

Remoción de hidrocarburos, mediante biosorción con bagazo de caña de azúcar y humedales horizontales subsuperficiales

Pastora de la C. Martínez-Nodal^{1*}, Iván Rodríguez-Rico², Elena Rosa-Domínguez¹ y Maira María Pérez-Villar³

1. Departamento de Grados Científicos. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuní, km. 5. Santa Clara. Cuba. CP: 54830.

* pastoramn@uclv.edu.cu

2. Departamento Ingeniería Química. Facultad de Química – Farmacia Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuní, km. 5. Santa Clara. Cuba. CP: 54830.

3. Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA). Facultad de Química – Farmacia Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuní Km. 5. Santa Clara. Cuba. CP: 54830.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la remoción de hidrocarburos mediante un sistema de tratamiento que utiliza bagazo natural de la caña de azúcar y la combinación con un humedal de flujo subsuperficial. Para la evaluación del sistema, se utilizó una columna rellena con bagazo de caña de azúcar natural, seguida de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal. La planta utilizada fue la especie emergente *Cyperus alternifolius*. El sistema se alimentó con el agua oleosa (residuo peligroso). Una vez adaptada la planta, se evaluó el sistema completo. El sistema trabajó con un caudal de 2 L/h. Al efluente final del sistema de tratamiento, se le determinaron los parámetros: pH, demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuelto (OD) e hidrocarburos totales (HCT). Se propone un esquema tecnológico de baja complejidad tecnológica, bajo costo y sostenible para la remoción de hidrocarburos. El diseño tecnológico se realizó utilizando la información obtenida a escala experimental.

Palabras clave: biosorbentes, bagazo de caña de azúcar, remoción de hidrocarburos, humedales construidos.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the removal of hydrocarbons by means of a treatment system using natural bagasse from sugar cane and the combination with a subsurface flow wetland. For the evaluation of the system, a column filled with natural sugarcane bagasse was used, followed by a wetland constructed of horizontal subsurface flow. The plant used was the emerging species *Cyperus alternifolius*. The system was fed with oily water (hazardous waste). Once the plant was adapted, the entire system was evaluated. The system worked with a flow rate of 2 L / h. To the final effluent of the treatment system, the parameters were determined: pH, chemical oxygen demand (COD), dissolved oxygen (DO) and total hydrocarbons (TH). A technological scheme of low technological complexity, low cost and sustainable for the removal of hydrocarbons is proposed. The technological design was made using the information obtained on an experimental scale.

Key words: Biosorbents, sugarcane bagasse, hydrocarbon removal, constructed wetlands.

INTRODUCCIÓN

En la industria eléctrica se genera un residual líquido con un alto contenido de hidrocarburos, producto de la centrifugación que se realiza con el objetivo de eliminar impurezas, que contiene el combustible utilizado como principal materia prima para la generación de energía eléctrica distribuida. Este es considerado como un residuo peligroso (RESPEL), que debe ser tratado de forma adecuada y segura para evitar posibles daños al suelo, a las aguas superficiales, subterráneas y a la población en general, en caso de derrames o vertimientos sin la calidad requerida (2). Las alternativas de tratamientos no convencionales como: la biosorción y los humedales horizontales de flujo subsuperficial, se perfilan como soluciones tecnológicas de escasa

complejidad, sustentables y novedosas, para la depuración de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos, en países en vías de desarrollo (3 - 5). Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar la remoción de hidrocarburos mediante un sistema de tratamiento que utiliza bagazo natural de la caña de azúcar (BN) como biosorbente y la combinación con un humedal de flujo subsuperficial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sistema de tratamiento utilizado. Columna rellena con bagazo natural de caña de azúcar seguido de un humedal horizontal de flujo subsuperficial

Para la evaluación del sistema de tratamiento propuesto a escala de laboratorio, se utilizó una columna rellena con bagazo de caña de azúcar natural, con diámetro de partículas (dP) entre +1 -2 mm y una relación $D/dp=34.6$ y $H/D=6.15$ respectivamente. Como tratamiento posterior se utilizó un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal de 0.4 m de largo, 0.17 de ancho y 0.09 m de profundidad (6, 7).

El agua a tratar (afluente): el sistema se alimentó con el agua oleosa generada en una Central Eléctrica (CE) que opera con diesel, después de una separación física de la fase combustible (diesel).

Medio poroso: grava caliza 10-15 mm.

