

SISTEMA BIOLÓGICO NOVEDOSO Y EFICIENTE PARA TRATAR AGUA RESIDUAL DE UN INGENIO AZUCARERO

NEW AND EFFICIENT BIOLOGICAL TREATMENT FOR SUGARMILL WASTEWATER

Gutiérrez-Hernández R.F¹. y Nájera-Aguilar H.A².

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tapachula, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica.
e-mail: rgutierrez@ittapachula.edu.mx;

²Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
e-mail: hugo.najera@unicach.mx

Resumen.

Con el objetivo de dar cumplimiento a lo establecido en la legislación ambiental que describe la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, se desarrolló un novedoso y eficiente proceso para tratar el agua residual generada en el área de producción de un ingenio azucarero. El proceso desarrollado denominado sistema BEME (Biorreactor Empacado con Material Estabilizado), es un sistema biológico semiaeróbico rico en consorcios microbianos presentes en el material estabilizado que se encuentra en los rellenos sanitarios. Durante las pruebas desarrolladas con diferentes cargas hidráulicas, la carga orgánica alimentada, medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO), tuvo un valor promedio de 4830 ± 490 mg/L. El sistema se estabilizó en las primeras tres semanas de operación, y alcanzó sus mayores remociones durante la quinta semana de monitoreo, logrando un efluente con una DQO de 347 ± 16 mg/L, lo que representó una eficiencia promedio de remoción de la DQO del 93%. Los resultados obtenidos presentan al sistema BEME como una alternativa eficiente, novedosa y amigable en su operación, para el tratamiento del agua residual generada en el proceso de extracción de azúcar de caña. A diferencia de los sistemas biológicos convencionales, el sistema BEME se caracteriza por su mínima generación de lodos y olores, así como su bajo consumo de energía.

Palabras clave: *Agua residual; Biorreactor Empacado con Material Estabilizado; Ingenio azucarero; Material estabilizado, Demanda Química de Oxígeno.*

Abstract.

In order to comply with the provisions of the environmental legislation that describes the Official Mexican Standard NOM-001-SEMARNAT-1996, which establishes the maximum permissible limits of pollutants in wastewater discharges in national waters, a novel and efficient process was developed to treat the wastewater generated in the production area of a sugar mill. The process developed called BEME system (Bioreactor Packed with Stabilized Material), is a semiaerobic biological system rich in microbial consortiums present in the stabilized material found in landfills. During the tests developed

with different hydraulic loads, the organic load fed, measured as Chemical Oxygen Demand (COD), had an average value of 4830 ± 990 mg/L. The system stabilized in the first three weeks of operation, and reached its highest removals during the fifth week of monitoring, achieving an effluent with a COD of 347 ± 16 mg/L, which represented an average efficiency of COD removal 93%. The results obtained present the BEME system as an efficient, novel and user-friendly alternative for the treatment of wastewater generated in the sugar cane extraction process. Unlike conventional biological systems, the BEME system is characterized by its minimal generation of sludge and odors, as well as its low energy consumption.

Keywords: Wastewater, Aged Refuse Bioreactor Packed, Sugarmill, Aged Refuse, Chemical Oxygen Demand.

INTRODUCCIÓN.

La caña de azúcar es uno de los cultivos comerciales de mayor importancia a nivel mundial. México se ubica dentro de los primeros seis países exportadores de azúcar de caña, encontrando en los Estados Unidos uno de sus principales mercados (Bustos *et al.* 2014). De acuerdo con el Informe Estadístico Agroindustrial de la Caña de Azúcar (2017), la superficie cosechada a nivel nacional durante el periodo 2016-2017 fue de 777,078 ha, con un rendimiento de 7.67 ton de azúcar producida por ha, sin embargo, durante los días de zafra, de acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (2006), esta actividad genera 45.9 m³/s de agua residual, por lo que considerando los 175 días de zafra reportado para este último periodo (2016-2017), se produjo un volumen de 694×10^6 m³ de agua residual.

