

Evaluación de la remoción de colorantes mediante humedales subsuperficiales

Assessment of dye removal with subsurface wetlands

Lic. Leyanis Domínguez-Martínez¹

Dra. C. Maira María Pérez-Villar^{1*}

Dra. C. Margie Zorrilla-Velazco¹

MSc. Yaribey Mayusca González-Roche¹

Ing. Francisco Pedrozo-Anoceto¹

¹Centro de Estudio de Química Aplicada, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: mariapv@uclv.edu.cu

RESUMEN

En este trabajo se evaluó la remoción de colorantes en un humedal subsuperficial experimental. Primeramente, se obtuvo la curva de calibración del azul de metileno para evaluar el comportamiento de la remoción de este colorante en el humedal, obteniéndose elevadas eficiencias de remoción del mismo y concentraciones efluentes por debajo del límite de detección del método. Posteriormente se realizó la caracterización del agua residual efluente de la Fábrica "Juan Pedro Carbó Serviá" perteneciente a la Empresa de Confecciones Fénix, obteniéndose que dichas aguas residuales no cumplen con los límites de vertimientos para los valores de pH y Demanda Química de Oxígeno. Finalmente se evaluó la depuración de dichas aguas residuales en el humedal experimental, donde se

obtiene un efluente que cumple con la norma cubana de vertimiento y eficiencias de remoción superiores al 90 %.

Palabras clave: humedales subsuperficiales; remoción; colorantes.

ABSTRACT

In the present research the dye removal in an experimental subsurface wetland was evaluated. First, the calibration curve of the methylene blue was obtained to evaluate the behavior of the removal of this dye in the wetland, obtaining high removal efficiencies of dye and effluent concentrations below the detection limit of the method. Subsequently, the characterization of the effluent wastewater of "Juan Pedro Carbó Serviá" Factory belonging to the Company of "Confecciones Fénix" was carried out, obtaining that these wastewater does not conform to the Cuban regulation standards for the values of pH and Chemical Oxygen Demand. Finally, the purification of this wastewater in the experimental wetland was evaluated, where an effluent conforms to the Cuban standard of discharge and removal efficiencies of more than 90 % were obtained

Keywords: subsurface wetlands; removal; dye.

Recibido: 5/9/2018

Aprobado: 29/10/2018

Introducción

La contaminación constituye el resultado de la ineficiencia de los procesos desarrollados por el hombre. Las operaciones asociadas a la fabricación de un producto generan una considerable cantidad de sustancias contaminantes, las cuales producen efectos adversos sobre la salud humana, en la flora, fauna y en determinados ecosistemas y su calidad.⁽¹⁾

La industria textil ha presentado notables problemas medioambientales vinculados principalmente al uso y la gestión del agua. Las aguas residuales de la industria textil han llegado a ser un problema igual o mucho más grande que las domésticas. Esta industria debido a su demanda de producción, han aumentado la cantidad de aguas residuales proporcionalmente, por lo que hoy es uno de los mayores problemas de contaminación.

El impacto ambiental de los efluentes líquidos provenientes de la industria textil es muy diverso, por la gran variedad de materias primas, reactivos (colorantes y auxiliares) y métodos de producción existentes. Dichos efluentes se caracterizan generalmente por su elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO), debido a los compuestos orgánicos refractarios; Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), debida a la materia orgánica biodegradable, elevada temperatura, alto contenido en color, pH inestable, sólidos en suspensión.⁽²⁾

Una gran proporción de los colorantes empleados en el teñido de tejidos, no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga pueden llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cuerpos de agua e implica un alto riesgo a la salud humana y al ecosistema debido a que algunos de estos colorantes o sus subproductos son altamente tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos, haciendo necesario que su presencia sea controlada.⁽³⁾

Han sido desarrolladas y probadas diversas tecnologías en sistemas de tratamiento de efluentes industriales coloreados. Los procedimientos fisicoquímicos han sido comúnmente usados e incluyen procesos de floculación, precipitación, oxidación química avanzada y adsorción. Sin embargo, limitaciones como la generación de lodos, el costo de operación y reactivos, y la generación de subproductos solubles, usualmente más tóxicos, impiden su uso extendido. En este marco de referencia, la adsorción con carbón activado ha mostrado ser la estrategia más promisoría; sin embargo, su elevado costo restringe su implementación a gran escala; de ahí que la exploración de materiales alternativos, con propiedades similares, de origen natural, fácil adquisición y por tanto mínimo valor económico, es imperiosa.⁽⁴⁾

