



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

***Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad
en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio***

TESIS:

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA

PRESENTA

SURYA ANAID RAMÍREZ MARTÍNEZ



Ciudad Universitaria, CD. MX. 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: MARÍA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ

VOCAL: Profesor: JOSÉ MANUEL MÉNDEZ STIVALET

SECRETARIO: Profesor: LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS

1er. SUPLENTE: Profesor: MARISELA BERNAL GONZÁLEZ

2° SUPLENTE: Profesor: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**UNAM, FACULTAD DE QUÍMICA, LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA
AMBIENTAL Y QUÍMICA AMBIENTAL, LABORATORIOS 301, 302 Y 303,
CONJUNTO 4-E.**

ASESOR DEL TEMA:

DRA. MARÍA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ DE BAZÚA _____

SUPERVISOR TÉCNICO:

MARÍA GUADALUPE SALINAS JUÁREZ _____

SUSTENTANTE:

SURYA ANAID RAMÍREZ MARTÍNEZ _____

RECONOCIMIENTOS

Los reactivos y materiales empleados en esta investigación fueron parcialmente financiados por los proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, PAPIIME, “Apoyo a la enseñanza experimental de los laboratorios terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM”, “Apoyo a la enseñanza experimental de las asignaturas terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM” y “Desarrollo de material didáctico para las asignaturas ingeniería ambiental y estancia académica de la carrera de ingeniería química con base en estudios de caso” Claves EN103704, PE101709 y PE-100514, respectivamente, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, DGAPA, y del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Clave 50009067.

También se agradece al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la UNAM por su valioso apoyo en especie de algunos materiales y de equipo de cómputo académico a través del Subcomité Académico por Campo del Conocimiento de Ingeniería Ambiental.

Finalmente, pero muy valioso para esta investigación, fue el apoyo académico del Instituto de Biología de la UNAM, a través de la Maestra en Ciencias Berenit Mendoza Garfias.

DECLARATORIA

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce del presente que es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Alumna: Surya Anaid Ramírez Martínez

ÍNDICE

JURADO ASIGNADO:	2
RECONOCIMIENTOS	3
DECLARATORIA	4
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	7
GLOSARIO	11
RESUMEN	12
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. OBJETIVOS	21
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	21
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	21
1.2. CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	22
2. ANTECEDENTES	23
2.1. AGUAS RESIDUALES Y TECNOLOGÍAS PARA PEQUEÑOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO	23
2.2. HUMEDALES Y HUMEDALES ARTIFICIALES	26
2.2.1. <i>Tipos de humedales</i>	27
2.2.2. <i>Acción de los microorganismos en un humedal artificial</i>	29
2.2.3. <i>Remoción de materia orgánica en humedales artificiales</i>	29
2.3. FOTOSÍNTESIS	30
2.4. ANÁLISIS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO, DQO	31
2.5. CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS	33
2.6. CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS VEGETALES, CCMV	35
3. METODOLOGÍA	37
3.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	37
3.1.1. <i>Diseño de las celdas</i>	38
3.1.2. <i>Composición del agua residual sintética y de la solución nutritiva</i>	40
3.1.3. <i>Inóculo</i>	41
3.2. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	42
3.2.1. <i>Construcción de los reactores</i>	42
3.2.2. <i>Pipas de muestreo</i>	42
3.2.3. <i>Ánodo y cátodo</i>	42
3.2.4. <i>Planta y medio de soporte</i>	43
3.3. OPERACIÓN DEL SISTEMA	44
3.3.1. <i>Plan de muestreo y seguimiento de parámetros</i>	44
3.3.2. <i>Técnicas analíticas</i>	44
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	45
3.5. REALIZACIÓN DE MICROGRAFÍAS	45
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47

4.1. REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DISUELTOS MEDIDOS COMO DQO.....	47
4.2. EFECTO DE LA PLANTA Y DEL INÓCULO EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL SINTÉTICA	50
4.3. INFLUENCIA DEL PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y TEMPERATURA SOBRE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL	51
4.4. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	54
4.4.1 <i>Efecto del agua residual sintética sobre la generación de electricidad en una CCMV.....</i>	56
4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	57
4.6. MICROGRAFÍAS	59
5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	65
5.1. CONCLUSIONES	65
5.2. PERSPECTIVAS	66
ANEXOS	67
ANEXO A-1.....	67
<i>Datos experimentales</i>	67
ANEXO A-2.....	80
<i>Resultados del análisis estadístico.....</i>	80
ANEXO A-3.....	81
<i>Protocolo para la preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido (bacterias)</i>	81
.....	81
ANEXO A-4.....	83
<i>Micrografías obtenidas de los electrodos de los reactores.....</i>	83
ANEXO A-5.....	104
<i>Disposición controlada de los residuos producidos en esta experimentación</i>	104
<i>Figura A-5.1. Diagrama de bloques de los procesos empleados para eliminación de metales en residuos de DQO</i>	107
BIBLIOGRAFÍA	108

Índice de tablas y figuras

Tabla	Título de la tabla	Página
Tabla 1.1.	Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2013 (CONAGUA, 2014)	19
Tabla 3.1.	Diferencia, denominación y constitución de las celdas	40
Tabla 3.2.	Composición del agua residual sintética, ARS y la solución nutritiva, SN	43
Tabla 4.1.	Valores promedio de temperatura (°C), pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) para cada una de las celdas que se tenían en operación	54
Tabla 4.2.	Tabla que muestra el número, composición y nombre de los reactores analizados por la prueba de Friedman	60
Tabla A-1.	Datos de voltaje en circuito abierto (mV)	69
Tabla A-1.1.	Datos de remoción de materia orgánica medida como DQO	71
Tabla A-1.2.	Datos de temperatura en las celdas	74
Tabla A-1.3.	Datos de pH en las celdas	76
Tabla A-1.4.	Datos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	79
Tabla A-3.	Tabla de compuestos y concentraciones que se utilizan para preparar solución madre (stock)	84

Figura	Título de la figura	Página
Figura 1.1.	Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado al 2013 (CONAGUA, 2014)	20
Figura 1.2.	Fuentes de suministro de energía, 2012 (CONAGUA, 2014)	21
Figura 3.1.	Reactor testigo (RT)	39
Figura 3.2.	Reactor de cloruro de polivinilo con puerto y pipas de muestreo	41
Figura 3.3.	Configuración física en esquema de las celdas	41
Figura 3.4.	Configuración física general de las celdas	42
Figura 3.5.	Colector de corriente unido al ánodo y al cátodo	45
Figura 3.6. (A).	Soporte de grafito en granillo dentro del reactor	45
Figura 3.6. (B).	Planta <i>Phragmites australis</i> comúnmente conocida como carrizo	45
Figura 3.6. (C).	Celda completa vista desde arriba	45
Figura 4.1.	Gráfico que muestra la remoción de los reactores 1 PARSI, 3 PARS y 5 ARSI en función del tiempo	50
Figura 4. 2.	Gráfico de valores promedio de la materia orgánica medida como DQO para los reactores 5 ARSI, 1 PARSI, 3 PARS y 7 ARS	51

Figura 4.3.	Gráfico que muestra los valores promedio de DQO del influente y efluente de las celdas 9 SN, 4 PSN y 8 ALL (Reactores sin fuente externa de carbono)	51
Figura 4.4.	Curvas de remoción para las celdas que contienen planta, inóculo y planta e inóculo	53
Figura 4.5.	Valores de temperatura (°C) en función del tiempo para cada uno de los reactores	55
Figura 4.6.	Valores de pH en función del tiempo para cada uno de los reactores	55
Figura 4.7.	Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en función del tiempo para cada uno de los reactores	56
Figura 4.8.	Curvas de voltaje en función del tiempo para las celdas que contienen agua residual sintética	58
Figura 4.9.	Curvas de voltaje en función del tiempo para todos los reactores	59
Micrografía 1.	Celda 1 – PARS. Ánodo (fibra del fieltro de grafito)	85
Micrografía 2.	Celda 1 – PARS. Ánodo (fibra del fieltro de grafito)	85
Micrografía 3.	Celda 1 – PARS. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)	86
Micrografía 4.	Celda 1 – PARS. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)	86
Micrografía 5.	Celda 1 – PARS. Empaque (granillo de grafito)	87
Micrografía 6.	Celda 1 – PARS. Empaque (granillo de grafito)	87
Micrografía 7.	Celda 3 – PARS. Ánodo (granillo de grafito)	88
Micrografía 8.	Celda 3 – PARS. Ánodo (granillo de grafito)	88
Micrografía 9.	Celda 3 – PARS. Cátodo (granillo de grafito)	89
Micrografía 10.	Celda 3 – PARS. Cátodo (granillo de grafito)	89
Micrografía 11.	Celda 3 – PARS. Empaque (granillo de grafito)	90
Micrografía 12.	Celda 3 – PARS. Empaque (granillo de grafito)	90
Micrografía 13.	Celda 4 – PSN. Ánodo (granillo de grafito)	91
Micrografía 14.	Celda 4 – PSN. Ánodo (granillo de grafito)	91
Micrografía 15.	Celda 4 – PSN. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)	92

Micrografía 16.	Celda 4 – PSN. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)	92
Micrografía 17.	Celda 5 – ARSI. Ánodo (granillo de grafito)	93
Micrografía 18.	Celda 5 – ARSI. Ánodo (granillo de grafito)	94
Micrografía 19.	Celda 5 – ARSI. Cátodo (granillo de grafito)	95
Micrografía 20.	Celda 5 – ARSI Cátodo (granos de grafito)	95
Micrografía 21.	Celda 5 – ARSI. Empaque (fibras de fieltro de grafito)	96
Micrografía 22.	Celda 5 – ARSI. Empaque (fibras de fieltro de grafito)	96
Micrografía 23.	Celda 7 – ARS. Ánodo (fibra de fieltro de grafito)	97
Micrografía 24.	Celda 7 – ARS. Ánodo (fibra de fieltro de grafito)	97
Micrografía 25.	Celda 7 – ARS. Cátodo (fibras de fieltro de grafito)	98
Micrografía 26.	Celda 7 – ARS. Cátodo (fibras de fieltro de grafito)	98
Micrografía 27.	Celda 7 – ARS. Empaque (granos de grafito)	99
Micrografía 28.	Celda 7 – ARS. Empaque (granos de grafito)	99
Micrografía 29.	Celda 8 – ALL. Ánodo (granos de grafito)	100
Micrografía 30.	Celda 8 – ALL. Ánodo (granos de grafito)	100
Micrografía 31.	Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)	101
Micrografía 32.	Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)	101
Micrografía 33.	Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)	102
Micrografía 34.	Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)	102
Micrografía 35.	Celda 8 – ALL. Empaque (grano de grafito)	103
Micrografía 36.	Celda 8 – ALL. Empaque (grano de grafito)	103
Micrografía 37.	Celda 9 – SN. Ánodo (grano de grafito)	104
Micrografía 38.	Celda 9 – SN. Ánodo (grano de grafito)	104
Micrografía 39.	Celda 9 – SN. Cátodo (fibra de grafito)	105
Micrografía 40.	Celda 9 – SN. Cátodo (fibra de grafito)	105
Micrografía 41.	Celda 9 – SN. Empaque (grano de grafito)	106
Micrografía 42.	Celda 9 – SN. Empaque (grano de grafito)	106
Figura A-5.1.	Diagrama de bloques de los procesos empleados para eliminación de metales en residuos de DQO	109

Glosario

8 ALL	Reactor con agua de la llave
AR	Agua residual
ARS	Agua residual sintética
TRH	Tiempo de residencia hidráulica
7 ARS	Reactor con agua residual sintética
5 ARSI	Reactor con agua residual sintética e inóculo
CCM	Celdas de combustible microbianas
CCMV	Celdas de combustible microbianas vegetales
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua, México
COT	Carbono orgánico total
COV	Compuestos orgánicos volátiles
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días
DQO	Demanda química de oxígeno
6I	Reactor con inóculo
IEA	Agencia Internacional de Energía, por sus siglas en inglés
1 PARSI	Reactor con planta, agua residual sintética e inóculo
3 PARS	Reactor con planta y agua residual sintética
2PI	Reactor con planta e inóculo
4 PSN	Reactor con planta y solución nutritiva
SEM	Espectroscopía electrónica de barrido, por sus siglas en inglés
SN	Solución nutritiva
UGA	Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, México
USAI	Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación de la Facultad de Química de la UNAM, México
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas del inglés, <i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
9 SN	Reactor con solución nutritiva
10 RT	Reactor testigo
PBS	Solución salina amortiguada por fosfatos, por sus siglas en inglés

RESUMEN

Se presentan los resultados de la investigación sobre la implementación de un sistema natural para el tratamiento de agua residual y la generación de electricidad simultánea e *in situ*, a escala de laboratorio (Laboratorios 301-303, Facultad de Química). Para llevar a cabo este proyecto se utilizaron siete reactores que simulaban humedales artificiales para el tratamiento de agua residual sintética (1 PARSI, reactor con planta, agua residual sintética e inóculo; 3 PARS, reactor con planta y agua residual sintética; 4 PSN, reactor con planta y solución nutritiva; 5 ARSI, reactor con agua residual sintética e inóculo; 7 ARS, reactor con agua residual sintética; 8 ALL, reactor con agua de la llave y 9 SN, reactor con solución nutritiva). Los reactores se construyeron incluyendo los componentes de una celda de combustible microbiana vegetal, CCMV. Las celdas o reactores consisten en recipientes cilíndricos de cloruro de polivinilo, contienen dos piezas de fieltro de grafito que funcionan como electrodos (ánodo y cátodo). Éstos están unidos a un cable de cobre que funciona como colector de corriente. Dos de los reactores contienen una especie vegetal conocida comúnmente como carrizo (*Phragmites australis*). El medio de soporte para los reactores que forma parte del ánodo es grafito en granillo. De acuerdo con el análisis estadístico realizado para la remoción de materia orgánica del agua residual sintética, se concluyó que las celdas 3 PARS, 1 PARSI y 5 ARSI son las celdas que mejor funcionaron como sistemas de tratamiento de agua residual sintética, por la remoción obtenida. Y, de acuerdo con el análisis estadístico realizado para los resultados de voltaje en circuito abierto, se determinó que la celda 1 PARSI presentaba los valores más altos de voltaje generado. Los valores obtenidos de pH para cada celda permitieron identificar que el pH neutro favorece la remoción de materia orgánica. La conductividad eléctrica no tuvo un efecto significativo en la generación de electricidad. Se propone evaluar el funcionamiento de otro tipo de empaque para la disminución de costos y para

minimizar el riesgo de contaminación de las muestras por arrastre de grafito, así como llevar a cabo pruebas bioquímicas, morfológicas y moleculares para la identificación de los microorganismos presentes en las celdas.

1. Introducción

En este capítulo se abordará de manera general la problemática con respecto al abasto y tratamiento del agua y a la provisión de energía eléctrica en México.

También se hablará del objetivo a cumplir con esta tesis

Entre los grandes desafíos que enfrenta el mundo, especialmente en las economías en desarrollo y emergentes, se encuentra la satisfacción de la demanda de agua dulce y de energía para las próximas décadas; siendo los más pobres quienes carecen y requieren urgentemente de los servicios de acceso al recurso hídrico, alcantarillado y electricidad. Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), a nivel mundial, 1.3 mil millones de personas viven sin electricidad, 780 millones de personas carecen de acceso al agua potable y 2.5 mil millones de personas carecen de servicios de saneamiento (INEGI, 2014).

