

Depuración sostenible de efluentes piloncilleros mediante un sistema híbrido innovador: digestión anaerobia + humedal construido

Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Isis Giovanna Amador-Suárez, Andrea Alvarado-Vallejo, Erik Samuel Rosas-Mendoza y Alejandro Alvarado-Lassman *

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: alejandro.al@orizaba.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 1 de junio de 2025 Aceptado: 7 de julio de 2025 Publicado: 9 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.561>

Resumen: La elaboración artesanal de piloncillo en los trapiches veracruzanos, actividad que sostiene a cientos de familias mexicanas, genera efluentes ácidos (pH 3.9-5.5) y con DQO > 40 g L⁻¹, valores fuera de los límites de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Para ofrecer una alternativa eficiente de bajo costo, se construyó un sistema híbrido que combina un reactor anaerobio de biopelícula fija (FBBR) y humedales construidos con biopelícula fija (HC-BF). El FBBR (150 L útiles, relleno de tubos corrugados y matriz de fibra polimérica trató durante 45 días agua piloncillera (10.6 g DQO L⁻¹) y removió 57 % de la carga. El digestato diluido, alimentó seis celdas HC-BF plantadas con *Canna indica* y *Cyperus papyrus*; tras dos lotes de 15 d, la DQO final fue de 0.15 g L⁻¹ y la remoción global alcanzó 65 %, estabilizando el pH en 6.7. Las macrófitas mostraron crecimiento y floración, evidenciando adaptación al efluente. La combinación tezontle-matriz de fibra polimérica resultó una opción económica y replicable, mientras que el biogás del FBBR abre la puerta a integrar energías renovables y economía circular. El sistema FBBR + HC-BF es una solución prometedora que ayuda a los productores de piloncillo a cumplir la norma y avanzar hacia los ODS 6 y 7.

Palabras clave: efluentes piloncilleros; reactor anaerobio de biopelícula fija; humedales construidos; energía circular.

Introducción

La caña de azúcar constituye uno de los cultivos agroindustriales más relevantes de México; en 2022 el sector aportó 3.8 % de la producción mundial y el 60.5 % de la producción nacional se concentra en los estados de Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí (CONDESUCA, 2022). Dentro de esta cadena de producción (Figura 1), la elaboración artesanal de panela o piloncillo (bloques de azúcar morena solidificada) se realiza en pequeños molinos denominados trapiches, y es la principal fuente de ingresos para cientos de comunidades rurales veracruzanas (Cabrera Martínez & Aguilar Rivera, 2018); sin embargo, su operación implica un uso intensivo de agua y la posterior generación de efluentes con elevada carga orgánica y carácter ácido (Mozharias *et al.*, 2023).

Estudios de campo reportan consumos de agua de 6.5 a 7.5 m³ día⁻¹ (jornada de 8 h), para el lavado, enfriamiento y empackado del producto (Amador-Báez & Rangel-Calderón, 2019). Los efluentes de la industria azucarera varían según el tipo de proceso; para descargas piloncilleras se han medido pH ácidos de 3.9 a 5.5 (Quezada-Moreno *et al.*, 2017; Amador-Báez & Rangel-Calderón, 2019). En términos de carga orgánica, la vinaza de caña presenta alrededor de 29 g L⁻¹ de DQO, mientras que la melaza diluida utilizada en digestión anaerobia es de ≈ 40 g L⁻¹ de DQO (Meng *et al.*, 2017).

