

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



“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”

Por:

**SILVANA MIGUEL GARCIA**

Tesis

Presentada como Requisito Parcial Para Obtener El Título de

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

“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”

Por:

**SILVANA MIGUEL GARCIA**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobado 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, México

Febrero 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

“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”

Por:

**SILVANA MIGUEL GARCIA**

Tesis

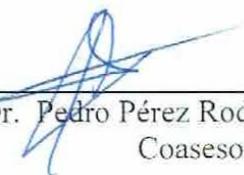
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobado por el Comité de Asesoría

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Asesor Principal Interno

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza  
Asesor Principal Externo

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta  
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2025

## 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 (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 citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, 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, organizacional, medio público o privado.

Autor principal



Silvana Miguel Garcia

Nombre y firma

Asesor principal



Silvana Yol.Hi. Martinez Amado

Nombre y firma

## DEDICATORIA

A mis padres, Ángel Miguel Garrido y María Juana García Pérez.

Quiero dedicarles mi tesis a mis padres por haberme brindado todo su apoyo durante estos 5 años y durante toda mi vida, agradezco que me hayan dado la oportunidad de haber estudiado en esta gran institución como lo es la UAAAN. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. El aliento que me brindaron en momentos de desánimo y su apoyo incondicional cuando tropecé han sido pilares fundamentales en mi vida. Mis palabras nunca serán suficientes para expresar la gratitud que siento hacia ustedes. Su papel como padres ha sido invaluable, guiándome en cada paso de mi camino. Gracias por ser mi mayor inspiración y por estar siempre a mi lado. Los amo por siempre.

A mis hermanos, Guissell García Pérez, Marco Antonio García Pérez, y Raúl Miguel García.

Quiero dedicar y agradecer a mis hermanos por ser pilares importantes en mi vida, por cuidarme y preocuparse por mí. Les agradezco por todo su apoyo y por ser tan buenos y admirables, gracias por siempre hacerme pasar los mejores momentos, por todas las risas y por siempre darme los ánimos y consejos para poder estar lejos de ellos. Les agradezco enormemente su compañía y ser los mejores hermanos. Los adoro mucho.

A mis sobrinos, Ana R. Yáñez, M Sebastián. Yáñez, Mariana Yáñez, Angelito Miguel Velasco y a la pequeña Elena.

Por ser una de las mejores alegrías que mis hermanos me dieron y a la familia por supuesto, cada momento a su lado es una bendición que ilumina mi vida y llena mi corazón de alegría. Ustedes son mi mayor inspiración y mi más preciado tesoro.

A mi novio Abraham Zarate Flores, por ser mi compañero incondicional, por tu apoyo constante y por tu amor genuino. Por ser mi roca en los momentos difíciles y mi mayor alegría en los momentos felices. Por cada gesto de cariño, cada palabra de aliento y cada momento compartido a tu lado. Por inspirarme a ser una mejor persona y a enfrentar cualquier desafío con valentía y determinación. Por recorrer junto a mí este camino, por estar para mí, amarme, apoyarme y por celebrar nuestros logros juntos, hoy termina un ciclo importante en mi vida,

pero también en la tuya, ya que has sido mi apoyo incondicional en este largo proceso de investigación y redacción.

Que este trabajo sea una prueba más de nuestro amor, de nuestra confianza y de nuestra capacidad de hacer realidad nuestros sueños. Te amo con todo mí ser.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por su amor, bondad y guiarme por el camino correcto en el que hoy me permite sonreír ante este gran logro, por bendecirme cada día y no abandonarme en los momentos más difíciles.

A mi Alma Terra Mater, por ser mi segunda casa, por haberme recibido y darme las oportunidades para formarme como profesional, le doy las gracias a esta gran universidad por todas las experiencias y la fortuna de conocer profesores excelentes en su campo y que me fueron de gran ayuda para poder terminar esta gran meta en mi vida.

A mi asesora la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, le agradezco profundamente por ser una parte fundamental durante este tiempo, por su dedicación y paciencia, por todo el conocimiento, que sin sus palabras y consejos no hubiese podido llegar a este paso tan anhelado, por la confianza y la oportunidad de trabajar en este proyecto los llevare grabados para siempre en mi memoria y sobretodo en mi futuro profesional.

A la Q.F.B Brenda Verónica Borrego Limón por su gran apoyo en la comprensión y desarrollo de las técnicas de análisis, por enseñarme y tenerme paciencia a lo largo de la ejecución de este proyecto de tesis y ayudarme en todo momento mediante su experiencia y conocimiento. Así como también por brindarme su confianza y su gran amistad.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>1</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>2</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2 OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>7</b>
<b>3 HIPÓTESIS</b> .....	<b>7</b>
<b>4 REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1 ¿Qué son las aguas residuales municipales?</b> .....	<b>8</b>
<b>4.2 Desafíos de las ARM</b> .....	<b>8</b>
<b>4.3 Tratamiento de aguas residuales municipales</b> .....	<b>9</b>
<b>4.3.1 Tratamiento primario:</b> .....	<b>9</b>
<b>4.3.2 Tratamiento secundario</b> .....	<b>10</b>
<b>4.3.3 Tratamiento terciario</b> .....	<b>13</b>
<b>5 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>14</b>
<b>5.1 Localización donde se llevó a cabo el experimento</b> .....	<b>14</b>
<b>5.2 Materiales y equipo</b> .....	<b>14</b>
<b>5.3 Metodología</b> .....	<b>15</b>
<b>5.3.1 Construcción de los electrodos</b> .....	<b>15</b>
<b>5.3.2 Diseño y operación del SBE</b> .....	<b>16</b>
<b>5.3.3 Parámetros evaluados</b> .....	<b>17</b>
<b>5.3.4 Métodos analíticos</b> .....	<b>17</b>
<b>5.3.5 Voltaje</b> .....	<b>22</b>
<b>6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>23</b>
<b>7 CONCLUSIÓN</b> .....	<b>26</b>
<b>8 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>27</b>

