

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



Evaluación del tamaño de poro de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas

Por:

**Fernanda Dominique Acevedo Chavarria**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2026

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**

Evaluación del tamaño de poro de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas

Por:

**Fernanda Dominique Acevedo Chavarria**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:


**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Asesor Principal Interno

  
Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta  
Asesor Principal Externo

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Coasesor

  
Dr. Eduardo Alberto Lara Reimers  
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2026

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

## DIVISIÓN DE INGENIERÍA

### DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación del tamaño de poro de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas

Por:

**Fernanda Dominique Acevedo Chavarria**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobada por el jurado examinador:

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Presidente

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Vocal

  
Dr. Eduardo Lara Reimers

Vocal

  
Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta

Vocal suplente



  
M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México

Junio de 2026

## DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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 (cortar y pegar); 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 citar 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización medio público o privado.

Autor principal



Fernanda Dominique Acevedo  
Chavarria

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

## DEDICATORIA

A mi mamá por todo lo que me ha enseñado con cariño y paciencia, acompañame en cada momento, por creer en mí y recibirme cada día para escucharme y hacerme sentir querida. A mi papá por darme lo necesario para mis estudios y por demostrar su interés, apoyo y cariño siempre.

A mis hermanas: por ser un ejemplo a seguir y las mujeres que más admiro, por enseñarme a crecer y darme seguridad en mí misma.

A mis amigos Maia, Fernanda, Yair y su familia por darme su apoyo en cada momento, motivarme y convertirse en un espacio en donde puedo descansar de todo y ser completamente transparente, por crecer conmigo y siempre estar ahí.

A mis amigas de la universidad y especialmente Natalia por apoyarme en todo con paciencia, hacerme sentir cómoda en un lugar en donde creía no pertenecer y ser la amiga que necesitaba.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, le agradezco por darme la oportunidad de crecer y aprender en sus instalaciones y ofrecerme las herramientas necesarias para mi formación.

Al Departamento de Ciencias del Suelo, le agradezco por ofrecerme sus instalaciones para mi aprendizaje.

Al Dr. Pedro Pérez Rodríguez, por ayudarme a crecer en todos los aspectos, enseñarme con paciencia y ser tan comprensivo, sus consejos, tiempo y apoyo fueron fundamentales a lo largo de este proceso, me dio la confianza para ser parte de esta tesis y lo más importante me permitió sentirme segura y capaz durante ella.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, por su apoyo y confianza para el desarrollo de mi tesis.

Al Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta por su constante soporte en este proyecto tan importante en mi vida.

Al Dr. Eduardo Lara Reimers por su disposición y compromiso en el proyecto.

A la Q.F.B. Brenda Verónica Borrego Limón, por recibirme con amabilidad en su laboratorio y apoyarme con los análisis requeridos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN .....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
OBJETIVO GENERAL .....	14
Objetivos específicos. ....	14
HIPÓTESIS .....	15
CAPÍTULO I .....	16
REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
1.1. Principios de funcionamiento de las CCM .....	16
1.2. Aplicaciones en generación de energía eléctrica .....	16
1.3. Aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales .....	17
1.4. Componentes de las CCM .....	18
1.4.1. Ánodo.....	18
1.4.2. Cátodo.....	19
1.4.3. Membrana de intercambio catiónico (MIC) .....	19
1.4.4. Inoculo.....	20
1.4.5. Sustrato.....	20
1.5. Materiales de los electrodos.....	21
1.5.1. Metales.....	21
1.5.2. Materiales a base de carbono.....	21
1.5.3. Polímeros conductores.....	23
1.5.4. Materiales innovadores .....	23

CAPÍTULO II .....	25
MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
2.1. Fabricación de ánodos impresos en 3D .....	25
2.2. Construcción y operación de las CCM.....	25
CAPÍTULO III .....	28
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	28
3.1. Voltaje .....	28
3.2. Densidad de potencia.....	29
3.3. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO) .....	30
3.4. Eficiencia coulombica.....	32
3.5. Biomasa.....	33
CONCLUSIÓN.....	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las CCM que se utilizarán en este estudio.....	27
Figura 2. Voltaje generado en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D .....	29
Figura 3. Densidad de potencia generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D .....	30
Figura 4. Eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	31
Figura 5. Eficiencia coulombica generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	33
Figura 6. Biomasa generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	34

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos estudiados en esta etapa experimental.....	25
--	----

## RESUMEN

Las celdas de combustible microbianas (CCM) representan una tecnología emergente capaz de integrar el tratamiento de efluentes contaminados con la generación de energía eléctrica, mediante la actividad metabólica de microorganismos electroactivos. El desempeño de estos sistemas depende en gran proporción de las características del ánodo, particularmente de su estructura y porosidad, las cuales tienen un impacto en el crecimiento de la biomasa microbiana, la difusión de sustratos y la transferencia de electrones. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del tamaño de poro de ánodos impresos en 3D sobre la generación de electricidad y la remoción de materia orgánica en aguas residuales municipales. Para ello, se fabricaron ánodos con tres tamaños de poro (3.4 mm, 2.3 mm y 1.6 mm) utilizando un filamento conductivo a base de Nylon12 y óxido de grafeno. Los ánodos fueron colocados en CCM de doble compartimento a escala laboratorio (2 L, volumen total) y fueron operadas durante 27 días, evaluando parámetros como voltaje, densidad de potencia, eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno (ERDQO), eficiencia coulombica y biomasa. Los resultados mostraron que el ánodo con tamaño de poro de 2.3 mm presentó el mejor desempeño electroquímico, alcanzando un voltaje máximo de 521.48 mV, una densidad de potencia de 14.93 mW/m<sup>2</sup> y una eficiencia coulombica de 4.87%. En contraste, el ánodo de 1.6 mm presentó la mayor ERDQO (86.98%), mientras que el de 3.4 mm presentó los valores más bajos en la mayoría de los parámetros evaluados. Asimismo, la mayor biomasa se observó en el ánodo de 2.3 mm, lo que sugiere una relación directa entre la formación de biopelícula electroactiva y la generación de energía. En conjunto, los resultados mostraron que el tamaño de poro del ánodo es un parámetro crítico en el diseño de CCM, ya que determina el equilibrio entre la degradación de materia orgánica y la recuperación de energía.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional global ha incrementado considerablemente la generación de aguas residuales municipales, las cuales contienen altas concentraciones de materia orgánica y otros contaminantes que representan un riesgo ambiental y sanitario si no son tratados de forma adecuada. Los métodos convencionales de tratamiento suelen implicar elevados costos energéticos y operativos, lo que ha impulsado la búsqueda de tecnologías alternativas más sostenibles y eficientes.