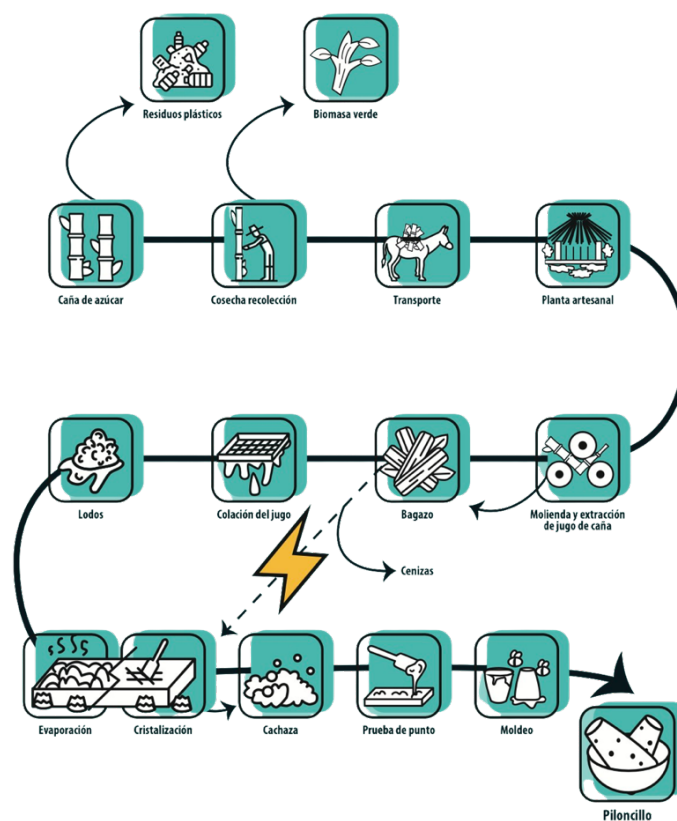


Figura 1. Proceso de producción de panela y puntos de generación de aguas residuales (Sánchez Castillo *et al.*, 2024).

Por otro lado, la melaza cruda puede alcanzar entre 134 y 1,089 g L⁻¹, y hasta ~1,170 g L⁻¹ cuando se expresa con la densidad industrial promedio (Oliveira *et al.*, 2020; Sukphun *et al.*, 2023). El contenido de sólidos totales (ST) se ha reportado entre 750 y 850 g L⁻¹ (Sukphun *et al.*, 2023). Estos valores se encuentran muy por encima de los límites permitidos para descargas en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

La compleja composición del efluente piloncillero demanda sistemas de tratamiento robustos. Los sistemas de tratamiento convencionales para aguas residuales industriales suelen ser eficaces, pero consumen mucha energía; en contraste, los tratamientos biológicos, como los reactores anaerobios y humedales construidos (HC), ofrecen una depuración eficiente de bajo costo energético y contribuyen al Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Wu *et al.*, 2023; Satyendra *et al.*, 2024). Los reactores anaerobios de biopelícula fija (FBBR, por sus siglas en inglés), retienen biomasa microbiana en soportes inertes, favoreciendo las interacciones microbianas y una mayor resistencia a variaciones de carga orgánica o pH (Alvarado-Vallejo *et al.*, 2024); por su parte, los HC reproducen la acción sinérgica de macrófitas, microorganismos y medio granular para mejorar la calidad del agua residual tratada (Agaton & Guila, 2023).

En cuanto al desempeño de la digestión anaerobia aplicada a efluentes azucareros, un sistema de dos etapas con lecho fijo alcanzó 7 L biogás L⁻¹ día⁻¹ (58 % CH₄) y ≈ 90 % de remoción de DQO a 35 °C en el tratamiento de melaza de caña (Meng *et al.*, 2017). En termofilia (55 °C), la configuración en dos etapas probada por Oliveira *et al.* (2020) elevó la productividad a 3.9 L CH₄ L⁻¹ día⁻¹ y el rendimiento a 311 NL CH₄ g⁻¹ DQO, superando los rendimientos obtenidos con una etapa (2.7 L CH₄ L⁻¹ día⁻¹; 173 NL CH₄ g⁻¹ DQO) y manteniendo ≈ 85 % de reducción en la carga orgánica. Estudios recientes mostraron que la co-digestión de vinaza y melaza de caña en un arreglo secuencial de reactores anaerobios de lecho fluidizado (AFBR, por sus siglas en inglés) con cargas de hasta 22.5 kg COD m⁻³ día⁻¹ aumentó la producción de metano y mantuvo eficiencias mayores al 80 % de remoción (Ribeiro *et al.*, 2024). De acuerdo con la revisión de Sukphun *et al.* (2023), los residuos azucareros tratados en sistemas bifásicos suelen generar entre 0.24 y 0.30 L CH₄ g⁻¹ DQO, lo que los convierte en una alternativa viable para valorizar energéticamente los efluentes piloncilleros.