En general, se considera que la industria azucarera produce alrededor de 1000 L de agua residual por ton de caña azúcar procesada (Hampannavar y Shivayogimath 2010). Esta agua residual se caracteriza por presentar altas cargas orgánicas medidas como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), con valores en el rango de 1052 - 4641 y 1752 - 8339 mg/L, respectivamente (Sánchez 1988; Fito *et al.* 2018), lo que le confiere una alta biodegradabilidad. También destaca la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST), y en menor grado otros parámetros como grasas y aceites, además de cloruros y sulfatos (Güven *et al.* 2009), por lo que cuando este tipo de agua se descarga sin tratamiento previo, representa un problema de contaminación para ecosistemas acuáticos y terrestres (Sahu y Chaudhari 2015). Las concentraciones en carga orgánica y SS sobrepasa por mucho los LMP establecidos en la normativa mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996).

Dentro de las alternativas de tratamiento para el agua residual de los ingenios azucareros, sobresalen los procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios, reportándose en la literatura una mayor aplicación de estos últimos, dada la elevada carga orgánica que puede permitir el aprovechamiento del biogás producido como fuente de energía. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones, un solo proceso no llega a ser suficiente, por lo que se han ensayado con sistemas híbridos (anaerobios-aerobios). De los estudios anaerobios reportados, se encuentra el realizado por Hampannavar y Shivayogimath (2010), quienes ensayaron con reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) bajo cargas orgánicas de 16 kg/m³.d y TRH de 6 h, logrando una remoción del 89% en DQO. Otro estudio es el reportado por Pradeep *et al.* (2013), quienes con 12 h de TRH lograron una reducción del 79 y 81.8% de la DBO y DQO, respectivamente, y una producción de biogás de 445 ml/d, en un reactor anaerobio de película fija y flujo descendente. En lo relacionado a procesos aerobios, se ha empleado el sistema de lagunas aireadas que conlleva un menor costo de operación, pero los requerimientos de área han limitado mayores aplicaciones (Nahle 1990). Otro sistema ensayado en este tipo de agua residual, es el reportado por Hamoda y Al-Sharekh (1999), quienes probaron con un reactor aerobio de película fija sumergida, y para bajas cargas orgánicas (5 g DBO/m².d) alcanzaron remociones de 97.9% en DBO y 73.6% en DQO, en tanto que para mayores cargas orgánicas (120 g DBO/m².d), las eficiencias bajaron a valores de 88.5% en DBO y de 67.8% en DQO. Aunque en estos estudios las remociones en carga orgánica han sido importantes, en ninguno de ellos se alcanzaron los niveles de eliminación de contaminantes que den cumplimiento con las legislaciones locales, por lo que una etapa de depuración final es necesaria, y la combinación de sistemas híbridos ha representado una alternativa de solución.

De igual manera, también se ha ensayado con procesos fisicoquímicos a pesar de la biodegradabilidad que posee el agua residual de la industria azucarera, tal es el caso del trabajo reportado por Sahu *et al.* (2018), quienes probaron sistemas individuales y combinados de tratamiento (térmico-electrocoagulación); para el método térmico alcanzaron una reducción de 75.6 y 79.2% de DQO y Color, respectivamente, en tanto que para el método combinado las remociones fueron más favorables, 97.8% en DQO y 99.7% en Color. Otro estudio es el reportado por Bustos *et al.* (2014), quienes trabajaron con carbón activado inmovilizado, y alcanzaron 90% de la remoción de color bajo la relación líquido/sólido de 0.5:1 a 200 rpm y con 2 horas de reacción.

Un novedoso enfoque en el tratamiento de aguas residuales consiste en el uso de residuos sólidos urbanos (RSU) extraídos de los rellenos sanitarios después de más de 8 años de haber sido dispuesto en el sitio. Este material, denominado material estabilizado, es empleado como empaque en biorreactores,

generando una alternativa amigable, sustentable y de bajo costo de operación. Esta tecnología se ha denominado Biorreactor Empacado con Material Estabilizado (BEME).