## **ABREVIATURAS**

ARM: agua residual municipal

EDAR: estación depuradora de aguas residuales

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales

SBE: sistema bioelectroquímico

DQO: demanda química de oxígeno

TRH: tiempo de retención hidráulica

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diseño de la agrupación de electrodos empleada en el reactor unitario. ....	15
<b>Figura 2.</b> Reactores que se utilizaron con la primera distancia de 28 cm entre los electrodos del ánodo y cátodo .....	16
<b>Figura 3.</b> Sistema bioelectroquímico sin membrana utilizado durante la investigación y muestra de ambos reactores con la segunda distancia de 56 cm entre los electrodos del ánodo y cátodo.....	17
<b>Figura 4.</b> Tubos hach con reactivo.....	20
<b>Figura 5.</b> Tubos hach con reactivo y muestra.....	20
<b>Figura 6.</b> Digestor. ....	21
<b>Figura 7.</b> Lectura en espectrofotómetro .....	21
<b>Figura 8.</b> Voltímetro STEREN PC-LINK.....	22
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de la demanda química de oxígeno en un SBE a dos distancias entre ánodo y cátodo. ....	23
<b>Figura 10.</b> Comportamiento del voltaje en un SBE a dos distancias entre ánodo y cátodo..	24

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Porcentaje promedio del porcentaje de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno y voltaje generado en un SBE a dos distancias entre ánodo y cátodo..	25
--	----

## RESUMEN

Las aguas residuales municipales, al ser una mezcla compleja de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos, representan una seria amenaza para el medio ambiente y la salud pública debido a su alta carga de contaminantes, incluyendo grasas, aceites, proteínas y microorganismos patógenos. Su descarga sin tratar puede provocar graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos y la calidad del agua potable, por lo que es imperativo someterlas a procesos de tratamiento efectivos.

Los tratamientos biológicos se presentan como una opción viable y sostenible para abordar este desafío ambiental. Entre estos, los sistemas bioelectroquímicos (SBE) emergen como una tecnología prometedora. Los SBE tienen la capacidad única de no solo eliminar una amplia gama de contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales, sino también de generar electricidad como subproducto del proceso de tratamiento.

El presente estudio se enfocó en evaluar la influencia de la distancia entre los electrodos (ánodo y cátodo) de un sistema bioelectroquímico en la eficiencia de la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y la generación de voltaje. Como es conocida la DQO es un indicador clave de la contaminación orgánica e inorgánica en las aguas residuales. La distancia entre el ánodo y cátodo influyó en el desempeño del SBE durante el tratamiento de agua residual municipal a un tiempo de retención hidráulica de 20 horas. A mayor distancia (56 cm) mayor fue la remoción de la demanda química de oxígeno (6% más alta) pero la generación de voltaje fue cuatro veces inferior que a una distancia menor (28 cm).

## 1 INTRODUCCIÓN

El agua es una de las necesidades básicas del ser humano, su acceso y saneamiento son considerados como derechos humanos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el cual fue definido como uno de sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a alcanzar para el año 2030 (ONU, 2023). De acuerdo con el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2023), el país cuenta con una disponibilidad promedio de 3200 m<sup>3</sup> anuales para cada habitante, cuando países como Estados Unidos cuenta con 8.6 mil m<sup>3</sup>. México está conformado por múltiples climas y relieves que favorecen a distintas regiones con una mayor disponibilidad de agua y consecuentemente expone a zonas desérticas y semidesérticas a sufrir de sequías constantes (CONAGUA & SMN, 2023). La creciente población global y su cada vez mayor capacidad económica, ha conducido inevitablemente a una mayor presión sobre las fuentes de abasto de agua, básicamente como resultado de la necesidad de producir más alimentos y energía, así como de abastecer con mayores volúmenes a las zonas urbanas y a las actividades productivas, principalmente la agricultura y la industria (SEMARNAT, 2018).

La contaminación del agua ocurre cuando sustancias nocivas, a menudo sustancias químicas o microorganismos contaminan un arroyo, un río, un lago, un océano, un acuífero u otra masa de agua, degradando la calidad del agua y haciéndola tóxica para los seres humanos o el medio ambiente. Las aguas residuales, provienen de lavabos, duchas e inodoros (alcantarillado) y de actividades comerciales, industriales y agrícolas (metales, disolventes y lodos tóxicos), (Arriols, 2024). El término también incluye la escorrentía de las aguas pluviales, que se produce cuando las precipitaciones arrastran las sales de las carreteras, el aceite, la grasa, los productos químicos y los desechos de las superficies impermeables a nuestras vías fluviales. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019) más del 80 por ciento de las aguas residuales del mundo retornan al medio ambiente sin ser tratadas o reutilizadas; en algunos países menos desarrollados, la cifra supera el 95 por ciento. En los Estados Unidos, las instalaciones de tratamiento de aguas residuales procesan unos 34 mil millones de galones de aguas residuales al día. Estas instalaciones reducen la cantidad de contaminantes como los patógenos, el fósforo y el nitrógeno de las aguas residuales, así como

los metales pesados y los productos químicos tóxicos de los residuos industriales, antes de verter las aguas tratadas de nuevo en los cursos de agua.

En la actualidad, las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) procesan las aguas residuales con el objetivo de devolverlas al entorno natural, abordándolas como desechos y asignando considerables recursos, tanto energéticos como económicos, para su tratamiento. Durante los últimos años, las tecnologías aplicadas se han ido mejorando para aumentar su rendimiento y, así, disminuir los consumos energéticos, de igual manera se ha incrementado la investigación y el desarrollo sobre tecnologías innovadoras que permiten recuperar recursos del agua residual al mismo tiempo que se lleva a cabo la depuración. Así se está produciendo un cambio que consiste en dejar de considerar las EDARs como plantas de tratamiento de aguas residuales, a considerarlas plantas para extraer recursos, los cuales principalmente son energía y nutrientes. Existen diferentes niveles de limpieza en los procesos de remoción de los principales contaminantes contenidos en las aguas residuales, estos contaminantes presentan altas concentraciones, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) los mide regularmente en diferentes puntos (Bosch-Jiménez, 2020).

Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales se componen por lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas y filtros biológicos, otros procesos comunes son las zanjas de oxidación, de reactores anaerobios de flujo ascendente, así como también encontramos tecnologías como lo son, los sistemas bioelectroquímicos (BES), que son fruto de la sinergia de dos ciencias: la electroquímica y la biotecnológica. Las tecnologías BES integran electrodos (ánodo y cátodo) dentro de reactores biológicos, mediante microorganismos adheridos sobre los electrodos, las BES catalizan diferentes reacciones de oxidación y reducción para recuperar/valorizar recursos contenidos en el agua residual. Por lo tanto, la sinergia y combinación de un proceso biológico con uno de electroquímico, en un mismo reactor, permite mejorar el rendimiento de los procesos actuales del tratamiento de aguas residuales, desde un punto de vista de especificidad y eficiencia energética y también abre la puerta a la recuperación de recursos (AMAPEX, 2020).