En este contexto, las celdas de combustible microbianas (CCM) han emergido como una tecnología innovadora capaz de integrar la remediación de efluentes contaminados con la generación de electricidad. Estos sistemas bioelectroquímicos aprovechan la actividad metabólica de la microbiota electroactiva que, al degradar compuestos orgánicos, liberan electrones que son transferidos a un electrodo (ánodo), generando así una corriente eléctrica. De esta manera, las CCM no solo permiten la remoción de contaminantes, sino que también convierten la energía química contenida en los residuos en energía eléctrica directamente aprovechable.

El desempeño de las CCM depende en gran medida de sus componentes, particularmente del ánodo, ya que este constituye la superficie donde ocurre la colonización microbiana y la transferencia de electrones. Por ello, las propiedades físicas, químicas y estructurales del material anódico, como la conductividad, la biocompatibilidad y la porosidad, juegan un papel crucial en la eficiencia del sistema. En los últimos años, la impresión 3D ha surgido como una herramienta prometedora para el diseño y fabricación de electrodos con geometrías controladas, permitiendo optimizar características como el tamaño de poro y el área superficial.

La modificación del tamaño de poro en ánodos impresos en 3D puede influir significativamente en la formación de biopelículas, el transporte de nutrientes y la difusión de electrones, impactando directamente en la generación de energía y la eficiencia en la remoción de materia orgánica. Sin embargo, aún existe información

limitada sobre cómo estas variables afectan el desempeño integral de las CCM en condiciones reales de tratamiento de aguas residuales municipales.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto del tamaño de poro de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas.

### **Objetivos específicos.**

1. Fabricar los ánodos mediante impresión en 3D con tres tipos de tamaño de poro.
2. Evaluar la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica de las celdas de combustible microbianas empacadas con los ánodos fabricados durante el tratamiento de aguas residuales municipales.

## **HIPÓTESIS**

La modificación del tamaño de poro de ánodos impresos en 3D incrementará la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Principios de funcionamiento de las CCM

Las celdas de combustible microbianas (CCM) aprovechan la actividad metabólica de determinados microorganismos para transformar la energía química contenida en compuestos orgánicos en electricidad. Durante este proceso, las bacterias electroactivas colonizan la superficie anódica y oxidan la materia orgánica presente en el medio, liberando electrones y protones. Los electrones son conducidos hacia el cátodo mediante un circuito externo, generando una corriente eléctrica aprovechable. Paralelamente, los protones atraviesan una membrana selectiva y alcanzan la cámara catódica, donde reaccionan con los electrones y un agente oxidante, comúnmente oxígeno, para formar agua. Dependiendo de la disposición de los electrodos y de la arquitectura del reactor, las CCM pueden diseñarse en configuraciones de una o dos cámaras (Franks et al., 2010; Shankar et al., 2013; Xu et al., 2017; Palanisamy et al., 2019).

#### 1.2. Aplicaciones en generación de energía eléctrica

En la última década, las CCM han sido estudiadas intensamente debido a su potencial para generar energía de manera ambientalmente sostenible (Jatoi et al., 2020; Logan et al., 2015; Wang et al., 2015). Los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales (floculación/flotación, coagulación, etc.) consumen mucha energía, son complejos y, por lo general, poco respetuosos con el medio ambiente (Crini y Lichtfouse, 2019). Por lo tanto, las CCM son recomendables para el tratamiento de aguas residuales frente a las tecnologías convencionales, debido a la utilización de la actividad metabólica microbiana para la producción de energía sin un alto consumo energético (Ali et al., 2019; Du et al., 2007; Franks y Nevin,

2010; Rahimnejad et al., 2015; Sekar et al., 2019; Silveira et al., 2020; Singh, 2020; Yates et al., 2017). Como ejemplo de esto, Ieropoulos et al. (2013) evaluaron celdas de combustible microbianas (CCM) cerámicas para su implementación práctica, buscando minimizar costos y facilitar su producción a gran escala. Demostraron el uso eficiente de la orina como sustrato en diversas celdas, evidenciando su superioridad frente a otras materias primas orgánicas. Analizaron el potencial de estas CCM para proveer energía en comunicaciones de emergencia en zonas remotas de países en desarrollo. En este contexto, demostraron la capacidad de las celdas para cargar y alimentar un teléfono móvil comercial utilizando exclusivamente la energía generada a partir de orina pura. Los resultados mostraron que la potencia suministrada por las CCM permitió operar un teléfono móvil con una batería de baja capacidad, manteniendo sus funciones normales. Además, observaron que la potencia de la celda se mantuvo relativamente estable durante el proceso, con un tiempo de velocidad de carga aproximado de 30 horas.

### 1.3. Aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales

Las CCM han despertado un creciente interés debido a su potencial en diversas áreas ambientales y energéticas. Entre las aplicaciones más estudiadas destacan el tratamiento de aguas residuales, la remediación de suelos y sedimentos contaminados, así como el desarrollo de biosensores capaces de monitorear distintos parámetros ambientales (Saeed et al., 2015).

Una de las variantes más prometedoras corresponde a las celdas de desalinización microbiana (CDM), las cuales aprovechan los gradientes electroquímicos generados durante la operación del sistema para promover el transporte de iones fuera de una cámara destinada a la desalinización. Como resultado, es posible obtener agua con menor contenido salino mientras se mantiene la producción de energía eléctrica. Para lograr este objetivo, las CDM incorporan un compartimento adicional entre el ánodo y el cátodo, separado mediante membranas selectivas para

aniones y cationes que facilitan el movimiento controlado de las especies iónicas (Saeed et al., 2015).

Otra línea de investigación se enfoca en la recuperación de nutrientes presentes en aguas residuales. Tanto el nitrógeno como el fósforo son elementos esenciales para la agricultura, aunque sus altas concentraciones en cuerpos de agua pueden provocar fenómenos como la eutrofización y el deterioro de la calidad ambiental. En las CCM, la migración de cationes a través de membranas de intercambio protónico favorece el incremento del pH en la zona catódica, condición que facilita la conversión y posterior recuperación del nitrógeno en forma de amoníaco. Este compuesto puede extraerse mediante procesos de "stripping", mientras que el fósforo puede recuperarse simultáneamente mediante la formación de precipitados ricos en estruvita dentro del compartimento catódico, especialmente cuando existen concentraciones adecuadas de amonio y magnesio (Ye et al., 2019).

