







Artículo de divulgación

¿Qué papel pueden desempeñar las biobaterías para 2050? Aplicaciones reales y desafíos de las celdas de combustible microbianas

*What role can biobatteries play by 2050? Real-world applications and
challenges of microbial fuel cells*

Wilgince Apollon ¹, Alejandro Isabel Luna-Maldonado ², Víctor Arturo Maldonado-Ruelas ³,
Raúl Arturo Ortiz-Medina ³, Marco Antonio Vázquez-Gutiérrez ⁴, Sathish Kumar Kamaraj ^{1*}

¹ Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira km 14.5, C. Manzano, Industrial Altamira, Altamira 89600, México; apollonwilgince@gmail.com (W.A.); skamaraj@ipn.mx (S.-K.K.)

² Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa S/N, col. Ex Hacienda El Canadá, C.P. 66050. Gral. Escobedo, N.L. México; alejandro.lunam@uanl.edu.mx

³ Dirección de Posgrado e Investigación, Universidad Politécnica de Aguascalientes, Aguascalientes 20342, México; raul.ortiz@upa.edu.mx (R.A.O.-M.); victor.maldonado@upa.edu.mx (V.A.M.-R.)

⁴ TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL), Km 18 Carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, El Llano Ags., C.P. 20330, México.; marco_07@hotmail.com

* Autor para correspondencia: skamaraj@ipn.mx

Recibido:

18/11/2025

Aceptado:

18/12/2025

Publicado:

17/01/2026

RESUMEN

En la actualidad, la transición energética requiere tecnologías renovables que generen electricidad y minimicen el impacto ambiental. Las biobaterías, como las celdas de combustible microbianas (MFCs, por sus siglas en inglés), son prometedoras porque producen energía mientras tratan las aguas residuales y eliminan los contaminantes. En este artículo se explora cómo operan las MFC, así como los avances recientes en materiales y microbiología, y sus aplicaciones en el tratamiento del agua, la limpieza del suelo y de los sedimentos. También se examinan los desafíos que obstaculizan su rendimiento y el papel realista que podrían desempeñar para 2050. Se concluye que, en lugar de reemplazar por completo las fuentes tradicionales, las MFC servirán como un suplemento valioso en áreas específicas, como en instalaciones de tratamiento descentralizadas, en industrias que generan residuos orgánicos, en sensores y en biorremediación *in situ*. Las MFC aportan beneficios tangibles tanto para el medio ambiente como para la producción de energía limpia. ¿Te gustaría saber cómo?

Palabras clave: biobaterías, celdas de combustible microbianas, tratamiento de aguas residuales, sostenibilidad energética, remediación ambiental.

ABSTRACT

Today, the energy transition requires renewable technologies that generate electricity while minimizing environmental impact. Bio-batteries, such as microbial fuel cells (MFCs), are promising because they produce energy while treating wastewater and removing

contaminants. This article explores how MFCs operate, as well as recent advances in materials and microbiology, and their applications in water treatment, soil, and sediment cleanup. It also examines the challenges that hinder their performance and the realistic role they could play by 2050. The conclusion is that, rather than completely replacing traditional energy sources, MFCs will serve as a valuable supplement in specific areas such as decentralized treatment facilities, industries that generate organic waste, sensors, and in situ bioremediation. MFCs provide tangible benefits for both the environment and clean energy production. Would you like to know how?

Keywords: biobatteries, microbial fuel cells, wastewater treatment, energy sustainability, environmental remediation.

INTRODUCCIÓN

Energía viva para un planeta en crisis

La acelerada explotación de combustibles fósiles ha intensificado la contaminación ambiental y elevado las emisiones de gases de efecto invernadero, impulsando el avance del cambio climático. Por ello, es urgente actuar para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, sanear el agua y los suelos contaminados. Por ello, investigadores a nivel mundial implementaron los sistemas bioelectroquímicos¹, en esencia, biobaterías denominadas celdas de combustible microbianas (MFC). Las MFC proponen algo inusual: aprovechar el metabolismo microbiano² que, al oxidar materia orgánica (MO) o cualquier material biodegradable³ de forma natural, libera electrones que pueden recolectarse en forma de corriente eléctrica como subproducto (Logan, 2008; Wang *et al.*, 2022). ¿Te estarás preguntando cómo se da el proceso?

