

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



“Arranque de un sistema bioelectroquímico sin membrana para el tratamiento de agua residual municipal”

Por:

**ROCIO ESTRADA GARCIA**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

“Arranque de un sistema bioelectroquímico sin membrana para el tratamiento de agua residual municipal”

Por:

**ROCIO ESTRADA GARCIA**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

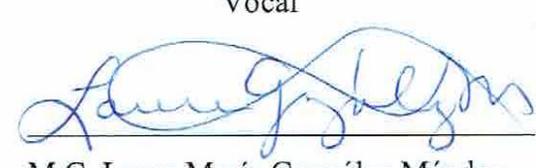
**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobado por el Jurado Examinador

  
Dr. Pedro Pérez Rodríguez  
Presidente

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Vocal

  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Vocal

  
M.C. Laura María González Méndez  
Vocal



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

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

“Arranque de un sistema bioelectroquímico sin membrana para el tratamiento de agua residual municipal”

Por:

**ROCIO ESTRADA GARCIA**

Tesis

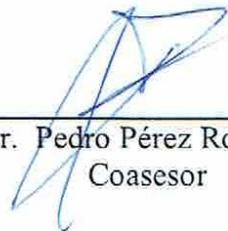
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

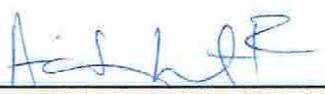
**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

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

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2024

## 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

  
Rocío Estrada García

Nombre y firma

Asesor principal

  
Dra. Silvia Leticia Martínez Sánchez

Nombre y firma

## **DEDICATORIA**

A mis padres Guillermo Estrada Jiménez y Angelina García Martínez por confiar en mí y ser mi motivación, gracias por apoyarme en todo lo necesario para que nunca me faltara nada y que a pesar de la distancia siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas demostrándome su amor incondicional, su comprensión, su paciencia y motivándome a vencer mis miedos para conseguir mis metas, gracias a ellos por darme consejos sabios e inculcarme el ejemplo de los valores y sobre todo el esfuerzo que se necesita para ser una persona profesional y apoyar a los demás.

A mis hermanos Rosario, Guillermo y Aurora por siempre ser tan unidos conmigo, por cuidarme y acompañarme en mis momentos difíciles y de alegría, gracias por siempre motivarme, apoyarme y aconsejarme en las etapas de mi vida, por contarme sus experiencias que tuvieron en la escuela para que yo tuviera un mejor desempeño y cumpliera mis objetivos.

A mi sobrina Melina que es una de mis motivaciones para seguir adelante gracias por ser el alma de la casa y llenarnos con sonrisas y felicidad, por tener el carisma y alma tan pura ya que con su vibra positiva siempre me contagiaba y así fue como hizo que mis días de pandemia fueran menos estresantes por su presencia.

A mi primo David gracias por confiar en mí, por motivarme y acompañarme a los exámenes de admisión, por siempre estar pendiente de mí y de la familia, por demostrarme que una persona profesional no se hace por el título sino por las acciones que uno tiene con los demás, gracias por enseñarme a ser solidario y empático.

A mi amiga Abigail porque podría decir que en el transcurso de la carrera solo tuve una amiga verdadera, leal, sincera que me demostró la diferencia entre cantidad y calidad, porque siempre estuvo para mí en los buenos y malos momentos de mi vida motivándome, porque compartimos momentos de risas y de ansiedad y cuando las cosas se me complicaban me compartía de sus conocimientos y sabiduría.

A Carlos porque nunca me ha dejado sola y a pesar de la distancia siempre me ha acompañado, por quererme y siempre ser muy paciente.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por proteger mi camino en este transcurso y haber terminado satisfactoriamente esta etapa de mi vida, por guiarme por el buen camino y brindarme lo esencial para conseguir mi meta.

A mi familia por creer en mí y apoyarme en mis decisiones, por alentarme constantemente además de su amor incondicional, comprensión y sus sabios consejos.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme la oportunidad de estudiar y terminar mi carrera profesional, por cumplir mi sueño y mi meta, por darme cobijo y ser mi segunda casa, por el apoyo incondicional y por ser mi Alma Mater.

A la maestra Susana Aguilar por ser mi amiga y brindarme su apoyo incondicional desde el primer día que llegué a Saltillo y siempre hacerme sentir como en casa.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador quien fue mi asesora de tesis, una gran maestra y amiga quien me dio la oportunidad de trabajar en este proyecto confiando y creyendo en mí además de apoyarme en todo momento brindándome su tiempo, sus consejos y conocimientos en el proceso.

A mis amigos Abigail Zavala, Eduardo Mendieta, Brenda Lizeth, Alexis Barbosa, Mireya Salinas por su amistad, por los buenos momentos que pasamos juntos y por siempre confiar en mí.

## CONTENIDO

<b>DECLARACION DE NO PLAGIO</b> .....	4
<b>DEDICATORIA</b> .....	5
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	6
<b>ABREVIATURAS</b> .....	9
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	10
<b>RESUMEN</b> .....	11
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>2. OBJETIVO GENERAL</b> .....	14
<b>2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	14
<b>3. HIPÓTESIS</b> .....	14
<b>4. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b> .....	15
<b>4.1 ¿Qué es el agua residual municipal?</b> .....	15
<b>4.2 Materia orgánica</b> .....	15
<b>4.3 Conflictos del agua residual municipal</b> .....	16
<b>4.4 Tratamiento de aguas residuales</b> .....	17
<b>4.4.1 Tratamientos biológicos de aguas residuales</b> .....	18
<b>4.4.2 Tratamiento de agua residual mediante una Celda de Combustible Microbiana (CCM)</b> .....	20
<b>4.4.2.1 Principios de la CCM</b> .....	21
<b>4.5 Elementos de una CCM sin membrana</b> .....	22
<b>4.5.1 Celda de combustible Microbiana sin membrana</b> .....	23
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	23
<b>5.1 Localización de la experimentación</b> .....	23
<b>5.2 Tipo de agua y toma de muestra</b> .....	23

<b>5.3 Materiales y equipo</b> .....	24
<b>5.4 Metodología</b> .....	25
<b>5.4.1 Construcción de los electrodos</b> .....	25
<b>5.4.2 Diseño y operación del SBE</b> .....	26
<b>5.4.3 Parámetros evaluados</b> .....	27
<b>5.4.4 Métodos analíticos</b> .....	27
<b>5.4.4.1 pH</b> .....	27
<b>5.4.4.2 Voltaje</b> .....	28
<b>5.4.4.3 Conductividad eléctrica</b> .....	28
<b>5.4.4.4 Temperatura</b> .....	29
<b>5.4.4.5 Demanda química de oxígeno (DQO)</b> .....	29
<b>5.4.4.5.1 Reactivos, material y equipo para la DQO</b> .....	30
<b>5.4.4.5.2 Solución de dicromato de potasio</b> .....	30
<b>5.4.4.5.3 Solución de sulfato de plata y ácido sulfúrico</b> .....	31
<b>5.4.4.5.4 Determinación de la DQO</b> .....	31
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	32
<b>6.1 pH</b> .....	32
<b>6.2 Voltaje</b> .....	33
<b>6.3 Eficiencia de la remoción de la DQO</b> .....	33
<b>6.4 Demanda química de oxígeno (DQO)</b> .....	34
<b>6.5 Conductividad eléctrica</b> .....	35
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	36
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	37

## **ABREVIATURAS**

CCM: Celda de combustible microbiano

CDM: Celda de desalinización microbiana

CE: Conductividad eléctrica

CEM: Celda de electrolisis microbiana

CESM: Celda de electrosíntesis microbiana

DAF: Flotación por aire disuelto

DQO: Demanda química de oxígeno

LAN: Ley de las Aguas Nacionales

MBR: Biorreactores de membrana

pH: Potencial de hidrógeno

SBE: Sistema bioelectroquímico

TRH: Tiempo de retención hidráulica

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imagen de una CCM y la transferencia de electrones en el ánodo .....	21
<b>Figura 2.</b> Imagen de la CCM que está compuesta por solo una cámara sin membrana. A cátodo expuesto al aire, B salida del efluente, C recirculación del sistema, D circuito externo, E resistencia y F sistema de medición de nivel de agua .....	23
<b>Figura 3.</b> Diseño del paquete de electrodos usados para el reactor unitario. ....	25
<b>Figura 4.</b> Reactor unitario con capacidad de 3.720 L. ....	26
<b>Figura 5.</b> Sistema bioelectroquímico sin membrana utilizado durante la experimentación .....	27
<b>Figura 6.</b> Comportamiento del pH del ARM influente y del efluente .....	32
<b>Figura 7.</b> Comportamiento del voltaje en el SBE en relación con la temperatura ambiente máxima y mínima. . ....	33
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de la eficiencia de la remoción de la DQO en función a la temperatura ambiente (máxima y mínima). ....	34
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de la DQO con relación a la temperatura ambiente (máxima y mínima). . ....	35
<b>Figura 10.</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica generada en el SBE sin membrana. ....	36

## RESUMEN

Dentro de los sistemas biológicos de aguas residuales se encuentran los sistemas bioelectroquímicos que han captado la atención debido a la remoción de la materia orgánica e inorgánica y a la generación de voltaje. Generalmente estos sistemas tienen un compartimento anódico y un compartimento catódico separado por una membrana, la cual representa un gasto sustancial. En el presente trabajo se realizó una investigación sobre la eficiencia de un sistema bioelectroquímico (SBE) sin el uso de una membrana por lo cual es considerado como un reactor unitario. Se estudió la fase de arranque del SBE evaluando el porcentaje de eficiencia de la remoción de la demanda química de oxígeno y el voltaje, la capacidad del reactor fue de 3.720 L y se estableció un tiempo de retención hidráulica (TRH) promedio de 52.49 h. En los compartimentos anódico y catódico se utilizaron un paquete con 6 piezas circulares de fieltro de grafito con biopelícula. Los parámetros monitoreados fueron DQO, voltaje, conductividad eléctrica (CE) y pH. El porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO fue de 67.43% en promedio de efectividad. El pH que se obtuvo del efluente se tornó más alcalino ya que aumento en promedio de 7.29 a 7.9. El voltaje que se generó por el SBE fue de 4.727 mV en promedio. La CE del efluente tuvo un promedio de 1762.43  $\mu\text{S}/\text{cm}$  que fue ligeramente más alta que el influente (1728.68  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los resultados obtenidos indican que este proyecto es aceptable por los resultados obtenidos en cuanto a los porcentajes de eficiencia de la remoción de materia orgánica, siendo necesario un periodo de evaluación más amplio y con un mayor número de parámetros.