“El 70% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua y tan sólo 30% es tierra firme. La mayor parte del agua en la Tierra es agua salada: 97.5% es agua de mares y océanos. El restante 2.5% es agua dulce, pero casi toda está congelada en los polos y en los glaciares. Del 2.5% de agua dulce, 69.7% es agua congelada, 30% es subterránea y en los ríos y lagos hay sólo 0.3%” (Centro Virtual de información del Agua, 2004).

“Anualmente México recibe 1489 mil millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación pluvial. De esta agua, se estima que el 71.6% se evapora o evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos y el 6.2% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable” (CONAGUA, 2013). De acuerdo con la CONAGUA, el agua renovable es la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en

una región, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y el agua proveniente de otros países o regiones; que es el balance de importaciones y exportaciones. Se calcula como el escurrimiento natural medio superficial interno anual, más la recarga total anual de los acuíferos, más los flujos de entrada salida de agua a otras regiones y se debe analizar desde tres perspectivas: la primera es la distribución temporal, que como su nombre lo indica varía de acuerdo a la temporada del año, la segunda es la distribución espacial ya que en algunas regiones del País suele haber precipitación abundante y baja densidad poblacional, mientras que en otras regiones es al revés y la tercera perspectiva es el área que se esté analizando ya que existen fuertes variaciones en todo el territorio nacional. “El agua es empleada de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. Al 25 de junio de 2010, el 90.9% de la población en México tenía cobertura de agua potable” (CONAGUA, 2013).

La Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, estima que al cierre de 2014 la cobertura de agua potable fue de 92.4% específicamente, la cobertura en zonas urbanas alcanzó 95.1% y en zonas rurales 82.9% (CONAGUA, 2015).

Al utilizar el agua en las distintas actividades humanas ésta sufre de cambios en su composición original, por lo que pasa a ser un agua residual. Al suceder esto es necesario que se lleve a cabo algún tipo de tratamiento para regresar esta agua al ambiente con mínimas modificaciones (INEGI, 2014).

“Para el año 2012 la descarga de aguas residuales total fue de 25,794 millones de metros cúbicos de los cuales 5,055 millones de metros cúbicos tuvieron algún tipo de tratamiento antes de ser retornados al medio ambiente. Es decir, que los restantes 20,739 millones de metros cúbicos no fueron saneados, lo que corresponde a más del 80 por ciento. El costo para el tratamiento de este tipo de descargas asciende a 64,632 millones de pesos” (INEGI, 2014), y habría que preguntarse quién debe pagar por ello.

“La inadecuada disposición de las aguas residuales y residuos sólidos propicia la contaminación de las fuentes de agua limpia. Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, en tanto que las segundas son las descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida” (CONAGUA, 2014). La secuencia de la generación de aguas residuales, recolección en alcantarillado y tratamiento/remoción se muestra en la **Tabla 1.1** (CONAGUA, 2014).

En el año 2013, las 2287 plantas municipales en operación en el país trataron 105.9 m³/s, es decir el 50.2% de los 211.1 m³/s recolectados en los sistemas de alcantarillado. Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales empleados en nuestro país se ilustran en la **Figura 1.1** (CONAGUA, 2014). “En el año 2013, la industria trató 60.7 m³/s de aguas residuales, en 2617 plantas en operación a nivel nacional” (CONAGUA, 2014).

Por otra parte, la energía y el agua son recursos que están vinculados y son esenciales para el bienestar humano. Sin agua, no es posible la vida y la energía permite obtener agua en la calidad y cantidad necesarias tanto para el consumo humano cotidiano, como para la actividad productiva.

“La energía (disponible para su uso por medio de los energéticos) es indispensable para la vida moderna y el agua es necesaria para su producción. De esta forma, la disponibilidad adecuada de los recursos hídricos está vinculada a la de los recursos energéticos y viceversa. El bombeo, la potabilización y el tratamiento de agua requieren energía, asimismo, el agua es necesaria para la producción, transformación y consumo de la energía” (Jiménez y col., 2010). En este sentido la generación de energía es un uso que tiene impactos potenciales en la cantidad y calidad del agua disponible.

**Tabla 1.1. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2013
(CONAGUA, 2014)**

Centros urbanos (descargas municipales)	
Aguas residuales	7.26 miles de hm ³ /año (230.2 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.66 miles de hm ³ /año (211.1 m ³ /s)
Se tratan	3.34 miles de hm ³ /año (105.9 m ³ /s)
Se generan	1.96 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.8 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.73 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Usos no municipales, incluyendo a la industria	
Aguas residuales	6.63 miles de hm ³ /año (210.26 m ³ /s)
Se tratan	1.91 miles de hm ³ /año (60.72 m ³ /s)
Se generan	9.95 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.30 millones de toneladas de DBO ₅ al año

Nota: DBO₅, - corresponde al parámetro de calidad 'Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días'

La demanda de electricidad y agua potable crece cada día por lo que es necesario proponer alternativas para un manejo sustentable de estos recursos.

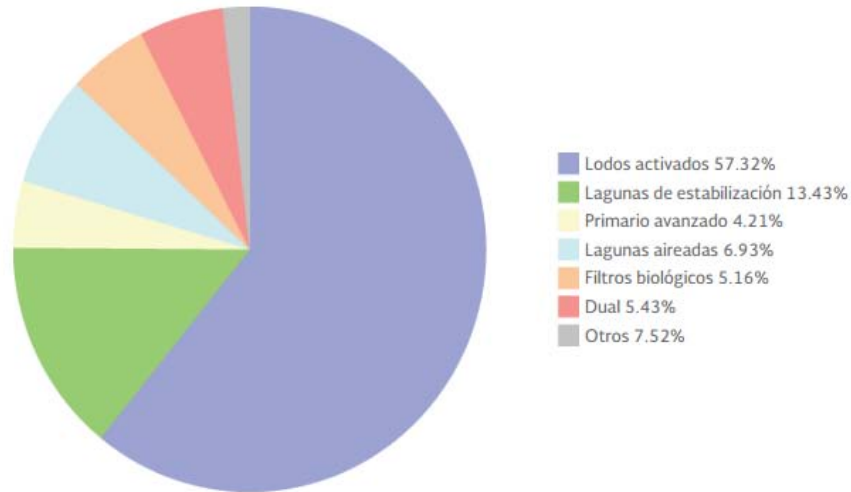


Figura 1.1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado al 2013 (CONAGUA, 2014)

La transformación y consumo de energía es una cadena, la extracción y procesamiento de combustibles y la generación eléctrica presentan los mayores consumos y fuentes de contaminación del agua. Aproximadamente el porcentaje de uso de agua para el sector energético alcanza 6% y el consumo de energía eléctrica para diversos usos del agua es del 7%. Queda claro que el sector energético necesita agua para operar y el suministro de agua potable junto con el saneamiento no pueden operar sin energía (Jiménez y col., 2010).

“El agua tiene un vínculo significativo con la energía pues por un lado se emplea energía para el abasto y tratamiento de agua, y por otro lado el agua interviene virtualmente en todas las fases de generación de energía. En la producción de combustibles se utiliza en la extracción de combustibles fósiles, el cultivo de biocombustibles y en el procesamiento y refinación. Es empleada además en la generación de vapor y el enfriamiento de las centrales térmicas (combustibles fósiles, bioenergía, geotérmicas, nucleares y algunos tipos de centrales solares), que representan más del 90% de la generación de energía mundial. Un 2.4% de la energía mundial es generada a través del agua contenida en presas mediante centrales hidroeléctricas” (CONAGUA, 2014). Las fuentes del suministro total de energía al 2012 en México se observan en la **Figura 1.2** (CONAGUA, 2014).

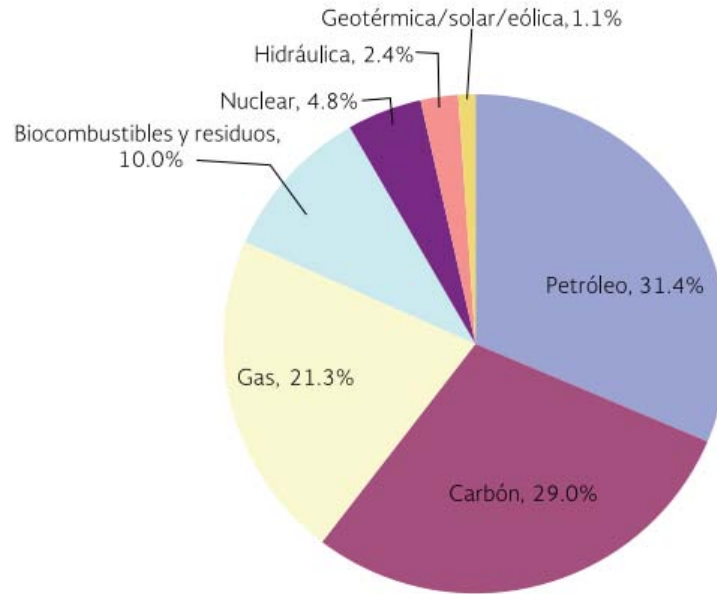


Figura 1.2. Fuentes de suministro de energía, 2012 (CONAGUA, 2014)

La creciente demanda de energía en el mundo y el uso excesivo de combustibles fósiles para satisfacer esa demanda han provocado serios problemas de contaminación ambiental y contribuyen al calentamiento global de la Tierra. En consecuencia, numerosos grupos de investigación a nivel mundial se enfocan en la búsqueda de fuentes alternativas de energía que contribuyan de manera sustentable a mitigar dicha demanda. Una de las consideraciones importantes en la búsqueda de fuentes alternativas es la liberación de CO₂ a la atmósfera, ya que algunas de ellas, como por ejemplo el proceso de combustión de los hidrocarburos contenidos en el petróleo, libera grandes cantidades de CO₂, favoreciendo problemas como el calentamiento global. Debido a lo anterior, se busca que las nuevas tecnologías de transformación de energía sean carbono-neutrales, es decir que sólo liberen el carbono recién fijado a la atmósfera (Falcón y col., 2009; Strik y col., 2010). En Costa Rica, por ejemplo, existe una Norma Nacional de Carbono Neutralidad (INTE -1201-06:2011) que define la siguiente ecuación para la carbono neutralidad: Emisiones totales - Reducciones - Compensaciones = 0 emisiones de efecto invernadero.

Esta norma aplica a todo tipo de organización y define requisitos para establecer un Sistema de Gestión sobre Carbono Neutralidad. Las “0 emisiones” se verifican por medio de una entidad acreditada (DCC, 2012). Acciones como esta se están llevando a cabo en todo el planeta y es importante colaborar con cada granito de arena para reparar y frenar el deterioro del ambiente.

Este trabajo de tesis contribuye al proyecto en desarrollo que se lleva a cabo en los Laboratorios 301-302-303 del Conjunto E de la Facultad de Química de la UNAM, en el que se investiga, a escala de laboratorio, la implementación de un sistema natural para el tratamiento de agua residual sintética (ARS) y la generación simultánea e *in situ* de electricidad. Para llevar a cabo este proyecto se utilizó un sistema instalado con los elementos de una celda de combustible microbiana vegetal (en adelante CCMV). Las celdas de combustible microbianas vegetales consisten en un dispositivo bio-electroquímico compuesto por los elementos de una celda de combustible microbiana incluyendo una especie vegetal. Los elementos internos de una celda de combustible microbiana son un ánodo y un cátodo. Éstos se unen por medio de un circuito eléctrico externo conformado por un cable de algún material conductor como el cobre y una resistencia eléctrica externa. La raíz de la planta está en contacto con el ánodo en donde los microorganismos electroquímicamente activos ahí albergados, reciben la materia orgánica proveniente de la raíz de la planta. Los microorganismos se encargan de oxidar la materia orgánica liberando electrones, protones y oxígeno al medio. Los electrones se transportan hasta el cátodo por medio del circuito eléctrico externo y los protones, atraviesan el medio de soporte de la planta hasta la superficie. Ahí se encuentra el cátodo; en ese extremo el oxígeno se une a dos moléculas de hidrógeno para producir agua. De esta manera se produce una corriente eléctrica (Salinas-Juárez y col., 2016, Strik y col., 2010).

En trabajos previos se demostró que las CCMV producen electricidad *in situ*. Por ejemplo: en Europa occidental se obtuvieron resultados de 67 mW/m^2 (Strik y col., 2011). Sin embargo, los estudios no incluyen la utilización de agua residual como

electrolito. Por tanto, la producción de electricidad en este sistema incluyendo agua residual es un área de oportunidad para la investigación. Si se considera que en la CCMV se llevarán a cabo los mecanismos de degradación que ocurren en un humedal artificial (que se verá en el capítulo siguiente), el tratamiento de agua residual sintética, ARS, a escala de laboratorio se realizaría por medio de estos mecanismos.

En el caso anterior es importante evaluar cómo influyen las características físicas (dimensiones, materiales, ubicación) y de operación (pH, temperatura y conductividad eléctrica) de la celda en la remoción de materia orgánica y cómo influye la calidad del agua residual sintética en la producción de electricidad, es decir, de qué manera afecta el ARS a la generación de electricidad

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar si una celda de combustible microbiana vegetal tiene el potencial de remover contaminantes disueltos medidos con la demanda química de oxígeno de un agua residual sintética.

1.1.2. Objetivos específicos

- Estudiar el efecto de la presencia de agua residual sintética en una CCMV sobre la generación de electricidad
- Evaluar los efectos de la planta y del inóculo en la remoción de materia orgánica del agua residual
- Determinar los posibles mecanismos de remoción de materia orgánica del agua residual con base en los parámetros evaluados
- Evaluar la generación de electricidad
- Determinar la influencia del pH y la conductividad eléctrica sobre la remoción de materia orgánica del agua residual

1.2. Condiciones de experimentación

El sistema experimental se construyó a escala de laboratorio, se alimentó con agua residual sintética y se mantuvo en funcionamiento bajo condiciones ambientales no controladas de temperatura, iluminación y humedad.

Se realizó la medición de voltaje en circuito abierto, VCA y las curvas de descarga con una caja de resistencias variables y con multímetros digitales.

La medición del contenido de materia orgánica se hizo por medio de la determinación de la demanda química de oxígeno, empleando la técnica analítica por el método titulométrico establecida en los métodos estándar para el análisis de aguas.

Se utilizó *Phragmites australis* (carrizo) como especie vegetal y grafito en polvo como material de empaque.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se abordarán las bases teóricas y los antecedentes sobre los que se realizó la presente investigación, enfocado en la evaluación del posible tratamiento de agua residual (remoción de materia orgánica) y la producción de electricidad en celdas de combustible microbianas vegetales

2.1. Aguas residuales y tecnologías para pequeños sistemas de tratamiento

La Norma Oficial Mexicana NOM – 002 - Semarnat – 1996 define a las aguas residuales (en adelante AR) como las aguas de composición variada provenientes de descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-002-SEMARNAT-1996).

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden clasificarse como físicos, químicos y biológicos. Los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos biodegradables y los organismos patógenos son los de mayor importancia y, por ello, la mayoría de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales son diseñadas para su remoción (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Las principales características físicas de un agua residual, son su contenido de sólidos, distribución de partículas por tamaño, turbiedad, color, olor, temperatura, pH, densidad y conductividad eléctrica (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Los constituyentes químicos de las aguas residuales son con frecuencia clasificados en inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos incluyen elementos individuales como: calcio (Ca), cloro (Cl), hierro (Fe), cromo (Cr) y zinc (Zn) y una amplia variedad de compuestos como nitratos (NO_3^-) y sulfatos (SO_4^{2-}), nutrientes, constituyentes no metálicos, metales y gases. Entre los nutrientes inorgánicos

están el amoníaco libre, el nitrógeno orgánico, nitritos, nitratos, fósforo orgánico y fósforo inorgánico.