Una MFC está compuesta por dos cámaras: el ánodo y el cátodo, separados por una membrana especial llamada membrana de intercambio de protones⁴ (PEM, por sus siglas en inglés; ver Fig. 1). En una MFC, las bacterias electroactivas forman una biopelícula⁵ en el ánodo mediante oxidación anaeróbica⁶ y transfieren electrones al cátodo a través de citocromos⁷, nanocables o mediadores. Estos electrones viajan por un circuito externo hasta el cátodo, donde reducen un aceptor (oxígeno), completando así el circuito (Sun *et al.*, 2021). En el cátodo, los electrones se combinan con el oxígeno y con los iones hidrógeno presentes en el medio

(frecuentemente en forma de iones hidronio, H_3O^+) formando agua y cerrando el ciclo eléctrico (Logan, 2008). ¿Te estarás preguntando quiénes son los “protagonistas” del proceso? A continuación, te explicamos.

Geobacter y *Shewanella* son microbios destacados en la transferencia de electrones, ya que pueden transportarlos fuera de sus células. Esto les permite usar iones metálicos o electrodos como aceptores en vez de oxígeno cuando este falta (Sun *et al.*, 2021; Ford *et al.*, 2025). Investigaciones recientes muestran que *Geobacter sulfurreducens* transfiere electrones a través de rutas complejas, en ambos sentidos, a lo largo de la red de citocromos de *Shewanella oneidensis* MR-1, ajustando su eficiencia según las condiciones eléctricas (Yang *et al.*, 2024). Por ello, diversos grupos científicos desarrollan consorcios microbianos y mejoran las películas superficiales⁸ para incrementar simultáneamente la producción de electricidad y la eliminación de contaminantes.

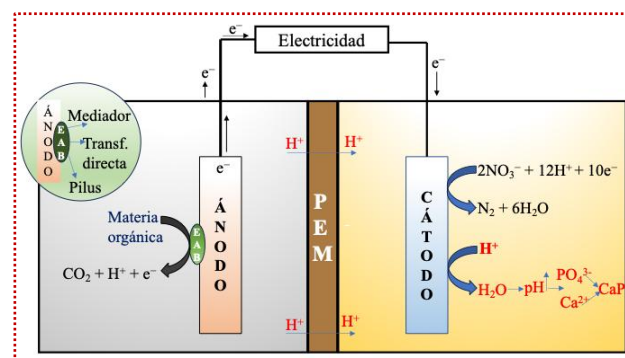


Figura 1. Diseño de una MFC con membrana PEM. *Crédito:* elaboración propia.

¹Sistemas bioelectroquímicos. Son sistemas capaces de convertir la energía química almacenada en un sustrato en energía eléctrica mediante microbios como bioanalizadores.

²Metabolismo microbiano. Se refiere a las reacciones químicas que un microorganismo utiliza para obtener energía y nutrientes, necesarios para vivir y reproducirse.

³Material biodegradable. Es una sustancia que los organismos vivos, como las bacterias y los hongos, pueden descomponer de forma natural. Se transforman en compuestos más simples y no tóxicos, como el dióxido de carbono, el agua y la biomasa.

⁴Membrana de intercambio de protones. Es una barrera especial que permite el paso de ciertos iones y separa las dos cámaras de la celda, lo que ayuda a completar el circuito eléctrico.

⁵Biopelícula. Capa de microorganismos adheridos a la superficie del ánodo.

⁶Oxidación anaeróbica. Es la descomposición de un sustrato en ausencia de oxígeno.

⁷Citocromos. Se refieren a un grupo de proteínas que contienen un grupo prostético de hemo.