## **2 OBJETIVO GENERAL**

Determinar si la distancia entre el ánodo y cátodo ejerce influencia en el porcentaje de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno y el voltaje generado en un sistema bioelectroquímico sin membrana durante el tratamiento de agua residual municipal.

## **3 HIPÓTESIS**

Se espera que la distancia entre el ánodo y cátodo influya en la generación de voltaje y el porcentaje de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno.

## 4 REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 ¿Qué son las aguas residuales municipales?

Las aguas residuales municipales son aquellas las cuales provienen de fuentes tanto domésticas, industriales como comerciales e institucionales estas aguas se encuentran dentro de un asentamiento o comunidad de humanos. Dado que la producción de aguas residuales en áreas municipales y urbanas está estrechamente ligada a la configuración y operación de los sistemas urbanos, resulta imperativo examinar detenidamente los modelos presentes y futuros de urbanización para desarrollar enfoques más sustentables en el manejo de aguas residuales a través de los años (Habitat-Graham *et al.*, 2017).

Este tipo de aguas residuales son desechadas a partir de diferentes tipos de desagües como los lavabos, duchas, lavanderías, inodoros, entre muchas otras fuentes. Por lo general las aguas residuales se componen de un 99% solo agua y el 1% restante es contaminación la cual es necesario que sea tratada antes de que el agua vuelva a ser reutilizada y/o vertidas a un cuerpo natural de agua o al sistema de alcantarillado (Clean TeQ Water, 2020).

### 4.2 Desafíos de las ARM

En un contexto donde la necesidad de agua dulce sigue creciendo y los limitados recursos hídricos se ven cada vez más presionados debido a la extracción excesiva, la contaminación y los efectos del cambio climático, sería ilógico no aprovechar las ventajas que ofrece una gestión más eficiente de las aguas residuales. Se estima que anualmente en el mundo hay un uso de 3.928 km<sup>3</sup> de agua dulce, de esto el 44% alrededor de (1.716 km<sup>3</sup> al año) son consumidos por la agricultura mediante la evaporación, mientras que el 56% restante (2212 km<sup>3</sup> al año) se descarga al medio ambiente en forma de aguas residuales vertidas del municipio o algunas industrias (UNESCO, 2017).

A nivel global, México se ubica como el segundo país, después de China, en el uso de "aguas crudas" (no tratadas) para riego. Estas aguas transportan importantes cantidades de microorganismos dañinos, elementos metálicos pesados y restos de productos de cuidado personal, lo que conlleva problemas de salud. Además, contienen residuos de antibióticos, lo que agrava la resistencia bacteriana (INCYTU, 2019). La ausencia de un sistema de drenaje es uno de los desafíos identificados, dado que el agua residencial fluye directamente hacia

lagunas, ríos, arroyos y acuíferos subterráneos, entre otros cuerpos de agua. Este problema se observa principalmente en zonas rurales, ante esto se sabe que solo un poco más de la tercera parte de la población rural dispone de una red para la captación y eliminación de aguas residuales, pero no necesariamente cuenta con una infraestructura para su tratamiento. (UVserva, 2017).

Ante esto se tomen medidas en las cuales se opte por invertir de manera efectiva en sistemas de tratamiento de aguas residuales y otras infraestructuras de saneamiento, es esencial para alcanzar mejoras en la salud pública, preservar el medio ambiente y elevar el bienestar. La gestión adecuada de los servicios de agua, saneamiento e higiene constituye una parte fundamental para prevenir enfermedades y salvaguardar la salud durante epidemias de enfermedades infecciosas, como la actual crisis de COVID-19 (Banco Mundial, 2020).

### **4.3 Tratamiento de aguas residuales municipales**

El tratamiento de aguas es un componente esencial que tiene como propósito el reducir la concentración de los contaminantes, materia orgánica, despeja sólidos y restaura la presencia de oxígeno en el agua residual a cierto valor de manera que sea lo suficientemente bajo, para poder ser descargada en un cuerpo receptor ya sea superficial o subterráneo (Cañez-Cota, 2022).

Existen tratamientos para el agua residual municipal que se clasifican como:

#### **4.3.1 Tratamiento primario:**

El principal objetivo de esta etapa es el de eliminar una porción de los sólidos suspendidos en la que el agua debe estar inmóvil por un tiempo determinado para que los sólidos se sedimenten, se prosigue con una separación de sólidos de gran y mediano tamaño como basura, plásticos, neumáticos, etc., por medio de tamizado o trampas de enrejado, se continúa con aplicar desarenadores al agua para quitar la mayor parte de partículas diminutas que se encuentren disueltas y que los propios tamices no pudieron filtrar, al final del proceso, el agua se retiene temporalmente en recipientes especialmente diseñados para sedimentación y decantación, permitiendo que la fuerza de la gravedad actúe sobre los sólidos restantes y los acumule en el fondo, separándolos del agua. El tratamiento primario ayuda a acondicionar el

agua para el inicio formal de su depuración y que las siguientes etapas se realicen sin complicaciones (Etecé, 2021).

#### **4.3.2 Tratamiento secundario**

Al ser culminado el tratamiento primario las aguas continúan su camino pasando a la siguiente etapa en la que se pretende degradar materiales de origen orgánico y sustancias biológicas procedentes de los residuos humanos, de esta manera se intenta que los trozos de la materia orgánica sean segregados mediante el proceso de sedimentación. La reducción de estos compuestos se puede dar a través de procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios (Cely-Calixto *et al.*, 2022).

##### **4.3.2.1 Sistema Aeróbico**

Este proceso es llevado a cabo en presencia de oxígeno, que se incluye mediante burbujeo dentro de los recipientes de almacenamiento, la eliminación correcta de los productos nitrogenados y su cantidad dependerá de cada planta de tratamiento. Este método de tratamiento transforma los agentes contaminantes orgánicos en productos resultantes como agua, CO<sub>2</sub> y microorganismos adicionales. Este enfoque de tratamiento emplea microorganismos que dependen del oxígeno para sus procesos metabólicos, nutriendo así a los microorganismos que se encargan de degradar los residuos presentes en las aguas. (BOSSTECH, 2020)

##### **4.3.2.2 Sistema Anaeróbico**

Este tratamiento es todo lo contrario al aerobio ya que este es mediante la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Esto conduce a una generación mínima de residuos sólidos, particularmente en contraste con un proceso aeróbico. Además, un método anaeróbico posibilita la creación de biogás, el cual, por otro lado, puede ser aprovechado económicamente. Es importante mencionar que este tipo de tratamiento no puede eliminar por completo los nutrientes ya que presenta deficiencias en cuanto a una menor depuración, y un proceso muy inestable (Telwesa, 2021).