“Los constituyentes orgánicos de mayor interés en las aguas residuales se clasifican como agregados e individuales. Los constituyentes orgánicos agregados comprenden un número de compuestos que no pueden ser distinguidos en forma separada. La materia orgánica en aguas residuales se constituye básicamente de proteínas (40 o 60 por ciento), carbohidratos (25 a 50 por ciento), grasas y aceites (8 a 12 por ciento). Además de proteínas, carbohidratos, grasas y aceites, las aguas residuales contienen pequeñas cantidades de un gran número de moléculas orgánicas sintéticas, con estructuras que van desde las más simples hasta las extremadamente complejas” (Crites y Tchobanoglous, 2000).

“La CONAGUA establece que las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, en tanto que las segundas son aquellas descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida” (CONAGUA, 2013).

“Cuando el agua llega a una estación depuradora, pasa por una serie de tratamientos que extraen los contaminantes del agua y reducen su peligro para la salud pública. Las plantas de tratamiento de aguas residuales comúnmente emplean un tratamiento físico o mecánico seguido de un tratamiento bioquímico, químico o físico-químico. El tipo de tratamiento depende de las características del agua contaminada y de su destino final. Un buen número de nuevas tecnologías han sido introducidas para los pequeños sistemas de tratamiento y han hecho posible producir efluentes de la misma calidad o incluso mejor que los producidos por grandes plantas de tratamiento. Ejemplos importantes incluyen el uso de: tecnologías alternativas para la recolección de aguas residuales, tamices de disco rotatorio, procesos de lodos activados, sistemas acuáticos de tratamiento,

humedales artificiales y sistemas de tratamiento en el suelo” (Crites y Tchobanoglous, 2000).

“En general se pueden definir estos procesos a través de la presencia o ausencia de oxígeno disuelto, es decir, de condiciones aerobias o anaerobias, lo que lleva consigo condiciones de fotosíntesis, movilidad o estabilidad de los microorganismos, etc.” (Ferrer y Seco, 2007). Basándose en estas características, se puede establecer una clasificación básica de este tipo de procesos de la forma siguiente:

Los sistemas que incluyen procesos aerobios fundamentales son: lodos activados, lechos empacados, lagunas de oxidación, lagunas aireadas, depósitos de oxidación y humedales. Y por otra parte, el grupo básico referente a los sistemas anaerobios comprende: lagunas anaerobias, digestores y filtros anaerobios. Existe otro grupo que comprende los sistemas que utilizan la fotosíntesis, fundamentalmente las lagunas de oxidación o las lagunas de estabilización (Ferrer y Seco, 2007).

“Por último, los sistemas que utilizan películas de microorganismos sobre grandes superficies que van consumiendo los nutrientes presentes en el agua residual, comprenden los lechos empacados, biodiscos, los filtros anaerobios y las columnas de desnitrificación” (Ferrer y Seco, 2007).

“Otros sistemas mixtos de tratamiento son los que utilizan los suelos y la materia vegetal como consumidores de los nutrientes presentes en las aguas residuales, y como asimiladores de ciertos productos contaminantes, como puede ocurrir con los metales pesados en ciertos tipos de suelos” (Ferrer y Seco, 2007).

Para esta investigación se utilizó un sistema a escala de laboratorio que utiliza una especie vegetal y que aprovecha la acción de los microorganismos presentes en las raíces de las plantas para la remoción de materia orgánica, funcionan como un

humedal por lo que a continuación se hablará sobre humedales y humedales artificiales.

2.2. Humedales y humedales artificiales

“Son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies terrestres cubiertas de agua, sea ésta de régimen natural o artificial, permanente o temporal, estancada o corriente, dulce, salobre o salada, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (UNESCO, 2006). “Los humedales constituyen un eslabón básico e insustituible del ciclo del agua. El mapa nacional de humedales incluye 6,331 humedales y complejos de humedales, cubriendo un 5% de la superficie del país” (CONAGUA, 2013).

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización. De esta forma pueden ser considerados como la parte principal en un tren de tratamiento (Delgadillo y col., 2010). La construcción de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales ha evolucionado desde las primeras investigaciones en Alemania con plantas emergentes, convirtiéndose en una importante tecnología para el tratamiento de efluentes de tanques sépticos, de lagunas de estabilización, en general, de efluentes de tratamiento biológico secundario (Centro Virtual de información del Agua, 2004).

“El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y favorecen la biodegradación de materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos. Los humedales tienen

tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento” (Delgadillo y col., 2010). “La fitodepuración, en este caso, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos. Constituyen “fitosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas” (Delgadillo y col., 2010).

Además de la depuración de aguas residuales, los humedales ofrecen beneficios ambientales agregados como son: crean y restauran nichos ecológicos, generan mejoras en el paisaje, contribuyen en la generación de zonas de amortiguamiento de crecidas de ríos y avenidas, son fuente de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego y aportan ventajas en otras actividades de carácter lúdico y económico (Arias y col., 2003).

2.2.1. Tipos de humedales

Los humedales pueden clasificarse de acuerdo con las características del material vegetal predominante en los lechos (Arias y col., 2003):

“a) Humedales artificiales con macrófitas flotantes. Por ejemplo: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*.

b) Humedales artificiales con macrófitas de hojas flotantes. Por ejemplo: *Nymphaea alba*, *Potamogeton gramineus*.

- c) Humedales artificiales con macrófitas sumergidas. Por ejemplo: *Littorella uniflora*, *Potamogeton crispus*.
- d) Humedales artificiales con macrófitas emergentes. Por ejemplo: *Thypha latifolia*, *Phragmites australis*” (Arias y col., 2003).

“Para el tratamiento de aguas residuales existe la posibilidad de usar diferentes alternativas siempre y cuando las plantas se puedan adaptar a las condiciones ambientales. Sin embargo, las plantas correspondientes al grupo de macrófitas emergentes han demostrado buena capacidad de adaptación y en especial son resistentes a las condiciones ambientales adversas predominantes, cuando se trata de aguas residuales. Una posible subdivisión de estos humedales artificiales plantados con macrófitas emergentes, es de acuerdo con el sentido preferente del movimiento del agua en lo lechos” (Arias y col., 2003):

- a) Sistemas de flujo libre (humedales de flujo superficial): el agua se vierte en un extremo del lecho, fluye al aire
- b) Sistemas de flujo horizontal subsuperficial, fluye debajo del lecho de soporte
- c) Sistemas con flujo vertical, puede ser de flujo libre y subsuperficial pero fluye en sentido vertical por toda el área del humedal. Por ello, su uso es limitado a sistemas pequeños
- d) Sistemas híbridos, una combinación de los de flujo libre o subsuperficial horizontal o vertical

A continuación se exponen las características de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, basados en macrófitas enraizadas emergentes, por ser del tipo que se utilizó en el presente sistema de trabajo.

“Los sistemas de flujo subsuperficial, se caracterizan porque la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo). La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser

de dos tipos: en función de la forma de aplicación de agua al sistema humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical” (Delgadillo y col., 2010).

2.2.2. Acción de los microorganismos en un humedal artificial

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios (Delgadillo y col., 2010).

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes (Delgadillo y col., 2010). La función básica de las bacterias en un humedal artificial es el consumo de materia orgánica y la degradación o la transformación de algunos productos más o menos tóxicos presentes en las aguas residuales. Las bacterias producen enzimas que atacan o digieren múltiples productos y absorben los alimentos del líquido del humedal. Las bacterias presentes degradan productos orgánicos; proteínas, lípidos, almidones o celulosa, así como sus productos de descomposición. Las poblaciones bacterianas, si el medio es favorable, pueden crecer muy rápidamente y transformar así con gran aceleración fuertes cantidades de nutrientes y de otros productos. Las bacterias más frecuentes en las lagunas de estabilización son en gran parte las mismas que pueden aparecer en un humedal artificial (Seoáñez y Angulo, 1997).

2.2.3. Remoción de materia orgánica en humedales artificiales

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aerobia o anaerobia. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica se fija a los sólidos suspendidos o se absorbe en el medio de soporte. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos

a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos o del soporte colocado (Delgadillo y col., 2010).

Todos los microorganismos involucrados en este tipo de proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes como elementos traza. De acuerdo con su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos; en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono. Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente (Delgadillo y col., 2010).

En la degradación aerobia, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aerobios quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aerobios quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. El último proceso es llamado nitrificación. (Delgadillo y col., 2010).

2.3. Fotosíntesis

“El mecanismo de la fotosíntesis es el uso de la energía solar por la clorofila de los organismos fotosintéticos como las plantas o las algas para incorporar el dióxido de carbono y otros componentes inorgánicos a la producción de material celular” (Ferrer y Seco, 2007).

En este proceso se forma oxígeno molecular. Los organismos fotosintéticos son muy importantes en los sistemas biológicos de tratamiento de aguas. Y son, básicamente, algas y plantas acuáticas flotantes o subacuáticas. Estos sistemas biológicos son las lagunas de oxidación, lagunas de estabilización, lagos, humedales artificiales y naturales y todos aquellos sistemas que utilizan una

producción intensa de algas para recuperar los nutrientes o para aprovecharlos (Ferrer y Seco, 2007).

2.4. Análisis de la demanda química de oxígeno, DQO

A través de los años, se han desarrollado diferentes análisis para determinar el contenido de materia orgánica en aguas residuales. En general, los análisis se pueden clasificar en aquellos usados para medir cantidades de materia orgánica agregada compuesta por constituyentes de similares características y los que cuantifican los compuestos orgánicos en forma individual (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Los análisis de compuestos orgánicos agregados se hacen para caracterizar aguas residuales tratadas y no tratadas, para estimar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras. Los métodos de laboratorio comúnmente usados para medir cantidades de materia orgánica (en general mayores a 1 mg/L) en aguas residuales incluyen la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico total (COT) (Crites y Tchobanoglous, 2000).

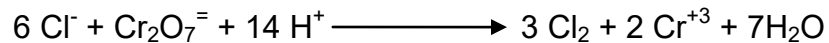
“La demanda química de oxígeno (conocida como DQO), es un parámetro de criterio de la calidad del agua. Es una medida de toda la materia presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada en un medio ácido por un fuerte oxidante como el permanganato o el dicromato y se mide como los miligramos de oxígeno equivalentes a la fracción orgánica disuelta y/o suspendida por litro de disolución (agua residual)” (Durán, 1994).

“Algunos factores de interferencia en el análisis de DQO son (Durán, 1994):

1. Muchos compuestos orgánicos que son oxidados por el permanganato o el dicromato no son bioquímicamente oxidables.

2. Ciertas sustancias inorgánicas como los sulfuros, los sulfitos, los tiosulfatos, los nitritos y el hierro ferroso se oxidan por el dicromato creando un “DQO inorgánico” que falsea el valor final obtenido para el agua residual analizada.

3. Los cloruros pueden interferir con el análisis de la DQO, por lo que deben tomarse provisiones para evitar esta interferencia que provoca valores mucho más altos de la DQO al oxidarse los cloruros por el dicromato”:



“Esta interferencia se evita adicionando HgSO_4 a la mezcla ya que el Hg^{+2} se combina con los cloruros para formar cloruro mercúrico no ionizado. Por otro lado, si no se agrega suficiente sulfato mercúrico, puede dar un dato no confiable. Los métodos estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1992) denominados Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales recomiendan una relación de 10:1 de sulfato mercúrico a cloruros), el exceso de cloruros puede hacer precipitar al catalizador de plata formando cloruro de plata insoluble y dado que el catalizador de plata es esencial para la oxidación de las cadenas lineales de alcoholes y ácidos, también puede obtenerse un valor incorrecto de la DQO” (Durán, 1994).

“El método aprobado por la APHA, AWWA, WPCF (1992) emplea dicromato de potasio como agente oxidante usando como catalizador sulfato de plata y sulfato mercúrico para acomplejar a los cloruros. La muestra y el oxidante se digieren en una solución de ácido sulfúrico usando un tiempo de reflujo de aproximadamente dos horas. El exceso de dicromato se titula con sulfato de ferroso amoniacal. Cabe mencionar que el tiempo de reflujo influye mucho en la reproducibilidad de los resultados” (Durán, 1994).

“Los compuestos orgánicos individuales se determinan para evaluar la presencia de contaminantes prioritarios identificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas del inglés, *U.S. Environmental*

Protection Agency). Muchos de los contaminantes orgánicos prioritarios también se clasifican como *compuestos orgánicos volátiles* (COV). Los compuestos orgánicos volátiles son de gran importancia porque una vez que los compuestos se encuentran en estado gaseoso son mucho más móviles, con lo cual aumenta la posibilidad de ser liberados al ambiente; la presencia de algunos de estos compuestos en la atmósfera puede causar riesgos para la salud pública y contribuyen al aumento de hidrocarburos reactivos en la atmósfera, lo cual puede conducir a la formación de compuestos oxidantes fotoquímicos. Aquellos compuestos orgánicos que tienen puntos de ebullición menor a 100°C y/o una presión de vapor mayor que 1mmHg a 25°C son en general considerados COV” (Durán, 1994).

2.5. Celdas de combustible microbianas

En los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías que se enfocan en la utilización de la energía acumulada en la biomasa de desechos (agua residual, por ejemplo), para ser transformada a otras formas de energía utilizables por los humanos como son: la metanogénesis (CH₄), el biohidrógeno (H₂) y la bioelectricidad. Las celdas de combustible microbianas, conocidas también como CCM, resultan ser una opción prometedora para la generación de electricidad de forma renovable (Falcón y col., 2009).

“Las celdas de combustible fueron descubiertas en 1839 por William Robert Grove, mientras realizaba estudios sobre la electrólisis del agua, al provocar la reacción del hidrógeno con el oxígeno para generar un energético. El término celda de combustible fue introducido en 1889 por Ludwig Mond y Charles Langer, quienes fueron los primeros en construirla, mediante la utilización de aire y gas de carbón industrial. Sin embargo, fue hasta finales de la década de 1960 que la NASA demostró la primera aplicación exitosa de este proceso en sus misiones espaciales Géminis y Apolo, como una forma de proporcionar agua potable a la tripulación y, posteriormente, como sistema de tratamiento y recuperación de energía, a partir de los desechos fisiológicos de los astronautas” (Alzate, 2014).

“En 1999, se demostró que las bacterias podrían ser utilizadas en una celda de biocombustible como un método para la determinación de la concentración de lactato en el agua y la generación de electricidad sostenida por el almidón presente en las aguas residuales industriales” (Alzate, 2014).

“En 2004, se reafirmó con éxito que las aguas residuales domésticas podían ser tratadas a niveles prácticos y generar simultáneamente electricidad, hecho que terminó convirtiéndose en una alternativa de investigación para varios grupos alrededor del mundo” (Alzate, 2014), incluido México.

“Las celdas de combustible microbianas son dispositivos que aprovechan la actividad electroquímica de bacterias específicas para generar electricidad a partir de una fuente de energía renovable. Una celda de combustible microbiana, se conforma por dos compartimentos, en uno de ellos se instala un ánodo y en el otro se aloja un cátodo, estas cámaras son separadas por una membrana de intercambio protónico. Las bacterias electroquímicamente activas crecen en el ánodo y oxidan las moléculas orgánicas o sustrato a dióxido de carbono (CO_2), protones y electrones. Los electrones son transferidos por medio de un circuito eléctrico externo al cátodo. Los protones pasan al área del cátodo en donde el oxígeno es reducido y reacciona con los protones y los electrones en el electrodo para formar agua” (Falcón y col., 2009).

“El agua es uno de los elementos básicos para la existencia de vida, pues gracias a ella es posible realizar todos los procesos biológicos; ninguna actividad humana se puede llevar a cabo sin ella. Durante siglos, el agua ha sido considerada recurso inagotable, por lo que no ha sido administrada con cuidado, lo que la ha convertido en un bien escaso, incluso, en zonas donde antes no lo era” (Alzate, 2014).