La Fábrica "Juan Pedro Carbó Serviá" perteneciente a la Empresa de Confecciones Fénix, ubicada en el municipio de Remedios provincia de Villa Clara, genera una gran cantidad de aguas residuales con elevada carga orgánica, las que son conducidas a una fosa séptica y

vertidas al sistema de alcantarillado. En consideración al sistema de tratamiento diseñado, que solo cuenta con un tratamiento primario, no se cumple con el Límite Máximo Permissible Promedio para la DQO, según la norma cubana de vertimiento NC 27/2012 ⁽⁵⁾, por ende, se debe aplicar alternativas de solución, para implementar un método apropiado, con bajo costo y facilidad de construcción, operación y mantenimiento, para ello, entre las alternativas más apropiadas se encuentran los humedales subsuperficiales.

En este sentido, el uso de humedales para depurar aguas es una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada. Los mismos han demostrado ser efectivos en la remoción de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y otras sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente.⁽⁶⁻⁸⁾ Se han desarrollado diversas investigaciones sobre la remoción de colorantes en aguas residuales de la industria textil mediante humedales subsuperficiales, los que han mostrado elevadas eficiencias de remoción, tanto de los colorantes como los diversos productos orgánicos que la componen.^(3,9,10)

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la depuración de aguas residuales contaminadas con colorantes procedentes de la de la Fábrica “Juan Pedro Carbó Serviá” mediante un humedal subsuperficial experimental.

Materiales y métodos

Características del humedal experimental

Se utilizó un sistema experimental que consiste en un humedal subsuperficial horizontal de 0,45 m de largo; 0,33 m de ancho y 0,2 m de profundidad con un área superficial: 0,15 m². El humedal posee una capa de suelo ferralítico rojo de 0,15 m de espesor y la capa restante de grava 5-10 mm de diámetro (figura 1).



Fig. 1 - Humedal subsuperficial experimental

Plantas

La planta emergente seleccionada fue la *Cyperus Alternifolius*, la cual ha sido estudiada en nuestro país anteriormente ^(11,12), mostrando elevados porcentajes de remoción de los contaminantes y elevada resistencia a condiciones adversas. Esta planta es una especie perenne, herbácea y se desarrolla bien bajo condiciones de estrés.

Suelo

El seleccionado fue el suelo ferralítico rojo que presenta un alto contenido en minerales, lo que favorece la remoción de contaminantes en el humedal. Dicho suelo fue caracterizado anteriormente por Pérez *et al.* ⁽¹³⁾ y se demostró el alto contenido de hierro, aluminio y manganeso en el mismo.

Remoción del azul de metileno en el humedal

La curva patrón de azul de metileno se determinó en un intervalo de 1 a 13 mg L⁻¹. Se pesaron 0,01 g de reactivo sólido azul de metileno y se diluyeron en 100 mL de agua destilada para obtener una disolución stock de concentración 100 ppm, de la cual se realizaron las diluciones con volúmenes desde 0,25 a 3,25 mL, enrazando hasta 25 mL con agua destilada.

Las lecturas de absorbancia se hicieron en un espectrofotómetro UV-Visible, GENESYS 10, Estados Unidos, con longitud variable de 100 a 800 nm. Se realiza un barrido de exploración de 400 a 700 nm para escoger la longitud de onda de máxima absorción, la seleccionada fue de 665 nm correspondiente al máximo de absorbancia (figura 2). Posteriormente, se realiza la lectura de cada patrón a la longitud de onda de máxima absorción (665 nm) y se obtiene la curva de calibración.