Palabras clave: Sistema bioelectroquímico, membrana, tratamiento de aguas residuales municipales, efluente, influente, demanda química de oxígeno, pH, voltaje, conductividad eléctrica, temperatura.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la vida cotidiana el agua se utiliza para diferentes actividades ya sea para el uso doméstico, comercial, agrícola, instalaciones públicas, entre otras más, al desecharlas por la tubería generamos una mezcla de todas ellas con composiciones variadas según la Ley de las Aguas Nacionales (LAN) y es conocida como “agua residual municipal” (Rodríguez-Monroy y Duran de Bazúa 2006). Esta agua presenta características físicas notorias como el contenido de sólidos totales que es la materia que se queda en suspensión o flotando en el agua, también se presenta en dispersión coloidal, otras características son la temperatura que es mayor en comparación con la de abastecimiento ya que estas suelen descargarse como agua caliente que provienen del uso doméstico, el color es un parámetro importante para ver la condición del agua residual en el que es característico un color gris claro y es cuando el agua ha tenido un grado de descomposición o que llevan poco tiempo en almacenamiento, posteriormente si es color gris oscuro o negro son aguas sépticas en el que hay una descomposición bacteriana en condiciones anaerobias este proceso suele pasar por la formación de sulfuros, otra característica más es el olor queroseno o apestoso con olor sulfhídrico (Rodríguez-Monroy y Duran de Bazúa 2006).

Según CONAGUA en el 2020 se generaron 279.8 m<sup>3</sup>/s de agua residual municipal en donde se recolectan de la alcantarilla 215.4 m<sup>3</sup>/s y de ello solo se somete a tratamiento 1447 m<sup>3</sup>/s que equivale a un 51.7 % de agua residual municipal, por desgracia el agua es un elemento que está en uso constante y debido a los contaminantes que contiene ya no puede ser reutilizada por lo tanto es importante tratarla después de utilizarla ya que en unos años esta agua será la que abastecerá a toda la población es por eso que existen tratamientos para el agua residual y se clasifican según al mecanismo de degradación de contaminantes el cual pueden ser físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos (Fenoglio, 2000).

Los procesos biológicos en el tratamiento de agua residual son los que más se han utilizado por la ventaja de tener un mayor rendimiento con menor costo económico de explotación, el mantenimiento que requieren y por el insumo que utilizan, además de que no requieren sustancias químicas adicionales, estos procesos biológicos integran organismos vivos como lo son bacterias, hongos, plantas, dentro de estos procesos se conoce a los sistemas bioelectroquímicos (SBE) que principalmente se usaban para producir electricidad pero en

los últimos años se ha usado para el tratamiento de aguas residuales, así como la generación de compuestos de interés como el etanol, metanol, hidrógeno a través de la electrosíntesis, la principal ventaja es que pueden realizar varios procesos simultáneamente (Paz-Mireles, 2016) además de apoyarse del rendimiento de microorganismos para catalizar diversas reacciones electroquímicas, esencialmente estas reacciones incluyen la transferencia de electrones, como óxido-reducción. Este sistema se divide en cuatro tipos que son: celdas de combustible microbiana (CCM) que generan energía eléctrica y en el que las reacciones de reducción y oxidación son impulsivas; celdas de electrólisis microbianas (CEM) que necesita de provisiones de energía eléctrica para que realice las reacciones (Hatti-Kaul et al., 2016) y donde se genera fundamentalmente compuestos químicos inorgánicos entre ellos está el hidrógeno; celdas de electrosíntesis microbiana (CESM) que ayudan a procesar los compuestos químicos orgánicos y por último las celdas de desanilización microbiana (CDM) que se usan para desanilizar el agua (Wang y Ren, 2013).

Las celdas de combustible microbianas (CCM) se componen de dos electrodos, un ánodo y un cátodo los cuales se unen con un cable externo y se genera un circuito completo, estos compartimentos o cámaras se separan por una membrana permeable únicamente a protones (Bond y Lovley, 2003), algunos autores mencionan que este tipo de membrana presenta problemas como fugas de oxígeno que son del cátodo al ánodo, además de presentar pérdidas de sustrato en el cátodo, de igual manera hay una generación de movimientos de iones como lo es ferricianuro (Chae et al., 2008) es importante mencionar que el mercado de las membranas está en continuo crecimiento por lo tanto se tienen que hacer análisis para observar que tengan buenos resultados y mayor durabilidad (Rozendal et al., 2007). Algunos autores han reportado ventajas en el uso de sistemas bioelectroquímicos con celdas de combustible microbiana sin membrana en donde hay una mayor eliminación de costos en instalación, se genera un aumento en la densidad de potencia obtenida, una velocidad alta de transferencia de electrones, además es probable el incremento en la difusión de oxígeno atmosférico (Rismani-Yazdi et al., 2008).

## **2. OBJETIVO GENERAL**

Monitorear un sistema bioelectroquímico sin membrana durante la fase de arranque para el tratamiento de agua residual a escala laboratorio evaluando la eficiencia de remoción de la materia orgánica que se encuentra presente en el agua residual del Bosque Urbano de Saltillo y la generación de voltaje.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Establecer el arranque del sistema bioelectroquímico.
2. Evaluar los parámetros para el tratamiento de agua residual como la demanda química de oxígeno (DQO), el tiempo de retención hidráulica (TRH), la conductividad, potencial de hidrógeno (pH) y voltaje durante un periodo de tiempo de 21 días.
3. Examinar los resultados obtenidos para observar la eficiencia o deficiencia que existe en el sistema bioelectroquímico sin membrana.

## **4. HIPÓTESIS**

El sistema bioelectroquímico sin membrana tendrá un buen desempeño en la remoción de la materia orgánica y generará voltaje.

#### **4. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

El agua es uno de los recursos naturales que más se consume a nivel mundial considerándolo como uno de los elementos de mayor importancia ya que gracias a este vital líquido se da el desarrollo de la vida y con ello el progreso de países enteros, por desgracia la escasez de este recurso ha ido avanzando rápidamente debido a la contaminación de ríos, manantiales, acuíferos, mares, etc., y se ha visto una gran inestabilidad ambiental en el planeta que afecta a la flora, fauna, ecosistemas enteros, a las actividades agrícolas, industriales y ganaderas que conlleva a afectar social y económicamente a nivel mundial (Esponda, 2001).

##### **4.1 ¿Qué es el agua residual municipal?**

Las aguas residuales municipales se originan de distintos lugares como las descargas de usos municipales, comercios, industrias, agrícolas y usos domésticos, entre otros, siendo así el agua residual municipal se define como una mezcla de agua de todos estos usos en el que los hogares, los negocios, las escuelas e industrias tienen la mayor parte de estas descargas y se eliminan a través de los inodoros, lavabos, regaderas, lavanderías, etc., pueden estar compuestas por sólidos suspendidos o tener una alteración en su composición ya sea biológica, química y física en el que se encuentran compuestos orgánicos al igual que el nitrógeno, fósforo y bacterias coliformes fecales. Estas características descritas en el agua ocasionan que ya no pueda ser potable y, por ende, no puede usarse para el consumo humano o las actividades agrícolas, domésticas e industriales, las ventajas que generaría al tratar las aguas residuales municipales es que podrían volver a utilizarse ya sea en riego, procesos industriales o fines creativos, además de que se puede generar energía y obtener nutrientes, además de controlar el flujo ambiental (Rodríguez–Monroy y Duran de Bazúa, 2006).

##### **4.2 Materia orgánica**

El agua residual se compone principalmente por compuestos orgánicos que se refiere a la materia orgánica el cual puede ser determinada por características que almacenan los compuestos orgánicos; uno de ellos es que son oxidables además de poseer carbono orgánico en la estructura química. Existen diferentes formas para calcular la concentración de materia orgánica, una de ellas es la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que es un parámetro que mide la cantidad de un oxidante y es importante para el material orgánico ya que tiene la

finalidad de tener una reacción de oxidación, el procedimiento para la DQO es sencillo ya que se necesita la muestra de agua residual agregándole una solución de ácido sulfúrico con dicromato (mezcla considera con alta capacidad oxidante) posteriormente se agrega sulfato de plata que será el catalizador, esta muestra es puesta a una temperatura de ebullición que se considera finalizada al terminar las dos horas de oxidación, la concentración puede medirse a través de un espectrofotómetro o con la titulación del ión  $\text{Cr}^{3+}$  (APHA, 1992).