##### **4.3.2.3 Estanques de estabilización aerobia**

El estanque de estabilización es otra forma de tratamiento debido a su necesidad de un espacio significativo, suele ser construido en áreas rurales. Las lagunas opcionales, que operan en condiciones mixtas, son las más prevalentes, con una profundidad que oscila entre

0.6 y 1.5 metros y una extensión que supera generalmente una hectárea. En la parte inferior, donde ocurre la descomposición de los sólidos, prevalecen condiciones anaeróbicas, mientras que en las proximidades de la superficie se mantienen condiciones aeróbicas, lo que permite la oxidación de la materia orgánica disuelta y coloidal (Picazo *et al.*, 2024)

#### **4.3.2.4 Lagunas de Estabilización**

Las lagunas de estabilización se estiman que son uno de los procesos más aptos para las aguas residuales, las cuales consisten en la degradación de la materia orgánica que realizan las bacterias aeróbicas y anaeróbicas facultativas las cuales obtienen el oxígeno disuelto tanto del agua circundante como del aire atmosférico, además del generado por la fotosíntesis de las algas presentes en las lagunas. Estos cuerpos de agua, también llamados estanques o embalses, son relativamente poco profundos y se encuentran excavados en la tierra, rodeados por terraplenes. En estos lugares se vierten los desechos líquidos sin tratar, o aquellos provenientes de un proceso de tratamiento primario, con el propósito de retenerlos durante un período determinado.

Según el proceso biológico que tiene lugar en las lagunas, estas pueden ser clasificadas en tres tipos: anaeróbicas, aeróbicas y facultativas.

Las lagunas anaeróbicas son aquellas en las que el proceso ocurre sin la presencia de oxígeno disuelto. En este ambiente predominan bacterias anaeróbicas y facultativas, las cuales se encargan de degradar la materia orgánica presente en el agua. En caso de necesidad, se puede suministrar oxígeno a la laguna mediante agitadores mecánicos o mediante la difusión de aire. En este último caso, se habla de lagunas aireadas (Farias-Marquez, 2016).

#### **4.3.2.5 Lodos activados**

Durante este proceso el tanque de aireación se agita mediante dispositivos de aireación, los cuales también proporcionan oxígeno a la mezcla biológica, el efluente del tratamiento primario se dirige al tanque de aireación, donde se mezcla con microorganismos y bacterias, formando lo que se conoce como licor mixto. Este tanque, también llamado reactor biológico, suministra oxígeno o aire de forma continua a las aguas residuales, garantizando así que los organismos dispongan del oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica presente en el efluente. La adición de oxígeno también facilita la mezcla del licor mixto. Entre los dispositivos mecánicos de aireación comúnmente utilizados se encuentran los difusores sumergidos, que liberan aire comprimido en el fondo del tanque, y los aireadores

superficiales mecánicos, que agitan la superficie del líquido al introducir aire. El tiempo de retención hidráulica en los tanques de aireación suele variar entre 3 y 8 horas, pero puede prolongarse en caso de una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Posteriormente a la etapa de aireación, los microorganismos se separan del líquido mediante sedimentación en el decantador secundario, obteniendo así un efluente secundario clarificado. Una parte de este lodo se recicla hacia el tanque de aireación para de esta manera tener un nivel elevado de sólidos suspendidos, lo restante se desecha del agua para que la concentración sea constante y de aquí el agua que ha sido tratada va directamente al tratamiento terciario en donde pasará a su etapa final antes de ser vertida hacia una corriente natural (Nuevo, 2023).

#### **4.3.2.6 Biorreactores de membrana**

Este tipo de tratamiento dependerá de la desintegración biológica y la división por membrana que inciden de forma simultánea, en la que los sólidos suspendidos y microorganismos son divididos del agua que ya ha sido tratada mediante un sistema de filtración, la biomasa que es en su totalidad delimitada por el propio sistema nos da un efluente desinfectado y controlado al mismo tiempo que los microorganismos se encuentran en el sistema (Bluegold, 2020). Las bombas colocadas en los filtros de membrana crean un suave vacío y transportan el efluente a través de ellos. Los diminutos agujeros de la membrana impiden el paso de los microorganismos, reteniéndolos en el depósito de aireación. Durante este procedimiento, la membrana se ensucia o se bloquea, lo que hace necesario realizar una limpieza con mayor frecuencia.

#### **4.3.2.7 Sistemas bioelectroquímicos**

La disminución de los recursos no renovables a nivel global y la urgente necesidad de mitigar el impacto humano en el medio ambiente han promovido la innovación en sistemas de producción y plantas de tratamiento de residuos. Por lo que en la actualidad se estima que las aguas residuales son un recurso renovable para la generación de energía eléctrica, combustibles y otros productos químicos.

Hoy en día se opta por sistemas bioelectroquímicos microbianos también conocidos como sistemas bioelectroquímicos (BES) representan un enfoque novedoso que posibilita el procesamiento de efluentes en conjunto con la generación de energía renovable (Cornejo-Martell, 2017). Los SBE tienen como función reducir la energía gastada en procesos de depuración y el tratamiento de aguas residuales y de esta manera aumentar la sostenibilidad.

Las tecnologías bioelectroquímicas abarcan la generación de electricidad en celdas de combustible microbianas, así como la producción de hidrógeno y metano en celdas de electrólisis microbianas. Además de la producción de energía, los sistemas bioelectroquímicos tienen otros usos, como la síntesis de compuestos químicos de interés comercial (bioelectrosíntesis) y la desalinización del agua, entre otros ejemplos (López-Tirado, 2020).

El SBE se realiza dentro de una celda o reactor electroquímico, además de combinar procesos microbianos y electroquímicos. Los primeros están vinculados con las especies de microorganismos, su cantidad y su estado fisiológico; también, están relacionados con los nutrientes disponibles y no tóxicos que la biomasa proporciona para su subsistencia. Mientras que los procesos electroquímicos son influenciados por el material de los electrodos, la composición de los líquidos (electrolitos) en los que están sumergidos, la existencia de un separador de electrodos y, en general, por el diseño de la celda o reactor. Ambos procesos, microbiológico y electroquímico, también son impactados por condiciones ambientales como la temperatura y la concentración de oxígeno, entre otros. Estos sistemas bioelectroquímicos son caracterizados como tecnologías novedosas que emplean microorganismos en el ánodo para catalizar procesos de oxidación y en el cátodo para reacciones de reducción. Es decir, pueden existir microorganismos en ambos electrodos simultáneamente (Cercado-Quezada, 2022).

