UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

“Uso de un filtro impreso de ácido poliláctico y tepojal como alternativa en celdas de combustible microbianas sin membrana con electrodos a diferentes distancias.”

Por:

DULCE DANIELA SIFUENTES LUGO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila

Agosto 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

"Uso de un filtro impreso de ácido poliláctico y tepojal como alternativa en celdas de combustible microbianas sin membrana con electrodos a diferentes distancias."

Por:

DULCE DANIELA SIFUENTES LUGO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:

Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta
Asesor principal externo

Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor principal interno

M.C. Laura María González Méndez
Coasesor

Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Coasesor

Saltillo, Coahuila

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

"Uso de un filtro impreso de ácido poliláctico y tepojal como alternativa en celdas de combustible microbianas sin membrana con electrodos a diferentes distancias."

Por:

DULCE DANIELA SIFUENTES LUGO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Jurado Examinador

Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Presidente

Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Vocal

M.C. Laura María González Méndez
Vocal

Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta
Vocal

M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o cita textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Dulce Daniela Sifuentes Lugo

AGRADECIMIENTOS

Profundamente agradecida con Dios por ser mi mayor fuerza, la luz que guía mi camino.

A mis padres, por darme todo su amor y apoyo, y por acompañarme siempre para que pudiera cumplir mis metas. Gracias por creer en mí y por ser parte fundamental de cada uno de mis logros.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, por ayudarme a concretar esta etapa tan importante de mi formación académica, por compartir conmigo sus conocimientos y por estar siempre al pendiente, no solo de mí, sino también del Laboratorio de Biología. Reconozco y admiro profundamente el esfuerzo, compromiso y dedicación que entrega a su profesión.

A la M.C. Brenda Verónica Borrego Limón, quien me apoyó enormemente durante la realización de este trabajo, compartiendo conmigo sus conocimientos técnicos durante el desarrollo de las técnicas de análisis y acompañándome en la ejecución de los experimentos. Agradezco especialmente el bonito ambiente de convivencia que creó en el laboratorio. Gracias por estar siempre dispuesta a escucharme, orientarme y compartir conmigo sus experiencias.

A mis Chiquillas: Arely, Caro, Dani, Karla, Liz, Mago y Nai. Gracias por ser mi grupo de apoyo durante la universidad, por compartir conmigo sus conocimientos y hacer mucho más llevaderos los retos de la carrera. Sin ustedes, muchas cosas habrían sido mucho más difíciles de entender. Atesoro cada salida por un café, las comidas, las pláticas y, especialmente, nuestra tradición de celebrar cada cumpleaños con un pastel y las mañanitas. Gracias por todas las experiencias que construimos juntas y porque, aun ahora que nuestros caminos comienzan a tomar rumbos diferentes, seguimos buscando la manera de mantenernos presentes en la vida de las demás.

A una de mis mejores amigas, Mariana Paredes, a quien tuve la fortuna de conocer durante mi intercambio. Nuestra amistad se fue construyendo poco a poco hasta convertirnos en compañeras de viaje y de tantas experiencias que siempre recordaré con cariño. Gracias por seguir haciéndome parte de tu vida incluso después de regresar a casa, por abrirme las puertas a nuevas personas y experiencias, y por regalarme una amistad que trascendió aquella etapa. También te agradezco por inspirarme e impulsarme a llegar hasta este momento tan importante de mi formación.

A mi mejor amiga Vane, a quien conocí de la manera más inesperada y que, como nos gusta decir, llegó a mi vida por obra del destino. Desde el primer momento hubo un clic inmediato que dio inicio a una amistad llena de lealtad, cariño y aventuras. Gracias por ser una compañera incondicional, por acompañarme desde los inicios de mi formación académica y por estar presente en tantas etapas de mi vida. Me siento profundamente agradecida con la vida por haberte puesto en mi camino y por todos los recuerdos que hemos construido juntas.

A mi mejor amigo Jairo, con quien tuve la fortuna de conectar desde el primer momento y quien se convirtió en mi compañero durante los últimos años de mi carrera. Gracias por cada momento que compartimos, por las risas, la compañía y por hacer más alegres mis días en la universidad. Me llevo con muchísimo cariño todos los recuerdos que construimos juntos y agradezco profundamente haber coincidido contigo en esta etapa de mi vida.

Y a mi gatito Bebé, por alegrar mis días como estudiante foránea, acompañarme en tantas horas de estudio y hacer más cálido aquel lugar que, gracias a su compañía, pude llamar hogar.

DEDICATORIA

A mi papá, José Manuel, a quien dedico especialmente este logro. Gracias por todo tu amor, por tu esfuerzo y por haberme dado siempre las herramientas necesarias para crecer, aprender y llegar hasta donde estoy hoy. Gran parte de lo que he logrado ha sido posible gracias a ti y a todo lo que has hecho por mí.

A mi mami, Dulce Carolina, por todo su amor, apoyo y esfuerzo a lo largo de mi vida. Gracias por acompañarme en mi camino y por darme también las herramientas y oportunidades que me permitieron llegar hasta aquí. Este logro también es tuyo.

A mi abuelita, que hoy está en el cielo y a quien recuerdo con mucho amor. Aunque ya no pueda compartir este momento contigo, siempre formarás parte de mi historia y de la persona que soy.

Y a mi abuelito, por haber estado presente desde mis primeros años de escuela, por cuidarme, enseñarme y acompañarme mientras mis papás trabajaban. Gracias por haber sido parte de mis primeros pasos en mi educación, esos que, muchos años después, me permitieron llegar hasta aquí.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 1
DEDICATORIA 3
INDICE DE CONTENIDO 4
INDICE DE ILUSTRACIONES 5
INDICE DE GRÁFICAS 5
INTRODUCCIÓN 6
OBJETIVO GENERAL 7
HIPÓTESIS 8
REVISIÓN DE LITERATURA 8
Aguas residuales municipales 8
Demanda Química de Oxígeno (DQO) 8
Sistemas bioelectroquímicos 9
Celdas de combustible microbianas (CCM) 10
Celdas de combustible microbianas sin membrana 11
Tepojal 12
Ácido poliláctico (PLA) 13
MATERIALES Y MÉTODOS 14
Localización donde se llevó a cabo el experimento 14
Materiales y equipo 14
Metodología 16
Construcción de los electrodos 16
Descripción del sistema bioelectroquímico 17
Parámetros evaluados 19
Métodos analíticos 19
Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) 20
Voltaje 20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 20
Remoción de DQO 21
Generación de voltaje 22
CONCLUSIONES 24
BIBLIOGRAFÍA 25