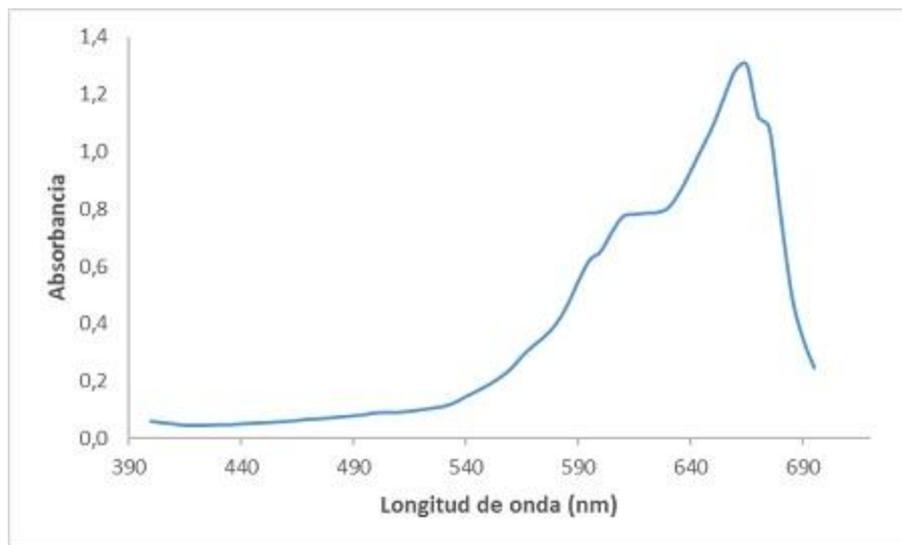


Fig. 2 - Espectro de absorción del azul de metileno

Evaluación de la remoción en el humedal

Para evaluar la remoción del colorante en el sistema de tratamiento se utilizaron dos disoluciones de azul de metileno, de 5 y 10 mg L⁻¹ respectivamente. Estas concentraciones de colorantes permiten evaluar la influencia de la concentración del colorante en la eficiencia de remoción. Estas disoluciones fueron aplicadas al humedal con un flujo continuo y horizontal, cubriendo todo el lecho. Se determinó la concentración de colorante en el agua efluente al humedal, determinando la absorbancia de dicha solución en el espectrofotómetro UV visible.

Caracterización del agua residual efluente de la fábrica

Se determinaron parámetros químico-físicos al agua residual efluente del tratamiento primario de la Fábrica. Los métodos analíticos se realizaron según lo establecido en el *Standard Methods for the examination of Waste and Wastewater*.⁽¹⁴⁾

- ✓ **Determinación de pH:** método electrométrico con pH metro JENWAY LTD modelo 3020, Inglaterra. Después de calibrado el equipo se procede a la medición. Las disoluciones buffer y las disoluciones problemas deben agitarse cuidadosamente durante la medición para evitar que se forme una capa fina de disolución en la interfase del electrodo de vidrio – disolución. Se espera 5 min para la estabilización de la lectura en la pantalla y se realiza la lectura.
- ✓ **Determinación de la conductividad eléctrica (CE):** método electrométrico con Conductímetro WTW, modelo INOLAB Multi 720, Alemania. Después de calibrado el equipo se procede a la medición. Primeramente, se enjuaga la celda de conductividad con una o más porciones de la muestra, se ajusta la temperatura a 25 °C y se mide la conductividad de la muestra.
- ✓ **Determinación de sólidos totales (ST):** método gravimétrico con estufa WTB Binder, Alemania y balanza analítica digital Denver Instrument, modelo SI- 234, Alemania. Se determinan al evaporar una muestra en una cápsula tarada, sobre baño de vapor y posteriormente secada en estufa hasta peso constante a 103-105 °C.
- ✓ **Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO):** método dicromato. Reflujo abierto con digestor de DQO de 6 plazas y balanza analítica digital Denver Instrument, modelo SI- 234. Se basa en la oxidación de la materia orgánica en cantidades conocidas de dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Esa mezcla se somete a reflujo por un tiempo de 2 h en presencia de sulfato de plata como catalizador y sulfato de mercurio para eliminar las interferencias de cloruros, bromuros y yoduros. Se define como la cantidad de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por las materias disueltas y en suspensión, cuando la muestra es tratada con dicho oxidante en condiciones definidas. Finalmente después de la digestión de la muestra, se valora el exceso de dicromato, con sulfato

de hierro (II) y de amonio en presencia de 1 o 2 gotas de ferroina como indicador hasta punto final (rojo vino).

Resultados y discusión

Evaluación de la remoción de azul de metileno en el humedal

En la figura 3 se presenta la curva de calibración obtenida, en el rango de concentraciones de 1 a 13 mg L⁻¹. El coeficiente de correlación lineal (R^2) obtenido para esta curva es de 0,999 2, lo que demuestra que el modelo lineal se ajusta perfectamente a los datos experimentales y que la curva de calibración cumple con la ley de Lambert-Beer, en el intervalo de concentraciones analizado. La evaluación de la condición de homocedasticidad se realizó mediante el análisis de los residuos (figura 4), observándose la distribución homogénea de los mismos, por lo que se considera que el modelo presenta un buen ajuste a los datos, corroborando lo planteado anteriormente.