Utilizando esta novedosa tecnología, diversos grupos de investigación, han reportado eficiencias importantes de remoción de contaminantes para diferentes matrices acuosas, tal como muestran los estudios realizados por Li *et al.* (2010) en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, quienes trabajaron con una carga hidráulica (C.H.) de 14 L/m³-d, con remociones de 64% en DQO, 95.8-99.8% en DBO y 90% en color; otro trabajo en el tratamiento de lixiviados es el reportado por Xie *et al.* (2010), donde se alcanzó una remoción de 80% en DQO y 90% en DBO con una C.H. de 20 L/m³-d; por otra parte, Zhao & Shao (2004) trataron aguas de rastro con una C.H. de 250 L/m³-d, realizando una aspersión continua por 3 horas una vez al día, con lo que se removió un 90, 88 y 50% en DQO, DBO y color, respectivamente. También los BEME se han ensayado en aguas más nobles como las aguas grises, con remociones de hasta un 93% en DQO, una C.H. de 159 L/m³-d y con una alimentación de 4 horas al día (Zhao *et al.* 2007).

Las altas eficiencias en la remoción de contaminantes mostradas por este sistema, son atribuidas principalmente a la gran actividad microbiana que existe en el material estabilizado (Song *et al.*, 2011). Se ha reportado la existencia de grandes y diversas poblaciones de microorganismos que se han aclimatado a altas concentraciones de contaminantes al paso de los años, desarrollando una gran capacidad para degradar materia orgánica refractaria (Xie *et al.*, 2012).

Así, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la remoción de materia orgánica medida como DQO en aguas residuales provenientes del área de proceso de un ingenio azucarero en el estado de Chiapas, México, usando un BEME bajo diferentes C.H. evaluadas a lo largo 77 días de operación.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Preparación de la Muestra.

La muestra utilizada en las pruebas de tratabilidad fueron colectadas de un ingenio azucarero ubicado en el sureste mexicano, y transportada al laboratorio para su almacenamiento (4 °C) hasta su posterior análisis. Antes de alimentar a los Biorreactores, el pH de la muestra fue ajustada a un valor entre 6 y 8.

Material estabilizado (ME).

El ME fue extraído del relleno sanitario de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Fue secado y separado en función de su tamaño de partícula. Antes de empacar al Biorreactor, del ME se retiró el vidrio, el cartón, los plásticos y las piedras.

Construcción del Biorreactor empacado con material estabilizado (BEME)

El Biorreactor fue construido con geometría cilíndrica ($\varnothing = 0.152$ m y $h = 3.0$ m). En la parte inferior del biorreactor se instaló una sección adicional de 0.30 m rellena con grava, a continuación 2.60 m de ME, y finalmente 10 cm de bordo libre, dando una altura total de 3.0 m. Para contener todo el material del biorreactor, este fue cerrado en la parte inferior con una tapa de PVC perforada.

Técnicas analíticas.

De manera breve se describen las técnicas analíticas empleadas antes, durante y al término de cada proceso.

pH. Se tomó la medida de la concentración de ión hidrógeno al agua residual del ingenio, con el objetivo de obtener un valor de pH entre 6 y 8, favorable para el buen funcionamiento de sistemas de tratamiento biológico.

Demanda química de oxígeno (DQO). Se siguió el método espectrofotométrico, empleando la disolución de Ag_2SO_4 en H_2SO_4 y la disolución de digestión, según la NMX-AA-030-SCFI-2011; las muestras se digitaron a 150°C por 2 horas y posteriormente se tomó lectura de la absorbancia a 600 nm en un espectrofotómetro (Sp-3000 nano).

Operación y monitoreo del Biorreactor

El BEME fue alimentado con agua residual del Ingenio a temperatura ambiente bajo dos C.H. (50 y 75 $\text{L}/\text{m}^3\text{-d}$). La alimentación se llevó a cabo por aspersión sobre todo el espejo del BEME en tres tiempos al día. La eficiencia del biorreactor se determinó diariamente mediante la estimación del porcentaje de remoción de la DQO (Ec. 1).

$$\% \text{ Remoción} = [(C_i - C_f)/C_i] \times 100 \quad (1)$$

Dónde: C_i : Concentración inicial

C_f : Concentración final

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Las pruebas de tratabilidad se iniciaron inmediatamente después de concluir un proceso de adaptación del sistema BEME. Durante el periodo de estudio, que tuvo una duración de 77 días, la carga orgánica presente en la alimentación, medida como DQO, fue en promedio de $4830 \pm 490 \text{ mg L}^{-1}$. En las pruebas de tratabilidad se evaluaron dos C.H. diferentes (50 y $75 \text{ L/m}^3\text{-d}$). El perfil de comportamiento de la DQO presente en el efluente del sistema BEME se puede observar en la Fig. 1, mientras que el análisis de varianza realizado a los datos obtenidos demuestra la existencia de una diferencia significativa entre los dos tratamientos.