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Construcción de electrodos e incorporación en el sistema. 17
Ilustración 2. Construcción del biorreactor 2 que cuenta con un PLA con tepojal.....18
Ilustración 3. Reactores bioelectroquímicos empleados durante el desarrollo experimental. (a) Reactor sin compartimento con tepojal. (b) Reactor con compartimento de tepojal.....19

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Porcentajes de remoción de DQO de los reactores R1 y R2 operados con diferentes distancias entre electrodos. 21
Gráfica 2. Voltaje generado por los reactores R1 y R2 operados con diferentes distancias entre ánodo y cátodo durante el periodo experimental. 22

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la vida y el desarrollo de las actividades humanas. Sin embargo, el crecimiento poblacional, la urbanización y las actividades industriales han incrementado la generación de aguas residuales, cuya descarga sin un tratamiento adecuado representa un riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Por ello, el tratamiento de aguas residuales constituye una estrategia fundamental para reducir la contaminación de los cuerpos de agua y favorecer su aprovechamiento de manera segura (Metcalf & Eddy, 2014).

Las aguas residuales provenientes de las actividades domésticas, comerciales e industriales son recolectadas mediante sistemas de alcantarillado y conducidas a plantas de tratamiento. Estas aguas están compuestas mayoritariamente por agua y una fracción menor de sólidos suspendidos y disueltos, entre los que se encuentran materia orgánica, materia mineral, nutrientes y otros contaminantes que pueden afectar la calidad de los cuerpos de agua receptores (Metcalf & Eddy, 2014).

El tratamiento de las aguas tiene como finalidad disminuir la carga contaminante antes de su descarga o reutilización. Debido a la composición de las aguas residuales y a los riesgos asociados con su vertido sin tratamiento, este proceso resulta indispensable para prevenir la contaminación física, química, biológica y bioquímica de los cuerpos de agua receptores. Para ello, se emplean diferentes tecnologías de tratamiento que, de manera general, se clasifican en operaciones unitarias, basadas principalmente en principios físicos, y procesos unitarios, sustentados en mecanismos químicos y biológicos (Metcalf & Eddy, 2014).

Dentro de los procesos empleados para el tratamiento de aguas residuales, los tratamientos biológicos se basan en la actividad metabólica de comunidades microbianas capaces de transformar los contaminantes presentes en el agua residual. Estos microorganismos participan en la degradación de la materia orgánica y en diferentes procesos asociados con la remoción de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, por lo que las características y diversidad de las comunidades microbianas desempeñan un papel importante en la eficiencia de los sistemas de tratamiento biológico (Zhang *et al.*, 2022).

En los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías bioelectroquímicas innovadoras. Entre ellas, las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) han despertado un creciente interés debido a su potencial para integrar el tratamiento de aguas residuales con la recuperación de

energía, lo que las convierte en una alternativa prometedora para el desarrollo de procesos más sostenibles (Logan *et al.*, 2006).

En las CCM se han evaluado diferentes materiales porosos y sistemas de filtración como alternativas a las membranas convencionales, con el propósito de disminuir costos y mantener condiciones adecuadas para el transporte de especies entre las zonas anódica y catódica. El uso de separadores porosos puede modificar el transporte de oxígeno, la resistencia interna y, en consecuencia, el desempeño electroquímico del sistema, por lo que las características del material utilizado constituyen un aspecto relevante en el diseño de estos dispositivos (Patel *et al.*, 2022).

Asimismo, en sistemas sin membrana, la distancia entre el ánodo y el cátodo constituye una variable de diseño que puede modificar el desempeño del sistema. Madondo *et al.* (2023) evaluaron separaciones de 2, 4, 6 y 8 cm en una celda de combustible microbiana sin membrana y observaron que el desempeño mejoró al incrementar la separación hasta 6 cm, mientras que a 8 cm disminuyó la eficiencia. Estos resultados muestran que el efecto de la distancia no necesariamente sigue una relación lineal y que puede existir una separación favorable de acuerdo con la configuración y condiciones de operación del sistema.

A partir de estos antecedentes, en el presente trabajo se evaluó el uso de un filtro impreso de ácido poliláctico y tepojal en una celda de combustible microbiana sin membrana para el tratamiento de agua residual municipal. Para ello, se comparó el comportamiento de un reactor sin filtro con un reactor que incorporó el filtro, utilizando separaciones entre ánodo y cátodo de 14, 28 y 42 cm. El desempeño de ambas configuraciones se evaluó mediante la eficiencia de remoción de DQO y la generación de voltaje, con el propósito de analizar el efecto de la incorporación del filtro y de la distancia entre los electrodos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del uso de un filtro impreso de ácido poliláctico y tepojal en un sistema bioelectroquímico sin membrana para el tratamiento de agua residual municipal, considerando diferentes distancias entre el ánodo y el cátodo, mediante el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno y el voltaje generado.

HIPÓTESIS

Se espera que el uso de un filtro impreso de ácido poliláctico y tepojal modifique el desempeño del sistema bioelectroquímico sin membrana, reflejándose en el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno y el voltaje generado, y que dicho efecto varíe de acuerdo con la distancia entre el ánodo y el cátodo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Aguas residuales municipales

Las aguas residuales municipales son aquellas generadas por las actividades desarrolladas en viviendas, establecimientos comerciales, instalaciones públicas y zonas de recreación. Estas aguas contienen diversos contaminantes, principalmente materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes y microorganismos, por lo que requieren un tratamiento adecuado antes de su descarga a los cuerpos receptores, con el fin de proteger el ambiente y la salud pública.