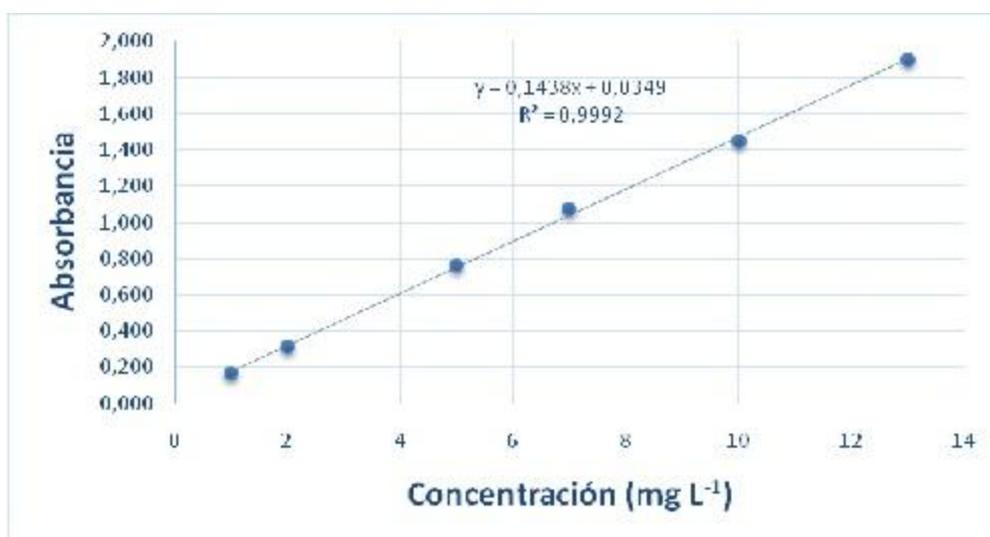


Fig. 3 - Curva de calibración de azul de metileno

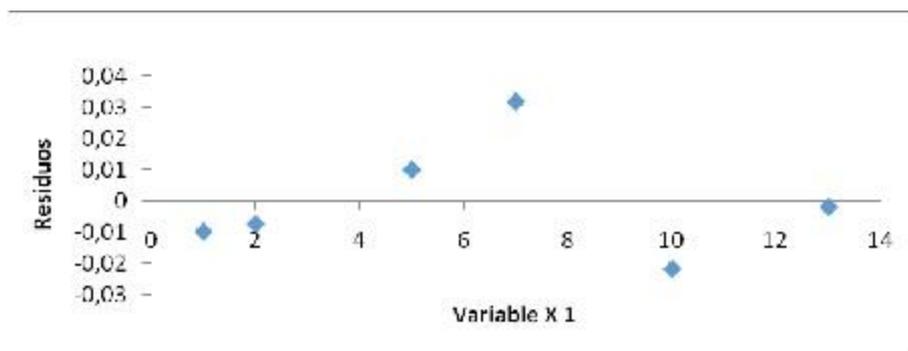


Fig. 4- Análisis de los residuos de la curva de calibración

Remoción del azul de metileno en el humedal

Después de su aplicación al humedal subsuperficial, a ambas disoluciones patrones de azul de metileno evaluadas (5 y 10 mg L⁻¹) presentaron una disminución apreciable de la coloración (figura 5), observándose solamente la coloración rojiza, característica del suelo ferralítico rojo empleado, en la disolución efluente del humedal experimental. Las concentraciones de colorante en el efluente del humedal presentaron valores inferiores al límite de detección del método (1 mg L⁻¹). Las eficiencias de remoción obtenidas fueron superiores a 80 % para la solución patrón de 5 mg L⁻¹ y 92 % para la de 10 mg L⁻¹. Estos resultados se corresponden con lo planteado por García y colaboradores ⁽¹⁵⁾, García y Corzo ⁽¹⁶⁾ y Delgadillo y colaboradores ⁽¹⁷⁾ acerca de que los humedales subsuperficiales presentan elevadas eficiencias de remoción de compuestos orgánicos, siendo su principal mecanismo de remoción la degradación microbiana y posterior asimilación por las plantas y la sorción en el sustrato.