#### **4.3 Conflictos del agua residual municipal**

Según Conagua en el 2015 a nivel mundial las aguas residuales se evacuaban entre el 85 y 95% directamente en ríos, océanos y lagos sin ser previamente tratadas. En el año 2000 y 2005 a nivel nacional el agua residual municipal tuvo un incremento de descargas del 6%. En nuestro país solo el 36% de aguas residuales generadas tienen un tratamiento, esto es por falta de infraestructura, mantenimiento, personal capacitado además del alto costo que tiene (CONAGUA, 2015); este bajo porcentaje es debido en parte a que se les ha dado más prioridad a las instalaciones de alcantarillado dejando a un lado la instalación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Lo anterior causa problemas de salud como en el 2005 en México a causa de la contaminación del agua hubo un incremento de enfermedades intestinales causando la muerte del 9.7% de niños (as) menores de 5 años con un promedio de 627 casos (De Anda y Shear, 2008).

Un estudio de la Secretaría de Salud menciona que solo el 25% del agua que se distribuye para el consumo humano es puesto a procesos de purificación complementario a la desinfección con cloro algo que es considerado insuficiente por los niveles altos de contaminación que perjudican a las fuentes hídricas. Por otro lado, vivimos en el siglo donde el medio ambiente y el aumento en los costos de energía nos generan preocupación por lo tanto es importante crear y establecer procesos de tratamiento de agua que sean diferentes a los que comúnmente existen y que además tengan un menor costo de instalación, menor consumo energético y un mejor desempeño en la remoción de contaminantes. Se calcula que el agua residual doméstica por si sola tiene 17.8 kJ/g de DQO y los lodos activados necesitan de 2.5-7.2 kJ/g de DQO, algunos estudios acerca del análisis de ciclo de vida han argumentado que los sistemas bioelectroquímicos (BES) son eficaces para tener productos de alto valor agregado.

#### **4.4 Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de pasos en donde el objetivo es depurar el agua tratada removiendo o reduciendo los contaminantes existentes en ella. Después de que el agua tratada tenga una concentración apta de contaminantes suelen ser reutilizadas para la industria o actividades en la agricultura.

Se considera que los principales pasos para el tratamiento del agua residual municipal son los siguientes:

- 1) Tratamiento primario que consiste en la separación física de sólidos grandes del flujo de residuos, en el momento en que las aguas residuales sin tratar entran a la planta de tratamiento primero ingresan por una rejilla metálica que cumple con la función de eliminar los desechos de mayor tamaño, más adelante una criba móvil detiene los desechos más pequeños y posteriormente la arena y la grava se asientan después de permanecer un corto tiempo en un tanque de arena, después la corriente residual se bombea al tanque de sedimentación primario en donde el 50% de sólidos orgánicos suspendidos se sedimentan en el interior en forma de lodo que también es conocido como lodo primario, en este proceso no hay una completa eliminación de patógenos microbianos.
- 2) El tratamiento secundario que tiene como propósito la degradación biológica y los microorganismos realizan la función de descomposición en el sobrante de sólidos suspendidos, la ventaja es la disminución de patógenos, en este punto el efluente del tratamiento primario se realiza con un tratamiento biológico ya sea en un lecho filtrante percolador o en un tanque de aireación también puede ser con una laguna de aguas residuales, al final se agrega un punto importante que es la desinfección.
- 3) El tratamiento terciario de efluentes el cual se agregan otros pasos más después del tratamiento secundario esto para disminuir más la materia orgánica, al igual que la turbidez, metales, nitrógeno, fósforo y patógenos (Gerba y Pepper, 2019).

#### 4.4.1 Tratamientos biológicos de aguas residuales

Los tratamientos biológicos de aguas residuales son tratamientos que permiten el uso de microorganismos y bacterias para purificar el agua también a su vez son usados reactores biológicos y estos tratamientos biológicos se distinguen porque pueden eliminar compuestos nitrogenados, carbonados, de fosforo y degradar la materia orgánica, además de que hay un menor costo económico de inversión en comparación con los químicos (Marco *et al.*, 1997), algunos ejemplos de estos tratamientos que son utilizados para tratar las aguas residuales municipales son:

*Flotación por aire disuelto (DAF)* consiste en eliminar los sólidos suspendidos, el proceso de clarificación DAF tiene lugar en la parte de enfrente del tanque conocida como “zona de contacto” se obtiene cuándo se coloca aire en el agua residual bajo presión y posteriormente se libera este aire en un tanque a presión atmosférica con esto se generan burbujas que se pegan a partículas de flóculos y a sólidos en suspensión, regularmente para crear los flóculos se agregan coagulantes a las aguas residuales previo al tanque DAF, posteriormente los agregados de floc-burbuja son enviados a la zona de separación en donde emergen del tanque creando un manto de lodo concentrado que puede quitarse con dispositivos desnatadores, este tratamiento es mucho más efectivo que el tratamiento primario convencional ya que se tiene un mejor resultado en la eliminación de sólidos suspendidos además de que es rentable (Gerba y Pepper, 2019).

*Filtro percolador* comúnmente son compuestos por un lecho de piedras, hulla, medios plásticos de cloruro de polivinilo, material cerámico o láminas de plástico corrugado en donde se filtra el agua residual y hacia la dirección del lecho filtrante se bombea el efluente con un rociador aéreo, en la superficie del filtro los microorganismos y las bacterias ya han desarrollado una biomasa microbiana que crea una biopelícula el cual detienen la materia orgánica que la degradan aeróbicamente, conforme hay un aumento de grosor en la biopelícula conlleva a una difusión limitada de oxígeno en las capas más ondas formando un ambiente anaeróbico cerca del espacio del medio filtrante.

*Lodos activados* que son la mezcla de una suspensión el cual contiene muchas bacterias y en el que a través de un tanque se bombea el efluente del tratamiento primario, aunque también se le conoce como digestión en tanques de aireación, los factores que detonan el crecimiento

bacteriano a través de un bombardeo por mezcla son el aire o el oxígeno puro en el que también se ve implicada la descomposición del material orgánico, posteriormente en un tanque de sedimentación secundario se saca el agua del tanque que se encuentra en la parte superior y se quitan los lodos del fondo, en este proceso existe una mayor cantidad del reciclaje de la biomasa. Los lodos activados para la eliminación de nitrógeno en las aguas residuales tienen una modificación y que estar acompañado por las etapas de nitrificación y desnitrificación, un factor importante es el sobrante de la tasa de lodo.

Las *lagunas de aireación* que se definen como un sistema de lodos activados y de alta tasa ya que existe un consumo de oxígeno que es dado por aireadores, estos se clasifican en dos que son las lagunas aireadas con biomasa en suspensión el cual los aireadores dan la energía necesaria por unidad de volumen para tener estable el lodo en suspensión y la otra es la laguna facultativa en donde la energía aportada por los aireadores es escasa por lo tanto los sólidos reposan y se juntan en el fondo de la laguna. Cuando se quedan sólidos biodegradables en la capa de lodo sedimentado estos se degradan anaeróbicamente al igual que en las lagunas de oxidación.

Los *biorreactores de membrana* (MBR) son una mezcla de tratamientos biológicos en el que hay una división de membranas por medio de membranas microporosas o de ultrafiltración, en este proceso se usa un tanque y una unidad de membrana colocada externamente al biorreactor o inmerso dentro de este, la función de las membranas es retener los sólidos suspendidos y conservar la alta concentración de biomasa que se encuentra dentro del biorreactor.

Los *sistemas bioelectroquímicos* (SBE) son células electroquímicas en el que se hace uso de los microorganismos como catalizadores o ya sea en uno o ambos electrodos y el diseño de este sistema es similar al de la pila electrolítica en donde el ánodo acepta los electrones producidos en la oxidación de bacterias exoelectrogénicas, mientras que el cátodo sirve como electrodo que acepta los electrones para reducir el compuesto, en este sistema se implican los procesos de respiración celular en el que se tiene como efecto un intercambio de electrones e hidrogeniones o protones que van desde la célula hasta el ánodo y en efecto se tiene un desplazamiento de electrones que van en un circuito eléctrico y los hidrogeniones van por una membrana de electrolito polimérico, con esto se tiene como resultado un flujo de

electrones al cátodo y en el que se genera una fracción de energía que se manifiesta en corriente, hidrógeno, CO<sub>2</sub> y un incremento en proporción de biomasa.

El uso de tratamientos bioelectroquímicos (BES o celdas de combustible microbianas) en las aguas residuales municipales conlleva a muchos beneficios ya que en las últimas décadas se ha puesto a prueba en diferentes aplicaciones, una de ellas es vista en la naturaleza de la oxidación en la materia orgánica y los diversos materiales oxidables que se encuentran en el bioánodo, como el almidón, acetato, aguas residuales domésticas, celulosa, con estos ejemplos de sustratos se demuestra que se puede tratar con una amplia gama de sustratos y aplicaciones de tratamientos de aguas residuales utilizando BES, además otra ventaja es que con este sistema se tiene gran eficiencia en la obtención de energía sostenible y productos químicos. La segunda opción para ampliar este sistema está vinculada con el cátodo de los BES, tras la investigación del bioánodo se encontró que los microorganismos de igual forma podían catalizar un proceso de reacciones catódicas en donde se podía incluir una disminución o reducción de oxígeno a agua, al igual que la reducción de protones a hidrógeno o la de nitrato a gas nitrógeno, al igual que de bicarbonato a metano, en el que estas reducciones serían menos costosas (Sleutels et al., 2012).