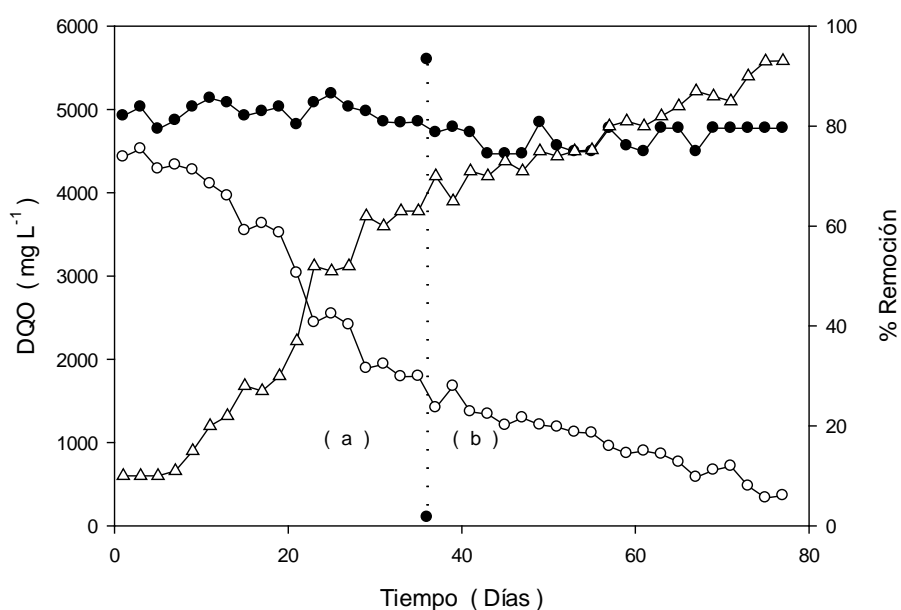


Fig. 1. Perfil de comportamiento de la DQO durante el tiempo de monitoreo. (a) C.H. de $50 \text{ L/m}^3\text{-d}$, (b) C.H. de $75 \text{ L/m}^3\text{-d}$. Donde: (●) Influyente, (○) Efluente, (Δ) Remoción en %.

De la figura 1 puede observarse que alrededor de la primera semana de monitoreo, la remoción en DQO fue inferior al 20%, pero para las 4 semanas restantes bajo la C.H. de $50 \text{ L/m}^3\text{-d}$, el sistema alcanzó remociones máximas del orden del 60%. Para la segunda C.H. ensayada ($75 \text{ L/m}^3\text{-d}$), la remoción continuó en ascenso hasta alcanzar valores del 93% de eliminación en DQO, lo que correspondió a valores de DQO inferiores a los 350 mg/L en el efluente final. Las remociones en DQO alcanzadas con el sistema BEME, son superiores a las reportadas por otros estudios ensayando con procesos biológicos y con el mismo tipo de agua residual, por ejemplo, al 89% reportado por Hampannavar y Shivayogimath (2010), quienes ensayaron con reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB), o el mencionado por

Pradeep *et al.* (2013), quienes con 12 h de TRH lograron una reducción del 79%, en un reactor anaerobio de película fija y flujo descendente. Otro estudio reportado es el de Hamoda y Al-Sharekh (1999), quienes con un reactor aerobio de película fija sumergida, alcanzaron remociones del 73.6%.