Fig. 5 - Disoluciones patrones afluentes y efluentes al humedal

Evaluación de la depuración del agua residual efluente de la Fábrica “Juan Pedro Carbó Serviá”

Caracterización preliminar del agua residual efluente de la entidad

El agua residual efluente de la entidad presenta valores de DQO muy por encima del Límite Máximo Permisible Promedio (LMPP) para alcantarillado (700 mg L^{-1}) según NC 27/2012 ⁽⁵⁾ (tabla 1). Dicho resultado es esperado por la cantidad de productos orgánicos que se usan en el proceso de producción y por solo contar la fábrica con un tratamiento primario consistente en una fosa séptica. Este parámetro es fundamental en la caracterización de las aguas residuales de industrias textiles ya que la característica fundamental de dichas aguas residuales es la elevada carga orgánica que presentan, así como su elevada coloración.

La concentración de sólidos totales presenta valores muy bajos, en correspondencia con la función principal del tratamiento existente actualmente en la entidad, dando una medida del buen funcionamiento del tratamiento primario instalado. El valor de pH se encuentra ligeramente inferior al límite de vertimiento.

Tabla 1 - Parámetros evaluados al agua residual efluente

Parámetros	Concentración	LMPP NC:27/2012
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	1 376,6 ±118,5	700
Solidos Totales (mg/L)	0,03 ± 0,01	-
pH (u)	5,76 ± 0,90	6-9
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{s/cm}$)	1 205 ± 64	4 000

Remoción de materia orgánica del agua residual efluente de la entidad en el humedal experimental

Como se muestra en la tabla 2, la eficiencia de remoción de materia orgánica en el agua residual efluente de la Fábrica “Juan Pedro Carbó Serviá” después de ser tratada en el humedal experimental fue elevada (92,2 %), demostrando la efectividad de estos sistemas

de tratamiento para la remoción de compuestos orgánicos, como se explicó anteriormente.⁽¹⁸⁻²¹⁾ Se obtiene un valor de DQO y pH que cumple con el LMPP para el vertimiento al alcantarillado, parámetros que con el sistema de tratamiento instalado actualmente en la entidad no cumplen con la legislación vigente, pudiéndose implementar un humedal subsuperficial como tratamiento secundario en la entidad antes de ser vertidas sus aguas residuales al alcantarillado.

Tabla 2 - Valores de dco afluente y efluente al humedal

Parámetro	C(DQO) Afluente	C(DQO) Efluente	Eficiencia de remoción (%)
Demanda Química Oxígeno (mg O ₂ L ⁻¹)	1 376,6 ± 118,5	106,9 ± 18,1	92,2
pH (u)	5,76 ± 0,90	6,75 ± 0,74	-

Conclusiones

El humedal experimental logró la remoción del azul de metileno en las dos disoluciones patrones evaluadas hasta valores inferiores a 1 mg L⁻¹, obteniéndose eficiencias de remoción superiores al 80 %. Las aguas residuales efluentes de la fábrica “Juan Pedro Carbó Serviá” no cumplen con el límite de vertimiento para la Demanda Química de Oxígeno y el pH, dicha agua residual al ser tratada en el humedal subsuperficial experimental logra valores de Demanda Química de Oxígeno y pH que cumplen con el límite de vertimiento. La eficiencia de remoción de materia orgánica en el agua residual de la entidad en el humedal experimental alcanzó valores superiores al 90 %.