2.6. Celdas de combustible microbianas vegetales, CCMV

Las celdas de combustible microbianas vegetales consisten en un dispositivo bioelectroquímico compuesto por los elementos de una celda de combustible microbiana y una especie vegetal. Los elementos internos de una celda de combustible microbiana son un ánodo y un cátodo; éstos se unen por medio de un circuito eléctrico externo conformado por un cable de algún material conductor como el cobre y una resistencia eléctrica externa. La raíz de la planta se aloja cercana al ánodo en donde los microorganismos electroquímicamente activos ahí albergados, reciben la materia orgánica proveniente de la raíz de la planta.

Dependiendo de la especie de planta, de su edad y de las condiciones ambientales se puede transferir hasta un 60% del carbono fijado en las hojas, a las raíces. La raíz de la planta es un sistema que produce y libera diferentes tipos de compuestos orgánicos en el suelo como por ejemplo: exudados (glúcidos, ácidos orgánicos, etc.), secreciones (carbohidratos poliméricos y enzimas), lisados (materiales de células muertas) y gases (etileno, C_2H_4 y dióxido de carbono, CO_2). Los microorganismos se encargan de oxidar la materia orgánica liberando electrones, protones y oxígeno al medio. Los electrones se transportan hasta el cátodo por medio del circuito eléctrico externo y los protones atraviesan el medio de soporte de la planta hasta la superficie en donde se encuentra el cátodo. De esta manera se produce una corriente eléctrica (Strik y col., 2010).

Un multidisciplinario consorcio europeo de investigación (www.plantpower.eu) ha estimado que la energía producida por una celda de combustible microbiana vegetal podría llegar a $1,000 \text{ GJ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ (Strik y col., 2010). Se han realizado estudios en los que se coloca el ánodo junto con el sedimento de la planta. En estos estudios, los rizodepósitos de las plantas y la materia orgánica del sedimento están disponibles para la generación de corriente. Un ejemplo de esto es la utilización de un cultivo de plantas de arroz en una celda de combustible microbiano, en la cual resultó en un aumento de siete veces en la potencia de salida en comparación con una celda de combustible microbiana que tenía

únicamente sedimentos. En Japón se han realizado experimentos al aire libre en un campo de arroz. Sin embargo, en esos casos, la potencia de salida no era más alta que la reportada para una celda de combustible microbiana. La diferencia de potencia entre el arrozal y experimentos de celdas de combustible microbianas podrían ser el resultado de una variedad de factores, incluyendo la presencia de plantas de arroz, la composición del sedimento, las especies microbianas presentes y el diseño de la celda (Kaku y col., 2008).

Un estudio en celdas de combustible microbianas vegetales con la especie vegetal *Anglica spartina* logró una corriente eléctrica y una densidad de potencia máxima con un valor promedio de 50 mW/m² en un tiempo de funcionamiento de 33 días (Helder y col., 2010).

Las bacterias más comúnmente halladas en celdas de combustible microbianas vegetales son del género *Desulfobulbus* o la *Geobacteraceae* relacionados a *Natronocella*, *Beijerinckiaceae*, *Rhizobiales* o *Rhodobacter* (Strik y col., 2011). Algunas especies tales como *Geobacteraceae sulfurreducens*, *Shewanella putrefaciens* y *Geobacter metallireducens* son electroquímicamente activas (Kim y col., 2008).

A continuación, después de estos fundamentos, se presenta la metodología para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación.

3. Metodología

En este capítulo se verá cómo se construyó el sistema experimental y cómo se realizó su operación

3.1. Configuración del sistema experimental

Inicialmente se planteó un sistema con diez reactores o celdas, cada uno de los reactores se diferenciaron por su composición ya que algunos tenían planta y otros no, algunos incluían inóculo y otros no, algunos eran alimentados con agua residual sintética (ARS) y otros con solución nutritiva (SN). Las diferencias, denominación y constitución de las celdas se muestran en la **Tabla 3.1**. De las diez celdas se instalaron 8 (1 PARSI, 3 PARS, 4 PSN, 5 ARSI, 7 ARS, 8 ALL y 9 SN, 10 RT), el reactor testigo (RT) que se muestra en la **Figura 3.1** se armó con el fin de tener un referente para la vitalidad de la planta y únicamente contiene solución nutritiva (SN) y la planta de carrizo. A diferencia de todas las demás celdas instaladas ésta no contiene electrodos. Las otras dos celdas (PI, planta con inóculo e I, inóculo) no se instalaron ya que no contendrían fuente de carbono y era probable que la planta y el inóculo murieran.



Figura 3.1. Reactor testigo (RT)

Tabla 3.1. Diferencia, denominación y constitución de las celdas

No.	Fuente externa de carbono (ARS)	Presencia de planta	Inóculo	Nombre
1	✓	✓	✓	PARSI
2	x	✓	✓	PI
3	✓	✓	x	PARS
4	x	✓	x	PSN
5	✓	x	✓	ARSI
6	x	x	✓	I
7	✓	x	x	ARS
8	x	x	x	ALL
9	x	x	x	SN
10	x	✓	x	RT

PARSI, reactor con Planta, Agua Residual Sintética e Inóculo; PARS, reactor con Planta, Agua Residual Sintética; PSN, reactor con Planta y Solución Nutritiva; ARSI, reactor con Agua Residual Sintética e Inóculo; ARS, reactor con Agua Residual Sintética; ALL, reactor con Agua de la LLave; SN reactor con Solución Nutritiva, RT Reactor Testigo. Nota: El sombreado indica los reactores que se mantuvieron en operación

3.1.1. Diseño de las celdas

Las celdas o reactores consistieron en recipientes cilíndricos de cloruro de polivinilo de 17.5 cm de altura y 15 cm de diámetro, los cuales tenían un puerto de muestreo en la parte inferior del reactor como se muestra en la **Figura 3.2**. También contenían a los electrodos, que se conformaron con dos piezas de fieltro de grafito de 6 mm de espesor y con diámetro de 15 cm. Estos fieltros estaban unidos a un cable de cobre que funcionaba como colector de corriente. El medio de soporte para la planta, que formaba parte del ánodo, era grafito en granillo (3 mm de diámetro). La planta que se utilizó es comúnmente conocida como carrizo (*Phragmites australis*). En las **Figuras 3.3**. y **3.4**. se muestra la configuración física general de las celdas.



Figura 3.2. Reactor de cloruro de polivinilo con puerto y pipas de muestreo

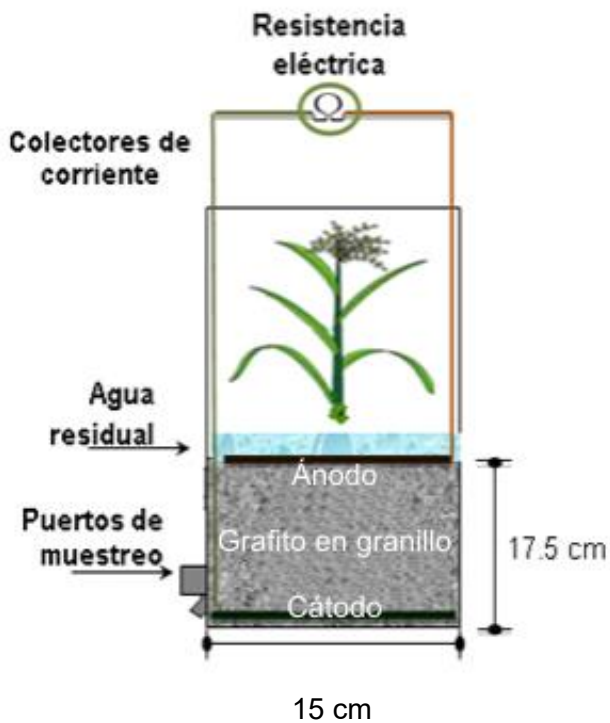


Figura 3.3. Configuración física en esquema de las celdas



Figura 3.4. Configuración física general de las celdas

3.1.2. Composición del agua residual sintética y de la solución nutritiva

El agua residual sintética (ARS) empleada para alimentar las celdas se formuló con agua de la llave adicionada con acetato de potasio como fuente de carbono, sulfato de amonio como fuente de nitrógeno y azufre, fosfato monobásico de potasio como fuente de potasio y fósforo, sulfato heptahidratado de magnesio como fuente de magnesio. Lo anterior se calculó considerando los valores promedio de los contaminantes que conforman el agua residual doméstica no tratada (Masters y Ela, 2008). La **Tabla 3.2** muestra la composición del ARS empleada en la presente investigación. Para el caso de las celdas que se alimentaron con ARS, cada tercer día se retiró el agua de las celdas e inmediatamente se llenaron con ARS recién preparada, teniendo así un tiempo de residencia hidráulico de tres días, TRH = 3d.

Tabla 3.2. Composición del agua residual sintética, ARS y la solución nutritiva, SN

Elemento	Cantidad para ARS (mg/L)	Compuesto adicionado	Cantidad para SN (mg/L)
Carbono (C), mg/L	300	Acetato de potasio	0
Nitrógeno (N), mg/L	20	Sulfato de amonio	20
Potasio (K), mg/L	10	Fosfato monobásico de potasio	10
Magnesio (Mg), mg/L	1	Sulfato heptahidratado de magnesio	1

La solución nutritiva (SN), **Tabla 3.2**, se formuló con agua de la llave adicionada con sulfato de amonio como fuente de nitrógeno y azufre, sulfato heptahidratado de magnesio como fuente de magnesio y fosfato monobásico de potasio como fuente de potasio y fósforo. Para el caso de los reactores alimentados con SN, cada tercer día se retiró el agua de las celdas y se volvían a llenar con SN recién preparada, teniendo el mismo TRH.

3.1.3. Inóculo

El inóculo es cualquier agente biológico que ayuda a la introducción de microorganismos en el sistema (Zarco, 2013). En esta investigación el inóculo consistió en un lodo residual proveniente de un reactor anaerobio. Contenia $60,975 \pm 1143$ mg/L de sólidos totales; $42,660 \pm 743$ mg/L de sólidos volátiles totales y $43,413 \pm 1,114$ mg/L de sólidos suspendidos volátiles, lo que indicó la presencia de biomasa en el lodo.

En el caso de las celdas PARSÍ y ARSÍ, se colocaron 150 mL de este lodo sobre la superficie del ánodo de las celdas seleccionadas y sobre de éste, se colocó el grafito en granillo junto con la planta de carrizo para el caso de la celda PARSÍ. Para el caso de la celda ARSÍ solamente se colocó el grafito en polvo. Posteriormente, a ambas se les colocó el cátodo.

3.2. Construcción del sistema experimental

3.2.1. Construcción de los reactores

Como ya se mencionó, se utilizaron tubos de cloruro de polivinilo de 15 cm de diámetro y se cortaron a 17.5 cm de altura. En una de las bases del cilindro se colocó una tapa de cloruro de polivinilo. Se perforó el cilindro cerca a la parte inferior del recipiente formado para colocar ahí el puerto de muestreo (2 cm encima del fondo), que consistió en un tubo de vidrio que traspasa el interior del cilindro hacia el exterior en donde se le colocó un trozo de manguera. De este puerto de muestreo se obtenía la muestra para hacer la determinación de la demanda química de oxígeno. Todos los lugares que pudieran dar pie a una fuga se sellaron con pegamento y posteriormente se verificó que no hubiera fugas en los recipientes.

3.2.2. Pipas de muestreo

Las llamadas pipas de muestreo permitían introducir en el reactor, el electrodo de pH, el sensor de temperatura y la celda conductimétrica. Como se muestra en la **Figura 3.2**, las pipas de muestreo eran tubos de cloruro de polivinilo de 2.5 cm de diámetro y 20 cm de altura, estaban perforados para permitir el paso del agua presente en la celda y estaban recubiertos por una capa de algodón, una capa de gasa y una malla de plástico, para evitar el paso del grafito en granillo hacia el interior de las pipas de muestreo. Estas pipas se colocaron tocando el fondo de los reactores.

3.2.3. Ánodo y cátodo

El ánodo y el cátodo estaban formados por fieltro de grafito de 6 mm de espesor, con diámetro de 15 cm. Éstos estaban unidos, a un colector de corriente (cable de cobre, calibre número 12) que cierra el circuito eléctrico como se muestra en la **Figura 3.6**. El ánodo se colocó a 2 cm de altura del reactor medido de abajo hacia arriba y el cátodo se colocó a 12 cm de altura del reactor.



Figura 3.5. Colector de corriente unido al ánodo y al cátodo

3.2.4. Planta y medio de soporte

El medio de soporte para la planta, que formó parte del ánodo es grafito en granillo de 3mm de diámetro (Luken, Tecnología Química, S.A. de C.V). El reactor se llenó hasta una altura de 2 cm con el grafito en granillo como se muestra en la **Figura 3.6. (A)**.



(A)



(B)



(C)

Figura 3.6. (A) Soporte de grafito en granillo dentro del reactor, (B) Planta *Phragmites australis* comúnmente conocida como carrizo, (C) Celda completa vista desde arriba

Posteriormente, se colocó el ánodo y sobre éste la planta comúnmente conocida como carrizo (*Phragmites australis*) (**Figura 3.6. (B)**). Esta planta fue tomada de las plantas que se tienen en cubetas y a las que también se les dosifica con SN para adaptarlas al ambiente circundante.

Por último, sobre el grafito en granillo rodeando la planta y las pipas de muestreo se colocó el cátodo, quedando así la celda completa como se muestra en la **Figura 3.6. (C)**. Una vez instaladas las celdas se les agregó el agua correspondiente a un volumen de 550 mL aproximadamente, que es el volumen de agua necesario para llegar al cátodo.

3.3. Operación del sistema

3.3.1. Plan de muestreo y seguimiento de parámetros

A cada uno de los seis reactores se les dio seguimiento haciéndoles medición de pH, temperatura (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), voltaje en circuito abierto, VCA (mV) y cada tercer día se tomaba una muestra de 30 mL de agua a cada uno de los reactores para hacer el análisis de concentración de materia orgánica medida con la demanda química de oxígeno (DQO).

3.3.2. Técnicas analíticas

La técnica analítica utilizada para la determinación de la DQO fue la de refluo cerrado, método titulométrico tomada de los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA-WPCF, 1992). Los residuos producidos por este análisis se almacenaron y posteriormente se entregaron a la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, UGA, para su tratamiento y disposición controlada (Anexo A-5).

Diariamente se llevó a cabo el registro del voltaje en circuito abierto utilizando un multímetro BK *Precision* (EEUU). Los parámetros de temperatura, conductividad eléctrica y pH se midieron con un equipo de campo de la marca *Conductronic PC 18* (México). Como ya se conoce y se sigue estudiando, existen microorganismos capaces de transformar la materia orgánica y organismos que, además, generan

electricidad. Para corroborar la existencia de microorganismos en los sistemas de este estudio se prepararon muestras del ánodo, cátodo y grafito en granillo contenidos en cada una de las celdas. Las muestras se mandaron a analizar por espectroscopía electrónica de barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés) a la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) del Edificio E de la Facultad de Química. Se informó por el personal que realizó esta fase de la investigación que el equipo era marca JEOL JSM-5900LV.

3.4. Análisis estadístico

Se utilizó el programa *Minitab 15* para saber si los resultados de remoción y de voltaje en circuito abierto presentaban diferencia significativa, por el efecto de la composición de los reactores, por medio de una prueba de estadística no paramétrica, llamada prueba de Friedman. Esta prueba se utiliza para comparar las distribuciones de mediciones para k tratamientos (siete reactores) diseñados en n bloques (55 días de observación) usando un diseño aleatorizado de bloques (Devore, 2008).