El tratamiento de las aguas residuales municipales es fundamental para proteger la salud pública, reducir la contaminación de los cuerpos de agua y preservar los recursos hídricos. Además de disminuir el impacto ambiental, las aguas residuales tratadas pueden reutilizarse en actividades como el riego, procesos industriales y otros usos no potables. Actualmente, también se reconoce que las aguas residuales constituyen una fuente potencial para la recuperación de recursos, como agua, energía y nutrientes, lo que contribuye al desarrollo de estrategias de economía circular y al aprovechamiento sostenible de los recursos disponibles (Banco Mundial, 2020).

En este contexto, los sistemas bioelectroquímicos, como las celdas de combustible microbianas, han despertado un creciente interés debido a su capacidad para remover materia orgánica de las aguas residuales mientras generan energía eléctrica, representando una alternativa sostenible frente a los tratamientos convencionales.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro utilizado para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente las sustancias susceptibles de oxidación presentes en una muestra de agua. Su determinación se emplea para evaluar la carga contaminante de aguas naturales, residuales y residuales tratadas, incluyendo las aguas residuales municipales e industriales (Secretaría de Economía, 2012). La medición de este

parámetro permite estimar la cantidad de materia oxidable presente en el agua y constituye una herramienta importante para evaluar sus características y el comportamiento de los procesos de tratamiento.

La DQO es uno de los parámetros empleados para evaluar la calidad de las aguas residuales, debido a que permite estimar indirectamente la cantidad de contaminantes susceptibles de oxidación presentes en una muestra. Su determinación puede utilizarse para valorar la carga contaminante de las aguas residuales y para evaluar la eficiencia de los procesos de depuración mediante la comparación de las concentraciones obtenidas antes y después del tratamiento (Arias-Cárdenas, 2016).

En los sistemas bioelectroquímicos, la materia orgánica presente en el agua residual puede ser aprovechada por los microorganismos electroactivos como fuente de energía y electrones. Por ello, la disminución de la DQO durante la operación de una celda de combustible microbiana permite evaluar la remoción de materia orgánica asociada al proceso de tratamiento. En este sentido, la DQO constituye un parámetro relevante para determinar el desempeño de estos sistemas, ya que permite relacionar la degradación de la materia orgánica con la generación de electricidad. Estudios han utilizado incluso sistemas basados en celdas de combustible microbianas para evaluar la DQO de aguas residuales domésticas, mostrando una relación entre la concentración de DQO del influente y la respuesta eléctrica del sistema (Corbella *et al.*, 2020).

Sistemas bioelectroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos (BES, por sus siglas en inglés) son tecnologías que aprovechan la capacidad de determinados microorganismos para catalizar reacciones electroquímicas asociadas con la transferencia de electrones. Estos sistemas han sido estudiados como tecnologías emergentes debido a sus diversas aplicaciones, entre las que se encuentran la generación de energía, la biorremediación y el tratamiento de contaminantes (Aguilar-González *et al.,* 2016).

Entre los principales tipos de sistemas bioelectroquímicos se encuentran las celdas de combustible microbianas (CCM), las celdas de electrólisis microbiana, las celdas de electrosíntesis microbiana y las celdas de desalinización microbiana. Las CCM destacan por su capacidad para utilizar microorganismos como catalizadores en la oxidación de materia

orgánica y generar energía eléctrica como resultado del flujo de electrones hacia un electrodo (Aguilar-González *et al.*, 2016).

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son sistemas bioelectroquímicos capaces de transformar la energía química contenida en la materia orgánica en energía eléctrica mediante procesos catalizados por microorganismos. Debido a esta característica, las CCM han sido estudiadas como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, ya que permiten aprovechar la materia orgánica presente en el agua como fuente de energía para los microorganismos y, simultáneamente, favorecer su degradación (Jalili *et al*., 2024).

Celdas de combustible microbianas (CCM)

El funcionamiento de una CCM se basa en la oxidación de la materia orgánica en el ánodo. Durante este proceso, los microorganismos generan electrones y protones. Los electrones son transferidos hacia el ánodo y posteriormente circulan a través de un circuito externo hasta alcanzar el cátodo, generando una corriente eléctrica. En el cátodo ocurre una reacción de reducción que permite completar el proceso electroquímico. La transferencia de electrones asociada con las reacciones microbianas constituye el fundamento de la generación de electricidad en estos sistemas.

Las CCM pueden presentar diferentes configuraciones y diseños, dependiendo de factores como la disposición de los electrodos, los materiales utilizados, el tipo de microorganismos y la presencia o ausencia de una membrana separadora. La selección y optimización de estos elementos resulta importante debido a que pueden modificar el desempeño eléctrico y la eficiencia del tratamiento. En particular, las configuraciones sin membrana han recibido atención debido a que pueden simplificar el diseño del reactor y reducir algunos de los costos asociados con las membranas, aunque también pueden presentar limitaciones relacionadas con la transferencia de oxígeno y sustrato entre las zonas anódica y catódica (Jalili *et al.*, 2024).

Debido a su capacidad para combinar el tratamiento de materia orgánica con la generación de electricidad, las CCM representan una alternativa de interés dentro de las tecnologías bioelectroquímicas aplicadas al tratamiento de aguas residuales. Su desempeño depende de las características del sistema y de las condiciones de operación, por lo que el estudio de las diferentes configuraciones del reactor resulta fundamental para mejorar su funcionamiento.

Las celdas de combustible microbianas (CCM) sin membrana constituyen una configuración de los sistemas bioelectroquímicos en la cual no se emplea una membrana física para separar las zonas anódica y catódica. A diferencia de las CCM convencionales de dos cámaras, en las que una membrana de intercambio iónico permite el transporte de protones entre los compartimentos, las configuraciones sin membrana permiten que el transporte de especies iónicas ocurra directamente a través del electrolito. La eliminación de la membrana simplifica la construcción del reactor y reduce los costos asociados con su adquisición, mantenimiento y reemplazo (Mahesh & Mahidhara, 2025).

Celdas de combustible microbianas sin membrana

En una CCM sin membrana, los microorganismos electroactivos oxidan la materia orgánica en la zona anódica, generando electrones y especies iónicas como productos del metabolismo. Los electrones son transferidos hacia el ánodo y posteriormente conducidos mediante un circuito externo hasta el cátodo, donde tiene lugar una reacción de reducción. Al no existir una barrera física entre ambas zonas, el transporte iónico necesario para mantener la electroneutralidad ocurre a través del medio líquido mediante procesos de difusión y convección (Mahesh & Mahidhara, 2025).