### **4.3.3 Tratamiento terciario**

Este tipo de tratamiento tiene como función principal el aumentar la calidad y eficiencia, al ser la etapa final del tratamiento se llevan a cabo pasos para la desaparición de agentes patógenos como bacterias de origen fecal, y de esta manera elevar los criterios de calidad. Se pueden llevar a cabo procesos como la filtración en la que se deben contener la mayor parte de materia en suspensión y de esta manera el carbón activo restante ayuda a detener el resto de las toxinas (Rodríguez-de Jorge, 2020).

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 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.

### 5.2 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

Filtro 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

Micropipeta Labmate

Multímetro Steren PC-Link

Parafilm

Pisetas

Pinzas

Probetas Pyrex 100ml y 250ml

Puntillas

Refrigerador Mabe

Termómetro

Tijeras

Tubos Hach con Tapa

Tubos Kimax

Vasos de Precipitado Pyrex 200 ml y 500 ml

### 5.3 Metodología

#### 5.3.1 Construcción de los electrodos

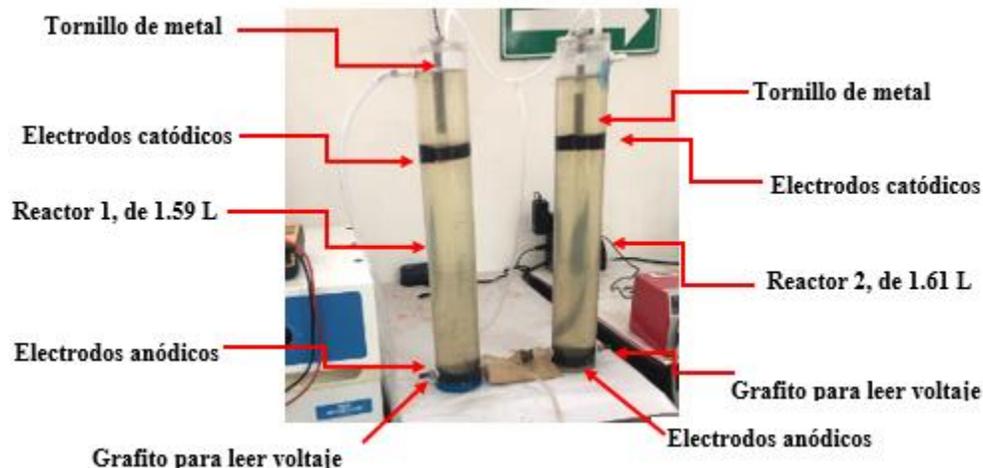
Para la fabricación de los electrodos, se empleó fieltro de grafito que se cortó en círculos con un diámetro de 5 cm. Se cortaron en total 12 discos (3 para cada electrodo). A los discos se les practicaron 5 perforaciones de 0.5 cm de diámetro. Luego, se dejaron secar durante 2 horas en un horno de secado a una temperatura de 100°C para eliminar la humedad. Después, se colocaron en un desecador para pesarlos individualmente y por grupo (3 discos), y mediante las perforaciones, los 3 discos de cada electrodo fueron unidos con hilo. Una vez finalizada la unión de los discos, un grupo (ánodo) se sumergió en una solución de agua residual con lodo anaeróbico (100 ml de lodo, 900 de agua residual), mientras que el cátodo se colocó en una solución de agua residual con lodo aeróbico (100 ml de lodo, 900 de agua residual). Esto sirvió para acondicionar los electrodos, de manera que, al ser introducidos en el reactor unitario, ya contarán con una biopelícula microbiana formada tanto aeróbicamente (en el cátodo) como anaeróbicamente (en el ánodo).



**Figura 1.** Diseño de la agrupación de electrodos empleada en el reactor unitario

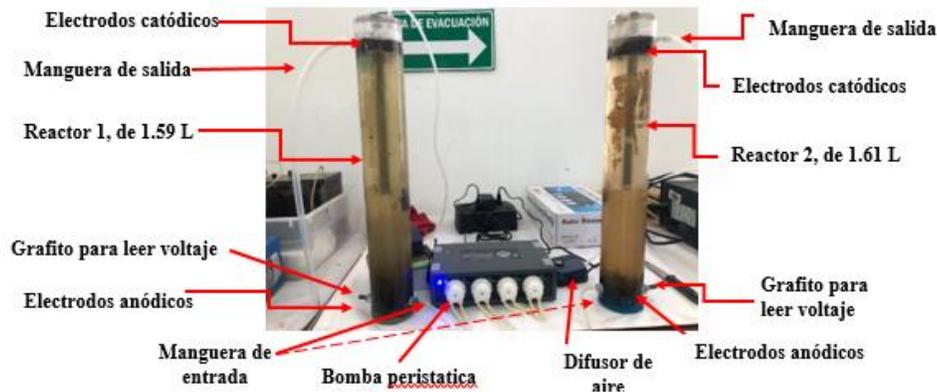
### 5.3.2 Diseño y operación del SBE

Este SBE se elaboró mediante dos reactores unitarios, en los que ambos constaron de un espacio para el ánodo y otro para el cátodo, el reactor se diseñó sin una membrana para observar su eficiencia sobre el tratamiento de ARM y la distancia entre cada electrodo, la capacidad de trabajo del reactor uno fue de 1.59 L y del reactor dos de 1.61 L, se integraron en la parte inferior de cada reactor un grupo de discos anteriormente hechos de fieltro de grafito en los que ya se había formado una biopelícula anaerobia, el siguiente grupo de discos se introdujeron en el área del cátodo, primeramente a una altura de 28 cm en ambos reactores con la ayuda de un tornillo de metal en el que se pusieron los electrodos por la parte de en medio, debajo de este compartimento se colocó una manguera con un difusor que oxigenaba esta sección mediante la inyección de aire mediante una bomba de acuario (figura 2) al paso de 8 días se cambiaron de posición los electrodos del cátodo a la parte superior del reactor, y de esta manera estuvieron a 56 cm de distancia entre ánodo y cátodo, el aireador se mantuvo a la misma distancia de 28 cm para cada reactor (figura 3).