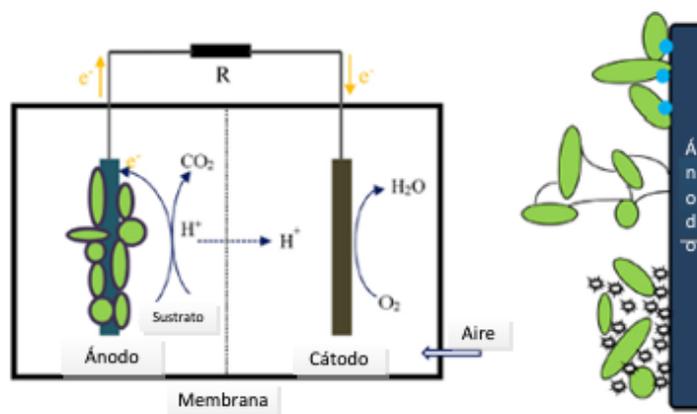
#### **4.4.2 Tratamiento de agua residual mediante una Celda de Combustible Microbiana (CCM)**

Desde hace tiempo se ha analizado la incorporación de procesos para el tratamiento de aguas residuales (Mehranfar et al., 2019), actualmente se conoce del uso de una nueva tecnología que son las CCM mencionando las ventajas generadas como la producción de energía directa o la eliminación de la aireación en los procesos (Aquino et al., 2018), por lo tanto, lo dicho anteriormente está vinculado con el crecimiento de las bacterias en el sistema que puede ser anaerobio o anaerobio facultativo y no necesitan de una aireación activa (Huggins et al., 2013). Las aguas residuales domésticas, de procesamiento de alimentos, envasado de carnes, granjas, etc., son efluentes que tienen un gran contenido orgánico y permiten alimentar a una CCM (Feng et al., 2008) ya que contienen formas diferentes de contaminantes y pueden ser tratados como la materia orgánica biodegradable, sólidos en suspensión, fósforo, nitrógeno, jabones y muchos otros compuestos inorgánicos que se encuentran en cantidades diferentes (Kumar et al., 2019). Hay diferentes estudios donde mencionan que trabajar con las CCM ha

tenido una eficiencia del 80% de remoción de la DQO proveniente de contaminantes orgánicos que se encuentran en el agua y con una efectividad coulombica del 80% disminuyendo la proporción de los sólidos finales entre un 50% y 90% (Du et al., 2007).

#### 4.4.2.1 Principios de la CCM

Las CCM más comunes se conforman por 2 compartimentos, la cámara del ánodo y el cátodo y principalmente se separan por una membrana de intercambio protónico (Rismani-Yazdi et al., 2008), la principal función de la cámara anódica es que las bacterias electrógenas se comportan como catalizadores para oxidar la materia orgánica (Ghangrekar y Chatterjee, 2017) y los electrones que se liberan posterior a la oxidación del donante de electrones son enviados al ánodo en condiciones anaerobias (Lia et al., 2018). Para la obtención de electricidad se necesita de un circuito externo que debe de estar compuesto por un material conductor y debe estar integrada una resistencia externa que será la que conlleve a los electrones del ánodo al cátodo que están en presencia de oxígeno es decir en condición aerobia (Ghangrekar y Chatterjee, 2017). Mientras tanto los protones que se traspasan a la membrana disminuyen al recibir los electrones y se mezclan para formar agua, es un procedimiento semejante que acontece en las celdas de combustible químico (Das, 2018).



**Figura 1.** Imagen de una CCM y la transferencia de electrones en el ánodo (Li et al., 2018).

#### 4.5 Elementos de una CCM sin membrana

Una celda de combustible microbiana está constituida de la misma forma que una celda de combustible química en el que sus principales elementos son el *ánodo*, *cátodo*, *un separador* y *el circuito externo* (Das, 2018).

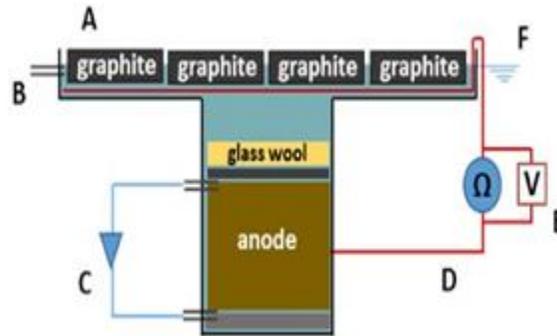
**Ánodo:** es importante para la creación de la biopelícula, el intercambio de electrones en los microorganismos y para la aceptación de electrones (Das, 2018). La biopelícula se genera principalmente en el ánodo en donde los microorganismos electro activos o exoelectrógenos son los responsables de producir electricidad en función de los compuestos orgánicos (Logan, 2009), debido a que estos organismos de manera extracelular ejecutan la transferencia de electrones así mismo envían los electrones al ánodo (Koch y Harnisch, 2016). El potencial interfacial se determina básicamente por los microorganismos que se crean, el pH, los mediadores y el material del electrodo (Sivasankar et. al. 2018) estos deben de ser compatibles, poseer una área superficial grande, estabilidad química y resistencia a la corrosión (Mustakeem, 2015), uno de los materiales que más se ocupa como electrodo en las CCM es el carbono que pueden ser placas de grafito, carbón vítreo, material fibroso como el fieltro, fibra espuma, tela o gránulos y barras (Logan et al., 2006).

**Cátodo:** ayuda a realizar las reacciones de reducción que son de un aceptor de electrones, comúnmente es el oxígeno, para llevarse a cabo estas reacciones necesitan de la disposición de 3 elementos los cuales son el electrolito, oxígeno y el electrodo (Mustakeem, 2015). El cátodo está compuesto por 3 capas que es el material de base del electrodo, el catalizador y la de difusión de oxígeno (Das, 2018). Algunos autores como por ejemplo López, 2014 reportan que es importante el uso del cátodo ya que este ayuda a generar la corriente y resalta que es necesario para la construcción y operación de las celdas.

**Separador:** en la CCM el separador es usado esencialmente para separar las reacciones de oxidación y reducción esto es para no perder voltaje al igual que se impide dañar a los microbios en el ánodo ya que se encuentra un oxidante como por ejemplo el oxígeno (Scott, 2016) además de disminuir las reacciones que hay en los procesos electroquímicos que acontece en los dos lados de los electrodos y para tener una mayor eficiencia tiene que haber resistencia mecánica, una excelente conductividad iónica, estabilidad química, conducción no electrónica y resistencia mecánica.

#### 4.5.1 Celda de combustible Microbiana sin membrana

Una opción de las CCM pueden ser las celdas de combustible microbiana sin membrana en el que se quita esta opción de separar los dos compartimentos y se puede distribuir el oxígeno al sistema por medio de difusión que está en el aire en el que el cátodo está libre o expuesto.



**Figura 2.** Imagen de la CCM que está compuesta por solo una cámara sin membrana. A cátodo expuesto al aire, B salida del efluente, C recirculación del sistema, D circuito externo, E resistencia y F sistema de medición de nivel de agua (Corbella y Puigagut, 2018).

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Localización de la experimentación

El experimento se realizó en el laboratorio de Biología que está instalado en el departamento de botánica en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que se ubica en la localidad de Buenavista perteneciente al municipio de Saltillo del estado de Coahuila.

### 5.2 Tipo de agua y toma de muestra

Las muestras que se utilizaron para la experimentación se hicieron con agua residual municipal colectada de la Planta Tratadora de Agua Residual del Bosque Urbano del Ejército Mexicano que está ubicado en la ciudad de Saltillo, Coahuila y almacenadas en recipientes de 20 L para su transporte.

### **5.3 Materiales y equipo**

Aluminio

Arcilla (diámetro de 0.5 cm)

Bascula American Scientific Products

Bomba peristáltica Manostat Simon

Bomba aireadora de pecera marca ELITE799 modelo 799 HA799

Capsula de porcelana

Centrífuga J-600

Crisoles

Cúter

Electrodo ORION 013005MD

Espátula

Filtro de grafito

Filtros de fibra de vidrio Ahlstrom 47 cm

Frascos de cultivo Kimax 80 ml

Gradillas

Guantes de látex

Horno Orsa

Incubadora Hach Modelo 205

Jeringas BD 5 ml

Matraces 50 ml y 500 ml

Micropipeta Labmate

Parafilm

Pisetas

Pinzas

Potenciometro Thermo Scientific Orion Star A215

Probetas Pyrex 100 ml y 250 ml

Puntillas

Refrigerador Mabe No Frost

Sistema de filtración Glassco 250 ml

Termómetro

Tijeras

Tiras de pH Macherey-Nagel

Tubos Kimax

Vasos de Precipitado Pyrex 200 ml y 500 ml

Voltímetro Steren PC-Link

## 5.4 Metodología

### 5.4.1 Construcción de los electrodos

Para la construcción de los electrodos, se utilizó fieltro de grafito el cual fue cortado en círculos con un diámetro de 8.5 cm. Se cortaron un total de 12 discos (seis para cada electrodo). A los discos se les hicieron 10 perforaciones de 0.5 cm, posteriormente, estos se pusieron a secar durante 2 horas en un horno de secado a una temperatura de 100°C para eliminar la humedad, después fueron puestos en un desecador para pesarlos individualmente y por paquete (6 discos), a través de las perforaciones los 6 discos de cada electrodo fueron unidos con hilo. Al finalizar la unión de los discos, un paquete (ánodo) fue introducido en una solución de agua residual con lodo anaerobio (100 ml de lodo, 900 de agua residual) mientras el cátodo en una solución de agua residual con lodo aerobio (100 ml de lodo, 900 de agua residual) que sirvió para acondicionar los electrodos y que estos al colocarlos en el reactor unitario ya tuvieran formada una biopelícula microbiana tanto anaerobia (ánodo) como aerobia (cátodo).