Las CCM también han demostrado utilidad en el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados. Debido a que estos compuestos suelen ser persistentes y tóxicos para los ecosistemas y la salud humana, su eliminación constituye un desafío importante. En estos sistemas, los metales pueden actuar como aceptores terminales de electrones en el cátodo, favoreciendo su reducción a estados de oxidación menos tóxicos. Además, la diferencia de potencial generada durante la operación del sistema promueve la migración de los cationes metálicos hacia regiones donde pueden ser removidos mediante mecanismos de precipitación o adsorción. De esta manera, las CCM permiten combinar la depuración de aguas residuales con la recuperación de metales valiosos sin requerir aportes energéticos externos significativos (Huang et al., 2013; Ye et al., 2019).

#### 1.4. Componentes de las CCM

##### 1.4.1. Ánodo

La región anódica es el sitio donde se establece la comunidad microbiana encargada de oxidar los sustratos orgánicos y liberar electrones hacia el circuito

externo. Debido a su papel en la formación de la biopelícula y en los procesos de transferencia electrónica, el ánodo debe fabricarse con materiales conductores, químicamente estables y resistentes a la corrosión, siendo los materiales basados en carbono y ciertos metales las opciones más utilizadas (Kim et al., 2018; Lee et al., 2017).

#### 1.4.2. Cátodo

El rendimiento global de una CCM está fuertemente influenciado por los procesos que ocurren en el cátodo, ya que este electrodo recibe los electrones procedentes del ánodo y facilita las reacciones de reducción necesarias para cerrar el circuito. Entre los materiales más empleados se encuentran los metales conductores resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable, frecuentemente combinados con catalizadores que mejoran la reducción de oxígeno. Alternativamente, ciertos sistemas incorporan comunidades microbianas capaces de actuar como catalizadores biológicos de las reacciones catódicas, configuraciones que se conocen como biocátodos (Mohamed et al., 2017).

#### 1.4.3. Membrana de intercambio catiónico (MIC)

Además de los electrodos, la membrana constituye un elemento clave en numerosas configuraciones de CCM. Su principal función es restringir la mezcla entre los compartimentos anódico y catódico mientras permite la migración selectiva de especies cargadas, favoreciendo el balance electroquímico del sistema. Las membranas de intercambio catiónico son las más empleadas debido a su capacidad para transportar cationes y limitar el paso de otras especies. No obstante, con el objetivo de reducir costos y simplificar el diseño de los reactores, algunas configuraciones de una sola cámara o de tipo sedimentario prescinden completamente de este componente (Mohamed et al., 2017).

#### 1.4.4. Inoculo

La composición del inóculo es uno de los factores biológicos que más influyen en el desempeño de las celdas de combustible microbianas. Diversos grupos de microorganismos, entre ellos bacterias, arqueas, levaduras y algas, han sido utilizados como biocatalizadores en estos sistemas bioelectroquímicos (Ma et al., 2017; Smith et al., 2014). La selección entre cultivos puros y comunidades microbianas mixtas depende en gran medida de la aplicación prevista. Por ejemplo, microorganismos especializados como *Geobacter sulfurreducens* suelen exhibir una elevada eficiencia en la transferencia de electrones cuando se emplean sustratos definidos, como el acetato, debido a sus mecanismos metabólicos altamente especializados (Smith et al., 2014). En contraste, los consorcios microbianos mixtos presentan una mayor capacidad de adaptación frente a condiciones ambientales variables y permiten la degradación de corrientes residuales complejas con altas concentraciones de materia orgánica, como las aguas residuales municipales e industriales (Logan et al., 2006).

#### 1.4.5. Sustrato

Entre los factores que determinan el desempeño de una CCM, el tipo de sustrato desempeña un papel fundamental, ya que condiciona tanto la actividad microbiana como la cantidad de electrones disponibles para la producción de energía. Por esta razón, la investigación en este campo ha explorado una amplia diversidad de fuentes de carbono, incluyendo compuestos puros utilizados en estudios mecanísticos y matrices complejas provenientes de aguas residuales y otros residuos orgánicos (Liu et al., 2009; Chen et al., 2010). Existe una gran variedad de sustratos posibles que pueden utilizarse, y estos influyen en la densidad de potencia y la composición de los microorganismos en el ánodo (Chae et al., 2009). Diversos tipos de carbohidratos (Kim et al., 2000), ácidos orgánicos (Bond y Lovley, 2005) y alcoholes pueden actuar como sustratos potenciales en las celdas de combustible microbianas (Kim et al., 2007).

## 1.5. Materiales de los electrodos

Los materiales de los electrodos son cruciales para optimizar la eficiencia de las celdas de combustible microbianas (CCM), impactando la conductividad, la estabilidad química y mecánica, y la biocompatibilidad para la formación de biopelículas. (Lowy et al., 2006)

### 1.5.1. Metales

Los metales son generalmente más conductivos que los materiales a base de carbono, lo que permite un flujo de electrones efectivo. Sin embargo, el uso de metales puros está limitado debido a la corrosión que sufren en las CCM. Además, algunos metales no facilitan la adhesión bacteriana debido a sus superficies lisas (Santoro et al., 2017).

- Acero inoxidable: Este material es no corrosivo, pero no ofrece una alta densidad de potencia en comparación con materiales basados en carbono, como el grafeno o el grafito (Santoro et al., 2017).
- Metales nobles: El oro, la plata, el titanio y el platino ayudan a disminuir la resistencia interna en las CCM (Santoro et al., 2017).
- El titanio y el platino se utilizan principalmente como catalizadores para mejorar el rendimiento del cátodo (Santoro et al., 2017).

### 1.5.2. Materiales a base de carbono

- Tela de carbono: es un material carbonoso que se utiliza con frecuencia como material de ánodo en celdas de combustible microbianas (CCM). Este material garantiza una gran superficie específica y una porosidad relativamente alta, lo que le confiere una elevada conductividad eléctrica, así como flexibilidad y resistencia mecánica, permitiendo la formación de estructuras 3D más complejas. Su principal inconveniente radica en su elevado costo (Guerrini et al., 2014).