Una de las principales ventajas de las CCM sin membrana es la reducción de la resistencia interna y de la complejidad del sistema, además de la eliminación de problemas asociados con el ensuciamiento (fouling) y deterioro de las membranas. Estas características hacen que las configuraciones sin membrana sean particularmente atractivas para aplicaciones de tratamiento de aguas residuales, donde se busca desarrollar sistemas de menor costo y con posibilidades de escalamiento. Asimismo, la ausencia de una membrana puede facilitar el transporte de especies iónicas y simplificar la operación del reactor (Mahesh & Mahidhara, 2025; Jalili *et al.*, 2024).

Sin embargo, la eliminación de la membrana también presenta ciertas limitaciones. La ausencia de una barrera física puede favorecer el transporte de oxígeno hacia la zona anódica y el desplazamiento de materia orgánica hacia el cátodo, lo que puede generar reacciones secundarias y disminuir la eficiencia de recuperación de electrones. De igual manera, el contacto directo entre las zonas anódica y catódica puede reducir la diferencia de potencial disponible y favorecer pérdidas de eficiencia electroquímica. Por esta razón, el diseño y la disposición de los electrodos adquieren especial importancia en este tipo de sistemas (Jalili *et al.*, 2024; Mahesh & Mahidhara, 2025).

Las CCM sin membrana pueden presentar diferentes configuraciones, incluyendo sistemas de una cámara y diseños en los que las zonas anódica y catódica se mantienen parcialmente diferenciadas mediante la geometría del reactor, el flujo del líquido o la distribución de los electrodos. En estos sistemas, la distancia entre el ánodo y el cátodo constituye un parámetro relevante, debido a que modifica las condiciones de transporte iónico y la resistencia interna del sistema. Una separación excesiva puede incrementar la resistencia al transporte de carga, mientras que una separación demasiado pequeña puede favorecer la interacción entre las condiciones anódicas y catódicas, incluyendo la difusión de oxígeno hacia el ánodo (Mahesh & Mahidhara, 2025).

Por lo tanto, la configuración sin membrana representa una alternativa de interés para el tratamiento bioelectroquímico de aguas residuales, particularmente cuando se busca disminuir la complejidad y los costos de construcción del reactor. No obstante, su desempeño depende de un equilibrio entre la reducción de la resistencia interna, el transporte de especies químicas y la separación adecuada de las condiciones anódicas y catódicas. En este sentido, la evaluación de parámetros de diseño como la distancia entre los electrodos resulta fundamental para determinar las condiciones que permitan favorecer tanto la remoción de materia orgánica como la generación de electricidad.

Tepojal

El tepojal es un material de origen volcánico que se caracteriza por presentar una estructura porosa y baja densidad, propiedades que pueden resultar de interés para su utilización como medio de soporte o material filtrante. La presencia de poros y su estructura superficial pueden proporcionar sitios para la retención de partículas y favorecer la formación y adherencia de biopelículas, dependiendo de las características del material y de las condiciones de operación del sistema.

El empleo de materiales volcánicos porosos como medios de filtración ha sido estudiado en diferentes sistemas de tratamiento de agua. Xie *et al.* (2019) evaluaron el uso de partículas de escoria volcánica como medio filtrante en un biofiltro aireado para el tratamiento de agua y observaron un desempeño favorable del sistema durante su etapa estable, incluyendo la remoción de materia orgánica expresada como DQO. Los autores también observaron que el tiempo de retención hidráulica tuvo una influencia importante sobre el desempeño del sistema.

La utilización de materiales volcánicos como medios filtrantes también se ha relacionado con la búsqueda de alternativas de bajo costo para el tratamiento de aguas. Estos materiales pueden funcionar como soporte físico para el desarrollo de microorganismos y contribuir a la retención de contaminantes presentes en el agua. En sistemas de tratamiento de aguas residuales se han estudiado diferentes rocas volcánicas porosas debido a características como su disponibilidad, porosidad y capacidad para funcionar como medio de soporte.

En el contexto de las celdas de combustible microbianas, el empleo de un material poroso como el tepojal puede resultar de interés debido a su posible función como medio de soporte dentro del reactor. La presencia de una superficie sólida puede favorecer la retención de microorganismos y el establecimiento de biopelículas, mientras que su estructura porosa puede modificar las condiciones de flujo y contacto entre el agua residual y el material. Por ello, la incorporación de tepojal representa una alternativa que puede ser evaluada experimentalmente en sistemas bioelectroquímicos destinados al tratamiento de aguas residuales.

Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero termoplástico de origen biológico que puede obtenerse a partir de recursos renovables y que se caracteriza por presentar propiedades mecánicas y estructurales favorables, además de ser biodegradable bajo condiciones adecuadas. Estas características han favorecido su utilización en diferentes aplicaciones y han incrementado el interés por su empleo en materiales destinados a procesos ambientales (Shekhar & Mondal, 2024).

Entre las características del PLA se encuentran su facilidad de procesamiento, estabilidad dimensional y posibilidad de modificar sus propiedades mediante diferentes métodos de fabricación. Sin embargo, el material presenta algunas limitaciones, como su carácter relativamente hidrofóbico y una velocidad de degradación limitada en condiciones ambientales convencionales, por lo que sus propiedades y comportamiento dependen de la estructura y del método de procesamiento empleado (Shekhar & Mondal, 2024).

En los últimos años, el PLA también ha sido estudiado para aplicaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales. Kacaribu *et al.* (2025) señalan que los materiales y compuestos basados en PLA han mostrado potencial para la remoción de diferentes contaminantes presentes en el agua, particularmente cuando el polímero es modificado para mejorar sus propiedades

superficiales y su capacidad de interacción con los contaminantes. Esto ha permitido considerar al PLA como una alternativa para el desarrollo de materiales destinados a procesos de tratamiento de agua.

Asimismo, la fabricación de estructuras porosas de PLA permite modificar características como la porosidad y la superficie disponible del material. Estas propiedades son relevantes cuando el polímero se emplea como parte de una estructura filtrante, ya que la geometría y distribución de los poros pueden influir en el paso del fluido y en la interacción entre el material y las sustancias presentes en el agua. La literatura reciente ha estudiado diferentes métodos para producir estructuras y membranas porosas de PLA, incluyendo técnicas de fabricación que permiten controlar su estructura y porosidad (2024).