Los resultados de estos estudios dejan ver que aunque las remociones en carga orgánica (DQO) han sido importantes, en ninguno de ellos se alcanzaron los niveles de eliminación de contaminantes que den cumplimiento con las legislaciones locales, por lo que una etapa de depuración final es necesaria. Para el caso del presente trabajo, los primeros resultados muestran que el efluente obtenido del sistema BEME, puede cumplir con los LMP de descarga establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, y no requerir una etapa final de depuración, sin embargo, un mayor tiempo de monitoreo es necesario, además de un análisis más completo al efluente final para corroborar que el resto de parámetros contemplados en la Norma, no sobrepasan los LMP.

CONCLUSIONES.

- El sistema evaluado resultó ser altamente eficiente para tratar los efluentes generados en la industria azucarera, alcanzando a la fecha un 93% de remoción en DQO y con un efluente final menor a los 350 mg/L.
- Durante todo el periodo de operación, el sistema no generó lodos residuales, ni olores característicos de los procesos biológicos convencionales.
- El sistema fue operado de manera exitosa con un mínimo de consumo de energía, ya que durante su operación no se requirió aireación ni agitación dentro del reactor.

Literatura consultada:

Fito, J., Tefera, N., Kloos, H., & Van Hulle, S. W. (2018). Physicochemical Properties of the Sugar Industry and Ethanol Distillery Wastewater and Their Impact on the Environment. *Sugar Tech*, 1-13.

Hamoda M.F., Al-Sharekh H.A., (1999). Sugar wastewater treatment with aerated fixed-film biological systems, *Water Sci. Technol.* 40, 313–321.

Hampannavar U.S., Shivayogimath C.B., (2010). Anaerobic treatment of sugar industry wastewater by upflow anaerobic sludge blanket reactor at ambient temperature, *Int. J. Environ. Sci.* 1 (4) 631–639.

4to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México. 2016-2017. SAGARPA.

- Li, H., Gu, Y., Zhao, Y., & Wen, Z. (2010). Leachate treatment using a demonstration aged refuse biofilter. *Journal of Environmental Sciences*, 22(7), 1116-1122.
- Nahle C., (1990). Purification of wastewater in sugar factories—Anaerobic and aerobic treatment, N-elimination, *Zuckerindustrie*. 115, 27–32.
- Pradeep N.V., Anupama S., Arun Kumar J.M., Vidyashree K.G., Lakshmi P., Ankitha K., Pooja J., (2013). Treatment of Sugar Industry Wastewater in Anaerobic Downflow Stationary Fixed Film (DSFF) Reactor. *Sugar Tech*. DOI 10.1007/s12355-013-0227-8.
- Sahu, O. P., & Chaudhari, P. K. (2015). The characteristics, effects, and treatment of wastewater in sugarcane industry. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(3), 435-444.
- Sahu, O., Rao, D. G., Thangavel, A., & Ponnappan, S. (2018). Treatment of sugar industry wastewater using a combination of thermal and electrocoagulation processes. *International Journal of Sustainable Engineering*, 11(1), 16-25.
- Sanchez, L. Travieso, (1988). Distillery waste water treatment by high rate anaerobic filters, *Biotechnol. Lett.* 10(1). 521–522.
- Song, L., Shi, L., Zhao, Y., & Li, H. (2011). Novel engineering controls to increase leachate contaminant degradation by refuse: from lab test to in situ engineering application. *Ecological Engineering*, 37(11), 1914-1919.
- Xie, B., Lv, Z., Lv, B. Y., & Gu, Y. X. (2010). Treatment of mature landfill leachate by biofilters and Fenton oxidation. *Waste Management*, 30(11), 2108-2112.
- Xie, B., Xiong, S., Liang, S., Hu, C., Zhang, X., & Lu, J. (2012). Performance and bacterial compositions of aged refuse reactors treating mature landfill leachate. *Biosource Technology*. 103(1), 71-77.
- Zhao, Y., Lou, Z., Guo, Y., & Xu, D. (2007). Treatment of sewage using an aged-refuse-based bioreactor. *Journal of Environmental Management*, 82(1), 32-38.
- Zhao, Y., & Shao, F. (2004). Use of an aged-refuse biofilter for the treatment of feedlot wastewaters. *Environmental Engineering Science*, 21(3), 349-360.