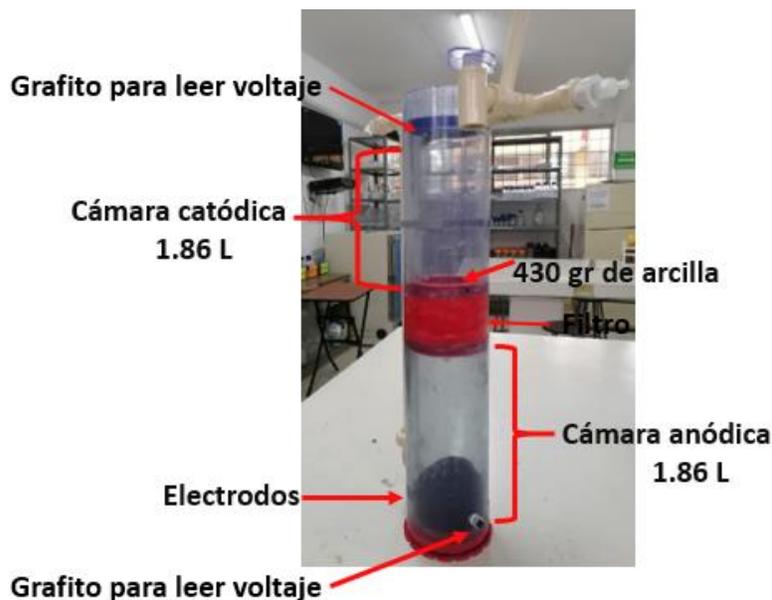


**Figura 3.** Diseño del paquete de electrodos usados para el reactor unitario.

### 5.4.2 Diseño y operación del SBE

El SBE fue diseñado como un reactor unitario que tiene dos espacios uno para el ánodo y otro para el cátodo, este reactor fue diseñado sin una membrana para observar la eficiencia que tiene en el tratamiento de ARM y con una capacidad de trabajo de 1.86 L para cada sistema, en total el reactor unitario cuenta con una capacidad de 3.720 L, en la parte inferior se introdujo un paquete de discos que estaban hechos de fieltro de grafito en el que previamente ya se les había desarrollado una biopelícula anaerobia, en la parte media del reactor hay una estructura que separa a los dos sistemas donde se colocaron 430 gramos de arcilla expandida (figura 4).

En la parte superior se encontraba el cátodo, en el cual se instaló el otro paquete de discos de grafito con biopelícula aerobia, sobre este compartimento se instaló una manguera con un difusor el cual aireaba este compartimento con la administración de aire a través de un bomba de pecera (figura 4).



**Figura 4.** Reactor unitario con capacidad de 3.720 L.

El SBE fue alimentado con ARM por primera vez el 25 de noviembre de 2023 usando una bomba peristáltica y ajustando el TRH a 52.49 horas (manteniendo la velocidad en el número 02 de la bomba peristáltica). El flujo de este reactor era ascendente, primero el agua entraba

al ánodo y hasta llegar al cátodo donde se encontraba posteriormente una manguera para la salida del ARM tratada. El reactor fue alimentado de forma continua durante 21 días (del 25 de noviembre de 2023 al 15 de diciembre de 2023). En la figura 5 se logra observar el SBE que se utilizó en la investigación.



**Figura 5.** Sistema bioelectroquímico sin membrana utilizado durante la experimentación.

### 5.4.3 Parámetros evaluados

El influente y efluente del reactor se monitorearon durante un periodo de 21 días y se analizaron algunos parámetros como: demanda química de oxígeno, voltaje, conductividad eléctrica, pH y temperatura ambiente para determinar la eficiencia del reactor.

### 5.4.4 Métodos analíticos

#### 5.4.4.1 pH

El pH es un factor importante para monitorear la calidad del agua considerado como un logaritmo de la concentración de iones hidrógeno en el que presenta un rango de 0 a 14 por lo tanto 0 es el punto más ácido y estas aguas en su punto alto provocan que ocurra la disolución de metales que se usan en las conducciones como por ejemplo el plomo, cobre,

zinc que al ser consumidos pueden afectar gravemente la salud, entonces 14 es el punto más alcalino y 7 es considerado como el rango neutro (Mora, 2007), de igual manera determinar el pH es un factor importante ya que de ello dependerá si en la muestra no hay nutrientes o si hay toxicidad por lo tanto el rango más recomendable para agua potable varía desde 6.5 a 8.5 como un valor para seguir (Jiménez, 2001).

Para la investigación se determinó la medición del pH con el electrodo de la marca ORION 013005MD que estaba conectado al potenciómetro de la marca THERMO SCIENTIFIC ORION STAR A215 posteriormente se cambió y se midió con el potenciómetro de la marca HANNA HI 8424 en el que se utilizó una solución buffer de pH 7 para la calibración y poder medir el pH correctamente, antes de introducirlo al efluente el electrodo se enjuagaba con agua destilada y se secaba con papel absorbente después se introducía en la muestra del efluente para poder medir el pH diariamente.

#### **5.4.4.2 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.

#### **5.4.4.3 Conductividad eléctrica**

La CE se define como la capacidad que tienen algunas soluciones para conducir corriente eléctrica y es expresada mediante números, este parámetro puede ser alterado por el tipo de sales que se encuentren en el agua, al igual que por la temperatura, el tiempo de disolución, pH, gases disueltos y por otros factores que alteran la solubilidad (Galvín, 2003) aunque hay una gran importancia en las sales minerales ya que son buenas conductoras a diferencia de la materia orgánica y coloidal ya que presentan una baja conductividad (Seoáñez, 2001). En esta investigación la CE se monitoreó con un electrodo de la marca ORION de la modelo 013005MD que estaba conectado con un potenciómetro de la marca THERMO SCIENTIFIC ORION STAR A215 el cual el antes de introducir el electrodo al agua residual se enjuagaba

con agua destilada y se secaba con papel absorbente posteriormente se introducía en el efluente para leer la conductividad.

#### **5.4.4.4 Temperatura**

La temperatura del agua residual comúnmente es más alta a diferencia del agua para consumo humano ya que se usan para actividades domésticas que incluyen agua caliente en sus actividades, comúnmente la temperatura media anual que presenta el agua residual es de 15.6°C, pero todo dependerá también de la ubicación geográfica y de la estación del año, en el caso de los efluentes la temperatura puede presentarse muy alta o muy baja en comparación con los influentes (Metcalf & Eddy, 1991).

En esta investigación se tomó en cuenta la temperatura ambiental ya que influye en las reacciones biológicas que ocurren en el reactor por lo tanto las temperaturas registradas tanto la máxima como la mínima se investigaron en la página de internet AccuWeather.

#### **5.4.4.5 Demanda química de oxígeno (DQO)**

Según las Normas Mexicanas NMX-AA-089/1-SCFI-2010 y NMX-AA-089/2-1992 mencionan que la DQO es la concentración de la masa de oxígeno que equivale a la cantidad de dicromato que es consumido por la materia que se disuelve y se suspende al tratar una muestra de agua con este oxidante, por lo que es un parámetro esencial para determinar que tanta contaminación orgánica hay en el agua para ello se utiliza un oxidante químico concentrado en una solución ácida y calor para que haya una reacción oxidante en el carbono hasta llegar a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Como se ha mencionado la DQO es un parámetro fundamental para determinar y evaluar el proceso del tratamiento de ARM puesto que determina la cantidad de elementos susceptibles a oxidarse con la ayuda de una sustancia química en este caso se ha utilizado el dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) porque es muy bueno para la reacción de oxidación a temperatura alta combinado con sulfato de plata (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para que funcione como un catalizador y se pueda realizar la oxidación de algunos compuestos orgánicos, de igual manera para revelar los cloruros y que no haya interferencias se usa el sulfato de mercurio (HgSO<sub>4</sub>) (Metcalf & Eddy, 1991). La Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012 menciona que cuando hay un cambio de color en los tubos de amarillo a verde-azul este tiende a leerse con una absorbancia de 620

nanómetros con un espectrofotómetro de UV/Vis y esto es ocasionado por la oxidación de la materia orgánica a causa del dicromato de potasio con el medio mayormente ácido por la presencia del catalizador ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Según la SEMARNAT menciona que la  $\text{DQO} \leq 10$  es considerada como excelente y que no posee contaminantes,  $10 < \text{DQO} \leq 20$  se considera de buena calidad y son las aguas superficiales que tienen contenido bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable,  $20 < \text{DQO} \leq 40$  aceptable con índice de contaminación de aguas superficiales con capacidad de autodepuración o descargas de aguas residuales que han sido tratadas biológicamente,  $40 < \text{DQO} \leq 200$  se considera como agua contaminada que se origina de aguas superficiales de descargas de aguas residuales crudas que provienen de aguas municipales,  $\text{DQO} > 200$  son aguas fuertemente contaminadas que se originan de las descargas municipales y no municipales (SEMARNAT, 2015).