⁸Películas superficiales. Se refiere a capas muy finas de un material depositadas sobre una superficie como la del ánodo de una MFC.

¿Qué hace únicas a las MFC en el tratamiento de aguas?

Las MFC, a diferencia de otras tecnologías convencionales (Gupta *et al.*, 2021), convierten contaminantes orgánicos en electricidad de bajo costo. En las aguas residuales domésticas o industriales, los compuestos presentes en la demanda química de oxígeno (DQO)⁹, tanto orgánicos como inorgánicos, alimentan a los microbios del ánodo. Cuando disminuye la DQO, el agua se purifica y es posible tratar las aguas residuales mientras se genera energía en un único reactor (Malik *et al.*, 2023; Esfandiyari *et al.*, 2024). Los bioelectrodos impulsan reacciones que permiten inmovilizar o transformar contaminantes como nitrógeno, fósforo, colorantes, metales pesados (Cu, Zn, Hg), compuestos halogenados¹⁰ (p. ej., CH₂Cl₂, CCl₄) y diversas sustancias emergentes¹¹ (Kunwar *et al.*, 2024). Aunque el nivel de electricidad generado es reducido, esto contribuye al ahorro de energía en el tratamiento y respalda el uso de sistemas autónomos o descentralizados (Mahurede *et al.*, 2023).

Ya en la práctica, en sectores como las cervecerías y las agroindustrias con efluentes ricos en materia orgánica, se han implementado y probado sistemas piloto de MFC a gran escala, logrando remociones de DQO superiores al 90 % y generando ahorros en los costos de tratamiento de aguas (Apollon *et al.*, 2024). Empresas dedicadas a procesos bioelectroquímicos han reportado reducciones de emisiones y de manejos en sitios de corrientes con alto contenido orgánico (Aquacycl, 2025). Aun cuando las plantas convencionales siguen predominando, estos casos evidencian el avance tecnológico y el beneficio ambiental que pueden aportar las MFC (Malik *et al.*, 2023).

⁹Demanda química de oxígeno. Refleja la cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden oxidarse en el agua; es un indicador estándar del nivel de contaminación.

¹⁰Compuestos halogenados. Productos químicos orgánicos en los que uno o más átomos de hidrógeno han sido reemplazados por átomos de halógeno.

¹¹Sustancias emergentes. Son aquellas sustancias detectadas en el medio ambiente que, sin embargo, actualmente no están incluidas en los programas de monitoreo de rutina ni en las regulaciones existentes.

¿Cómo se arma una MFC eficiente?

La eficiencia de una MFC depende principalmente de los materiales de los electrodos, del diseño del reactor, del tipo de electrolito y del sustrato utilizado. A pesar de ello, encontrar materiales económicos sigue siendo uno de los principales retos para los investigadores, lo que motiva explorar múltiples alternativas rentables. Además, la arquitectura del reactor, ya sea monocámara o bicámara, con o sin membrana, determina el nivel de las pérdidas óhmicas y de transporte (Wang *et al.*, 2024). Un ánodo ideal debe ser conductor, poroso, biocompatible y poseer una gran área superficial; actualmente se experimenta con composites de carbono, grafeno, fibras y espumas para mejorar la adhesión y el crecimiento de la biopelícula (Wang *et al.*, 2022). El cátodo suele representar la principal limitación del rendimiento de la MFC: la reducción de oxígeno puede optimizarse mediante catalizadores (carbones dopados con nitrógeno, metales no nobles) y biocátodos¹² que permiten evitar el uso de platino (Malik *et al.*, 2023). Además, es esencial ajustar el electrolito, la hidrodinámica¹³, el pH y la conductividad iónica¹⁴ para minimizar las pérdidas del sistema (Mahurede *et al.*, 2023).



