constructed Wetland Systems for Treatment of Sanitary Wastewater under Tropical Conditions. *Water, Air, Soil Pollut.* 220, 161-171.
- García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial* (pp. 2-8). Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- García, J. A., Paredes, D., & Cubillos, J. A. (2013). Effect of Plants and the Combination of Wetland Treatment Type Systems on Pathogen Removal in Tropical Climate Conditions. *Ecological Engineering*, 58, 57-62.
- Guittonny-Philippe, A., Petit, M., Masotti, V., Monnier, Y., Malleret, L., Coulomb, B., Combroux, I., Baumberger, T., Viglione, J., & Laffont-Schwob, I. (2015). Selection of Wild Macrophytes for Use in Constructed Wetlands for Phytoremediation of Contaminant Mixtures. *Journal of Environmental Management*, 147(1), 108-123.
- Konnerup, D., Koottatep, T. H., & Brix, H. (2009). Treatment of Domestic Wastewater in Tropical, Subsurface Flow Constructed Wetlands Planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecological Engineering*, 35, 248-257.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Boca Raton, USA: Taylor and Francis Group, CRP Press.
- Kyambadde, J., Kansime, F., & Dalhammar, F. (2005). Nitrogen and Phosphorus Removal in Substrate-Free Pilot Constructed Wetlands with Horizontal Surface Flow in Uganda. *Water, Air, Soil Pollut.*, 165, 37-59.
- Leto, C., Tuttolomondo, T., Labella, S., Leone, R., & Licata, M. (2013). Effects of Plant Species in a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland –Phytore Mediation of Treated Urban Waste Water with *Cyperus alternifolius* L. and *Typhalatifolia* L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*, 61, 282-291.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. New York: McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible (17 de marzo de 2015). *Resolución 0631 de 2015 por la cual*

se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible.

ONU (2003). *Informe de la Organización de las Naciones Unidas*. Revisado el 5 de junio de 2014. Recuperado de <http://www.fire.or.cr/mayo03/notas/agua1.htm>.

Reed, S., Crites, R., & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill, Inc.

USDA (2016). *Natural Resources Conservation Services*. United State Department of Agriculture. Recovered from <http://plants.usda.gov/core/profile?symbol=ECCO2>.

Vega, H. J., Lancheros, J. C., & Caselles-Osorio, A. (2013). Organic Matter and Nitrogen Removal in horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetlands Planted with *Cyperus articulatus*. *Memorias. Quinto Simposio Internacional sobre Dinámica y Control de Contaminación en Humedales, Wetpol.*, Nantes, Francia.

Velásquez, J. (1994). *Plantas acuáticas vasculares de Venezuela* (992 pp.). Caracas: Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.

Vymazal, J. (2013). The Use of Hybrid Constructed Wetlands for Wastewater Treatment with Special Attention to Nitrogen Removal: A Review of a Recent Development. *Water Research*, 47, 4795-4811.

Dirección institucional de los autores

Biól. Jhan Carlos Charris Olmos

Universidad del Atlántico
Km 7 Vía Puerto, Barranquilla, Atlántico, COLOMBIA
Teléfono: +57 (5) 3197 010
jhancarloscharris09@gmail.com

Dr. Aracelly Caselles Osorio

Docente asociada
Universidad del Atlántico
Km 7 Vía Puerto, Barranquilla, Atlántico, COLOMBIA
Teléfono: +57 (5) 3197 010
aracellycaselles@mail.uniatlantico.edu.co