#### **5.4.4.5.1 Reactivos, material y equipo para la DQO**

- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Sulfato de mercurio ( $\text{HgSO}_4$ )
- Sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ )
- Dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )
- Agua destilada
- Agitador magnético Civeq
- Frascos ámbar de 1 litro
- Matraz de aforación Pyrex
- Tubos Hach con tapa de rosca
- Papel
- Balanza electrónica de precisión US Solid
- Desecador Pyrex
- Digestor Termorregulador Hach DRB 200
- Espectrofotómetro Hach DR5000

#### **5.4.4.5.2 Solución de dicromato de potasio**

Para realizar esta solución es recomendable usar material de vidrio en el que se puede utilizar mejor los reactivos además de usar una balanza de precisión para obtener medidas correctas, primeramente, se pesa 20 gr. de dicromato de potasio en el que se pone a secar en el horno aproximadamente 2 horas con un temperatura de  $103^\circ\text{C}$ , posteriormente se enfría en un

deseCADador y se toma 10.216 gr. de dicromato de potasio se coloca en un matraz de aforaci3n de 1 litro agregando 500 ml de agua destilada y a11adiendo 33.3 gr. de sulfato de mercurio y cuidadosamente se le agrega 167 ml de 1cido sulf1rico concentrado, cuando la soluci3n este fr1a se tiene que aforar a 1 litro con agua destilada despu3s de que la mezcla este fr1a y si observamos que no se disolvi3 bien podemos usar un agitador magn3tico y mediante agitaci3n volvemos a disolver, por ultimo vaciar la soluci3n a un frasco 1mbar con la finalidad de evitar el contacto directo con la luz por su sensibilidad y una posible descomposici3n.

#### **5.4.4.5.3 Soluci3n de sulfato de plata y 1cido sulf1rico**

Se pesan 15 gr. de sulfato de plata despu3s se coloca en un matraz de aforaci3n de 1 litro, posteriormente se afora con 1cido sulf1rico concentrado dej1ndolo a reposar en un lapso de 2 d1as en un lugar en condiciones sin humedad y sin iluminaci3n para que complete la disoluci3n por 1ltimo se vac1a a un frasco color 1mbar.

#### **5.4.4.5.4 Determinaci3n de la DQO**

1.- En un tubo Hach se agregaron 3.5 ml de sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) y 1.5 ml de la mezcla de dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), para mezclar bien las soluciones cerrar con un tap3n de rosca y agitamos suavemente.

2.- A11adir 2.5 ml del ARM que se usa como muestra y se cierra nuevamente con un tap3n de rosca agit1ndolo suavemente por inversi3n, se debe realizar un blanco de referencia usando agua destilada en vez de ARM.

3.- Limpiar los tubos con papel absorbente para eliminar residuos de la mezcla, posteriormente se colocaron en el digestor durante 2 horas a  $150^\circ\text{C}$ .

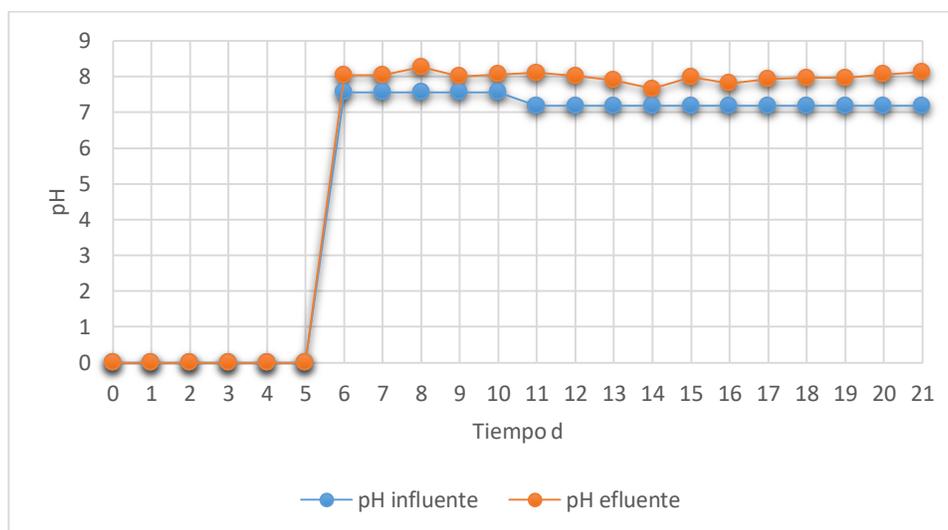
4.- Transcurrido el tiempo se sacaron los tubos del digestor dej1ndolos enfriar a temperatura ambiente, leer la absorbancia coloc1ndolos en el espectrof3tometro a una longitud de onda de 620 nm.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 pH

En la figura 6 se muestran los valores de pH del influente (ARM sin tratamiento) y el pH del efluente (ARM tratada por el reactor unitario). Estos datos fueron obtenidos a partir del día 6 que se contó como el día 1, en total se obtuvieron 32 lecturas en el que diariamente fue monitoreado este parámetro. El rango de pH que fue detectado en el efluente fue de 7.66 hasta 8.27 que indica un valor más alcalino. Estos valores están dentro del rango de 6.5 a 8.5, valores que son idóneos para la supervivencia de diferentes sistemas biológicos, así mismo con el pH mayor a 9.0 y menor de 5.8 se genera una restricción para el desarrollo y fisiología de los organismos vivos (Chapman, 1996).

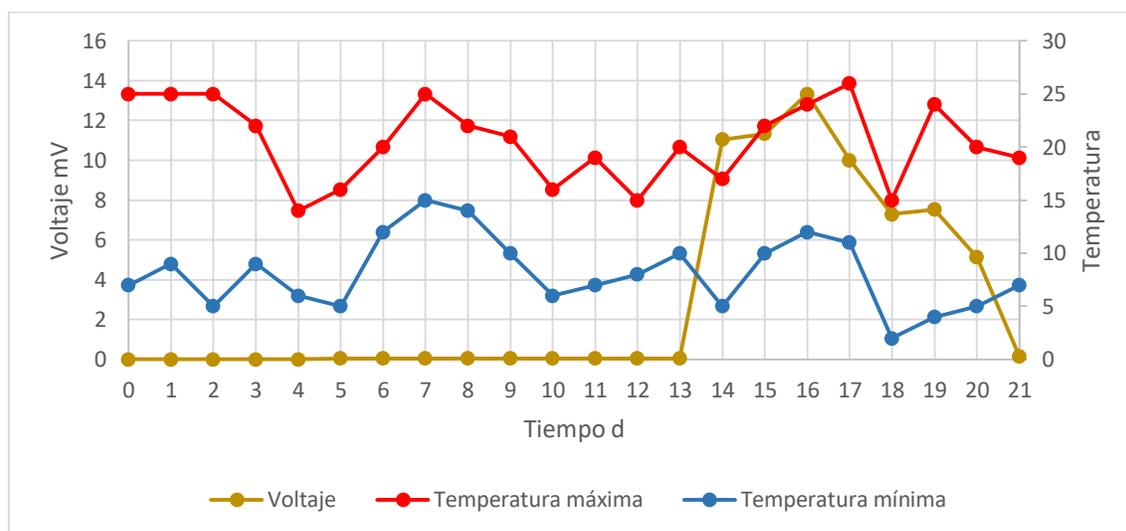
El valor más alto de pH del influente fue de 7.56, que correspondió al ARM utilizada de los días 6 al 10, por el contrario, la lectura del pH más bajo fue de 7.18, que correspondió al ARM utilizada del día 11 al 21. En la gráfica se puede observar las lecturas del pH tanto del influente como del efluente que tienen una pequeña diferencia presentando valores neutros a alcalinos que son considerados ideales para el crecimiento de organismos aerobios (Guinea *et al.*, 2000).



**Figura 6.** Comportamiento del pH del ARM influente y del efluente.

## 6.2 Voltaje

En la figura 7 se observan los resultados del voltaje obtenidos durante la experimentación y en el que se monitoreó diariamente detectando la primera lectura de 0.059 mV el día 8. La lectura más baja fue de 0.045 mV detectada el día 9 y la máxima el día 16 con 13.34 mV. Se observó que el día 14, 15 y 16 el voltaje incrementó cuando la temperatura ambiente máxima registrada para cada día fue de 17°C, 22°C y 24°C y la mínima de 5°C, 10°C y 12 °C, posteriormente pasando estos días (día 17,18,19,20,21) el voltaje fue disminuyendo con temperaturas mínimas de 11°C, 2°C, 4°C, 5°C, 7°C y máximas de 26°C, 15°C, 24°C, 20°C y 19°C. El voltaje que se generó por el SBE en promedio fue de 4.727 mV. Es probable que la generación de voltaje haya sido afectada por las bajas temperaturas, ya que para obtener mejores resultados en la generación de energía en el arranque de un SBE se necesita de una temperatura ambiente que facilite y permita buena actividad de la biomasa (Monroy, 1992).