Al mismo tiempo, la ingeniería microbiana incorpora rutas metabólicas que mejoran el transporte extracelular de electrones¹⁵ (EET, por sus siglas en inglés; ver Fig. 2) o amplían la variedad de sustratos degradables. En *Shewanella*, se han optimizado las redes de citocromos y el metabolismo de NAD(H) para incrementar la corriente generada (ver Fig. 2A y 2B); en *Geobacter*, la sobreexpresión de los complejos extABCD aumenta la densidad de corriente gracias a la compactación celular cerca del electrodo (Xu *et al.*, 2025). Además, ya se han identificado microbios no electroactivos capaces de usar electrones externos, lo que abre la posibilidad de diseñar consorcios sintéticos que combinen degradación especializada y alta eficiencia en EET (Liu *et al.*, 2024).

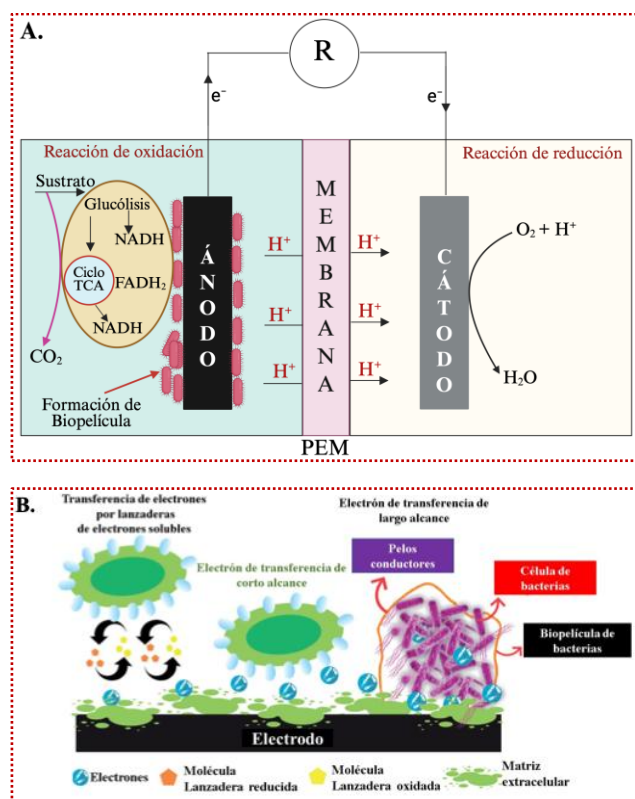


Figura 2. Diagrama de las vías de EET en bacterias electroactivas (EAB) durante la oxidación de los sustratos. (A) Flujo de electrones en *Shewanella* a través de citocromos, conectando el metabolismo con el electrodo. (B) Transferencia en *Geobacter*, donde la compactación de la biopelícula cerca del ánodo aumenta la eficiencia de corriente. *Crédito:* imagen A, elaboración propia; imagen B, adaptada de Yaqoob *et al.* (2021).

¹²Biocátodos. Son electrodos diseñados para trabajar con microorganismos, lo que permite que las bacterias

transfieran electrones de manera eficiente para generar energía.

¹³Hidrodinámica. Es el estudio del movimiento de líquidos y gases y de las fuerzas en los cuerpos sumergidos.

¹⁴Conductividad iónica. Mide cuánto un material puede conducir electricidad mediante iones.

¹⁵Transferencia extracelular de electrones. Describe cómo algunas bacterias “conectan” su metabolismo con un electrodo, liberando electrones que pueden aprovecharse como corriente eléctrica.

Remediación ambiental más allá del agua

Las tecnologías bioelectroquímicas se han adaptado para su uso en suelos y sedimentos. En estas tecnologías destacan las ‘MFC de sedimentos’, donde los electrodos se colocan directamente en ambientes naturales para aprovechar la descomposición de la MO, generar electricidad y favorecer la degradación de contaminantes (Liang *et al.*, 2025). En el caso de compuestos halogenados, como los clorados, el control del potencial vincula la degradación biológica con las reacciones electroquímicas, lo que acelera la deshalogenación *in situ*¹⁶ (Zhu *et al.*, 2022). En el caso de nuevos contaminantes, las MFC y las celdas de electrólisis microbiana (MEC, por sus siglas en inglés)¹⁷ han demostrado que pueden facilitar la oxidación y la reducción. En algunos casos, también favorecen la recuperación de nutrientes o metales (You *et al.*, 2023). Si bien muchos estudios se encuentran en fase piloto o de laboratorio, la gama de aplicaciones está creciendo rápidamente.