La digestión anaerobia en dos etapas maximiza la recuperación energética frente a los sistemas monofásicos; sin embargo, la inversión inicial puede ser hasta 60 % mayor por los requerimientos extras de calentamiento, agitación y deshidratación (Mozhiarasi *et al.*, 2023). Para compensar ese sobre-costeo, se han propuesto arreglos híbridos que acoplan un reactor anaerobio compacto con un humedal de bajo mantenimiento. Un ejemplo reciente combina un reactor anaerobio a baffles (ABR) y humedales de flujo ascendente (UCW) rellenos con bloques de concreto celular y cáscara de coco; con 24 h de HRT se lograron remociones de 96 % SST, 84 % DQO, 68 % nitrógeno total y 65.5 % fósforo, generando un efluente apto para riego y uso doméstico, todo ello con una construcción sencilla y costos operativos bajos (Satyendra *et al.*, 2024).

A partir de estos antecedentes se diseñó un sistema híbrido FBBR + HC con soportes de matriz de fibra polimérica para el crecimiento de biopelícula. Este estudio de caso, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Orizaba, evalúa la capacidad de tratamiento del sistema y documenta su potencial de réplica en comunidades piloncilleras.

Desarrollo

Durante el primer trimestre de 2025 se realizaron ensayos piloto para comprobar la viabilidad de un sistema híbrido FBBR + HC-BF construido con materiales de bajo costo (tubos corrugados de PEAD y matriz de fibra polimérica) y para tratar los desechos de las comunidades piloncilleras. El esquema completo se observa en la Figura 2.

Caracterización del efluente

Se tomaron muestras en tres trapiches veracruzanos y se analizó la DQO soluble como indicador de carga orgánica. Las descargas presentaron 42.5 ± 10.9 g L⁻¹ DQO.

Primera etapa: reactor anaerobio de biopelícula fija (FBBR)

El FBBR (Figura 2A) -fabricado en fibra de vidrio y resina epoxi-viniléster Derakane Momentum 411-350- posee 215 L de volumen total (150 L útiles) y está relleno con tubos corrugados de ½" × 8 cm, empaquetados con matriz de fibra polimérica que proporcionan > 300 m² m⁻³ de área específica para biopelícula. El reactor se alimentó de forma

semicontinua con agua residual diluida a 10.63 ± 2.74 g DQO L^{-1} (dilución 1:4 respecto al vertido crudo), a un caudal de 20 L $día^{-1}$, lo que fija un TRH de 5 días. Durante 45 días de operación se obtuvo un efluente (digestato) de 2.48 ± 0.45 g DQO L^{-1} , equivalente a una remoción promedio de 56.94 ± 0.44 %.



Figura 2. Sistema híbrido FBBR + HC-BF. (A) Reactor anaerobio de biopelícula fija; (B) Humedales construidos con biopelícula fija.

Segunda etapa: humedales construidos con biopelícula fija (HC-BF)

El digestato se diluyó 1:10 y se condujo a seis celdas de polipropileno (30 L) con lecho de tezontle (10–25 mm) y flujo subsuperficial (Figura 2B). Cada celda cuenta con bastidores portafibras para reforzar la biopelícula y se plantó según la configuración de la Figura 3B:

- **HC-A y HC-E:** *Canna indica* (2 ejemplares).
- **HC-B y HC-F:** *Cyperus papyrus* (2 ejemplares).
- **HC-C y HC-D:** mezcla *C. indica* + *C. papyrus* (1 + 1 ejemplar).

Se aplicaron dos lotes de alimentación, cada uno de 15 d: el primero con 0.38 ± 0.02 g DQO L^{-1} y el segundo con 0.39 ± 0.03 g DQO L^{-1} (HRT de 24 horas).

Al finalizar la alimentación del primer lote, la DQO promedio descendió a 0.17 ± 0.04 g L^{-1} , lo que representa una remoción global de 57.08 ± 9.52 %. Posteriormente, después de la alimentación del segundo lote, la DQO se redujo a 0.15 ± 0.04 g L^{-1} y la remoción global aumentó a 64.61 ± 9.12 %. El incremento sugiere una mejor adaptación de la microbiota, consolidación del medio filtrante y mayor estabilidad hidráulica. El pH de salida se estabilizó en torno a 6.7, dentro del rango aceptable para cuerpos receptores clase B.