**Figura 2.** Reactores que se utilizaron con la primera distancia de 28 cm entre los electrodos del ánodo y cátodo.

Al SBE se le administro ARM mediante una bomba peristáltica, se le ajusto el TRH a 20 horas en la que cada hora se descargaban 70 ml de ARM tratada cada hora. El flujo en este reactor era de manera ascendente, inicialmente el agua ingresaba al ánodo y ascendía hasta alcanzar la parte superior del reactor, donde se ubicaba luego una manguera para la salida del ARM tratada. La alimentación del reactor se realizó durante 15 días. En la figura 3 se muestra el SBE que se utilizó durante esta investigación.



**Figura 3.** Sistema bioelectroquímico sin membrana utilizado durante la investigación y muestra de ambos reactores con la segunda distancia de 56 cm entre los electrodos del ánodo y cátodo.

### 5.3.3 Parámetros evaluados

La experimentación se desarrolló a lo largo de 15 días durante el cual se llevaron a cabo distintos indicadores para supervisar la eficacia del RBS. Entre los aspectos evaluados se incluyeron el voltaje tanto de la muestra inicial como la tratada, la DQO de las muestras inicial y tratada, las cuales se registraron diariamente.

### 5.3.4 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).

#### **5.3.4.1 Demanda Química de Oxígeno**

La DQO es un análisis que incluye tanto el material orgánico biodegradable como no biodegradable, la parte biodegradable y soluble determina la concentración esperada de la DQO filtrada en el efluente, mientras que la parte no biodegradable y particulada influye en la producción diaria de lodos y en la acumulación de los mismos en un reactor biológico.

El método estándar para la determinación de la DQO es usando el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), la muestra se oxida debido a una solución sulfúrica caliente del dicromato de potasio con sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) que es usado como catalizador para oxidar la materia orgánica y el sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ ) es utilizado para reducir la interferencia de los iones cloruros. Para muestras digeridas turbias y de color atípico se usa la titulación con sulfato de amonio ( $NH_4$ ) y hierro estandarizado. Este análisis se realizó por espectrofotometría con tubo cerrado (NMX-AA-030/2-SCFI-2011).

#### **5.3.4.2 Materiales utilizados para determinar la DQO**

Ácido sulfúrico

Agitador magnético Civeq

Agua destilada

Balanza electrónica de precisión US Solid

Desecador Pyrex

Dicromato de potasio

Digestor Hach DRB 200

Espectrofotómetro Hach DR5000

Frascos ámbar

Matraz de aforación Pyrex

Sulfato de mercurio

Sulfato de plata

Tubos Hach con tapa

Voltímetro STEREN PC-LINK

#### **5.3.4.3 Solución de dicromato de potasio**

Se recomienda usar material de vidrio para manipular los reactivos y una balanza de precisión para una medición exacta de los ingredientes. Se pesaron 20 gramos de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), una vez pesado se metió al horno para secarlo durante 2 horas a una temperatura de  $100^\circ C$ . Después se pasó a un desecador para enfriarse y de ahí se tomaron 10.216 g del dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y 500 ml de agua destilada para pasarlos a un matraz de aforación con capacidad de 1 litro a esto se le añadió 33.3 gramos de sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ ) y 167 ml de ácido sulfúrico concentrado, añadiéndolo lentamente, ya que la solución se haya enfriado se afora a un litro con agua destilada, posteriormente se introdujo un agitador magnético para poder obtener una solución homogénea para finalmente pasarla a frascos de color ámbar para evitar el contacto directo con la luz ya que la mezcla resulta ser fotosensible.

#### **5.3.4.4 Solución de sulfato de plata y ácido sulfúrico**

Se pesaron 15 gr de sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) y se vaciaron en un matraz de aforación con capacidad de 1 litro. Después se afora con ácido sulfúrico concentrado y se deja reposar durante una noche en un lugar sin humedad ni luz, después se agito nuevamente con el fin de disolver todo el sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ), finalmente se pasa la solución a un frasco de vidrio color ámbar para ser protegido de la luz solar directa ya que la disolución es fotosensible. La disolución es estable por doce meses.

#### **5.3.4.5 Determinación de la DQO**

Se tomaron 3.5 ml de la mezcla de sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) y ácido sulfúrico y 1.5 ml de la mezcla del dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y se pasaron a un tubo Hach con tapa (figura 4) a esto se le agrega 2.5 ml de la muestra de ARM y se tapa bien, se realiza el mismo el paso cambiando la muestra de ARM por agua destilada para tener un blanco (figura 5) se debe agitar lentamente por inversión y llevar al digestor durante 2 horas a una temperatura de  $150^\circ C$ . Ya que haya pasado el tiempo en el digestor se sacan los tubos (figura 6) y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después llevarlos al espectrofotómetro y poder leer su absorbancia a una longitud de onda de 620 nm (figura 7).



**Figura 4.** Tubos hach con reactivo.



**Figura 5.** Tubos hach con reactivo y muestra.



**Figura 6.** Digestor.



**Figura 7.** Lectura en espectrofotómetro.

### 5.3.5 Voltaje

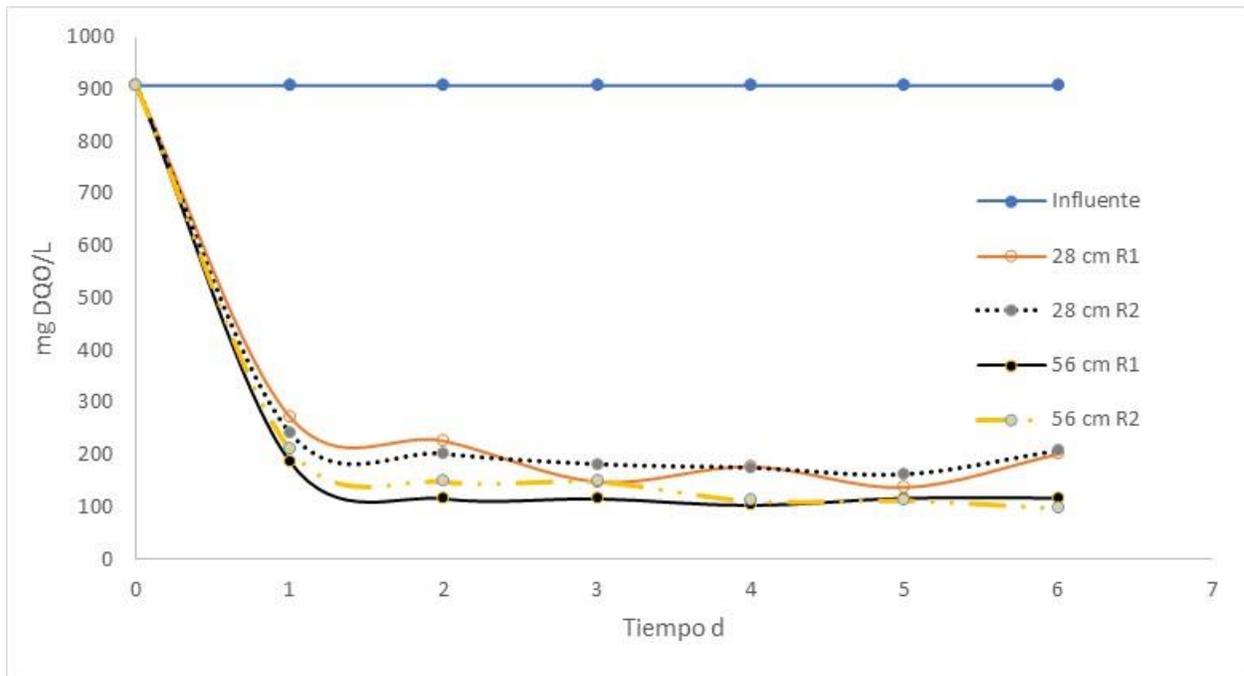
El voltaje es considerado como una magnitud física en el que determina la diferencia del potencial eléctrico que hay entre dos puntos, por ejemplo, en la celda de combustible microbiana la cámara catódica y la anódica comprenden estos puntos, en el caso del voltaje que se generó en la experimentación con el SBE fue monitoreado con un voltímetro de la marca STEREN PC-LINK que de igual manera la cámara anódica y la cámara catódica corresponden a estos puntos (figura 8).