¹⁶Deshalogenación *in situ*. Método de limpieza ambiental que elimina átomos de halógenos de contaminantes en el sitio, sin necesidad de excavar ni mover el material.

¹⁷Celdas de electrólisis microbiana. Son dispositivos similares a las MFC, pero que aplican un pequeño voltaje externo para producir gases útiles (como hidrógeno) a partir de residuos biodegradables.

¿Cuánta energía producen realmente?

Uno de los mayores desafíos de las MFC es que su densidad de potencia¹⁸ y su costo por kWh no se igualan a los de tecnologías como la eólica o la solar; su producción eléctrica suele ser modesta y depende del sustrato y del diseño. Sin embargo, una evaluación integral cambia esta perspectiva: al reducir la carga

orgánica del agua, las MFC permiten ahorrar la energía que las plantas convencionales utilizan en aireación. Su bajo consumo y su autogeneración también posibilitan operaciones descentralizadas y sensores autoalimentados (Bazina *et al.*, 2023). En aplicaciones industriales, pilotos en cervecerías y agroindustrias han demostrado que pueden reducir tanto los costos de tratamiento como la huella de carbono¹⁹, aunque la venta de electricidad no sea la principal ventaja (Aquacycl, 2025).

Estudios previos demuestran que las MFC pueden alcanzar un amplio rango de densidades de potencia, determinado por el tipo de sustrato, la cepa microbiana y el sistema. Cabe señalar que un estudio de 2017 con configuraciones especiales, como MFC en forma de U alimentadas con extractos de residuos vegetales, ha logrado una densidad de potencia muy alta de 88990 mW/m² (88.99 W/m²), lo que evidencia que ciertos residuos orgánicos permiten obtener densidades superiores a las de sustratos convencionales (Javed *et al.*, 2017). Hasta la fecha, es la mayor densidad de potencia alcanzada en una MFC operada con sustratos orgánicos. En contraste, otro estudio reportó una densidad de potencia máxima de 5500 mW/m² (~5.5 W/m²) en comparación con la celda de control, lo que confirma que el rendimiento puede mejorarse sustancialmente al optimizar el material del electrodo y el diseño del reactor (Zafar *et al.*, 2019). Estos resultados indican que, aunque el sustrato puede permitir salidas máximas de potencia, es crucial optimizar la comunidad microbiana y el diseño para mantener altos rendimientos en múltiples aplicaciones de MFC.

¹⁸ Densidad de potencia. Indica cuánta energía puede producir una MFC por unidad de área; sirve para comparar el rendimiento entre distintos diseños.

¹⁹ Huella de carbono. Es la cantidad total de gases de efecto invernadero, como el CO₂ y el CH₄, emitidos a la atmósfera por una persona, organización, evento o producto.

Avances que están cambiando el juego

Los avances recientes en las MFC están redefiniendo su desempeño: los ánodos macroporosos autoportantes y los carbones dopados han aumentado las corrientes y la vida operativa, mientras que las membranas y los separadores de bajo costo reducen las pérdidas iónicas (Wang *et al.*, 2022). Paralelamente, la biología sintética ha acelerado

la EET y ha permitido dirigir vías redox y consorcios específicos (Ford *et al.*, 2025). Su integración con la digestión anaeróbica (DA), la electrosíntesis, entre otros, amplía su potencial (Rabaey *et al.*, 2010). Además, estudios recientes han mejorado el escalamiento, el arranque y el manejo de biopelículas (Mahurede *et al.*, 2023).