En el presente estudio, el PLA se empleó como material de fabricación del filtro incorporado en uno de los reactores. Su utilización permitió obtener una estructura diseñada específicamente para integrarse al sistema experimental y combinarse con el tepojal. De esta manera, el uso del PLA como material estructural constituye una alternativa para la fabricación de filtros destinados a sistemas bioelectroquímicos de tratamiento de aguas residuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización donde se llevó a cabo el experimento

El presente experimento fue llevado a cabo en el laboratorio de Biología, ubicado en el Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que se encuentra en la localidad de Buenavista, municipio de Saltillo, estado de Coahuila.

Materiales y equipo

Ácido sulfúrico

Agitador magnético Civeq

Aluminio

Balanza electrónica de precisión US Solid

Bascula American Scientific Products

Bomba peristáltica auto dosificadora Jebao DP4

Cúter

Desecador Pyrex

Digestor Hach DRB 200

Espátula

Espectrofotómetro Hach DR5000

Fieltro de grafito

Frascos de Cultivo Kimax 80 ml

Gradillas

Guantes de Látex Mc Gloves

Horno Orsa

Incubadora Hach Modelo 205

Jeringas BD 5 ml

Matraces 50 ml y 500 ml

Matraz de Aforación Pyrex 1 L

Medidor de pH Digital OBEST

Micropipeta Labmate

Multímetro Steren PC-Link

Parafilm

Pisetas

Pinzas

Probetas Pyrex 100ml y 250ml

Puntillas

Refrigerador Mabe

Tapas de goma

Tepojal

Termómetro

Tijeras

Tubos Hach con Tapa Tubos Kimax

Vasos de Precipitado Pyrex 200 ml y 500 ml

Metodología

Construcción de los electrodos

Los electrodos se fabricaron utilizando fieltro de grafito cortado en discos de 5 cm de diámetro. En total se prepararon 12 discos para conformar cuatro electrodos, empleando tres discos por electrodo. Posteriormente, a cada disco se le realizaron cinco perforaciones de 0.5 cm de diámetro con el fin de facilitar el flujo del agua a través del material.

Después de realizar las perforaciones, los discos se secaron en un horno a 100 °C durante dos horas para eliminar la humedad. Posteriormente, se dejaron enfriar en un desecador y se registró el peso individual de cada disco, así como el correspondiente a cada conjunto de tres discos que conformaría un electrodo.

Finalmente, los tres discos destinados a cada electrodo se unieron mediante hilo utilizando las perforaciones previamente realizadas. Antes de incorporarlos al reactor, los ánodos se acondicionaron en una mezcla de lodo anaerobio y agua residual (100 mL de lodo y 900 mL de agua residual), mientras que los cátodos se colocaron en la misma mezcla. Este

acondicionamiento favoreció la formación inicial de una biopelícula microbiana sobre la superficie de los electrodos.

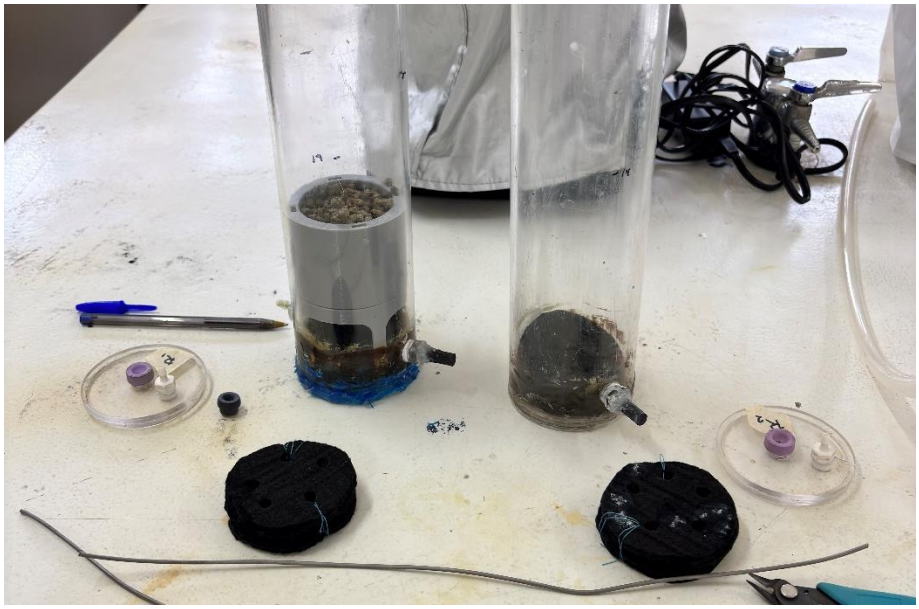


Ilustración 1. Construcción de electrodos e incorporación en el sistema.

Descripción del sistema bioelectroquímico

Se emplearon dos biorreactores unitarios de forma cilíndrica, fabricados a partir de tubos de plástico. La capacidad volumétrica de cada reactor era de 1500 mL cada reactor. Ambos sistemas contaron con dos electrodos: ánodo y cátodo, configurados como un sistema bioelectroquímico sin membrana.

De acuerdo con el objetivo de esta investigación se evaluó el efecto de la distancia entre ánodo y cátodo, variando dicha separación de manera mensual en tres niveles: 42 cm, 28 cm y 14 cm.

El cátodo se ubicó inicialmente a una distancia de 42 cm respecto al ánodo. Ambos electrodos se encontraban conectados internamente mediante una varilla de acero inoxidable, formando el circuito eléctrico del sistema. Dicha varilla sobresalía a través de la tapa del reactor —la cual se encontraba sellada— mediante un orificio provisto de una tapa de goma, permitiendo la conexión de cables para la medición del voltaje. El extremo externo del circuito se conectó al electrodo de grafito del ánodo.

El suministro de aire a los cátodos se realizó mediante una bomba aireadora conectada a través de una manguera que contenía un difusor. Al reactor 2 se le adiciona un aditamento impreso de ácido poliláctico que contenía 75.26 g de tepojal el cual se ubicó entre ánodo y cátodo con el fin de evitar el paso de burbujas de aire del cátodo al ánodo.