**Figura 8.** Voltímetro STEREN PC-LINK.

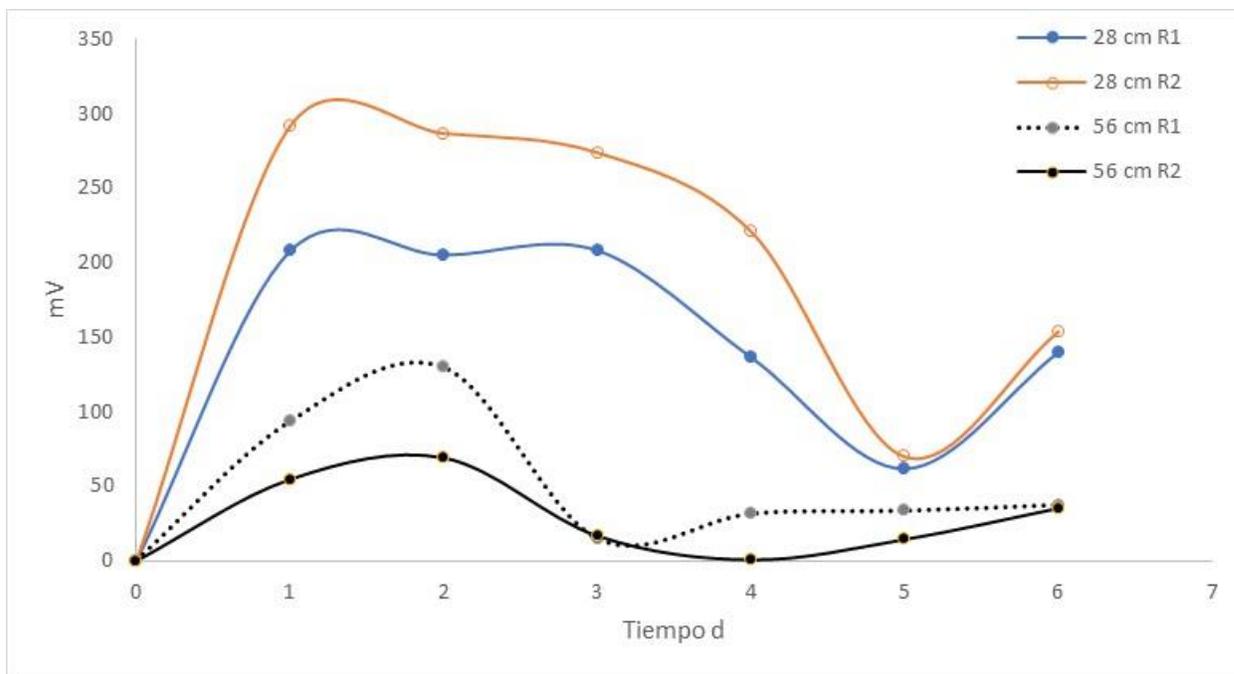
## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 9 se puede observar la remoción de la demanda química de oxígeno a dos distancias entre los electrodos del ánodo y del cátodo en un sistema bioelectroquímico unitario sin membrana de intercambio catiónico para el tratamiento de agua residual municipal a un TRH de 20 horas. En esta misma figura se aprecia que en los reactores que tenían los electrodos a una distancia de 56 cm la DQO disminuyó más que en los que en los reactores que tenían una distancia de 28 cm. En el año 2011 Buitrón y Pérez evaluaron el efecto de la distancia de los electrodos (4, 6 y 12 cm) en una CCM usando una mezcla de agua residual generada en una institución educativa y glucosa, no detectando diferencia entre la remoción de la DQO ni la generación de voltaje.



**Figura 9.** Comportamiento de la demanda química de oxígeno en un SBE a dos distancias entre ánodo y cátodo.

En la figura 10 se puede observar la generación de voltaje a dos distancias entre los electrodos del ánodo y del cátodo en un sistema bioelectroquímico unitario sin membrana de intercambio catiónico para el tratamiento de agua residual municipal a un TRH de 20 horas. Claramente se puede observar en esta figura que la generación de voltaje es mayor a una menor distancia entre los electrodos.



**Figura 10.** Comportamiento del voltaje en un SBE a dos distancias entre ánodo y cátodo.

En la tabla 1 se presentan los resultados promedio de la remoción de la DQO y de la generación promedio de voltaje en los SBE a dos diferentes distancias, detectando un 73.25% de remoción a 56 cm de distancia entre electrodos mientras que este valor fue casi 6% menor a 28 cm de distancia, mientras que la generación de voltaje fue en promedio más de cuatro veces superior en los SBE con electrodos a una distancia de 28 cm.

**Tabla 1.** Porcentaje promedio del porcentaje de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno y voltaje generado en un SBE a dos distancias entre ánodo y cátodo.