Referencias bibliográficas

1. BARRIOS ZIOLO, L. F., GAVIRIA RESTREPO, L. F., AGUDELO, E. A.; CARDONA GALLO, S. A. "Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión". *DYNA*. 2015, **82** (191), 118-126. ISSN 0012-7353.
2. SALAS, G. "Tratamiento por oxidación avanzada (Reacción Fenton) de aguas residuales de la Industria Textil". *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*. 2010, **13**, 30-38. ISSN: 1726-2208
3. SALINAS, M. *Evaluación de un sistema de biofiltración y humedal para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil*. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2011. Disponible en www.ptolomeo.unam.mx
4. HORMAZA, A.; SUÁREZ GARCÍA, E. "Estudio del proceso de biosorción de dos colorantes estructuralmente diferentes sobre residuos avícolas". *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 2009, **75**, 329-338. ISSN: 1810-634X
5. ONN. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. Norma Cubana, NC: 27/2012. Cuba. 2012.
6. GABRIEL, J.; QUELUZ, T.; DRIZO, A.; SÁNCHEZ ROMÁN, R. M. "Performance Evaluation of First-Order Hydraulic Models for COD Removal in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands". *Journal of Environmental Engineering*. 2017, **143** (10), 601-619. ISSN 0733-9372
7. WU, S.; KUSCHK, P.; JAN VYMAZAL, H. B.; DONG, R. "Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review". *Water Research*. 2014, **57**, 40-55. ISSN 0043-1354
8. VYMAZAL, J. "Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review". *Ecological Engineering*. 2014, **73**, 724-751. ISSN 0925-8574
9. DAVIES, L. C.; CARIAS, C. C.; NOVAIS, J. M.; MARTINS DIAS S. "Phytoremediation of textile effluents containing azo dye by using *Phragmites australis* in a vertical flow intermittent feeding constructed wetland". *Ecological Engineering*. 2005, **25** (5) 594-605. ISSN 0925-8574
10. SOON AN, O.; KATSUHIRO, U.; DAISUKE, I.; KAZUAKI, Y. "Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow

constructed wetland". *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165** (1-3), 696-703. ISSN 0304-3894

11. PÉREZ, M.; HERNANDEZ, J.; BOSSENS, J.; ROSA, E., TACK, F. "Vertical flow constructed wetlands: kinetics of nutrient and organic matter removal". *Water Science & Technology*. 2014, **70** (1), 76-81. ISSN 0273-1223.

12. GONZÁLEZ, Y. M.; PÉREZ, M.; MARTÍNEZ, P.; DÍAZ, Y. "Humedales subsuperficiales horizontales en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO". *Afinidad*. 2016, **73** (573), 50-54. ISSN 0001-9704.

13. PÉREZ, M. M.; ROSA, E.; TACK, F.; VANDEMOORTEL, A. "Caracterización de sustratos de filtros de suelo plantados: Influencia en la depuración de aguas residuales". *Afinidad*. 2011, **68**, 124–128. ISSN 0001-9704.

14. APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st edn, Washington, DC. 2000. ISBN 10: 0875530478

15. GARCÍA, J.; AGUIRRE, P.; BARRAGÁN, J.; MUJERIEGO, R.; MATAMOROS, V.; BAYONA, J. M. "Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands". *Ecological Engineering*. 2005, **25** (4) 405–418. ISSN 0925-8574

16. GARCÍA SERRANO, J.; CORZO HERNÁNDEZ, A. *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. 2008. Disponible en 41. <http://hdl.handle.net/2117/2474>

17. DELGADILLO, O.; CAMACHO, A.; PÉREZ, L. F.; ANDRADE, M. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Edición Nelson Antequera Duran Bolivia, 2010. ISBN: 978-99954-766-2-5.

18. CASIERRA MARTÍNEZ, H. A.; CHARRIS OLMOS, J. C.; CASELLES OSORIO, A.; PARODY MUÑOZ, A. E. "Organic Matter and Nutrients Removal in Tropical Constructed Wetlands Using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae)". *Water, Air, & Soil Pollution*. 2017, **228** (9), 338-350. ISSN 0049-6979.

19. ANGASSA, K.; LETA, S.; MULAT, W.; KLOOS, H.; MEERS, E. "Organic Matter and Nutrient Removal Performance of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Planted with

Phragmite karka and Vetiveria zizanioides for Treating Municipal Wastewater”. *Environmental Processes*. 2018, **5** (1), 115–130. ISSN 2198-7491.

20. CASELLES OSORIO, A.; VEGA, H.; LANCHEROS, J. C.; CASIERRA MARTÍNEZ, H. A.; MOSQUERA, J. E. “Horizontal subsurface-flow constructed wetland removal efficiency using *Cyperus articulatus* L.”. *Ecological Engineering*. 2017, **99**, 479-485. ISSN 0733-9372.

21. ÁVILA, C.; BAYONA, J. M.; MARTÍN, I.; SALAS, J. J.; GARCÍA, J. “Emerging organic contaminant removal in a full-scale hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse”. *Ecological Engineering*. 2015, **80**, 108-116. ISSN 0733-9372.