Desafíos por resolver

Los desafíos que enfrentan las MFC incluyen la escalabilidad y el costo, ya que limitaciones como la resistencia interna, la suciedad en el compartimento catódico y la variabilidad del sustrato afectan la generación máxima de energía por volumen, lo que impacta los costos de tratamiento de aguas residuales y de producción de electricidad (Mahurede *et al.*, 2023). Además, la fiabilidad biológica puede verse comprometida por cambios de pH, la presencia de tóxicos o la competencia microbiana, lo que requiere resiliencia para mantener la eficiencia del tratamiento (Malik *et al.*, 2023). También existe una falta de métricas estandarizadas, como la relación entre la eliminación de DQO y el kWh generado, y protocolos de prueba comparables a las tecnologías ya establecidas (Esfandyari *et al.*, 2024). Por último, las MFC aún se perciben como tecnologías recientes en los servicios públicos, por lo que la capacitación técnica y la gestión de riesgos resultan esenciales para su integración exitosa en los contratos de desempeño.

¿Y para 2050? Un papel realista y estratégico

Hacia 2050, no es realista anticipar que las biobaterías desplazarán por completo a las baterías solares, eólicas o de litio como fuentes principales de energía. Sin embargo, las MFC destacan por su aporte en ámbitos clave, como el tratamiento descentralizado de aguas en industrias pequeñas y medianas, donde facilitan la reducción de costos y de la huella de carbono, ofreciendo energía como valor añadido (Aquacycl, 2025). Además, estos sistemas permiten la remediación *in situ* de suelos o sedimentos gracias a su bajo consumo energético y a su capacidad para operar en zonas de difícil acceso (Liang *et al.*, 2025). En el área de la biotecnología ambiental, las MFC de baja potencia pueden alimentar biosensores y optimizar infraestructuras y el mantenimiento (Wang *et al.*, 2022), e incluso aportar energía a dispositivos simples como LEDs y relojes digitales en zonas rurales con acceso limitado a la electricidad (Apollon *et al.*, 2020).

En lugar de reemplazar a las fuentes tradicionales, las MFC probablemente se integrarán con tecnologías complementarias, como electroanálisis, fotocátalisis, membranas y electrocátalisis. Esta integración permitirá desarrollar procesos circulares orientados al objetivo de cero residuos y cero consumo de agua (Nawaz *et al.*, 2022), potenciando así la sostenibilidad y la eficiencia energética en sectores donde las alternativas convencionales presentan limitaciones.

¿De la cerveza a la energía limpia?

- En 2007, una cervecera australiana probó el uso de MFC para tratar residuos y logró producir 2 kW de electricidad. El objetivo principal era la depuración, mientras que la generación de energía era un beneficio adicional (Wired/AP, 2007).
- Entre 2021 y 2025, estudios con aguas residuales cerveceras muestran remociones de DQO superiores al 90 % en sistemas apilados y mejoras operativas en plantas piloto industriales (Negassa *et al.*, 2021; Aquacycl, 2025).

CONCLUSIÓN

¿Biobaterías, un futuro para un mundo sostenible? Las MFC por sí solas no resolverán la transición energética; sin embargo, ofrecen algo diferente: tratan el agua (y a veces el suelo/sedimento) mientras recuperan energía y productos con valor agregado. Cuando el objetivo es tratar residuos de manera sostenible, a bajo costo y con una reducida huella de carbono, las MFC ofrecen una alternativa viable y complementaria. Cuando haya necesidad de energía y almacenamiento para la red eléctrica, su contribución será limitada.

De cara a 2050, las MFC influirán en el desarrollo de materiales autosostenibles, sistemas modulares y modelos de operación y de negocio orientados a maximizar los beneficios ambientales. En un entorno que exige circularidad y eficiencia, las biobaterías, en particular las MFC, no lo serán todo, pero llenarán un nicho entre el tratamiento, la energía y la dirección de la remediación.