3.5. Realización de micrografías

El factor fundamental, tanto para la producción de electricidad como para la depuración de las aguas residuales son los microorganismos que proliferan dentro de los reactores. Por esta razón se tomaron micrografías a muestras del contenido de los reactores para observar los organismos que proliferaban en ellos. Se tomaron las muestras al azar de partículas del ánodo y del cátodo así como del grafito usado como soporte en los reactores. Las micrografías se hicieron como un estudio preliminar, ya que su realización no era un objetivo de esta investigación.

Se tomaron 21 muestras a las cuales se les aplicó un tratamiento especial (**Anexo A-3**) para microscopía electrónica de barrido (bacterias), el cual incluye un secado a punto crítico para lo que las 21 muestras se llevaron al Instituto de Biología de la

UNAM y, con la ayuda académica de la Maestra en Ciencias Berenit Mendoza Garfias, se realizó el tratamiento. Una vez que se tenían las muestras preparadas se mandaron al Laboratorio de Microscopía de la USAI-FQ (Unidad de Servicios y Apoyo a la Investigación, Edificio de Ingeniería Química, Conjunto E, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria) en donde se obtuvieron 42 micrografías: 6 de la celda PARSI (planta, agua residual sintética e inóculo), 6 de la celda PARS (planta y agua residual sintética), 4 de la celda PSN (planta y solución nutritiva), 6 de la celda ARSI (agua residual sintética e inóculo), 6 de la celda ARS (agua residual sintética), 8 de la celda ALL (agua de la llave) y 6 de la celda SN (solución nutritiva).

4. Resultados y discusión

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en cada uno de los siete reactores para los parámetros de voltaje en circuito abierto (mV), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), los resultados del análisis de concentración de materia orgánica, el análisis estadístico viendo los reactores control, así como las micrografías tomadas

4.1. Remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO

En la **Figura 4.1** se observa la remoción obtenida en los reactores 1 PARSI, 3 PARS y 5 ARSI en función del tiempo. En promedio se obtuvo 83% en el reactor 1 PARSI, 84% en 3 PARS y 84% en 5 ARSI. La gráfica no muestra los resultados del reactor 7 ARS porque la remoción presenta una variación amplia, alcanzando un promedio de 37% con una desviación estándar de 33%. Esto se atribuye a que no hay microorganismos suficientes o capaces de degradar la materia orgánica suministrada en el ARS. En las micrografías 23 a 28 se observan microorganismos en el ánodo y en el cátodo, pero no se aprecian en el empaque, lo que podría indicar que al no haber inóculo ni planta en este reactor, los microorganismos que estuvieron presentes provenían del ambiente pero no fueron suficientes para degradar toda la materia orgánica. En la **Figura 4.2** se observan los resultados promedio de materia orgánica medida como DQO para el influente ARS y para el efluente de los reactores 5 ARSI, 1 PARSI, 3 PARS y 7 ARS. La barra roja indica el valor de DQO del influente que es agua residual sintética y las barras inferiores corresponden al efluente de los reactores mencionados en orden de mayor a menor valor de DQO. Se observa que el valor promedio del reactor 5 ARSI obtuvo la menor concentración de DQO con $50.88 \text{ mgO}_2/\text{L}$, esto puede deberse a la presencia de los microorganismos provenientes del inóculo que cumplen con la función de degradar la materia orgánica y que al no incluirse en el ARS, no hubo degradación en el reactor. Finalmente, se atribuye la remoción de la materia orgánica, principalmente, a la actividad metabólica de los microorganismos presentes en las celdas (Liu y col., 2014).

Tanto en la **Figura 4.1**, como en la **Figura 4.2**, se muestran los resultados obtenidos de los reactores que se alimentaron con ARS ya que al contener materia orgánica en el influente, es en ellos en donde se observa una remoción, a diferencia de los reactores en los que se utilizó agua de la llave o solución nutritiva (4 PSN, 9 SN y 8 ALL). Como se aprecia en la **Figura 4.3**, se graficaron los valores promedio de los resultados obtenidos del análisis de DQO para los influentes y efluentes de las celdas 4 PSN, 9 SN y 8 ALL. Los valores de DQO de los efluentes son mayores a los valores de DQO de los influentes. En este caso no se buscaba la remoción de la materia orgánica sino más bien, hacer el análisis de lo que sucedía con la poca materia orgánica en estos reactores, la que se vio incrementada debido a la exposición al aire libre, a la presencia de la planta y a la posible inclusión de polvo de grafito en la muestra. La función de estos reactores es aportar información sobre parámetros que puedan estar interviniendo para el objetivo de este proyecto.

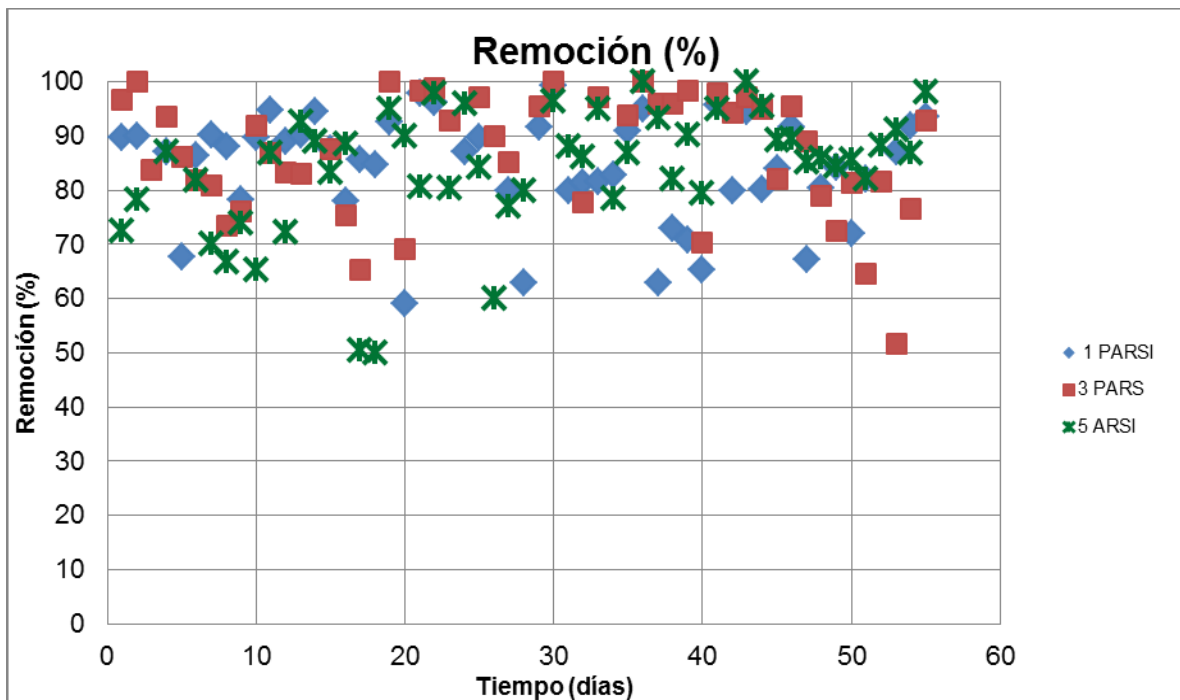


Figura 4.1 Gráfico que muestra la remoción de los reactores 1 PARS, 3 PARS y 5 ARSI en función del tiempo

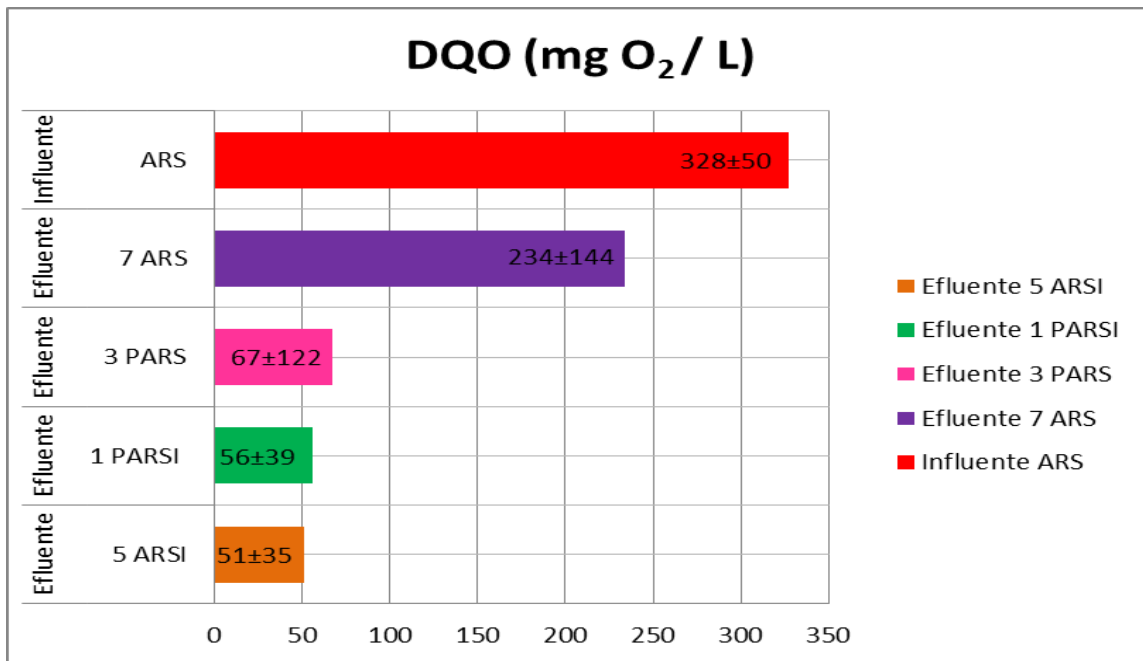


Figura 4.2. Gráfico de valores promedio de la materia orgánica medida como DQO, mg/L, para los reactores 5 ARSI, 1 PARS, 3 PARS y 7 ARS

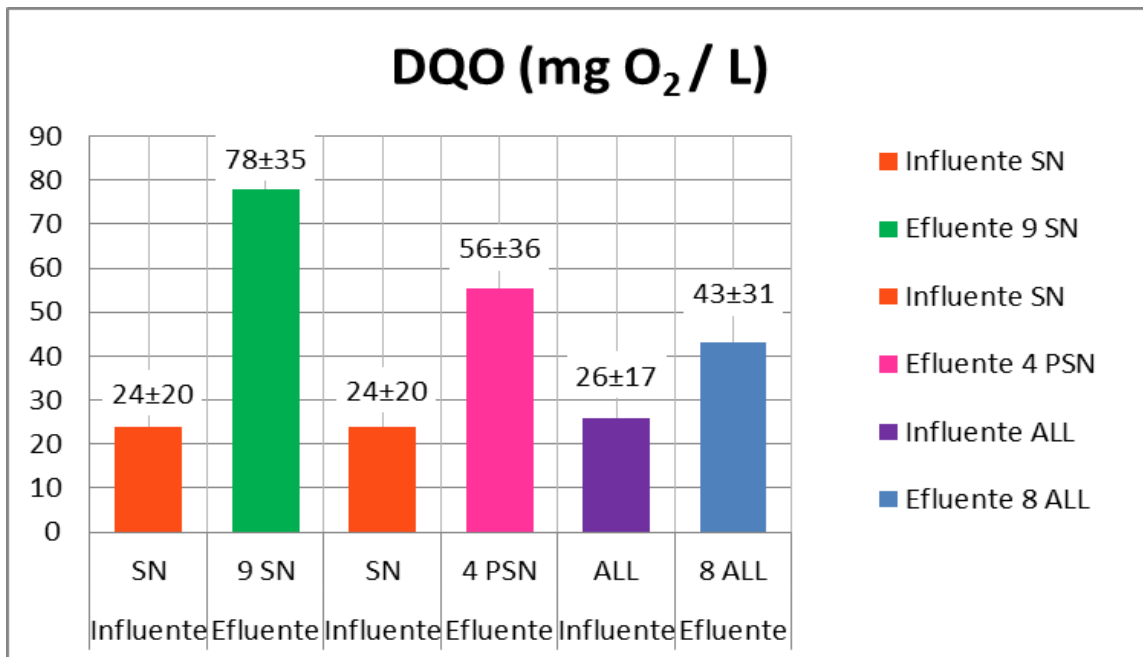


Figura 4.3. Gráfico que muestra los valores promedio de DQO del influente y efluente, mg/L, de las celdas 9 SN, 4 PSN y 8 ALL (Reactores sin fuente externa de carbono)

En el **Anexo A-1** se presentan los datos obtenidos ya en porcentajes de los siete reactores para 55 días, de los 202 días de operación. Se incluyeron estos días porque el análisis de la DQO se realizó sólo para estos 55 días, con el objetivo de minimizar reactivos y producción de residuos que son altamente contaminantes (**Anexo A-5**).

4.2. Efecto de la planta y del inóculo en la remoción de materia orgánica del agua residual sintética

Como se observa en la **Figura 4.4**, las celdas que contenían ARS, con o sin planta, fueron capaces de remover materia orgánica la mayor parte del tiempo, como es el caso de la celda 1 PARSI (planta, agua residual sintética e inóculo) que removió en promedio 83% de la materia orgánica presente, la remoción se atribuyó a la presencia de la planta y del inóculo. La celda 3 PARS (planta y agua residual sintética) removió 84% de materia orgánica presente en la celda y esta capacidad de remoción atribuye a la planta y a los microorganismos incluidos en la raíz de ésta. La celda 4 PSN tuvo una remoción promedio del 9% pero se debe considerar que su influente no contenía una carga orgánica alta (23.17 mgDQO/L). El reactor 4 PSN se alimentó con solución nutritiva, por lo tanto, los microorganismos que en él habitaron fueron diferentes de los que estaban en las celdas con ARS (como se verá en las micrografías), además de que la presencia de la planta aumentaba la cantidad de materia orgánica y, al no haber suficientes microorganismos que la degradaran, pudo haber aumentado su concentración (DQO) (**Figura 4.4**). La celda 5 ARSI (agua residual sintética e inóculo) presentó una remoción promedio del 84% y se le atribuye a la actividad metabólica de los microorganismos del inóculo. Los microorganismos aportados por el inóculo y por la planta se encargaron de remover la mayor cantidad de materia orgánica presente; en PARSI y PARS por la planta y los microorganismos y en ARSI, por los microorganismos.