Planta emergente: *Cyperus Alternifolius*, ya que se encuentra con gran abundancia en las zonas donde se vierte agua oleosa y se reporta con buenos resultados en la depuración de aguas residuales por (9,10); además por su alta adaptabilidad a los medios húmedos sin circulación de agua.

El flujo. Se aplica el flujo intermitente, de (2 L/h), al tener en cuenta estudios similares a pequeña escala, reportados en la literatura.

Evaluación de la calidad del afluente y el efluente. Se realiza mediante los Límites Máximos Permisible Promedio (LMPP) establecidos las NC 27.2012. Ríos y Embalses.

En la figura 1, se puede observar la estación experimental utilizada para el tratamiento de estos residuales y la adaptación progresiva de la de especie emergente (*Cyperus alternifolius*) al medio.

Al afluente de la columna se le determinaron los parámetros que se muestran en la tabla 1, de acuerdo con Blanco (8).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados obtenidos en la caracterización y evaluación del afluente (agua oleosa) al sistema

En la tabla 2, se muestran los valores promedios obtenidos de los parámetros determinados al agua oleosa que se utilizó (afluente), comparados con los LMPP establecidos en la NC 27.2012. Como se puede observar, el agua residual oleosa no cumple con la norma de vertimiento en el indicador materia orgánica (DQO). En el caso del parámetro hidrocarburos totales (HCT), se prohíbe su vertimiento (PV) a cualquier cuerpo receptor.

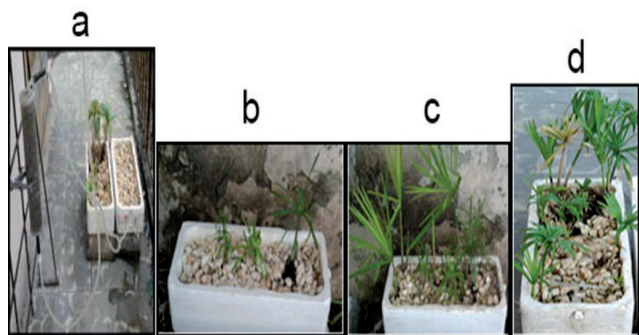


Figura 1. a- Estación experimental utilizada, b- 9 días, c- 27 días y d- 45 días de adaptación al medio.

Tabla 1. Parámetros de calidad y métodos analíticos empleados

Parámetros	UM	Método empleado
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	Método electrométrico
Color verdadero (CV)	mg/L. Pt	Método escala platino-cobalto
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	Método dicromato. Refluj. abierto
Oxígeno disuelto (OD)	mg O ₂ /L	Método electrométrico
Hidrocarburos totales (HCT)	mg/L	Extracción gravimétrica

Tabla 2. Valores de los parámetros analizados al afluente del sistema y LMPP

Parámetros	UM	Afluente	LMPP NC 27.2012
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	7.76	6 - 10
Color verdadero (CV)	mg/L. Pt	250	-
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	695.5	250
Oxígeno disuelto (OD)	mg O ₂ /L	0	2
Hidrocarburos totales (HCT)	mg/L	1444	PV

Remoción de hidrocarburos en el efluente del sistema compuesto por una columna rellena con bagazo natural de caña de azúcar como biosorbente, seguida de un humedal horizontal de flujo subsuperficial

En la tabla 3 se muestra una comparación de los resultados obtenidos en los muestreos realizados al afluente, el efluente del sistema y los porciento de remoción obtenidos, por lo que se corrobora lo planteado por los autores (9, 10) cuando se utilizan humedales horizontales como tratamientos terciarios.

En la tabla 4, se observa que excepto el índice de hidrocarburos, los demás parámetros se encuentran por debajo del LMPP reportado.

Aunque la norma (NC 27.2012) prohíbe el vertimiento directo a la red de alcantarillado y cualquier cuerpo receptor de: gasolina, petróleo y aceites (minerales), se considera que por ser una concentración baja (15.2 mg/L), tener un oxígeno disuelto de 3.7 mg/L y ser el cuerpo receptor (suelo) de baja calidad y

Tabla 3. Comparación de los valores obtenidos al afluente y efluente del sistema

Parámetros	UM	Afluente	Efluente	% R
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	7.76	7.64	-
Color verdadero (CV)	mg/L Pt	250	45	82.0
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	695.5	62.24	91.05
Hidrocarburos totales (HCT)	mg/L	1444	15.2	98.9
Oxígeno disuelto (OD)	mg O ₂ /L	0	3.70	-

Tabla 4. Valores de los parámetros analizados al efluente final del sistema de tratamiento con los normativos.