Agradecimientos

WA agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca postdoctoral otorgada (No. 4500144). También reconocemos el apoyo del Instituto Politécnico Nacional, Unidad de Altamira. KSK desea agradecer a SIP-IPN (SIP-20231443 y 20240941) por su financiación, así como extender su agradecimiento a IPN, SECIHTI y SEP México.

Literatura citada

- Apollon, W., Kamaraj, S. K., Silos-Espino, H., Perales-Segovia, C., Valera-Montero, L. L., Maldonado-Ruelas, V. A., ... y Gómez-Leyva, J. F. 2020. Impact of *Opuntia* species plant bio-battery in a semi-arid environment: Demonstration of their applications. *Applied Energy*, 279, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115788>
- Apollon, W., Rusyn, I., Kuleshova, T., Luna-Maldonado, A. I., Pierre, J. F., Gwenzi, W., y Kumar, V. 2024. An overview of agro-industrial wastewater treatment using microbial fuel cells: Recent advancements. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104783>
- Aquacycl 2025. Case Study: A sustainable approach to brewery wastewater. Disponible en: https://aquacycl.com/resources/case-studies/whitepaper-a-sustainable-approach-to-brewery-wastewater/?utm_source=chatgpt.com (consultado el 20 de octubre de 2025).
- Bazina, N., Ahmed, T. G., Almdaaf, M., Jibia, S., y Sarker, M. 2023. Power generation from wastewater using microbial fuel cells: A review. *Journal of biotechnology*, 374, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.07.006>
- Esfandyari, M., Jafari, D., y Azami, H. 2024. Microbial fuel cells for energy production in wastewater treatment plants-a review. *Biofuels*, 15(6), 743-753. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2294227>
- Ford, K. C., Miller, S. D., Tefft, N. M., y TerAvest, M. A. 2025. Overlap and differences between the inward and outward electron transfer pathways in *Shewanella oneidensis*. *FEMS Microbiology Letters*, 372, fnaf094. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnaf094>
- Gupta, S., Mittal, Y., Panja, R., Prajapati, K. B., y Yadav, A. K. 2021. Conventional wastewater treatment technologies. *Current developments in biotechnology and bioengineering*, 47-75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821009-3.00012-9>