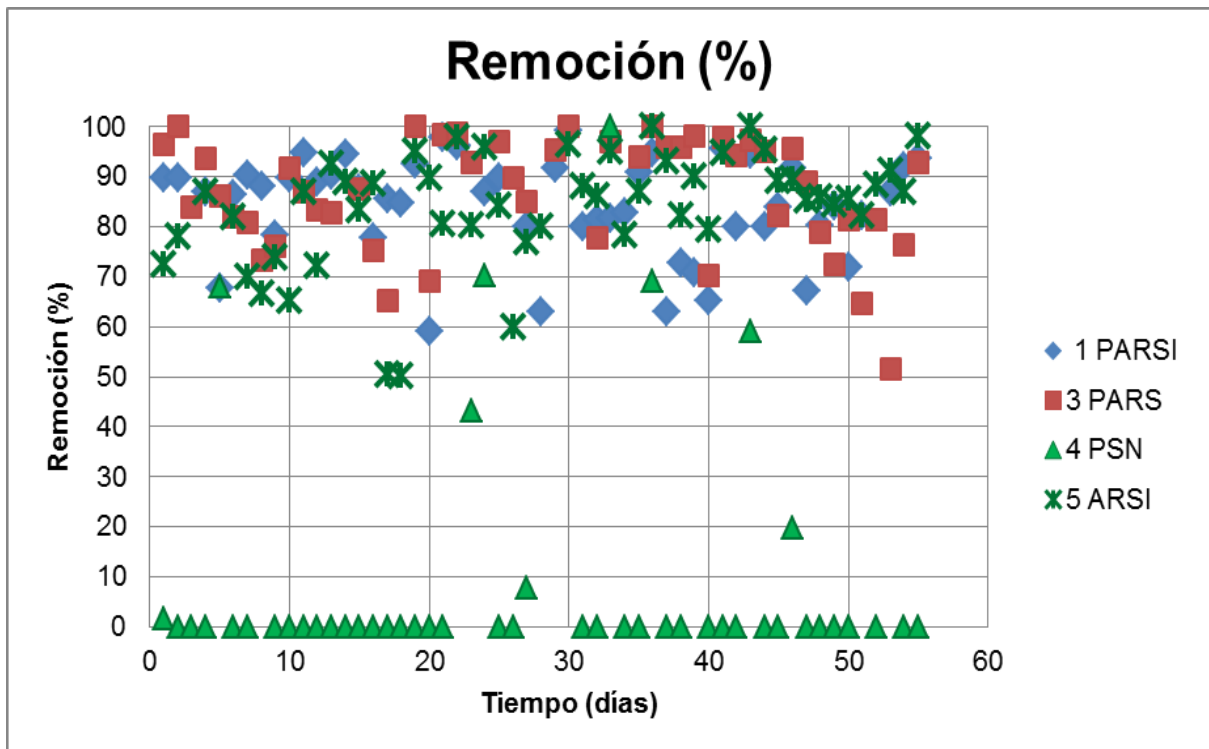


Figura 4.4. Curvas de remoción para las celdas que contienen planta, inóculo y planta e inóculo

4.3. Influencia del pH, conductividad eléctrica y temperatura sobre la remoción de materia orgánica del agua residual

En la **Tabla 4.1** se muestra el promedio de los parámetros de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$). Los valores de temperatura (**Figura 4.5**) de la tabla muestran que las celdas 1 PARSI y 4 PSN se mantuvieron a 16°C , en promedio. Sin embargo, la diferencia entre las demás celdas es mínima.

Para los valores de pH (**Figura 4.6**) se observa que las celdas 1 PARSI, 3 PARS, 5 ARSI y 7 ARS tienen en mismo valor promedio de 7.1. Estas celdas recibían una fuente externa de carbono en el acetato de potasio del agua residual sintética. Las celdas 4 PSN, 8 ALL y 9 SN tienen un pH ligeramente ácido; 6.3, 6.4 y 6.0 respectivamente. Por lo anterior se infiere que la adición de acetato afecta indirectamente el pH en los reactores, dado que el sustrato que se suministra a las celdas altera el tipo de microorganismos presentes (Fang y col., 2013). Es posible que los microorganismos en los reactores con ARS hayan sido diferentes a los

microorganismos de las otras celdas, de modo que esto influyó en el pH registrado.

Para la conductividad eléctrica (**Figura 4.7**) se observa que la celda 3 PARS tiene, en promedio, la conductividad eléctrica más alta con un valor de $1254 \mu\text{S cm}^{-1}$. En orden de mayor a menor le sigue la celda 7 ARS con un valor de $1090 \mu\text{S cm}^{-1}$, la celda 1 PARS con $1084 \mu\text{S cm}^{-1}$, la celda 5 ARSI con $1072 \mu\text{S cm}^{-1}$, la celda 4 PSN con un valor de $795 \mu\text{S cm}^{-1}$, 9 SN presentó $644 \mu\text{S cm}^{-1}$ y, por último, con el valor más bajo, la celda 8 ALL con un valor de $572 \mu\text{S cm}^{-1}$. De acuerdo con estos valores se puede observar que las celdas que son alimentadas con ARS presentaron los valores de conductividad eléctrica más altos seguidos de los de las celdas que son alimentadas con SN y por último el valor más bajo de conductividad eléctrica lo tiene la celda que es alimentada con agua de la llave. Estos resultados son congruentes ya que el agua residual sintética tiene más iones disueltos que la solución nutritiva y ésta a su vez más iones que el agua de la llave. La conductividad eléctrica no tuvo un efecto significativo en la generación de electricidad, sino que los factores que mayormente influyeron en este aspecto son los mencionados a continuación como el tipo de microorganismos y la presencia de materia orgánica.

Tabla 4.1. Valores promedio de temperatura (°C), pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) para cada una de las celdas en operación

	1 PARS	3 PARS	4 PSN	5 ARSI	7 ARS	8 ALL	9 SN
Temperatura (°C)	16±2	15.8±1.8	16±1.9	15.7±2.2	15.8±1.9	15.6±2	15.8±1.8
pH	7.1±0.78	7.1±0.78	6.3±0.63	7.1±0.74	7.1±0.76	6.4±0.52	6.0±0.64
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1084±219	1254±289	795±196	1072±174	1090±170	572±83	644±87

PARSI, reactor con planta, agua residual sintética e inóculo; PARS, reactor con planta, agua residual sintética; PSN, reactor con planta y solución nutritiva; ARSI, reactor con agua residual sintética e inóculo; ARS, reactor con agua residual sintética; ALL, reactor con agua de la llave; SN reactor con solución nutritiva

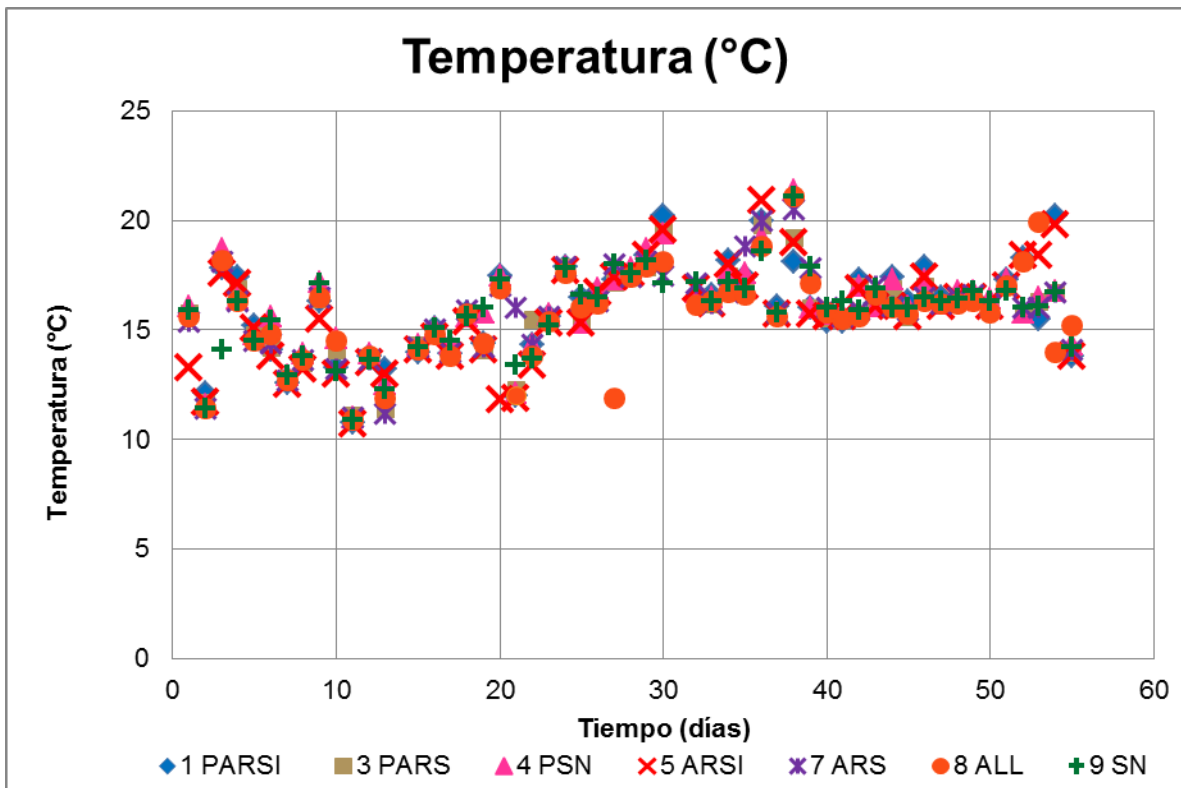


Figura 4.5. Valores de temperatura (°C) en función del tiempo para cada uno de los reactores

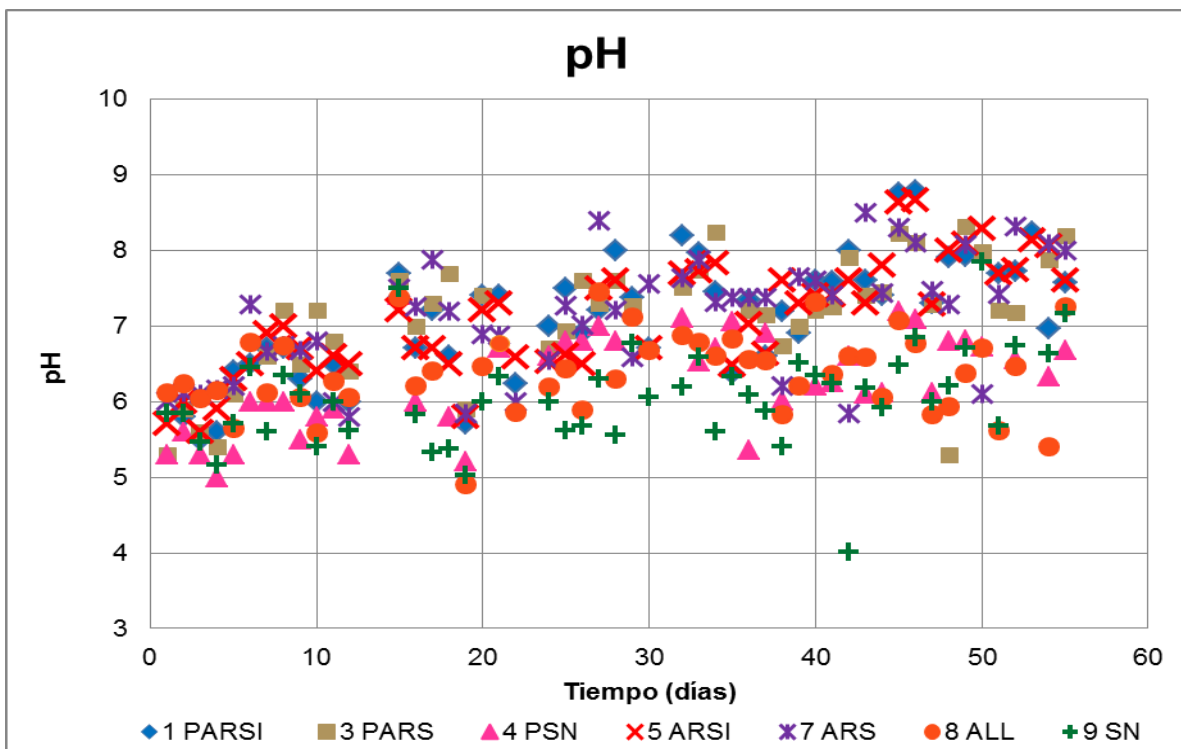


Figura 4.6. Valores de pH en función del tiempo para cada uno de los reactores

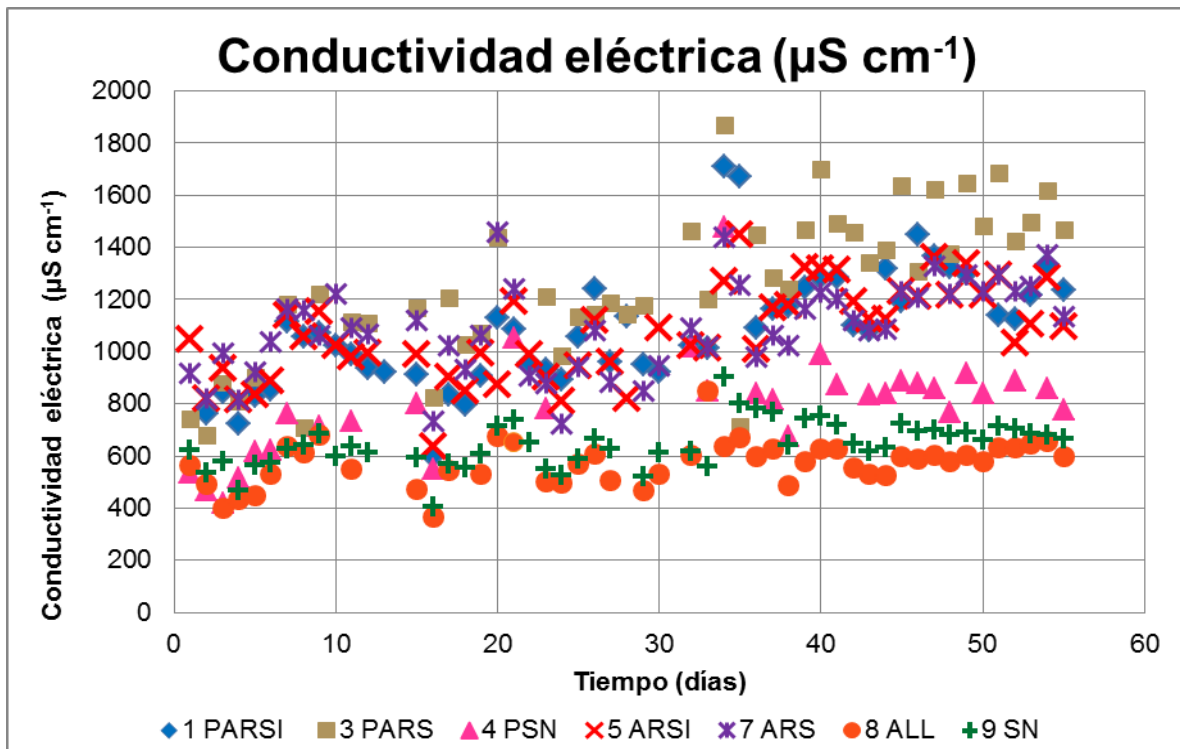


Figura 4.7. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en función del tiempo para cada uno de los reactores

4.4. Generación de electricidad

Para que circule la corriente eléctrica en la celda bio-electroquímica es necesario que los electrodos estén conectados externamente mediante una resistencia eléctrica externa y un conductor eléctrico (cable de cobre), que la disolución electrolítica (ya sea ARS o SN) esté en contacto con ambos electrodos para conducir los iones y que se pueda tener una reacción de transferencia de electrones en cada uno de los dos electrodos.

La carga es conducida por tres procesos diferentes en las distintas partes de la celda (Skoog, 2001):

1. En los electrodos de fieltro de grafito, así como en el cable de cobre que es el conductor externo, los electrones sirven de portadores de carga, moviéndose desde el ánodo hasta el cátodo.
2. En la disolución (ya sea ARS o SN), el flujo de electricidad implica la migración tanto de cationes como de aniones. Por lo tanto, los iones participan en el flujo de electricidad.
3. En las superficies de los dos electrodos tiene lugar un tercer proceso. En este caso una reacción de oxidación o una de reducción proporcionan un mecanismo mediante el cual la conducción iónica de la disolución se acopla con la conducción electrónica del electrodo para proporcionar un circuito completo para el flujo de carga.