- Cepillo de carbón: es un material muy interesante con un núcleo de titanio en el que se entrelazan fibras de carbón. Presenta una superficie muy elevada, con una óptima relación superficie/volumen. La alta conductividad eléctrica está garantizada por el titanio central, lo que a su vez incrementa el coste del material. Los cepillos de carbón se utilizan ampliamente como ánodos y las investigaciones en curso buscan reducir los costes totales. (Guerrini et al., 2014).
- Varillas de carbono: se utilizan principalmente como colectores de corriente, no como electrodos de ánodo propiamente dichos, debido a su baja superficie específica. Su coste es bastante asequible para aplicaciones en CCM (Jiang & Li., 2009)
- Malla de carbono: es un material carbonoso disponible comercialmente, de bajo costo y con una conductividad eléctrica relativamente baja (Liu et al., 2004). Su principal inconveniente radica en su baja resistencia mecánica, que puede comprometer su durabilidad en condiciones de alto flujo. Si bien la malla de carbono puede plegarse para formar un electrodo tridimensional, su porosidad es baja (Liu et al., 2004).
- Velo de carbono: es un material carbonoso muy económico con una conductividad eléctrica y porosidad relativamente altas (Liu et al., 2004). Esta última característica es fundamental para permitir que las bacterias accedan y colonicen todos los sitios disponibles del material. La monocapa de velo de carbono es bastante frágil, pero debido a la versatilidad del material, puede plegarse para formar un electrodo tridimensional robusto y poroso (Ieropoulos et al., 2010).
- Filtro de carbono: es un material carbonoso que se utiliza comúnmente como ánodo en celdas de combustible microbianas (CCM). Se caracteriza por su alta porosidad y alta conductividad eléctrica. Al igual que el velo de carbono, sus poros de gran tamaño permiten que las bacterias penetren en su estructura y colonicen la biopelícula internamente. Su costo es relativamente bajo y su resistencia mecánica es alta, dependiendo del espesor del material (Liu et al., 2004).

- Cartón carbonizado: es un material tridimensional muy interesante, compuesto por una lámina de cartón ondulado de una sola pared, fabricada con papel reciclado a partir de una capa de fibra insertada entre dos capas de revestimiento y sometida a un tratamiento térmico (1000 °C) durante 1 h en atmósfera inerte. El cartón carbonizado obtenido se adhiere posteriormente a un soporte rígido. Este material es de muy bajo coste, presenta alta conductividad eléctrica y alta porosidad (Chen et al., 2012).

### 1.5.3. Polímeros conductores

- Polianilina (PANI): Los compuestos de polianilina con fieltro de grafito han servido como ánodos, mostrando una densidad de potencia de  $2.9 \text{ W/m}^3$ , un rendimiento mucho mejor que el ánodo sin modificar. Además, este compuesto ofrece un área superficial mayor para el crecimiento bacteriano (You et al., 2017).
- Polipirrol (PPy): Este polímero puede penetrar las membranas celulares de las bacterias y transportar el electrón a través de la vía metabólica. El PPy modificado con papel de carbono ha mostrado una densidad de potencia tan alta como  $452 \text{ mW/m}^2$  en otros trabajos (You et al., 2017).

### 1.5.4. Materiales innovadores

Dentro de los principales materiales innovadores empleados en CCM se encuentran los hidrogeles, los cuales puede prepararse mediante reticulación física o química, lo que garantiza su estabilidad estructural durante la adsorción de agua. Diversas propiedades únicas, como la capacidad de hinchamiento, la estructura porosa, la biocompatibilidad, la no toxicidad y la autorreparación, los hacen idóneos para mejorar el rendimiento y la estabilidad de las CCM. La estructura porosa del hidrogel proporciona un amplio espacio para la colonización microbiana, mientras que sus propiedades de hinchamiento mantienen un entorno interno estable, lo que garantiza la viabilidad a largo plazo de la comunidad microbiana. Además, el

hidrogel facilita el flujo de desechos y nutrientes dentro y fuera de la matriz, proporcionando a los microorganismos los recursos que necesitan para sobrevivir. La capacidad de modificar el grupo funcional de los polímeros de la matriz puede facilitar el transporte de electrones y la unión microbiana (Sivaraman et al., 2019).

## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1. Fabricación de ánodos impresos en 3D

Para la fabricación de los ánodos, un filamento conductivo con base Nylon12 y óxido de grafeno (marca Color Plus) se cargó y extruyó en una impresora 3D (Bambu Lab, X1E COMBO), evaluando el tamaño de poro. La Tabla 1 muestra los tratamientos estudiados.

**Tabla 1.** Tratamientos estudiados en esta etapa experimental.

Tratamiento	Apertura de espacio interno
T <sub>1</sub>	3.4 mm
T <sub>2</sub>	2.3mm
T <sub>3</sub>	1.6mm

#### 2.2. Construcción y operación de las CCM

La configuración experimental de las CCM se presenta en la Figura 1. Se emplearon reactores de doble cámara con una capacidad total cercana a 2000 mL, distribuidos en dos compartimentos de aproximadamente 1000 mL cada uno. En la cámara catódica se colocó un electrodo de fieltro de grafito con dimensiones de 10 × 10 × 0.8 cm y se añadió agua desionizada como solución catolítica. La aireación se realizó de manera continua mediante una bomba de aire conectada a un difusor externo para garantizar la disponibilidad de oxígeno. En el compartimento anódico se instaló uno de los ánodos fabricados y se incorporaron 1000 mL de agua residual municipal sin tratamiento previo, utilizada simultáneamente como fuente de sustrato e inóculo microbiano. Ambos