- Javed, M. M., Nisar, M. A., Muneer, B., y Ahmad, M. U. 2017. Production of bioelectricity from vegetable waste extract by designing a U-shaped microbial fuel cell. *Pakistan Journal of Zoology*, 49(2). <http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/2017.49.2.711.716>
- Kunwar, S., Pyey, N., Bhatnagar, P., Chadha, G., Rawat, N., Joshi, N. C., Tomar, M. S., Eyvaz, M., y Gururani, P. 2024. A concise review on wastewater treatment through microbial fuel cell: sustainable y holistic approach. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(5), 6723–6737. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31696-x>
- Liang, M., Luo, G., y Lei, P. 2025. Recent Advances in Bioelectrochemical Approaches for Sustainable Environmental Remediation. *International Journal of Electrochemical Science*, 101077. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2025.101077>
- Liu, X., Ye, Y., Yang, N., Cheng, C., Rensing, C., Jin, C., Neelson, K. H., y Zhou, S. 2024. Nonelectroactive *clostridium* obtains extracellular electron transfer-capability after forming chimera with *Geobacter*. *ISME Communications*, 4(1), ycae058. <https://doi.org/10.1093/ismeco/ycae058>
- Logan, B. E. 2008. *Microbial fuel cells*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470258590>
- Mahurede, T. P., Chihobo, C. H., Utete, B., y Taru, P. 2023. A review of microbial fuel cell prototypes, their efficacy in wastewater treatment and the contextual situation for Zimbabwe. *Fuel Communications*, 17, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2023.100094>
- Malik, S., Kishore, S., Dhasmana, A., Kumari, P., Mitra, T., Chaudhary, V., ... y Rajput, V. D. 2023. A perspective review on microbial fuel cells in treatment and product recovery from wastewater. *Water*, 15(2), 316. <https://doi.org/10.3390/w15020316>
- Nawaz, A., ul Haq, I., Qaisar, K., Gunes, B., Raja, S. I., Mohyuddin, K., & Amin, H. 2022. Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 161, 357-373. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039>
- Negassa, L. W., Mohiuddin, M., y Tiruye, G. A. 2021. Treatment of brewery industrial wastewater and generation of sustainable bioelectricity by microbial fuel cell inoculated with locally isolated microorganisms. *Journal of water process engineering*, 41, 102018. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102018>
- Rabaey, K., Butzer, S., Brown, S., Keller, J., y Rozendal, R. A. 2010. High current generation coupled to caustic production using a lamellar bioelectrochemical system. *Environmental science & technology*, 44(11), 4315-4321. <https://doi.org/10.1021/es9037963>
- Sun, W., Lin, Z., Yu, Q., Cheng, S., y Gao, H. 2021. Promoting extracellular electron transfer of *Shewanella oneidensis* MR-1 by optimizing the periplasmic cytochrome c network. *Frontiers in Microbiology*, 12, 727709. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.727709>
- Wang, J., Ren, K., Zhu, Y., Huang, J., y Liu, S. 2022. A Review of Recent Advances in Microbial Fuel Cells: Preparation, Operation, and Application. *Biotech*, 11(4), 44. <https://doi.org/10.3390/biotech11040044>
- Wang, L., Du, H., Elsyed, A. F. N., Yun, N., Wang, X., & Rossi, R. 2024. Impact of reactor architecture and design parameters on the performance of microbial electrolysis cells revealed by the electrode potential slope analysis. *Electrochimica Acta*, 485, 144072. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144072>
- Werkneh, A. A., Beyene, H. D., y Osunkunle, A. A. 2019. Recent advances in brewery wastewater treatment; approaches for water reuse and energy recovery: A review. *Environmental Sustainability*, 2(2), 199-209. <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00056-2>
- Wired/AP. 2007. *Foster's: Australian for Clean Energy* (pionero de MFC en cervcería). Disponible en: <https://www.wired.com/2007/05/fosters-austral/#:~:text=Australian%20beermaker%20Foster's%20is%20installing,Keller%2C%20the%20university's%20wastewater%20expert> (consultado el 17 de octubre de 2025).
- Xu, J., Zhou, W., Han, X., Liu, J., Dong, Y., Jiang, Y., ... y Hu, Y. 2025. Extracellular electron transfer proteins contribute to reduction of ferric minerals by *Geobacter* biofilms. *Applied and Environmental Microbiology*, 91(5), e00369-25. <https://doi.org/10.1128/aem.00369-25>
- Yang, G., Xia, X., Nie, W., Qin, B., Hou, T., Lin, A., ... y Zhuang, L. 2024. Bidirectional extracellular electron transfer pathways of *Geobacter sulfurreducens* biofilms: Molecular insights into extracellular polymeric substances. *Environmental Research*, 245, 118038. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118038>
- Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., y Umar, K. 2021. Electrode Material as Anode for Improving the Electrochemical Performance of Microbial Fuel Cells. In S. Haider, A. Haider, M. Khodaei, & L. Chen (Eds.), *Energy Storage Battery Systems –*



Fundamentals and Applications. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.98595>

- You, J., Ji, Z., Zhao, J., Sun, H., Ye, J., Cheng, Z., ... y Chen, D. 2023. Configurations of bioelectrochemical reactor for environmental remediation: a review. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144325. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144325>
- Zafar, Z., Ayaz, K., Nasir, M. H., Yousaf, S., Sharafat, I., y Ali, N. 2019. Electrochemical performance of biocathode microbial fuel cells using petroleum-contaminated soil and hot water spring. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1487-1500. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1757-0>
- Zhu, X., Wang, X., Li, N., Wang, Q., y Liao, C. 2022. Bioelectrochemical system for dehalogenation: A review. *Environmental Pollution*, 293, 118519. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118519>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