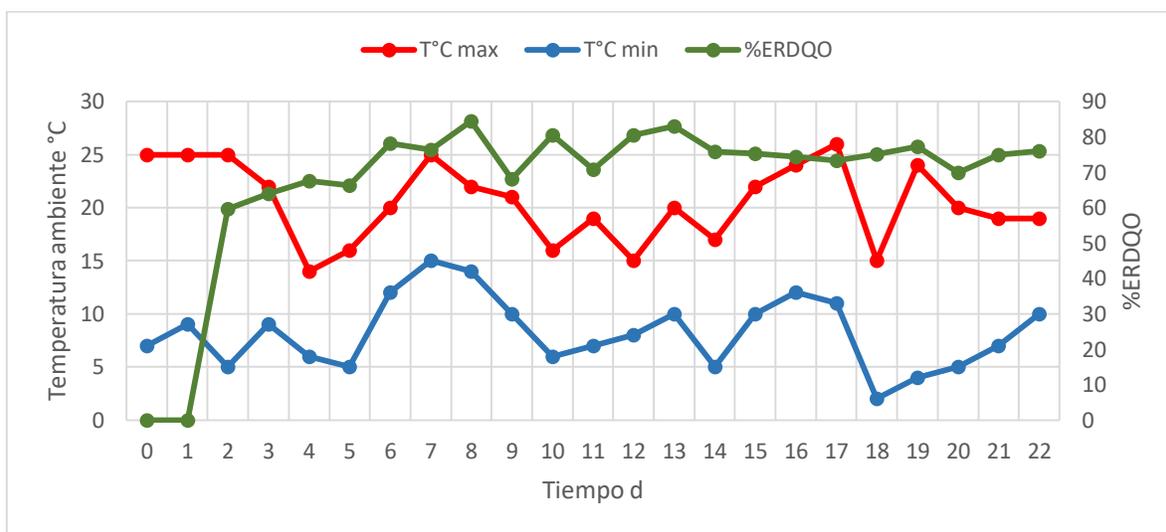


**Figura 7.** Comportamiento del voltaje en el SBE en relación con la temperatura ambiente máxima y mínima.

## 6.3 Eficiencia de la remoción de la DQO

En la figura 8 se observa la eficiencia de la remoción de la DQO del efluente que se detectó en el sistema bioelectroquímico con respecto al comportamiento de la temperatura ambiente considerando la máxima y la mínima que se presentó durante los días de experimentación.

El porcentaje de la eficiencia de la remoción de la DQO está vinculado con la temperatura ambiente, puesto que al tener variabilidades en las temperaturas el porcentaje de la ERDQO no se mantuvo estable con excepción de los dos últimos días. Se observa que el %ERDQO más alto se obtuvo el día 8 con una temperatura máxima de 22°C y una mínima de 14°C, con un %ERDQO de 84.525% y la eficiencia de remoción más baja fue detectada el día 2 a una temperatura mínima de 5°C y con una temperatura máxima de 25°C con un %ERDQO de 59.671%. A pesar de las bajas temperaturas la eficiencia de la remoción de la DQO no fue afectada de manera sustancial, y esto concuerda con estudios realizados por otros autores donde mencionan que los SBE son ideales para trabajar a temperaturas bajas sin que existan caídas importantes en la remoción de la DQO (Heidrich *et al.*, 2018). El promedio del porcentaje de la eficiencia de remoción de la DQO durante los días de monitoreo fue de 67.43%.

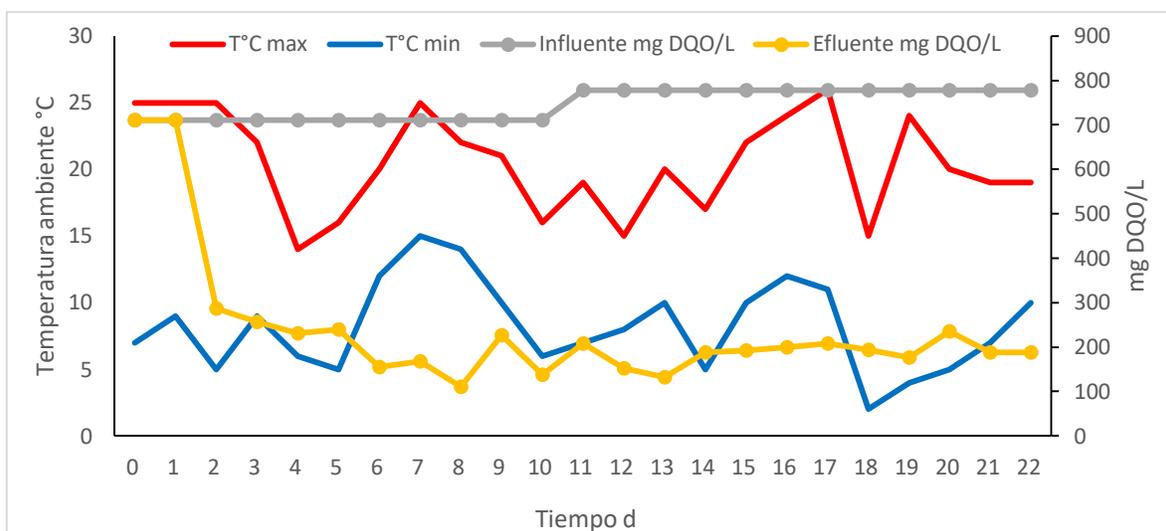


**Figura 8.** Porcentaje de la eficiencia de la remoción de la DQO en función a la temperatura ambiente (máxima y mínima).

#### 6.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

En la figura 9 se muestra el comportamiento que tuvo la DQO en relación a la temperatura ambiente máxima y mínima. Se requirieron dos colectas de ARM, el agua utilizada en el periodo del día 1 al 10 tuvo concentración de 710 mg DQO/L, y el ARM utilizada del día 11 al 22 tuvo una concentración de 778 mg DQO/L. En el efluente se observa que en los primeros días se mantenía en una concentración superior a los 200 mg DQO/L y

posteriormente fue disminuyendo hasta 110 mg DQO/L. Al cambiar el agua en el día 11 el valor volvió a subir a 207.5 mg DQO/L y posteriormente bajo hasta 110 mg DQO/L, esto indica que la concentración de la DQO en el efluente estuvo mayormente entre los 100 a 200 mg/L a pesar de los cambios de temperatura, los valores de DQO no variaron severamente.

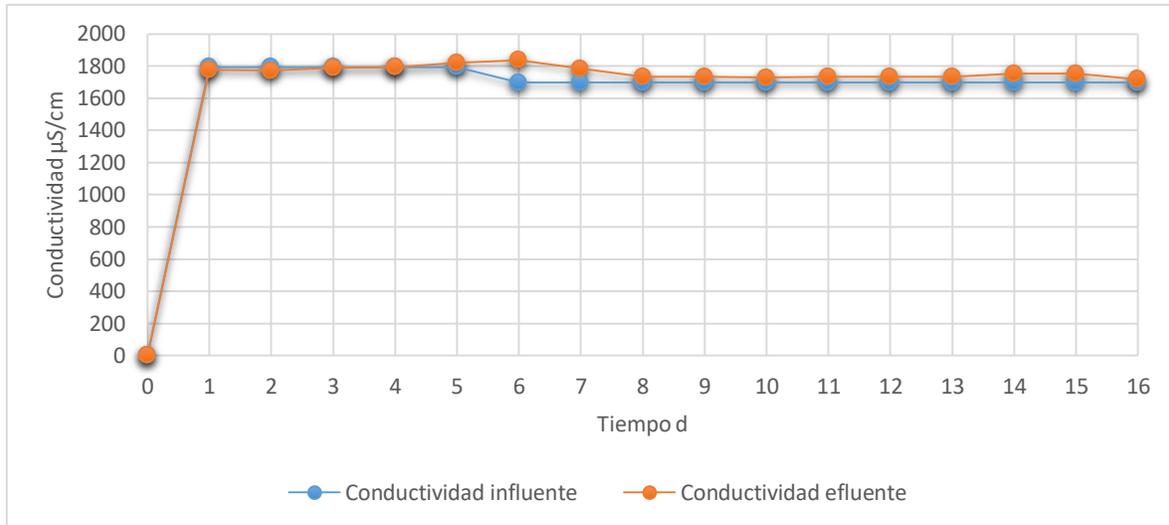


**Figura 9.** Comportamiento de la DQO con relación a la temperatura ambiente (máxima y mínima).

### 6.5 Conductividad eléctrica

En la figura 10 se observan los valores que se obtuvieron en la CE tomadas durante 16 días con un total de 32 lecturas. La lectura inicial de la CE del influente fue de 1794  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (día 1 al 5), cuando el agua se cambió la CE fue de 1699  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (día 6-16) teniendo un promedio de todos los datos del influente de 1728  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el efluente el valor más alto de CE fue 1838  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (día 6) y el valor mínimo fue de 1717  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con un valor promedio de 1762  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La CE fue casi uniforme sin notar diferencias sustanciales, al tener mayor conductividad eléctrica, hay menos remoción en la eficiencia de materia orgánica en el agua residual ya que al producir conductividad por presencia de iones que vienen de sales hay una pérdida de actividad celular por deshidratación a causa del flujo de salida mediante la pared celular (Ferrer Polonio, Antonio Mendoza Roca y Alicia Iborra Clar, 2017), por otro lado, las aguas que poseen menos de 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no ocasionan problemas para el uso del riego en

plantas o suelo (Morales Posada y Acosta Niño, 2010), por lo tanto la CE registrada indica que el agua residual tratada por este sistema no puede usarse en sistemas de riego ya sea para jardín u otros usos.