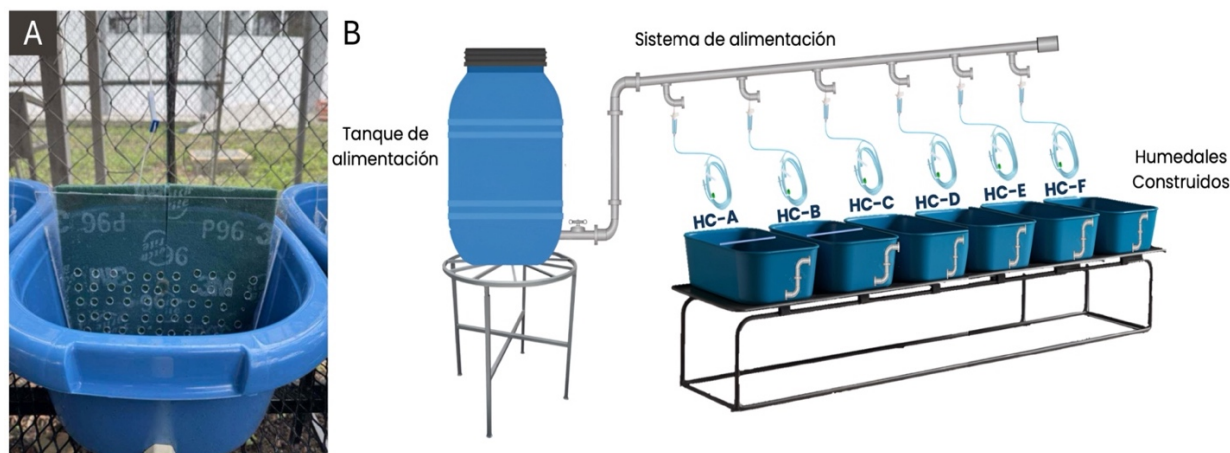


Figura 3. Diseño del HC-BF: (A) bastidores con fibras Scotch-Brite 96; (B) diagrama de distribución de celdas HC-A a HC-F.

Durante los 30 días de operación en el HC-BF, *Canna indica* y *Cyperus papyrus* emitieron nuevos brotes y aumentaron su biomasa aérea; en *C. indica* aparecieron inflorescencias (Figura 4). La respuesta vegetal confirma la tolerancia de ambas especies al efluente diluido y su aporte a la estabilidad del sistema.



Figura 4. Desarrollo de macrófitas tras dos lotes de operación: (A) crecimiento de *C. indica* (HC-A); (B) crecimiento de *C. papyrus* (HC-B); (C) floración de *C. indica* (HC-C).

El ensayo piloto demuestra que el esquema FBBR + HC-BF puede alcanzar remociones globales de DQO de $\approx 60\%$. Estos resultados preliminares respaldan la continuación de las pruebas para optimizar la comunidad microbiana y el crecimiento vegetal.

El sistema se alinea con las tendencias mundiales de transición energética: la etapa anaerobia genera biogás aprovechable como fuente renovable de calor o electricidad, lo que convierte al tratamiento en un nodo de **economía circular** y contribuye a la descarbonización de la cadena piloncillera. De continuar su optimización—por ejemplo, capturando y refinando el metano o integrando paneles fotovoltaicos para bombear el caudal—la tecnología puede evolucionar hacia un modelo autosuficiente que refuerce el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (energía asequible y limpia) y complemente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento). Así, el FBBR + HC-BF no solo representa una opción viable para cumplir la NOM-001-SEMARNAT-2021, sino también un punto de partida para incorporar energías renovables y cerrar los ciclos de materia y energía en las comunidades piloncilleras.

Conclusiones

Los ensayos piloto confirman la pertinencia del enfoque híbrido propuesto: la etapa anaerobia en el FBBR redujo cerca de la mitad de la carga orgánica inicial pese a la acidez característica del efluente piloncillero, y el tratamiento subsiguiente en el sistema HC-BF elevó la remoción global de DQO hasta $\sim 65\%$, mientras estabilizaba el pH y propiciaba el crecimiento de *Canna indica* y *Cyperus papyrus*. El empleo combinado de matriz de fibra polimérica y tezontle se perfiló como una solución económica y prometedora para el soporte y crecimiento microbiano, al aprovechar materiales de fácil adquisición y operación sencilla. Estos resultados preliminares avalan la continuación de pruebas para la validación del sistema FBBR + HC-BF como tecnología basada en la naturaleza que puede ayudar a los pequeños trapiches a cumplir la NOM-001-SEMARNAT-2021 y, simultáneamente, avanzar hacia el ODS 6 mediante el reúso seguro del agua depurada.