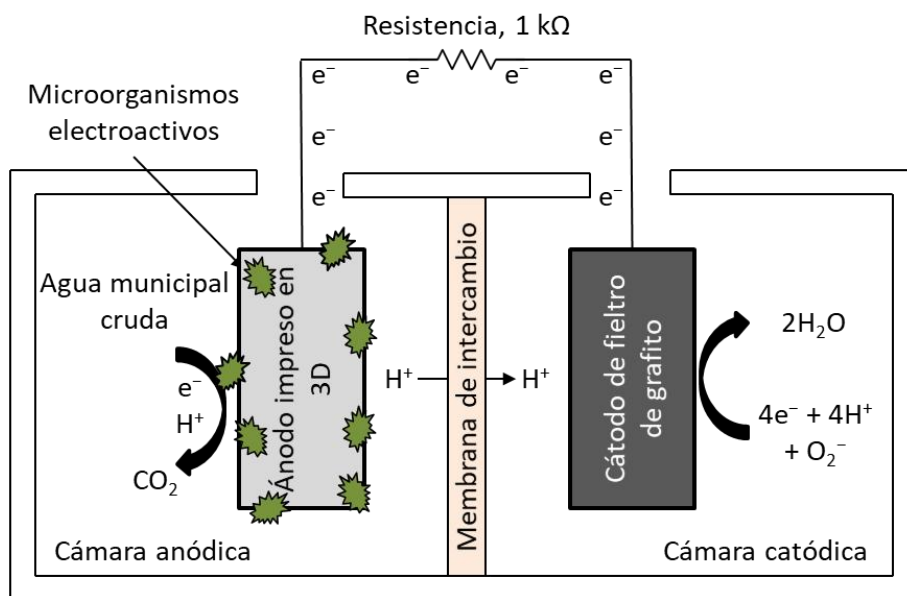
compartimentos se separaron mediante una membrana de intercambio catiónico previamente acondicionada en una solución de NaCl al 5 % durante 12 h. La distancia entre los electrodos se mantuvo constante en 4 cm. El seguimiento electroquímico se efectuó utilizando un multímetro digital Fluke 289 TrendCapture. El voltaje generado por cada celda se registró dos veces al día, en horario matutino y nocturno, durante un periodo total de 27 días. Los primeros 15 días se consideraron como etapa de acondicionamiento para favorecer la formación y estabilización de la biopelícula sobre la superficie anódica. El circuito eléctrico se cerró mediante una resistencia externa de 1 k $\Omega$ , empleándose además un alambre de acero inoxidable como colector de corriente. La densidad de potencia ( $P$ , mW/m<sup>2</sup>) generada en las CCM se calculó como

$$P = \frac{U^2}{R_{ext} \times A_{An}} \times 1000$$

donde  $U$  es el voltaje (V),  $R_{ext}$  es la resistencia externa aplicada al sistema ( $\Omega$ ) y  $A_{An}$  es el área proyectada del ánodo en metros cuadrados (Luo et al., 2010). Por otra parte, la eficiencia coulombica (%) fue calculada como

$$E_{cb} = \frac{M \int_0^t I dt}{FbV_{An} \Delta COD}$$

donde  $M = 32$  es el peso molecular del oxígeno,  $I$  es la corriente eléctrica,  $F = 96,485.33$  C/mol es la constante de Faraday,  $b = 4$  es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno,  $V_{An}$  es el volumen del sustrato en el compartimento anódico, y  $\Delta COD$  es la diferencia de DQO a través del tiempo (Logan et al., 2006). Finalmente, la demanda química de oxígeno (DQO) fue determinada al inicio y al final de la reacción para evaluar la remoción de materia orgánica en el sistema (NMX-AA-030/2-SCFI-2011).



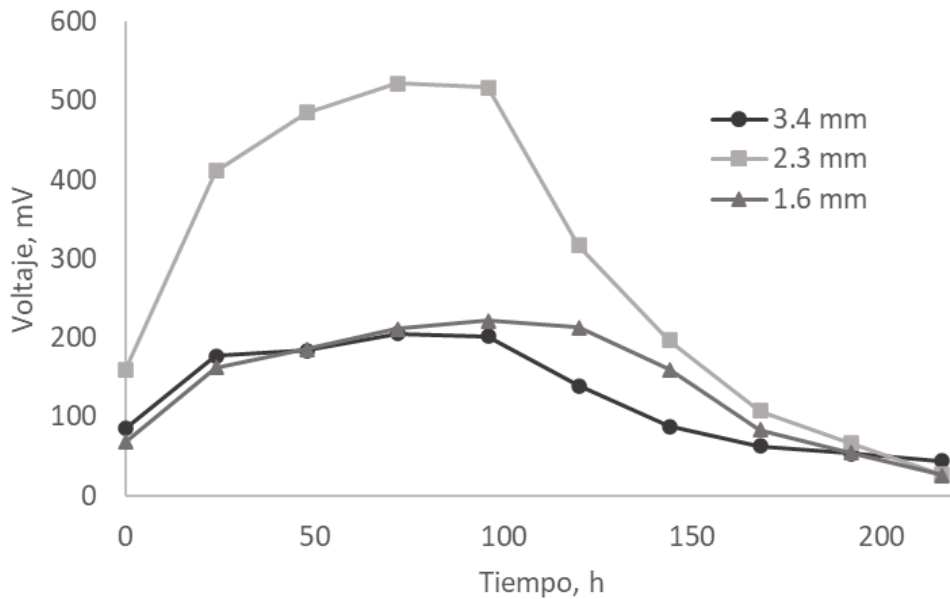
**Figura 1.** Esquema de las CCM que se utilizarán en este estudio.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Voltaje

En la Figura 2 se puede observar el voltaje generado por las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que el voltaje máximo obtenido por los ánodos de tamaño de poro de 3.4 mm, 2.3 mm y 1.6 mm fue de 205.15 mV, 521.48 mV y 221.81 mV, respectivamente. Estos resultados sugieren que existe un tamaño de poro óptimo que promueve la colonización microbiana, la transferencia de electrones y la difusión del sustrato. Un tamaño de poro intermedio, como el de 2.3 mm, probablemente proporciona un equilibrio adecuado entre área superficial total disponible para la formación de biopelícula y accesibilidad del sustrato hacia los microorganismos electroactivos, lo que resulta en una mayor actividad electroquímica. En contraste, un tamaño de poro menor (1.6 mm) puede limitar la difusión de nutrientes y la eliminación de metabolitos dentro de la estructura del ánodo, mientras que un tamaño mayor (3.4 mm) podría reducir el área efectiva de contacto para la adhesión microbiana, disminuyendo así la densidad de biomasa electroactiva (Erbay et al., 2015; Naseri et al., 2022). En conjunto, estos resultados indican que la arquitectura del ánodo, particularmente el tamaño de poro, es un factor determinante en la eficiencia de generación de voltaje en las CCM.