En los reactores de este trabajo de tesis fue posible generar voltaje en circuito abierto, que es el potencial eléctrico máximo que produce una celda electroquímica. Los voltajes más altos se registraron en los reactores que proporcionaron una mayor y más estable remoción, es el caso de las celdas 1 PARS (planta, agua residual sintética e inóculo) y 3 PARS (planta y agua residual sintética); las celdas 5 ARS y 7 ARS no muestran resultados de voltaje mayores a 100 mV (**Figura 4.8**), a pesar de las remociones de DQO obtenidas.

Los fenómenos que se mencionan arriba sucedieron en los reactores al momento de cerrar el circuito con una caja de resistencias eléctricas externas, de esta forma se logró registrar corriente y potencia eléctrica en las celdas con mayor voltaje en circuito abierto. La generación de potencia y corriente se registró en 1 PARS y 3 PARS con 21.1 mW/m^2 y 3.4 mW/m^2 respectivamente (considerando el área geométrica del ánodo), estos valores se registraron únicamente para comprobar la generación de una corriente eléctrica.

La planta, el inóculo y la aportación de materia orgánica de una fuente externa (ARS), son factores que intervienen en la generación eléctrica. La celda PARSI, que incluye estos tres factores en su configuración es la que presentó una diferencia significativa superior con respecto a las otras celdas en el análisis estadístico de los resultados.

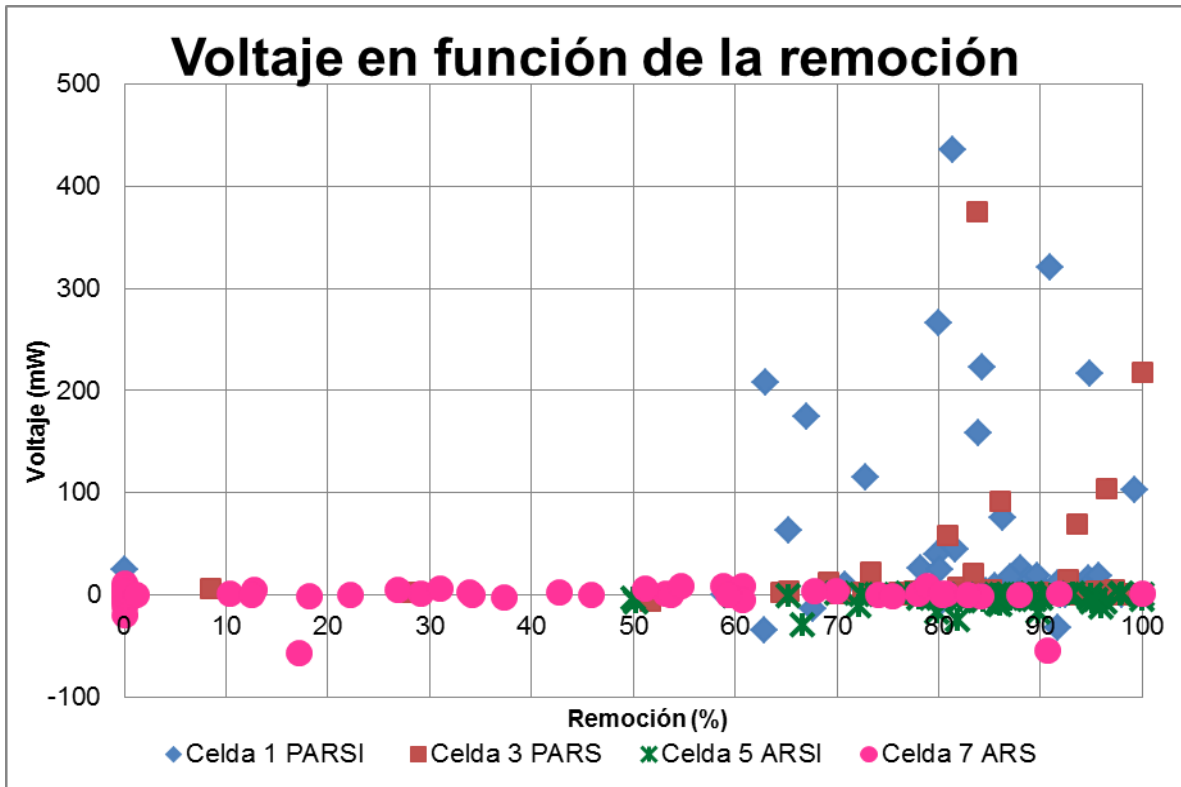


Figura 4.8. Curvas de voltaje en función del tiempo para las celdas que contienen agua residual sintética

4.4.1 Efecto del agua residual sintética sobre la generación de electricidad en una CCMV

La presencia del agua residual sintética tiene influencia en la generación de voltaje en las celdas que contienen planta (**Figura 4.9**). Los voltajes generados en los reactores PARSI y PARS fueron mayores a los generados en PSN en donde no había suministro extra de materia orgánica. En promedio, el voltaje en circuito abierto para PARSI y PARS resultó ser de 54.5 y 21.2 mV. En cambio, PSN produjo 2.9 mV. En los reactores que no contenían planta, aunque se alimentaran

con ARS, la generación de voltaje se ubicó cercano a cero o con voltajes negativos, lo que coincide con investigaciones realizadas previamente (De Schampelaire y col., 2008), en donde se obtuvieron valores negativos en los reactores que no contenían planta.

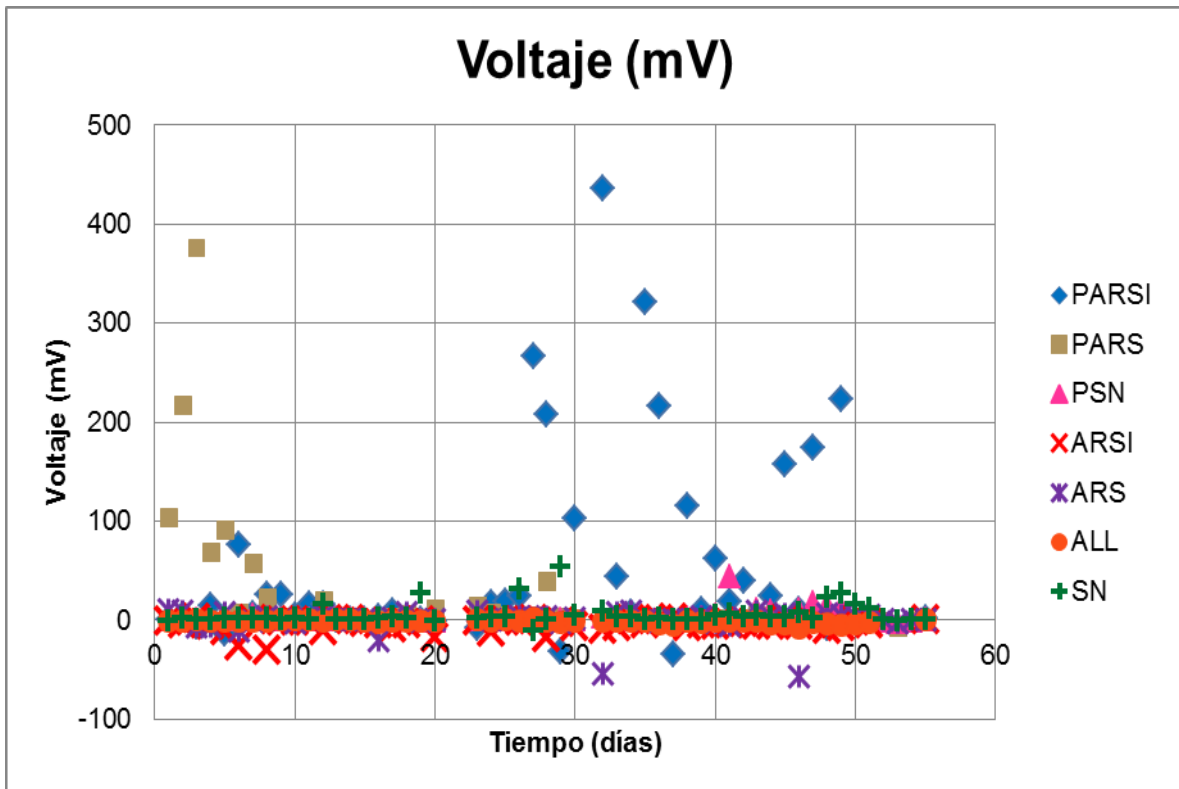


Figura 4.9. Curvas de voltaje en función del tiempo para todos los reactores

4.5. Análisis estadístico

Como se mencionaba en el capítulo anterior, para saber si los resultados de remoción de materia orgánica y de voltaje en circuito abierto presentaban suficiente evidencia para indicar diferencias en la composición de los reactores se utilizó una prueba de estadística no paramétrica de Friedman. El nombre de los reactores analizados y su composición se observa en la **Tabla 4.2**. La prueba de Friedman se aplicó primero para los datos de remoción (%) en todos los reactores. De la prueba se determinó que no existe una diferencia significativa entre el efecto del reactor 5 ARSI y el efecto del reactor 1 PARSI, también se obtuvo que la configuración física del reactor 3 PARS, es la mejor para obtener una mayor

remoción de materia orgánica en una celda de combustible microbiana vegetal. En el **Anexo A-2** están las tablas correspondientes.

La igualdad estadística puede deberse a la presencia de inóculo en 5 ARSI y 1 PARSI; aunque el inóculo no es estrictamente necesario para la degradación de materia orgánica como en 3 PARS. De esta forma se observa que, tanto el inóculo, como la planta, son factores que contribuyen a la degradación de materia orgánica. Se observó que los reactores 8 ALL, 4 PSN y 9 SN tienen un desempeño similar entre sí para remoción, lo cual se esperaba ya que por su conformación física los tres reactores no cuentan con una fuente de carbono externa.

Posteriormente, se realizó la prueba de Friedman para los resultados de voltaje en circuito abierto y se obtuvo que la celda 1 PARSI es la que cuenta con los resultados más altos de voltaje. La generación en las celdas 3 PARS y 9 SN tienen valores semejantes por lo que no hay diferencia significativa entre ellas. Tampoco se encontró diferencia significativa entre las celdas 7 ARS y 4 PSN. Las celdas 5 ARSI y 8 ALL son las que obtuvieron los valores de voltaje más bajos y entre ellas no hay diferencia significativa.

Tabla 4.2. Tabla que muestra el número, composición y nombre de los reactores analizados por la prueba de Friedman

No.	Reactor	Fuente externa de carbono (ARS)	Presencia de planta	Inóculo
1	PARSI	✓	✓	✓
3	PARS	✓	✓	x
4	PSN	x	✓	x
5	ARSI	✓	x	✓
7	ARS	✓	x	x
8	ALL	x	x	x
9	SN	x	x	x

PARSI, reactor con planta, agua residual sintética e inóculo; PARS, reactor con planta, agua residual sintética; PSN, reactor con planta y solución nutritiva; ARSI, reactor con agua residual sintética e inóculo; ARS, reactor con agua residual sintética; ALL, reactor con agua de la llave; SN reactor con solución nutritiva

4.6. Micrografías

Esta sección no constituye realmente parte del objetivo principal de esta investigación pero se considera como la punta de lanza para continuar con esa línea. En los **Anexos A-3 y 4** se presentan la metodología y las micrografías tomadas en las 7 celdas.

Las bacterias, como se dijo arriba, forman en algunos casos, biopelículas, ya sea con sus organismos o con exopolímeros que secretan. Éstas cubren algunos de los microorganismos por lo que solo se alcanza a observar la forma de las bacterias cubiertas por la biopelícula. Las bacterias, como se dijo arriba, forman capas de microorganismos y de sustancias poliméricas extracelulares como un mecanismo de defensa para prevenir su arrastre en presencia de un flujo de líquido, así el flujo se llevará solo a las bacterias libres de la superficie dejando a las bacterias que están adheridas a la matriz (grafito en granillo o en fibra) para su proliferación. Éste es el caso del estudio realizado en un sistema donde se utilizaron capas de fibra de carbono para formar el ánodo y *Shewanella putrefaciens* para aumentar su potencial en la producción de corriente anódica (Carmona y col., 2012).

A continuación se describe cada una de las micrografías obtenidas (**Anexo A-4**) y se sugiere realizar a futuro pruebas bioquímicas morfológicas y moleculares para confirmar la presencia de microorganismos electroquímicamente activos como: *Lactococcus lactis*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Pseudomonas sp.* CMR12a, *Hansenula anomala*, *Proteus vulgaris* y *Lyngbya sp.* y *Nostoc sp.* (Carmona y col., 2012).

Micrografía 1. Celda 1 – PARSI (p. 85). Corresponde a la fibra de grafito que forma el ánodo de la celda que tiene planta, agua residual sintética e inóculo y se observan dos microorganismos aislados, al parecer el microorganismo de la derecha está en el momento de la división celular por la estreches que se observa en la parte de en medio.

Micrografía 2. Celda1 – PARSI. (p. 85). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del ánodo de la celda que tiene planta, agua residual sintética e inóculo y se observa un solo microorganismo.

Micrografía 3. Celda 1 – PARSI. (p. 86). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo y se observa un conjunto de microorganismos adheridos a la fibra de grafito.

Micrografía 4. Celda 1 – PARSI. (p. 86). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que tiene planta, agua residual sintética e inóculo y se observa un cúmulo de microorganismos unidos por medio de su biopelícula.

Micrografía 5. Celda 1 – PARSI. (p. 87). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del empaque de la celda que tiene planta, agua residual sintética e inóculo y no se observan microorganismos.

Micrografía 6. Celda 1 – PARSI. (p. 87). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del empaque de la celda que tiene planta, agua residual sintética e inóculo y no se observan microorganismos.

Micrografía 7. Celda 3 – PARS. (p. 88). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del empaque de la celda que tiene planta y agua residual sintética, no se observan microorganismos.

Micrografía 8. Celda 3 – PARS. (p. 88). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del empaque de la celda que tiene planta y agua residual sintética, no se observan microorganismos.

Micrografía 9. Celda 3 – PARS. (p. 89). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del cátodo de la celda que tiene planta y agua residual sintética, no se observan microorganismos.

Micrografía 10. Celda 3 – PARS. (p. 89). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del cátodo de la celda que tiene planta y agua residual sintética, no se observan microorganismos.

Micrografía 11. Celda 3 – PARS. (p. 90). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del empaque de la celda que tiene planta y agua residual sintética, se observa un solo microorganismo de forma alargada de aproximadamente 3 μ m de largo.

Micrografía 12. Celda 3 – PARS. (p. 90). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del empaque de la celda que tiene planta y agua residual sintética, se observan microorganismos de forma alargada, uno de ellos mide aproximadamente 3 μ m de largo, otro parece estar cortado en tres partes y se observa un microorganismo más, debajo del que está dividido.

Micrografía 13. Celda 4 – PSN. (p. 91). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del ánodo de la celda que tiene planta y solución nutritiva, se observan microorganismos de forma ovalada, en forma de cocos y de forma alargada.

Micrografía 14. Celda 4 – PSN. (p. 91). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del ánodo de la celda que tiene planta y solución nutritiva, del lado inferior izquierdo se observa un grupo de microorganismos en forma ovoide, de bacilos y de cocos.

Micrografía 15. Celda 4 – PSN. (p. 92). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que tiene planta y solución nutritiva, se observan grupos de microorganismos en forma de bacilos y de cocos.

Micrografía 16. Celda 4 – PSN. (p. 92). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que tiene planta y solución nutritiva, se observa un microorganismo en forma alargada y un coco.

Micrografía 17. Celda 5 – ARSI. (p. 93). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del ánodo de la celda que contiene agua residual sintética e inóculo, no se observan microorganismos.

Micrografía 18. Celda 5 – ARSI. (p. 93). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del ánodo de la celda que contiene agua residual sintética e inóculo, se observan cocos de forma aislada.