Bibliografía

- Agaton, C. B., & Guila, P. M. C. (2023). Ecosystem services valuation of constructed wetland as a nature-based solution to wastewater treatment. *Earth*, 4(1), 78–92. <https://doi.org/10.3390/earth4010006>
- Alvarado-Vallejo, A., Marín-Peña, O., Rosas-Mendoza, E. S., Méndez-Contreras, J. M., & Alvarado-Lassman, A. (2024). The valorization of fruit and vegetable wastes using an anaerobic fixed biofilm reactor: A case of discarded tomatoes from a traditional market. *Processes*, 12(9), Article 1923. <https://doi.org/10.3390/pr12091923>

- Amador-Báez, K. S., & Rangel-Calderón, H. (2019). *Propuesta de un sistema de tratamiento de agua residual industrial en el proceso de elaboración de la panela en la empresa Doña Panela LTDA* [Tesis de licenciatura, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/4f1e78ca-44ed-4160-a0f7-41ac5aacfb90/content>
- Cabrera Martínez, H. & Aguilar Rivera, N. (2018). Sustentabilidad socioeconómica y ambiental de la producción de piloncillo en la región centro de Veracruz Socio-economic and environmental sustainability of production of panela in the central region of Veracruz. *Medio ambiente, sustentabilidad y vulnerabilidad social*, 5, 19-39.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [CONDESUCA]. (2022). *Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2021-2024*.
- Meng, X., Yuan, X., Ren, J., Wang, X., Zhu, W., & Cui, Z. (2017). Methane production and characteristics of the microbial community in a two-stage fixed-bed anaerobic reactor using molasses. *Bioresource Technology*, 241, 1050–1059. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.181>
- Mozhiarasi, V., Natarajan, T. S., & Kondusamy, D. (2023). A high-value biohythane production: Feedstocks, reactor configurations, pathways, challenges, technoeconomics and applications. *Environmental Research*, 219, 115094. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115094>
- Nouhou Moussa A. W., Sawadogo B., Konate Y., & Sidibe S. D. S.. (2023). Critical state of the art of sugarcane industry wastewater treatment technologies and perspectives for sustainability. *Membranes*, 13(8), 709. <https://doi.org/10.3390/membranes13080709>
- Oliveira, C. A., Fuess, L. T., Soares, L. A., & Damianovic, M. H. R. Z. (2020). Thermophilic biomethanation of sugarcane molasses comparing single- and two-stage systems: Process performance and energetic potential. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100590>
- Quezada Moreno, C. W. F., Contreras Moya, A. M., Domínguez, E. R., Quezada Torres, D., Molina Borja, F. A., & Rojas Molina, J. O. (2017). Environmental impact evaluation of the industry of panela by life cycle analysis. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(1), 545–552. <https://doi.org/10.22161/ijeab/2.1.68>
- Ribeiro, A. R., Devens, K. U., Camargo, F., Sakamoto, I. K., & Fuess, L. T. (2024). Synergizing sugarcane waste valorization: Optimization of two-stage anaerobic co-digestion for enhanced methane recovery and organic matter removal. *Industrial Crops and Products*, 221, 119297. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119297>
- Sánchez Castillo, M. A., Martínez Jasso, C. M., Palomo González, L. F., Escudero Lourdes, C., & Gómez Torres, S. A. (2024). *El trapiche: corazón de la comunidad piloncillera Tének*. *Universitarios Potosinos*, 21(278), 3–10.
- Satyendra, & Vijay, R. (2024). *Anaerobic baffled reactor followed by up-flow constructed wetland for treatment of municipal wastewater*. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104810. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104810>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 11 de marzo). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Sukphun, P., Sittijunda, S., & Reungsang, A. (2023). Two-stage biohydrogen and methane production from sugarcane-based sugar and ethanol industrial wastes: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 386, 129519. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129519>
- Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., Cheng, C., Hu, Z., Zhuang, L., Guo, Z., Xie, H., & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 218–234. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>