Ilustración 2. Construcción del biorreactor 2 que cuenta con un PLA con tepojal.

Ambos biorreactores operaron con un sistema de alimentación continua de agua residual municipal, suministrada mediante una bomba peristáltica desde bidones de almacenamiento, los cuales eran renovados cada dos semanas. El influente ingresaba por la zona del ánodo y el efluente se recolectaba en la zona del cátodo.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) se ajustó a 20 horas con una bomba peristáltica auto dosificadora Jebao DP4, con un caudal aproximado de 70 mL por hora. El efluente tratado se recolectaba en bidones para su posterior análisis.

Se realizaron muestreos diarios del agua tratada, en los cuales se determinaron parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), pH, conductividad, potencial de óxido-reducción (ORP),

salinidad y voltaje del sistema en circuito cerrado de manera diaria, y en circuito abierto durante los cambios de agua residual.



Ilustración 3. Reactores bioelectroquímicos empleados durante el desarrollo experimental. (a) Reactor sin compartimento con tepojal. (b) Reactor con compartimento de tepojal.

Parámetros evaluados

Durante la operación de los biorreactores se monitorearon diversos parámetros fisicoquímicos y electroquímicos con el propósito de evaluar el desempeño del sistema en cada una de las distancias entre electrodos estudiadas (42, 28 y 14 cm). Los parámetros evaluados fueron demanda química de oxígeno (DQO), pH, conductividad, potencial de óxido-reducción (ORP), salinidad y voltaje del sistema. Las determinaciones se realizaron diariamente durante aproximadamente tres meses de operación, evaluando cada distancia entre electrodos durante un periodo de un mes.

Métodos analíticos

La DQO y el voltaje fueron parámetros que se midieron diariamente durante todo el tiempo de la investigación, tanto del influente (agua residual sin tratamiento) como del efluente (agua tratada).

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que permite estimar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua. Su determinación se realizó mediante el método de digestión con dicromato en tubo cerrado, de acuerdo con la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011.

Para el análisis se emplearon ácido sulfúrico concentrado, dicromato de potasio, sulfato de mercurio y sulfato de plata. La digestión de las muestras se llevó a cabo en un digestor Hach DRB 200 y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro Hach DR5000.

Las determinaciones se realizaron por triplicado. A cada tubo de reacción se adicionaron 2.5 mL de muestra y posteriormente se sometieron a digestión durante 120 minutos a 150 °C. Una vez finalizada la digestión, las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente y la absorbancia se determinó a una longitud de onda de 620 nm mediante un espectrofotómetro Hach DR5000.

Voltaje

El voltaje es un parámetro que permite evaluar la actividad bioelectroquímica de una celda de combustible microbiana, ya que refleja la diferencia de potencial generada por la transferencia de electrones desde el ánodo hacia el cátodo durante la oxidación de la materia orgánica por microorganismos electroactivos (Sevda *et al.*, 2013).

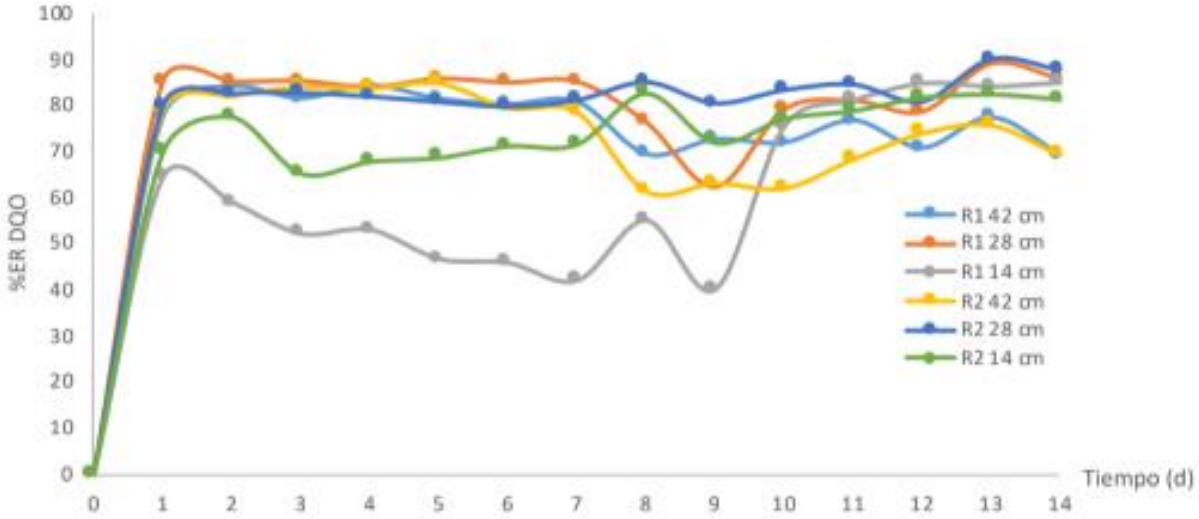
El voltaje generado por el sistema fue monitoreado mediante un voltímetro Steren PC-LINK conectado a los electrodos del sistema bioelectroquímico. Las mediciones se realizaron diariamente en circuito cerrado y, durante los cambios del agua residual, también se registró el voltaje en circuito abierto con el fin de evaluar la diferencia de potencial generada durante la operación del sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la operación del sistema bioelectroquímico se evaluó la remoción de DQO y la generación de voltaje en función de la distancia entre los electrodos. Los resultados mostraron

que la separación entre ánodo y cátodo influyó en el desempeño del sistema, observándose diferencias tanto en la eficiencia de remoción como en la producción eléctrica.