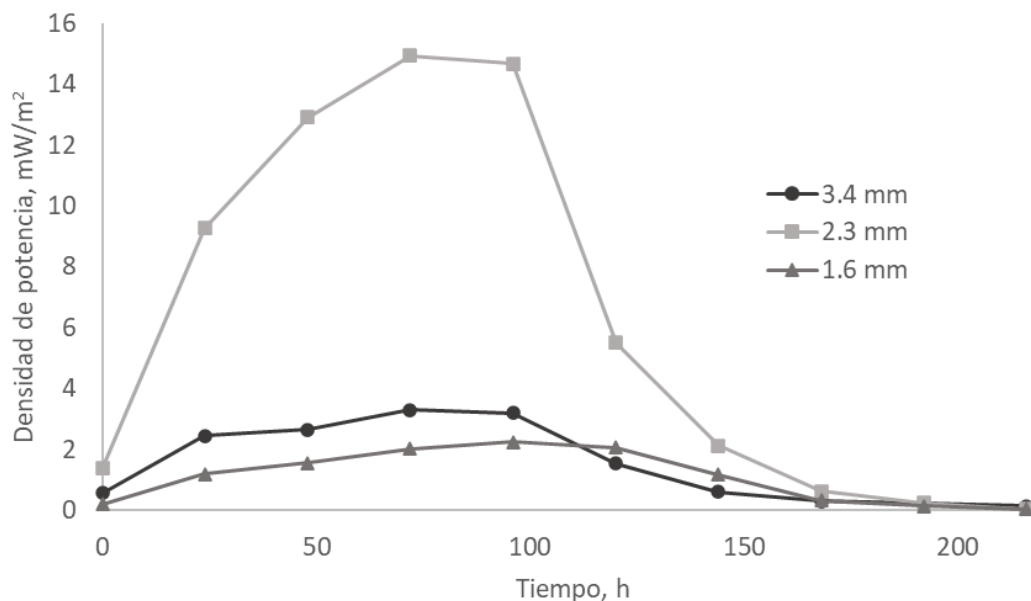


**Figura 2.** Voltaje generado en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

### 3.2. Densidad de potencia

En la Figura 3 se puede observar la densidad de potencia generada por las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la densidad de potencia máxima registrada por los ánodos de tamaño de poro de 3.4 mm, 2.3 mm y 1.6 mm fue de 3.31 mW/m<sup>2</sup>, 14.93 mW/m<sup>2</sup> y 2.23 mW/m<sup>2</sup> respectivamente. Estos valores confirman que el tamaño de poro no solo influye en la generación de voltaje, sino también en la capacidad del sistema para entregar potencia, la cual está directamente relacionada con la resistencia interna y la eficiencia en la transferencia de electrones. Un tamaño de poro intermedio favorece un balance adecuado entre área superficial disponible para la formación de biopelícula y accesibilidad del sustrato, lo que permite una mayor densidad de microorganismos electroactivos y una transferencia electrónica más eficiente (al igual que en el caso del voltaje). En contraste, un tamaño de poro reducido puede generar limitaciones de difusión que restringen el transporte de sustrato y metabolitos, mientras que un tamaño de poro mayor puede disminuir el

área efectiva de contacto, reduciendo la densidad de biomasa adherida. Estos resultados coinciden con lo reportado en la literatura, donde se establece que la arquitectura tridimensional del electrodo y su área superficial son factores clave en la optimización de la densidad de potencia en CCM (Bian et al., 2018; Chen et al., 2015).

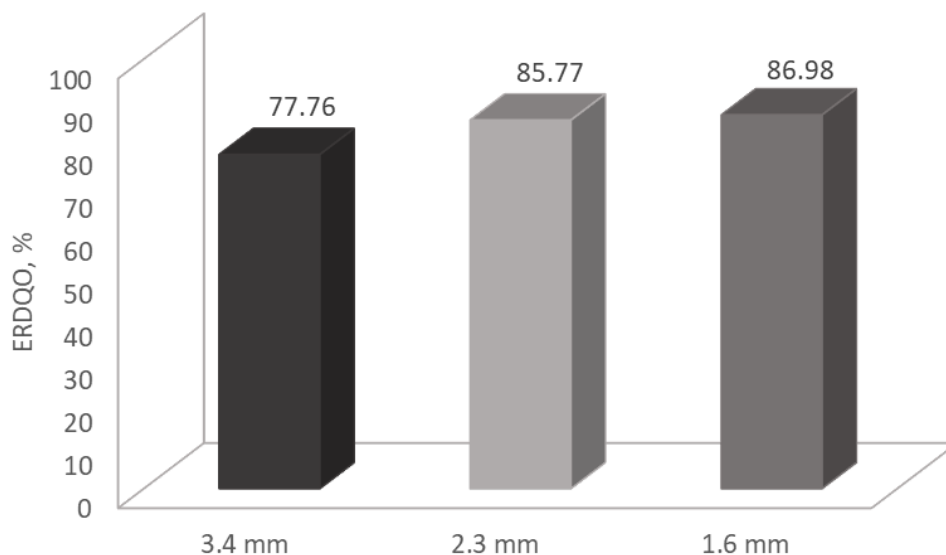


**Figura 3.** Densidad de potencia generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

### 3.3. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO)

En la Figura 4 se muestra la ERDQO obtenida en las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la ERDQO generada por los ánodos de tamaño de poro de 3.4 mm, 2.3 mm y 1.6 mm fue de 77.76%, 85.77% y 86.98% respectivamente. Este parámetro mostró una tendencia diferente a la observada en la generación de voltaje y densidad de potencia, alcanzando los valores más altos en los ánodos con menor tamaño de poro. Este comportamiento sugiere que los poros más pequeños favorecen una mayor degradación de la materia orgánica, posiblemente debido a