**Figura 10.** Comportamiento de la conductividad eléctrica generada en el SBE sin membrana.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados que se obtuvieron en la fase de arranque del sistema bioelectroquímico sin membrana monitoreado durante 21 días indican que hay una alta eficiencia en la remoción de la materia orgánica e inorgánica (DQO) con un promedio del 67.43%. Por lo tanto, se acepta la hipótesis porque se obtuvo un buen desempeño en la remoción de la materia orgánica. La producción de voltaje fue baja, pero se debe considerar que este estudio solo representa 21 días de estudio, por lo cual se debe considerar un estudio más largo y que involucre la medición de otros parámetros usando este sistema bioelectroquímico ya que se observó un gran potencial para su uso a escala en el tratamiento de aguas residuales.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- A Hernández García, H., Buitrón Méndez, G., M Lopez-Vazquez, C., y J Cervantes Carrillo, F. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. IWA publishing. DOI 10.2166/9781780409146
- Abarca, F., Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E., Márquez, R., y Zambrano, L. (2007). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Sanchez, O. Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos, 113-144. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Perpectivas-sobre-conservación-de-ecosistemas-acuáticos-en-México.pdf>
- Aguilar-González, M., Buitrón, G., Shimada-Miyasaka, A., & Mora-Izaguirre, O. (2016). Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia*, 50(2), 149-166. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000200149&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000200149&script=sci_arttext)
- Aguilar-González, M., Buitrón, G., Shimada-Miyasaka, A., y Mora-Izaguirre, O. (2016). Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia*, 50(2), 149-166. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000200149&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000200149&script=sci_arttext)
- Akman, D., Cirik, K., Ozdemir, S., Ozkaya, B., & Cinar, O. (2013). Bioelectricity generation in continuously-fed microbial fuel cell: effects of anode electrode material and hydraulic retention time. *Bioresource Technology* 149, 459-464. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413015344>.
- Alzate-Gaviria, L., K. González, I. Peraza, O. García, J. Domínguez, J. Vázquez, M. Tzecz-Sima y B. CantoCanché (2010), Evaluación del desempeño e identificación de exoelectrógenos en dos tipos de celdas de combustible microbianas con diferente

- configuración en el ánodo, *Interciencia*: 35(1), 19-25.  
<https://www.redalyc.org/pdf/339/33913146004.pdf>
- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Tecnología del Agua*, 7. <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/edar.pdf>
- Barceló, D., & López, M. J. (2008). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas*, Sevilla. 1-27.  
<http://elaguapotable.com/Contaminación%20y%20calidad%20quím%20del%20agua-a-los%20contaminantes%20emergentes.pdf>.
- Bermúdez Montaña, M. A., & Bernal Aragón, E. D. (2018). Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6695>
- 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.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDREVISTA=98&IDARTICULO=31582&IDPUBLICACION=3417>
- Carrera, R. A. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno con un sistema bioelectroquímico asistido con dos diferentes membranas. (Pág. 7-40)  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2132>.
- CNA, SEMARNAT. Estadísticas del Agua en México. Edición 2004. México 2004.  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
- CONAGUA, SEMARNAT. Estadísticas del Agua en México. Edición 2008. CONAGUA. México. 2008. [https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/\\_2008\\_EAM2008.pdf](https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/_2008_EAM2008.pdf)

- CONAGUA, SEMARNAT. Estadísticas del Agua en México. Edición 2011. CONAGUA. México. 2011.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/259373/\\_2011\\_EAM2011.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/259373/_2011_EAM2011.pdf)
- CONAGUA, SEMARNAT. Estadísticas del Agua en México. Edición 2013. México. 2014.  
<https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- CONAGUA, SEMARNAT. Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2011. México. 2011.  
<https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/DSAPAS%20Edicion%202011.pdf>
- CONAGUA, SEMARNAT. Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2012. México. 2012.  
<https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-40-12.pdf>
- CONAGUA. Atlas del Agua en México. Edición 2015. CONAGUA, SEMARNAT. México. 2015a.
- CONAGUA. Atlas del Agua en México. Edición 2016. CONAGUA, SEMARNAT. México. 2016a. [https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/Numeragua\\_2016.pdf](https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/Numeragua_2016.pdf)
- CONAGUA. Atlas del Agua en México. Edición 2017. CONAGUA, SEMARNAT. México. 2017a. [https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/EAM\\_2017.pdf](https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/EAM_2017.pdf)
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2020-2024. “Programa Nacional Hídrico. Edición 2020”. Comisión Nacional del Agua. D.F., México.  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020)
- DOF. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. CECCA-001/89. Diario Oficial de la Federación. México. 1989 (2 de diciembre).  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0)

- DOF. Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. “Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”. Diario Oficial de la Federación. México. 2000 (20 de noviembre).  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0)
- DOF. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM 012-SSA1-1993, Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados. México. 1994 (18 de diciembre).  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4728754&fecha=12/08/1994#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4728754&fecha=12/08/1994#gsc.tab=0)
- Domínguez-Maldonado, J. A., García-Rodríguez, O., Aguilar-Vega, M., Smit, M., & Alzate-Gaviria, L. (2014). Disminución de la capacidad de intercambio catiónico en una pila de combustible microbiana y su relación con la densidad de potencia. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13, 527-538.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382014000200017&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382014000200017&script=sci_abstract&tlng=pt)
- FAO, O. D. (2000). Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura y el medio rural de la FAO. Obtenido de [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/ecuador/indexe.sp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexe.sp.stm). Fecha de consulta: diciembre de 2023.
- Farias, N. (2016). Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas bioelectroquímicas microbianas para la producción de energías alternas. Centro De Investigación Y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C.  
<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/80/1/Análisis%20técnico-económico%20de%20la%20tecnología%20de%20celdas%20bioelectroquímicas%20microbianas%20para%20la%20producción%20de%20energías%20alternas..pdf>

- Galindo Pardo, F. V., Jacobo-Salcedo, M. D. R., Cueto-Wong, J. A., Reta Sánchez, D. G., García Hernández, J. L., y Vázquez-Vázquez, C. (2020). Caracterización de aguas residuales tratadas de la comarca lagunera y su viabilidad en el riego agrícola. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(1), 189-201. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342020000100189&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342020000100189&script=sci_arttext)
- Gómez-Sandoval, L., R. Páez y A. Flores-Díaz. Comportamiento de los sólidos en suspensión y sedimentables en cuerpos de agua: búsqueda de métodos aplicables al monitoreo comunitario. En: *Memorias del Tercer Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. UNAM, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. México. 2013. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001522.pdf>
- González, C. 2015. Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas. Tesis de Doctorado. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real. Pp. 410. <https://hdl.handle.net/10578/6531>
- Heidrich, E. S., Dolfing, J., Scott, K., Edwards, S. R., Jones, C., y Curtis, T. P. (2013). Production of hydrogen from domestic wastewater in a pilot-scale microbial electrolysis cell. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97, 69796989. DOI: 10.1007/s00253-012-4456-7. <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- Larrea-Murrell, J. A., Rojas-Badía, M. M., Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. M., y Heydrich-Pérez, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(3), 24-34. <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181229302004.pdf>
- Martínez C.Y., Herrera D., Gutiérrez R. F., y Bello R. 2016. Tratamiento de agua residual doméstica mediante un reactor Rfa y una Celda Microbiana de Combustible. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(3): 267-279.

- Muñoz, A. 2008. Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Monografía de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mineral de la Reforma Hidalgo. 296.  
<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/?sequence=1>
- NMX-AA-030/2-SCFI-2011. (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. Secretaría de Economía, México. Disponible en: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>.
- Pérez-Castillo, Ana Gabriela, & Rodríguez, Alexis. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), 1905-1918.  
[http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442008000400026&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442008000400026&lng=en&tlng=es).
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología en marcha*. vol.29, n.3, pp.3-14.  
<http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>.
- Pérez-Rodríguez, P., Martínez-Amador, S. Y., Valdez-Aguilar, L. A., Benavides-Mendoza, A., Rodríguez-de la Garza, J. A., & Ovando-Medina, V. M. (2018). Diseño y evaluación de un sistema secuencial bioelectroquímico para el tratamiento de agua residual municipal y generación de voltaje. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(1), 145-154. [https://www.researchgate.net/profile/Luis-Valdez-Aguilar/publication/350788401\\_Revista\\_Mexicana\\_de\\_Ingenieria\\_Quimica/links/6071d865a6fdcc5f77982cd0/Revista-Mexicana-de-Ingenieria-Quimica.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Luis-Valdez-Aguilar/publication/350788401_Revista_Mexicana_de_Ingenieria_Quimica/links/6071d865a6fdcc5f77982cd0/Revista-Mexicana-de-Ingenieria-Quimica.pdf)
- Revelo, Dolly M, Hurtado, Nelson H, & Ruiz, Jaime O. (2013). Celdas De Combustible Microbianas (CCMS): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación

de energía eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 17-28.  
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Romero-Aguilar, M., Colin-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., y Ortiz-Hernández, M. L. (2009). Wastewater treatment by an artificial wetlands pilot system: evaluation of the organic charge removal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 157-167.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s0188-49992009000300004&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s0188-49992009000300004&script=sci_arttext)

Sleutels, T. H., Ter Heijne, A., Buisman, C. J., & Hamelers, H. V. (2012). Bioelectrochemical systems: an outlook for practical applications. *ChemSusChem*, 5(6), 1012-1019. DOI: 10.1002/cssc.201100732

Zamora, J. R. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto,(ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, 9(12), 125-134.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5897932>