Remoción de DQO



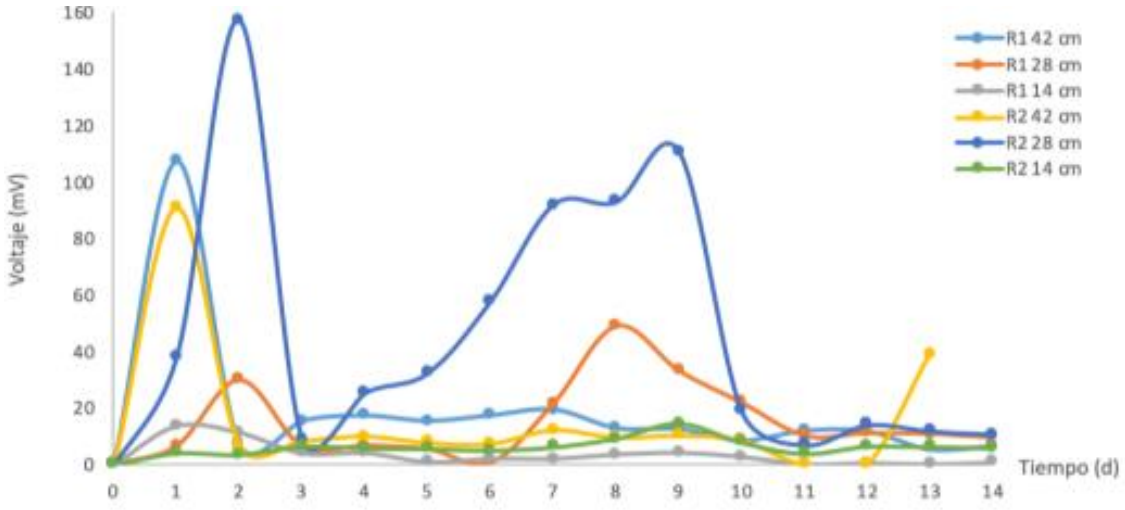
Gráfica 1. Porcentajes de remoción de DQO de los reactores R1 y R2 operados con diferentes distancias entre electrodos.

La Gráfica 1 muestra el comportamiento de la remoción de DQO durante el periodo de operación de los reactores R1 y R2. En ambos sistemas se observó que las configuraciones con distancias de 42 cm y 28 cm alcanzaron los mayores porcentajes de remoción, registrando eficiencias cercanas al 80–90 % durante gran parte del periodo experimental. En contraste, la distancia de 14 cm presentó consistentemente los menores porcentajes de remoción.

Al comparar ambos reactores, se observó que el efecto del filtro de PLA y tepojal sobre la remoción de DQO varió de acuerdo con la distancia entre los electrodos. A 42 cm, ambos reactores presentaron porcentajes elevados de remoción, aunque R1 (sin filtro) mostró valores generalmente más estables durante el periodo experimental. A 28 cm, R1 y R2 presentaron eficiencias de remoción similares durante gran parte de la operación. En contraste, a 14 cm se observó una diferencia más evidente entre ambos sistemas, ya que R2 (con filtro) presentó porcentajes de remoción superiores a R1 durante gran parte del periodo evaluado. Estos resultados sugieren que el efecto del filtro no fue uniforme para todas las configuraciones, sino que estuvo relacionado con la distancia entre el ánodo y el cátodo.

El comportamiento observado entre las diferentes distancias podría estar relacionado con la influencia que ejerce la separación entre los electrodos sobre el transporte de carga y la resistencia interna del sistema. La literatura señala que la distancia entre ánodo y cátodo constituye un parámetro de diseño relevante en las CCM; sin embargo, la separación que proporciona el mejor desempeño puede variar según la configuración del reactor y las condiciones de operación (Madondo *et al.*, 2023).

Generación de voltaje



Gráfica 2. Voltaje generado por los reactores R1 y R2 operados con diferentes distancias entre ánodo y cátodo durante el periodo experimental.

La Gráfica 2 muestra el comportamiento del voltaje generado por los reactores R1 y R2 durante el periodo experimental de operación. En ambos sistemas se observó que la distancia de 42 cm presentó los mayores valores de voltaje, alcanzando un valor máximo cercano a 150 mV en el reactor R2 durante los primeros días de operación. Por su parte, la configuración de 28 cm mostró una respuesta intermedia, mientras que la distancia de 14 cm registró los valores más bajos durante prácticamente todo el periodo experimental.

A lo largo de la operación se observaron variaciones en la producción de voltaje para las configuraciones evaluadas. Las fluctuaciones observadas pueden estar asociadas con cambios en la actividad metabólica de los microorganismos electroactivos, la disponibilidad de materia orgánica y las variaciones propias de la composición del agua residual municipal utilizada como influente.

Los resultados obtenidos muestran que la distancia entre los electrodos influyó en la generación de voltaje; sin embargo, el comportamiento observado difiere de algunos estudios en los que una menor separación favoreció la producción eléctrica. Singh y Kaushik (2021), por ejemplo, evaluaron separaciones de 1 y 10 cm en una CCM de doble cámara alimentada con agua residual de destilería y obtuvieron una densidad de potencia de 1.74 W/m^3 a 1 cm, 42.5 % superior a la obtenida a 10 cm. Los autores relacionaron este resultado con la reducción de la resistencia asociada al transporte de carga al disminuir la distancia entre los electrodos.

No obstante, una menor distancia no necesariamente produce el mejor desempeño en todas las configuraciones. Madondo *et al.* (2023) evaluaron una CCM sin membrana con separaciones de 2, 4, 6 y 8 cm y observaron que el desempeño aumentó hasta alcanzar su mejor condición a 6 cm, donde se obtuvo un voltaje máximo de 0.36 V y la menor resistencia interna hacia el final del periodo experimental. Al aumentar la separación a 8 cm, la eficiencia disminuyó. Estos resultados muestran que la relación entre distancia y desempeño electroquímico no es necesariamente lineal y depende de las características particulares del sistema.

En el presente estudio, la configuración que presentó el mejor desempeño eléctrico alcanzó su mayor generación de voltaje con una separación de 42 cm. Las diferencias respecto a los estudios anteriores pueden estar relacionadas con las características experimentales de cada sistema. Singh y Kaushik (2021) utilizaron una CCM de doble cámara, agua residual de destilería y separaciones de 1 y 10 cm, mientras que Madondo *et al.* (2023) emplearon una configuración sin membrana con adición de magnetita y separaciones de 2 a 8 cm. En contraste, en el presente trabajo se utilizó agua residual municipal, una CCM sin membrana y separaciones considerablemente mayores de 14, 28 y 42 cm, además de comparar un reactor sin filtro con otro que incorporó un filtro impreso de PLA y tepojal. Por lo tanto, las diferencias en la configuración del reactor, el tipo de sustrato, los materiales incorporados y el intervalo de distancias evaluado pueden contribuir al comportamiento distinto observado en la generación de voltaje.