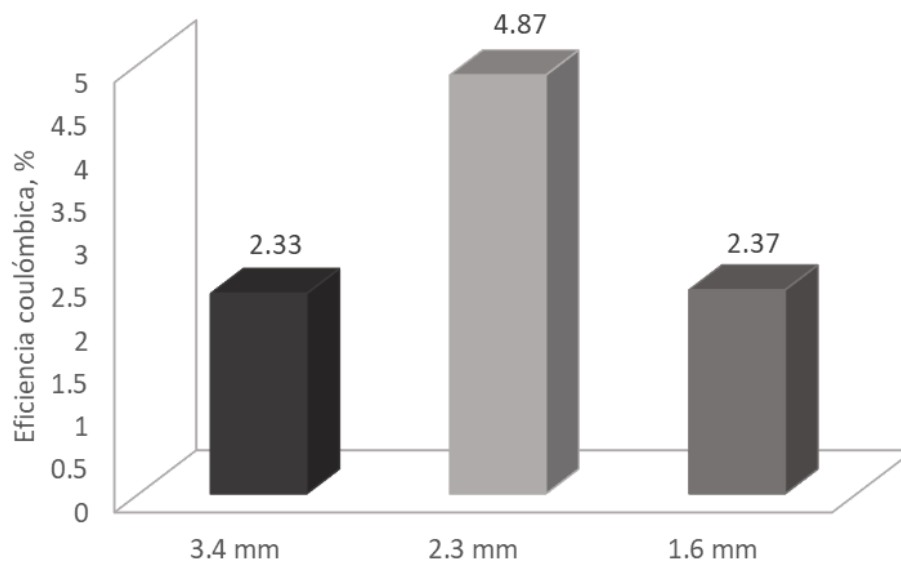
un mayor tiempo de retención del sustrato y una mayor proximidad entre los microorganismos electroactivos y el medio, lo que incrementa la eficiencia metabólica. Sin embargo, esta mayor remoción no se traduce necesariamente en una mayor recuperación de energía, lo que indica que parte de los electrones derivados de la oxidación del sustrato pueden estar siendo desviados hacia rutas metabólicas alternas no electrogénicas, como procesos de fermentación o respiración anaerobia (Pant et al., 2010; Rabaey y Verstraete, 2005). En contraste, el ánodo de 2.3 mm presenta un equilibrio entre remoción de materia orgánica y producción de energía, mientras que el de 3.4 mm podría estar limitado por una menor superficie efectiva para la colonización microbiana. Estos resultados evidencian que el tamaño de poro del ánodo influye no solo en la actividad electroquímica, sino también en la dinámica metabólica del sistema, afectando la distribución de electrones entre generación de energía y degradación de contaminantes.



**Figura 4.** Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno obtenida en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

### 3.4. Eficiencia coulombica

En la Figura 5 se muestra la eficiencia coulombica obtenida en las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la eficiencia coulombica generada por los ánodos de tamaño de poro de 3.4 mm, 2.3 mm y 1.6 mm fue de 2.33%, 4.87% y 2.37% respectivamente. Estos valores indican que, en el ánodo de 2.3 mm, una mayor fracción de los electrones liberados durante la oxidación de la materia orgánica presente en el agua residual municipal fue efectivamente transferida al electrodo y recuperada como corriente eléctrica. En contraste, los valores más bajos observados en los otros tratamientos sugieren mayores pérdidas de electrones hacia rutas metabólicas no electrogénicas. Este comportamiento es consistente con los resultados de remoción de DQO, donde los ánodos con menor tamaño de poro mostraron alta degradación de materia orgánica pero baja eficiencia eléctrica, evidenciando un desacoplamiento entre ambos procesos. El mejor desempeño del ánodo de 2.3 mm puede atribuirse a un equilibrio adecuado entre difusión de sustrato, formación de biopelícula y transferencia electrónica, lo que favorece la actividad de microorganismos electroactivos y reduce las pérdidas energéticas del sistema. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura, donde la eficiencia coulombica depende de la fracción de electrones dirigidos hacia el ánodo y de la competencia con otras rutas metabólicas dentro del sistema (Aelterman et al., 2006; Chae et al., 2009).

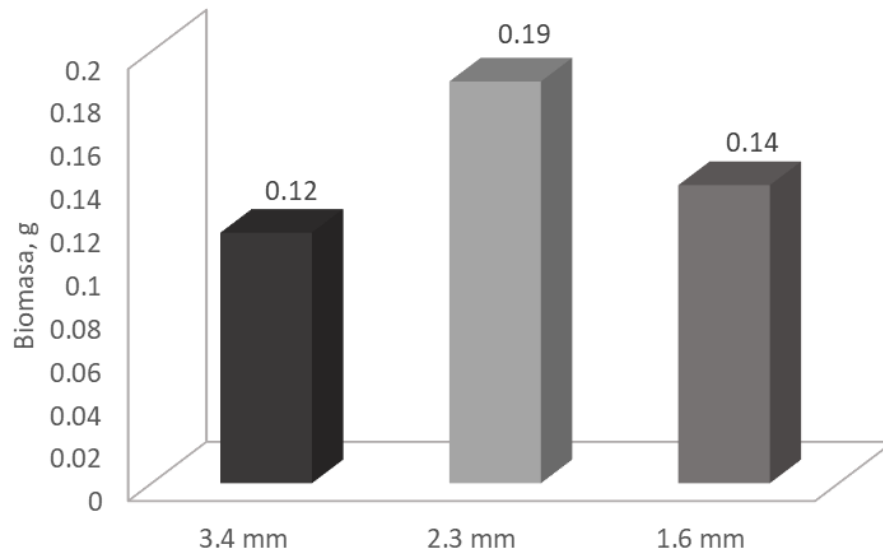


**Figura 5.** Eficiencia coulombica generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

### 3.5. Biomasa

En la Figura 6 se muestra la biomasa generada por las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la biomasa generada por los ánodos de tamaño de poro de 3.4 mm, 2.3 mm y 1.6 mm fue 0.12 g, 0.19 g y 0.14 g, respectivamente. Estos valores sugieren que el tamaño de poro influye directamente en la formación y desarrollo de la biopelícula electroactiva, siendo el tamaño intermedio el que proporciona condiciones más favorables para la colonización microbiana. Un tamaño de poro adecuado permite una mayor área superficial disponible para la adhesión bacteriana, así como una mejor difusión de nutrientes y eliminación de metabolitos secundarios, lo que favorece el crecimiento de microorganismos electroactivos. En contraste, un tamaño de poro menor puede limitar el transporte del sustrato hacia el interior del ánodo, mientras que un tamaño mayor puede reducir la densidad de puntos de anclaje para la biopelícula. Estos resultados son consistentes con el comportamiento observado en la generación de voltaje, densidad de potencia, y

eficiencia coulombica donde el ánodo de 2.3 mm también presentó el mejor desempeño, lo que confirma que una mayor biomasa electroactiva está directamente relacionada con una mayor capacidad de transferencia de electrones y, por lo tanto, con una mejor eficiencia del sistema (Cobo et al., 2025; Guo et al., 2015).



**Figura 6.** Biomasa generada en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

## CONCLUSIÓN

El tamaño de poro de los ánodos impresos en 3D tuvo un efecto significativo en el desempeño de las celdas de combustible microbianas, influyendo tanto en la generación de energía eléctrica como en la remoción de materia orgánica del agua residual municipal. Los resultados obtenidos permitieron identificar que el tamaño de poro de 2.3 mm presentó el mejor desempeño global del sistema, alcanzando los mayores valores de voltaje, densidad de potencia y eficiencia coulombica. El mejor comportamiento del ánodo de 2.3 mm se atribuye a un equilibrio adecuado entre área superficial disponible para la formación de biopelícula, difusión de sustratos y transporte de electrones, lo que favoreció la actividad de microorganismos electroactivos. En contraste, los ánodos con otros tamaños de poro, mostraron limitaciones: el de 1.6 mm presentó restricciones difusivas que afectaron la transferencia electrónica, mientras que el de 3.4 mm mostró una menor superficie efectiva para la colonización microbiana.