<b>Distancia entre electrodos en cm</b>	<b>%ERDQO</b>	<b>Voltaje en mV</b>
28	67.43	161.11
56	73.25	38.04

## 7 CONCLUSIÓN

La distancia entre el ánodo y cátodo consistentes en electrodos de fieltro de grafito influyó en el desempeño de un sistema bioelectroquímico durante el tratamiento de agua residual municipal a un tiempo de retención hidráulica de 20 horas. A mayor distancia (56 cm) mayor fue la remoción de la demanda química de oxígeno (6% más alta) pero la generación de voltaje fue cuatro veces inferior que a una distancia menor (28 cm).

Se deberían estudiar distancias intermedias para encontrar un equilibrio entre la generación de voltaje y el porcentaje de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno, es decir que en dicha distancia ambos parámetros sean los mejores.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

1. Agua. (2020). Sistemas bioelectroquímicos para incrementar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas. Revista Técnica de Medio Ambiente. [https://www.retema.es/actualidad/sistemas-bioelectroquimicos-incrementar-sostenibilidad-procesos-tratamiento-aguas?fbclid=IwAR19H53f-XyTT0Nq9oTi4pugevkEE\\_WDtCTsU09ZhjDsQghObCAeazQCvY](https://www.retema.es/actualidad/sistemas-bioelectroquimicos-incrementar-sostenibilidad-procesos-tratamiento-aguas?fbclid=IwAR19H53f-XyTT0Nq9oTi4pugevkEE_WDtCTsU09ZhjDsQghObCAeazQCvY)
2. Alabaster (2017). Aguas residuales el recurso desaprovechado. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247671\\_spa/PDF/247647spa.pdf.multi.nameddest=247671](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247671_spa/PDF/247647spa.pdf.multi.nameddest=247671)
3. AMAPEX. (2020). Innovaciones en el tratamiento de aguas residuales: Biotecnología y Electroquímica. <https://amapex.net/tratamiento-de-aguas-residuales-biotecnologia/>
4. Arriols, E. (2024). Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
5. Bluegold. (2020). Biorreactor de membrana MBR: Descripción y su aplicación al tratamiento de aguas residuales. <https://www.bluegold.es/es/biorreactores-de-membrana-mbr-descripcion-y-aplicacion/#:~:text=Un%20Reactor%20BioI%C3%B3gico%20de%20Membranas,el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.>
6. BOSSTECH. (2020), Todo sobre el tratamiento secundario de aguas residuales, <https://bosstech.pe/todo-sobre-tratamiento-secundario-aguas-residuales/>.
7. Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 14(1), 5-11. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-888X2011000100001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2011000100001)
8. Cádiz-Cota, A. (2022). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México: diagnóstico y desafíos de política pública. Tecnología y Ciencias del Agua, 13(1), 184-245. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-05>
9. Cely-Carrillo, Carillo. G, Bonilla. A. (2022) Tratamientos de aguas residuales. ECOE Ediciones. ISBN: 978-958-503-376-4.

- <https://www.researchgate.net/publication/376375373> Tratamientos de aguas residuales
10. Cercado-Quezada, V. (2022) La bioelectroquímica como recurso para producir energía complementaria a fuentes alternativas. <https://www.cronica.com.mx/academia/bioelectroquimica-recurso-producir-energia-complementaria-fuentes-alternativas.html>
  11. Conselva. (2018). Agua y desarrollo económico. <https://conselva.org/agua-y-desarrollo-economico/>
  12. Cornejo-Martell, A.J. (2017). Estudio del microbioma presente en celdas de combustible microbianas. Memoria de la especialidad de Ingeniería Ambiental. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, SC–Cideteq. [https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/314/1/Electromicrobiolog%C3%ADa%20del%20microbioma%20presente%20en%20celdas%20de%20combustible%20microbianas\\_rees.pdf](https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/314/1/Electromicrobiolog%C3%ADa%20del%20microbioma%20presente%20en%20celdas%20de%20combustible%20microbianas_rees.pdf)
  13. Editorial Etece. (2021), Tratamiento de aguas residuales. <https://concepto.de/tratamiento-de-aguas-residuales/>
  14. Farias de Marquez. B (2016), Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo III). <https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-modulo-iii>.
  15. Idrica. (2022), Las 4 etapas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, <https://www.idrica.com/es/blog/plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-etapas/>
  16. IMCO. (2023). Índice de competitividad estatal 2023. <https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-estatal-2023/>
  17. INCyTU. (2019). Tratamiento de aguas residuales. [https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU\\_19-028.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf)
  18. Jimenez, B. Molognoni, D, Corbella, C, Borrás, E. (2020). Sistemas bioelectroquímicos para aumentar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas, <https://www.automaticaeinstrumentacion.com/texto-diario/mostrar/2734888/aei-516-sistemas-bioelectroquimicos-aumentar-sostenibilidad-procesos-tratamiento-aguas>.

19. López-Tirado, N. (2020). Análisis del efecto de las condiciones termo-hidráulicas de un sistema bio-electroquímico para generación de potencia eléctrica a partir de la degradación de azúcares. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/11629>
20. Navarro, A. (2023). Situación actual del agua en México <https://issuu.com/agsconstruye/docs/construye-135-abr-2023-ags/s/22234342>
21. Norma Mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de Agua– Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas– Método de prueba–Parte 2–Determinación del índice de la Demanda Química de Oxígeno–Método de tubo sellado a pequeña escala. Diario Oficial de la Federación, 27 de junio 2013.
22. Nuevo, D. (2023). El tratamiento secundario de aguas residuales. TECPA. <https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/>
23. NuWater. (2021). ¿Qué es el tratamiento de aguas residuales municipales? <https://nuwater.com/es/%C2%BFQu%C3%A9-es-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales%3F/>
24. ONU. (2019). Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano. <https://www.un.org/es/global-issues/water>
25. ONU. (2023). Acerca del agua y el saneamiento. <https://www.ohchr.org/es/water-and-sanitation/about-water-and-sanitation#:~:text=El%2028%20de%20julio%20de,RES%2F64%2F292>
26. Rodríguez de Jorge, L. (2020). El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes, <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>
27. SEMARNAT. (2018). Informe del medio ambiente: agua. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
28. Telwesa. (2021). Sistemas MBR aerobios y anaerobios. <https://telwesa.com/sistemas-aerobios-y-anaerobios/#:~:text=Sistema%20anaerobio,comparamos%20con%20un%20proceso%20aerobio.>

29. Xiao, Y. Cheng, H. Zhao, F. (2018). Electrochemically active microorganisms.  
<https://bibliozacut.wordpress.com/2019/02/28/mes-sistemas-electroquimicos-microbianos/>