Al comparar estos resultados con los obtenidos por Miguel-García (2025), se observa un comportamiento diferente en la generación de voltaje. En dicho estudio se evaluaron separaciones entre ánodo y cátodo de 28 y 56 cm, obteniéndose un voltaje promedio de 161.11 mV a 28 cm y de 38.04 mV a 56 cm; es decir, la generación de voltaje fue más de cuatro veces superior con la menor separación entre los electrodos. En contraste, en el presente estudio la mayor generación de voltaje se observó con la separación de 42 cm.

Esta diferencia podría estar relacionada con las características particulares de cada configuración experimental. Aunque ambos estudios utilizaron agua residual municipal y sistemas bioelectroquímicos sin membrana, las distancias evaluadas fueron diferentes y, en el presente trabajo, uno de los reactores incorporó un filtro impreso de PLA y tepojal. La presencia de este elemento constituye una diferencia importante entre ambos diseños y pudo modificar las condiciones internas del reactor. Sin embargo, debido a que el desempeño de las CCM depende de múltiples factores, no es posible atribuir las diferencias observadas exclusivamente a la presencia del filtro.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, se concluye que la distancia entre el ánodo y el cátodo influye directamente en la eficiencia del sistema bioelectroquímico para el tratamiento de agua residual municipal. Al evaluar tres distancias diferentes, se determinó que la separación de 42 cm presentó el mejor desempeño, tanto en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) como en la generación de voltaje.

Este comportamiento puede estar asociado con condiciones más favorables para la actividad de los microorganismos electroactivos y la transferencia de electrones dentro del sistema. Asimismo, se observó que el sistema se estabilizó conforme avanzó el periodo de operación, lo que sugiere el establecimiento de una biopelícula funcional.

Al comparar los resultados obtenidos con estudios previos, se identificaron diferencias en el comportamiento del sistema, lo que evidencia que la influencia de la distancia entre electrodos depende de factores como el diseño del reactor, las condiciones de operación y las características del agua residual tratada.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la configuración evaluada constituye una alternativa con potencial para optimizar el desempeño de sistemas bioelectroquímicos sin membrana destinados al tratamiento de aguas residuales municipales, al favorecer simultáneamente la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar-González, M., Buitrón, G., Shimada-Miyasaka, A., & Mora-Izaguirre, O. (2016). Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. Agrociencia, 50(2), 149–165.
2. Arias Cárdenas, Á. S. (2016). Importancia de la medición de DQO en aguas residuales. Hanna Instruments. Documento de Arias Cárdenas
3. Condorchem Envitech. (s. f.). Tratamiento biológico de aguas residuales. https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/
4. Corbella, C., Hartl, M., Fernández-Gatell, M., & Puigagut, J. (2020). MFC-based biosensor for domestic wastewater COD assessment in constructed wetlands. https://arxiv.org/abs/2003.14078?
5. Delgado, M. (s. f.). Celdas de combustible microbianas con biocátodo [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán]. http://ccpy.gob.mx/energias-renovables/documentos_posgrados_cicy/Celdas_combustible_microbianas_con_biocatodo_Marisol_Delgado.pdf
6. Ghangrekar, M. M., & Shinde, V. B. (2007). Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. Bioresource Technology, 98(15), 2879–2885. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.050
7. Jalili *et al*. (2024) sería nuestra referencia principal, porque es reciente, es una revisión y además tienes acceso abierto al texto completo. El artículo está publicado en Heliyon, volumen 10, número 3, artículo e25439, con DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e25439.
8. Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, 40(17), 5181–5192. https://doi.org/10.1021/es0605016
9. Madondo, N. I., Rathilal, S., Bakare, B. F., & Tetteh, E. K. (2023). Effect of electrode spacing on the performance of a membrane-less microbial fuel cell with magnetite as an additive. Molecules, 28(6), 2853.
10. Mahesh, A., & Mahidhara, G. (2025). Membrane-Less Microbial Fuel Cells for Energy Production—A Comprehensive Review. Fuel Cells, 25(6), e70032. https://doi.org/10.1002/fuce.70032
11. Metcalf & Eddy, Inc., AECOM. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

12. Miguel García, S. (2025). Influencia de la distancia entre el ánodo y cátodo en el porcentaje de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno y la generación de voltaje durante el tratamiento de agua residual municipal mediante un sistema bioelectroquímico sin membrana [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].
13. Patel, B. R., Noroozifar, M., Mohebbi-Kalhori, D., & Kerman, K. (2022). Durum wheat semolina-modified ceramic membranes as novel porous separators for enhanced power generation and wastewater remediation using microbial fuel cell. Bioresource Technology, 361, 127752.
14. Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications: A review. Journal of Power Sources, 356, 225–244. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109
15. Secretaría de Economía. (2012). NMX-AA-030/1-SCFI-2012, Análisis de agua—Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas—Método de prueba—Parte 1: Método de reflujo abierto. Diario Oficial de la Federación. Norma NMX-AA-030/1-SCFI-2012
16. Shekhar, N., & Mondal, A. (2024). Synthesis, properties, environmental degradation, processing, and applications of Polylactic Acid (PLA): an overview. Polymer Bulletin, 81, 11421–11457. https://doi.org/10.1007/s00289-024-05252-7
17. Kacaribu, A. A., Aisyah, Y., Febriani, & Darwin. (2025). The Development of Green Polylactic Acid (PLA) Composites for Wastewater Treatment – A Review. Engineering Transactions, 73(3), 485–524. https://doi.org/10.24423/engtrans.3534.2025
18. Xie, K., Wang, B., Qiu, L., Zhang, S., Wang, J., Liu, G., & Sun, S. (2019). Performance and bacterial community composition of volcanic scoria particles (VSP) in a biological aerated filter (BAF) for micro-polluted source water treatment. Water Environment Research, 91, 954–967. https://doi.org/10.1002/wer.1139
19. Zhang, L., *et al*. (2022). Application of metagenomics to biological wastewater treatment. Science of the Total Environment, 807, 150737.