Parámetros	UM	Efluente	LMPP NC 27.2012
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	7.64	6 - 10
Color verdadero (CV)	mg/L. Pt	45	
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	62.24	250
Oxígeno disuelto (OD)	mg O ₂ /L	3.70	
Índice de hidrocarburos (IHC)	mg/L	15.2	PV

utilidad, pueden ser vertidos sin causar daño alguno, según estudios realizados (3, 4).

Diseño de la columna de adsorción rellena con bagazo natural de caña como tratamiento secundario y un humedal horizontal de flujo subsuperficial como tratamiento terciario

Escalado de la columna de adsorción

Para la realización del escalado de la columna de adsorción se tuvo en cuenta los principios establecidos en la metodología desarrollada (12), tanto para el modelo como para el prototipo: similitud geométrica, similitud térmica, las físicas del fluido se mantienen constantes para garantizar el régimen de transferencia de masa (similitud cinemática), similitud dinámica (dado que el Reynolds es constante) y régimen de transferencia de masa constante. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos.

En la figura 2, se muestra el diseño de la columna de lecho fijo, rellena con bagazo natural de caña de

Tabla 5. Parámetros de operación según la relación de escala, para una columna.

Parámetros	Modelo	Piloto
H (m)	0.32	1.6
d (m)	0.052	0.104
ΔP (Pa)	16.4	82.2
Q (m ³ /s)	5.6E-07	2.2E-06
m (kg)	0.06	0.95*

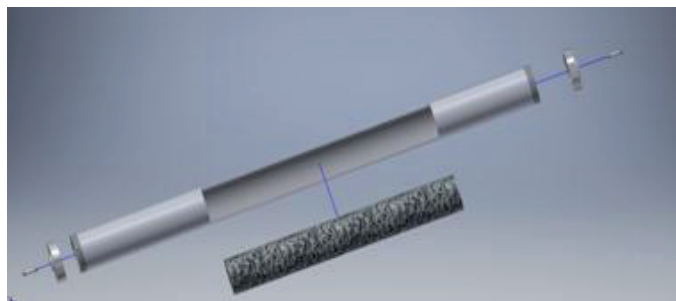


Figura 2. Diseño de la columna de lecho fijo.

azúcar piloto y el desglose de sus componentes.

Diseño del humedal horizontal de flujo subsuperficial

Para el diseño del sistema piloto se tuvieron en cuenta los parámetros usados en el humedal experimental.

Dimensionamiento biológico

Se realiza el modelo cinético de primer orden para la remoción de DQO (constante cinética ($KT = K20$): 1.104 d⁻¹), (13, 14,15). En la tabla 6 se muestran los resultados del tiempo de retención y el área calculados para el humedal subsuperficial horizontal, siendo necesario un tiempo de retención del agua residual en el humedal de un día.

Dimensionamiento hidráulico

El dimensionamiento hidráulico se utiliza para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida su área superficial. El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso. Conocido el ancho y teniendo en cuenta el área superficial determinada con el dimensionamiento biológico, se determina la longitud del sistema. (tabla 7).

En la figura 3, se observa la distribución de las dos celdas del humedal con los diferentes componentes y se aprecia la capa compacta de grava, sobre la cual se coloca la tubería de distribución.

En la tabla 8 se muestra un resumen de los principales parámetros de diseño de una celda del humedal.

En la superficie del humedal se colocan tuberías perforadas para lograr la distribución uniforme del agua residual en todo el lecho, proponiéndose un diámetro de 1 pulgada para la tubería de alimentación y ½ pulgada para la tubería de distribución.

Tabla 6. Tiempo de retención y área superficial para el contaminante DQO

Tiempo de retención (d)	1.0
Área superficial (m ²)	2.0

Tabla 7. Dimensionamiento hidráulico

Ancho (m)	0.21
Largo (m)	4.0

Tabla 8. Parámetros de diseño del humedal subsuperficial horizontal rectangular

Parámetros de diseño	
Planta emergente	<i>Cyperus Alterniufolius</i>
Medio poroso	Grava 10-16 mm
Profundidad	0.4 m
Largo	4 m
Ancho	0.5 m
Área superficial	2.0 m ²
Tiempo de retención hidráulico	1.0 día
Pendiente	0.01 m/m
Flujo	0.19 m ³ /d