En términos de tratamiento de aguas residuales, el ánodo con menor tamaño de poro (1.6 mm) alcanzó una mayor eficiencia de remoción de DQO; sin embargo, esta mayor degradación no se tradujo en una mayor producción de energía eléctrica, evidenciando un desacoplamiento entre ambos procesos debido a la presencia de rutas metabólicas no electrogénicas.

Finalmente, se concluye que la arquitectura del ánodo, particularmente el tamaño de poro, es un factor determinante en el desempeño de las CCM, y que la impresión 3D representa una herramienta prometedora para el diseño de electrodos optimizados que permitan mejorar la eficiencia de estos sistemas en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales y recuperación de energía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., & Verstraete, W. (2006). Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 54(8), 9-15.
- Bian, B., Shi, D., Cai, X., Hu, M., Guo, Q., Zhang, C., ... & Yang, J. (2018). 3D printed porous carbon anode for enhanced power generation in microbial fuel cell. *Nano Energy*, 44, 174-180.
- Bond, D. R., & Lovley, D. R. (2005). Evidence for Involvement of an Electron Shuttle in Electricity Generation by *Geothrix fermentans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(4), 2186–2189.
- Cao, Y., Hu, Y., Sun, J., & Hou, B. (2010). Explore various co-substrates for simultaneous electricity generation and Congo red degradation in air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 79(1), 90-96.
- Chen, G.-W., Choi, S.-J., Lee, T.-H., Lee, G.-Y., Cha, J.-H., & Kim, C.-W. (2010). Microbial community dynamics and electron transfer of a biocathode in microbial fuel cells. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 53(6), 1513–1520.
- Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y., & Kim, I. S. (2009). Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresour technology*, 100(14), 3518-3525.
- Chen, S., Liu, G., Zhang, R., Qin, B., Luo, Y., & Hou, Y. (2012). *Bioresour Technology*, 116, 507–511.
- Chen, X., Cui, D., Wang, X., Wang, X., & Li, W. (2015). Porous carbon with defined pore size as anode of microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 69, 135-141.
- Cobo, M. F. A., Rezaei, B., Keller, S. S., & Zhang, Y. (2025). Exploring the impact of surface properties, porosity and lattice size on bacterial energy harvesting with 3D pyrolytic carbon electrodes. *Journal of Power Sources*, 643, 237018.

- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155.
- Erbay, C., Yang, G., de Figueiredo, P., Sadr, R., Yu, C., & Han, A. (2015). Three-dimensional porous carbon nanotube sponges for high-performance anodes of microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 298, 177-183.
- Franks, A. E., & Nevin, K. P. (2010). *Microbial fuel cells, a current review. Energies*, 3(5), 899–919.
- Guerrini, E., Cristiani, P., Grattieri, M., Santoro, C., Li, B., & Trasatti, S. P. M. (2014). Electrochemical behavior of stainless-steel anodes in membraneless microbial fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 161(3), H62-H67.
- Guo, K., PrévotEAU, A., Patil, S. A., & Rabaey, K. (2015). Engineering electrodes for microbial electrocatalysis. *Current opinion in biotechnology*, 33, 149-156.
- Huang, L., Li, T., Liu, C., Quan, X. et al. (2013). Synergetic interactions improve cobalt leaching from lithium cobalt oxide in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 128: 539–546.
- Ieropoulos, I., Winfield, J., & Greenman, J. (2010). Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 101(10), 3520–3525.
- Ieropoulos, I. A., Ledezma, P., Stinchcombe, A., Papaharalabos, G., Melhuish, C., & Greenman, J. (2013). *Waste to real energy: The first MFC powered mobile phone*. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(37), 15312–15316
- Liu, H., Ramnarayanan, R. y Logan, B. E. (2004). Producción de electricidad durante el tratamiento de aguas residuales mediante una celda de combustible microbiana de una sola cámara. *Ciencias y tecnología ambientales*, 38 (7), 2281-2285.

- 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.
- Lowy, DA, Tender, LM, Zeikus, JG, Park, DH y Lovley, DR (2006). Captación de energía de la interfase sedimento marino-agua II: actividad cinética de los materiales del ánodo. *Biosensores y Bioelectrónica*, 21 (11), 2058-2063.
- Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 759-764.
- Kim, J. R., Jung, S. H., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2007). Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, \*98\*(13), 2568–2577.
- Kim, N. J., Choe, Y. J., Jeong, S. H., & Kim, S. H. (2000). Development of Microbial Fuel Cells Using *Proteus vulgaris*. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, \*21\*(1), 44–48.
- Mohamed, H. O., Abdelkareem, M. A., Park, M., Lee, J., Kim, T., Ojha, G. P., Pant, B., Park, S. J., Kim, H. Y., & Barakat, N. A. M. (2017). Investigating the effect of membrane layers on the cathode potential of air-cathode microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24308–24318.
- Naseri, S., Mousavi, S. A., & Karami, S. (2022). Effects of electrode material and surface area on the performance of microbial fuel cells treating leachate. *Desalination and Water Treatment*, 253, 223-230.
- Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., Roh, S. H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*, 221: 598–621.

- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource technology*, 101(6), 1533-1543.
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *TRENDS in Biotechnology*, 23(6), 291-298.
- 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.
- Saeed, H. M., Hussein, G. A., Yousef, S., Saif, J. et al. (2015). Microbial desalination cell technology: A review and a case study. *Desalination*, 359: 1–13.
- Shankar, R., Mondal, P., Chand, S. (2013). Modelling and simulation of double chamber microbial fuel cell: Cell voltage, power density and temperature variation with process parameters. *Green*, 3(3–4): 181–194.
- Sivaraman, S., & Santhanam, M. (2018). Conductive polymer hydrogel for microbial fuel cell anode. *Materials Research Express*, 5(7), 075311.
- Ye, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y. et al. (2019). Feasibility study on a double chamber microbial fuel cell for nutrient recovery from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 358: 236–242.
- You, J., Preen, R. J., Bull, L., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2017). 3D printed components of microbial fuel cells: Towards monolithic microbial fuel cell fabrication using additive layer manufacturing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 94-101.