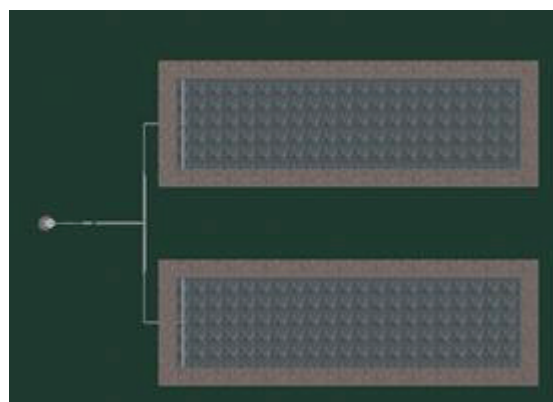


Figura 3. Distribución de las celdas del humedal horizontal de flujo subsuperficial.

CONCLUSIONES

1. La tecnología de tratamiento no convencional, de baja complejidad tecnológica y de bajo costo, alcanza altas eficiencias de remoción de contaminantes, presentes en las aguas oleosas.
2. Según los resultados obtenidos, de la revisión bibliográfica y de la búsqueda de patentes, se realiza una solicitud de Patente de Invención, número 2016-0085 a la Oficina Cubana de la Propiedad (OCPI), la cual fue otorgada a la Universidad Central de Las Villas, en septiembre 2018.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pérez, M. (2012). Evaluación del comportamiento de humedales subsuperficiales de flujo vertical en la depuración de aguas residuales domésticas. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Tutores: Dra. Elena Rosa Domínguez. Dr. Prof. Filip Tack. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.
2. EPA. 832-F-00-023(2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C.
3. Martínez, J.; Mallo, M.; Lucas R; Álvarez J; Salvarrey, A; Gristo, P. (2005). Guía para la gestión de residuos tóxicos y peligrosos. Fundamentos Tomo I. Centro coordinador del convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay.
4. Tietz, A.; Kirschner, A.; Langergraber, G.; Sleytr, K.; Haberl, R., (2007). Characterisation of microbial bio-coenosis in vertical subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. 380 (1-3).
5. Lakdawala, M; Pate, Y. (2012). The effect of low cost material Bagasse Fly ash to the removal of COD Contributing component of combined waste water of Sugar Industry. *Scholars Research Library Archives of Applied Science Research*, 4 (2):852-857. ISSN 0975-508X CODEN (USA) AASRC9.
6. Beom-Goo, L; Han, J; Rowell, R. (1999), Oil sorption by lignocellulosic fibers. In: *Kenaf Properties, Processing and Products*; Mississippi State University, Ag & Bio Engineering, 423-433, ISBN 0-9670559-0-3.
7. Watson, J. T.; Reed, S. C.; Kadlec, R. H.; Knight, R. L.; Whitehouse, A. E. (1989). Performance expectations and loading rates for constructed wetlands. En Hammer D.A. (ed) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publishers. Chelsea.
8. APHA, AWWA, WEF (2000). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed. Washington DC: American Public Health Association.
9. Blanco, E. (2008). Tratamiento de aguas de producción con humedales construidos de tipo subsuperficial. Trabajo de grado presentado ante la ilustre Universidad del Zulia para optar al grado académico de: Magíster Scientiarum en Ingeniería Ambiental. Tutor: Prof. Edixon Gutiérrez. Co-tutor: Ing. Marisel Núñez Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, División de Postgrado Programa de postgrado en Ciencias Ambientales Tratamiento. Maracaibo.
10. Korboulewsky, N.; Wang, R.Y.; Baldy, V. (2012), Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal. *Bioresource Technology*. 105, pp. 9-14.
11. Vasudevan, P.; Griffin, P.; Warren, A.; Thaphiyal, A.; Tandon M. (2011). Localized domestic wastewater treatment: part I Constructed wetlands (an overview). *Journal of Scientific and Industrial Research*. 70 583-594.
12. Rodríguez, R; Blázquez, G. (2010). Escalado de reactores químicos y biológicos. Editorial Calero de Hoces, Mónica, España. ISBN 13: 978-84-613-9139-4.
13. Reed, S., Crites, R. & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd Edition ed. New York: McGraw-Hill.
14. Kadlec, R. & Knight, R. (1996). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. In: IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control. s.l. IWA Publishing, pp. 156.
15. Crites, R, and Tchobanoglou, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw Hill Co. New York.