Micrografía 19. Celda 5 – ARSI. (p. 94). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua residual sintética e inóculo, se observan tejidos con perforaciones.

Micrografía 20. Celda 5 – ARSI. (p. 94). Corresponde al granillo de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua residual sintética e inóculo, se observa un trozo de tejido con perforaciones.

Micrografía 21. Celda 5 – ARSI. (p. 95). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del empaque de la celda que contiene agua residual sintética e inóculo, se observan microorganismos dispersos de forma ovalada y alargada.

Micrografía 22. Celda 5 – ARSI. (p. 95). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del empaque de la celda que contiene agua residual sintética e inóculo, se observan microorganismos de diferentes formas sujetos a una especie de biopelícula.

Micrografía 23. Celda 7 – ARS. (p. 96). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del ánodo de la celda que contiene agua residual sintética, se observa un cúmulo de microorganismos de forma alargada sujetos a una de las fibras.

Micrografía 24. Celda 7 – ARS. (p. 96). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del ánodo de la celda que contiene agua residual sintética, se observa un cúmulo de microorganismos de forma de bacilos y cocos atrapados en una especie de biopelícula, también se observan microorganismos dispersos.

Micrografía 25. Celda 7 – ARS. (p. 97). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua residual sintética, se observan microorganismos atrapados en una biopelícula adherida a la fibra de grafito.

Micrografía 26. Celda 7 – ARS. (p. 97). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua residual sintética, se observan bacilos y microorganismos de forma alargada adheridos a la fibra de carbono mezclados con una especie de biopelícula.

Micrografía 27. Celda 7 – ARS. (p. 98). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del empaque de la celda que contiene agua residual sintética, no se observan microorganismos.

Micrografía 28. Celda 7 – ARS. (p. 98). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del empaque de la celda que contiene agua residual sintética, no se observan microorganismos.

Micrografía 29. Celda 8 – ALL. (p. 99). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del ánodo de la celda que contiene agua de la llave, no se observan microorganismos.

Micrografía 30. Celda 8 – ALL. (p. 99). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del ánodo de la celda que contiene agua de la llave, no se observan microorganismos.

Micrografía 31. Celda 8 – ALL. (p. 100). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua de la llave, se observan algunos cocos de forma aislada y algunos microorganismos en forma ovoide.

Micrografía 32. Celda 8 – ALL. (p. 100). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua de la llave, se observan microorganismos de forma ovoide.

Micrografía 33. Celda 8 – ALL. (p. 101). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua de la llave, se observan microorganismos envueltos en una especie de biopelícula y algunos cocos aislados alrededor de ésta.

Micrografía 34. Celda 8 – ALL. (p. 101). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene agua de la llave, se observan cocos adheridos a una de las fibras.

Micrografía 35. Celda 8 – ALL. (p. 102). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del empaque de la celda que contiene agua de la llave, no se observan microorganismos.

Micrografía 36. Celda 8 – ALL. (p. 102). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del empaque de la celda que contiene agua de la llave, no se observan microorganismos.

Micrografía 37. Celda 9 – SN. (p. 103). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del ánodo de la celda que contiene solución nutritiva, no se observan microorganismos.

Micrografía 38. Celda 9 – SN. (p. 103). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del ánodo de la celda que contiene solución nutritiva, no se observan microorganismos.

Micrografía 39. Celda 9 – SN. (p. 104). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene solución nutritiva, se observan cocos y diplococos sobre la biopelícula que está sobre la fibra de carbono.

Micrografía 40. Celda 9 – SN. (p. 104). Corresponde a la fibra de grafito que forma parte del cátodo de la celda que contiene solución nutritiva, se observan bacilos sobre la fibra de carbono algunos de ellos están cubiertos por una especie de biopelícula.

Micrografía 41. Celda 9 – SN. (p. 105). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del empaque de la celda que contiene solución nutritiva, no se observan microorganismos.

Micrografía 42. Celda 9 – SN. (p. 105). Corresponde al grafito en granillo que forma parte del empaque de la celda que contiene solución nutritiva, no se observan microorganismos.

Se debe tomar en cuenta que la posición en la que se ubicó la muestra frente a la lente del microscopio influye de manera considerable para la captura de la imagen, ya que la lente podría estar observando del lado contrario al que se encuentran los microorganismos.

5. Conclusiones y perspectivas

5.1. Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación, se concluye lo siguiente:

- Una celda de combustible microbiana vegetal tiene el potencial de remover contaminantes disueltos (DQO) de un agua residual sintética
- La configuración de la celda que generó mayores voltajes incluye planta e inóculo: 1 PARS
- Las celdas 3 PARS, 1 PARS y 5 ARS son las celdas en las que se dio una mayor remoción de materia orgánica del agua residual sintética, comprobando que tanto el inóculo como la planta favorecen la degradación de la materia orgánica, probablemente porque los microorganismos que aportan son los encargados de la degradación.
- Los resultados obtenidos muestran que en una celda con inóculo la remoción de la materia orgánica se lleva a cabo por los microorganismos presentes en éste independientemente de la presencia de la planta, como es el caso de 1 PARS y 5 ARS, que no muestran diferencia significativa para la remoción de materia orgánica.
- En el caso de las celdas en donde no hay inóculo (3 PARS y 7 ARS), la remoción de materia orgánica se ve influenciada por la presencia de la planta ya que se observa que en 3 PARS hay remoción de materia orgánica pero en 7 ARS, no.
- La presencia de agua residual sintética influyó en la generación de electricidad ya que se observa que los voltajes más altos están presentes en las celdas que se alimentaban con agua residual. Además, en las micrografías se distinguen microorganismos distintos entre los reactores alimentados con ARS y los reactores con alimentación diferente.
- El pH medido en las celdas que removieron mayor cantidad de materia orgánica es de 7.1, así como también el de la celda que sólo contiene ARS.

- En las celdas que se obtuvo menor cantidad de remoción de materia orgánica el pH fue de 6, 6.3 y 6.4 para 9 SN, 4 PSN y 8 ALL, respectivamente, indicando que el pH neutro favorece la remoción.
- Se atribuye la remoción de la materia orgánica, principalmente, a la actividad metabólica de los microorganismos presentes en las celdas.
- La planta, el inóculo y la aportación de materia orgánica de una fuente externa (ARS), son factores que intervienen en la generación eléctrica. La celda 1 PARSI, que incluye estos tres factores en su configuración, es la que presentó una diferencia significativa superior con respecto a las otras celdas en el análisis estadístico de los resultados.

5.2. Perspectivas

Para futuras investigaciones se propone evaluar el funcionamiento de otro tipo de empaque para la disminución de costos y para minimizar el riesgo de contaminación de las muestras por arrastre de grafito. Además, como lo mencionó Erazo-Cortés (2015), es conveniente hacer la combinación de un material pétreo con el grafito en busca de una mejor generación eléctrica. Sería recomendable evaluar el funcionamiento de otro tipo de especies vegetales que cumplan el mismo objetivo de remoción de materia orgánica y producción de electricidad, así como llevar a cabo pruebas bioquímicas, morfológicas y moleculares para la identificación de los microorganismos presentes en las celdas.

Anexos

Anexo A-1

Datos experimentales

Tabla A-1. Datos de voltaje en circuito abierto (mV)

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)
1	21 de febrero del 2014	1.1	103.6	0.5	-0.1	10.8	-0.7	-1.1
2	5 de marzo de 2014	5.4	217.7	0.4	-3.8	8.8	-0.9	2.5
3	14 de marzo de 2014	-6.4	375.5	0.5	2	-6.7	0	1.3
4	21 de marzo de 2014	14	69.7	0.7	-4.35	-5.7	-1	1.1
5	26 de marzo de 2014	-13.9	92.2	0.5	-10.2	7.8	-0.1	2.3
6	28 de marzo de 2014	76.1	7.3	0.6	-25.3	-11.2	-0.3	1.5
7	31 de marzo de 2014	6.5	58.7	5.5	1.2	-0.2	-0.1	2.2
8	2 de abril de 2014	25.6	22.5	0.4	-29.7	3.8	-1.1	1.7
9	4 de abril de 2014	26.3	2.8	0.7	-0.1	1.1	0	0.8
10	7 de abril de 2014	4.9	0	0.1	-0.8	-1.8	0	1.8
11	9 de abril de 2014	16.1	0.1	0.4	-0.2	0.1	0	0.7
12	11 de abril de 2014	16.5	20.8	0.2	-10.7	4.9	-0.1	16.7
13	16 de abril de 2014	0	-0.6	0	0	0.1	0	0.1
14	18 de abril de 2014	0	0	0	0	0.1	0	0
15	23 de abril de 2014	0.2	0.6	0.6	-2.4	0.4	-0.6	0.1
16	2 de mayo de 2014	2.9	0.9	0.2	-3.1	-19.9	-2.6	2.4
17	5 de mayo de 2014	9.3	3.4	0.1	-7.3	1.7	-0.1	4.1
18	7 de mayo de 2014	3.7	5.8	0.2	-3.2	7.6	-1.1	1.4
19	9 de mayo de 2014	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.6	-0.1	27.3
20	14 de mayo de 2014	-0.4	12.2	-0.1	-17.2	0.5	-0.3	-0.3

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)
21	16 de mayo de 2014	-	-	-	-	-	-	-
22	19 de mayo de 2014	-	-	-	-	-	-	-
23	21 de mayo de 2014	-8.1	15.2	0.2	-0.1	8.8	0	2
24	30 de mayo de 2014	17	8.2	0.1	-12.2	0.9	-1	3.2
25	2 de junio de 2014	19.2	4.2	1.8	-0.1	0.7	0.4	3.9
26	4 de junio de 2014	25	3	0	-1.2	3.2	-1.2	30.8
27	9 de junio de 2014	266.2	5.3	0.1	0.8	1.7	1.8	-11.2
28	11 de junio de 2014	207.9	40.4	0	-17.3	4	-0.3	0.2
29	13 de junio de 2014	-32.1	3.4	0	-2.3	-1.8	-2.8	53.5
30	18 de junio de 2014	103.1	1.6	0.1	-6.9	1.4	-0.6	5.3
31	20 de junio de 2014	-	-	-	-	-	-	-
32	25 de junio de 2014	436	3.6	2.9	-9.6	-54	-0.1	9.2
33	27 de junio de 2014	44.1	0.4	3.8	-6.9	8.3	-0.3	4
34	2 de julio de 2014	8	2.4	0.3	0.2	8.5	-1	2.9
35	7 de julio de 2014	321.1	1.7	0.1	-3.1	1.2	-0.2	1.1
36	9 de julio de 2014	216.5	1.8	1	0.2	-1.1	-3	1.9
37	11 de julio de 2014	-34.1	-0.2	1.1	1.8	0.7	-4.7	0.7
38	18 de julio de 2014	115.6	1.2	1.5	-5.8	0.2	-1	0.7
39	21 ed julio de 2014	10.5	1.4	2.7	-3.3	4.1	-2.8	1.2
40	23 de julio de 2014	62.9	1.8	5.2	-4.3	-2.4	-0.5	4.3
41	25 de julio de 2014	19	1.2	43.9	-4	-4.7	-0.5	5.9
42	28 de julio de 2014	39.5	2.3	1	-1.8	2.4	-1.1	3.6
43	30 de julio de 2014	6.6	5	10.3	-5.4	9	-1.3	5.4
44	1 de agosto de 2014	24.8	2.2	9	-4.6	2.8	-3.1	3.6
45	6 de agosto de 2014	157.8	2.6	2.6	1.2	6.5	-3	2.8
46	8 de agosto de 2014	10.6	-0.4	10.1	-4.9	-56.4	-8.4	7.1
47	13 de agosto de 2014	174.4	1.5	16.8	-4.2	0.8	-2.1	1.7
48	15 de agosto de 2014	-7.5	-0.5	15.3	-8.8	5.6	-3.9	22.5
49	18 de agosto de 2014	222.6	2	11.8	-6.5	4.3	-5.6	27.6
50	20 de agosto de 2014		-0.4	1.7	-0.3	5.4	-3.3	15.5

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARS I	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)	Voltaje (mV)
51	1 de septiembre de 2014	-0.3	3.1	1.2	-3.2	5.1	-2.3	11.6
52	5 de septiembre de 2014	-	-0.5	-0.1	-	0	-	0.3
53	8 de septiembre de 2014	-	-6.4	-2.6	-	-1.6	-	-0.6
54	7 de septiembre de 2014	-	-0.1	-0.1	-	0	-	0
55	10 de septiembre de 2014	1.9	0	0	1.3	0	0.2	0
	Promedio	54.5	21.2	2.9	-4.6	-0.7	-1.2	5.5
	Voltaje mayor	321.1	375.5	43.9	2	9	1.8	53.5
	Voltaje menor	-32.1	-0.6	-2.6	29.7	-56.4	-8.4	-11.2
	Desv. Est.	98.0	61.4	7.0	6.5	12.1	1.8	10.2

Tabla A-1.1. Datos de remoción de materia orgánica medida como DQO

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARS I	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)
1	21 de febrero del 2014	90	97	2	72	0	2	2
2	5 de marzo de 2014	90	100	0	78	0	100	0
3	14 de marzo de 2014	-	84	0	-	0	0	0
4	21 de marzo de 2014	87	94	0	87	0	0	0
5	26 de marzo de 2014	68	86	68	-	0	36	0
6	28 de marzo de 2014	86	82	0	82	0	0	0
7	31 de marzo de 2014	90	81	0	70	0	0	0
8	2 de abril de 2014	88	73	-	67	0	100	0
9	4 de abril de 2014	78	76	0	74	0	0	0
10	7 de abril de 2014	90	92	0	65	0	0	0

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)
11	9 de abril de 2014	95	87	0	87	0	33	0
12	11 de abril de 2014	89	83	0	72	0	0	0
13	16 de abril de 2014	90	83	0	93	34	-	0
14	18 de abril de 2014	94	-	0	89	22	25	0
15	23 de abril de 2014	88	88	0	83	46	0	0
16	2 de mayo de 2014	78	75	0	89	0	-	0
17	5 de mayo de 2014	86	65	0	50	10	0	-
18	7 de mayo de 2014	85	8	0	50	0	0	0
19	9 de mayo de 2014	93	100	0	95	0	50	0
20	14 de mayo de 2014	59	69	0	90	88	39	0
21	16 de mayo de 2014	98	98	0	81	74	16	0
22	19 de mayo de 2014	96	99	-	98	80	0	0
23	21 de mayo de 2014	-	93	43	80	59	0	0
24	30 de mayo de 2014	87	100	70	96	92	32	0
25	2 de junio de 2014	90	97	0	84	100	0	62
26	4 de junio de 2014	0	90	0	60	0	0	0
27	9 de junio de 2014	80	85	8	77	78	3	0
28	11 de junio de 2014	63	-	-	80	70	0	0
29	13 de junio de 2014	92	95	-	-	75	0	0
30	18 de junio de 2014	99	100	-	96	53	0	0
31	20 de junio de 2014	80	-	0	88	54	0	0
32	25 de junio de 2014	81	78	0	86	91	0	0
33	27 de junio de 2014	82	97	100	95	61	100	0
34	2 de julio de 2014	83	28	0	78	79	0	0

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)
35	7 de julio de 2014	91	94	0	87	81	0	0
36	9 de julio de 2014	95	100	69	100	84	0	-
37	11 de julio de 2014	63	96	0	93	80	52	0
38	18 de julio de 2014	73	96	0	82	83	0	0
39	21 de julio de 2014	71	98		90	68	90	0
40	23 de julio de 2014	65	70	0	79	37	0	0
41	25 de julio de 2014	96	98	0	95	61	0	0
42	28 de julio de 2014	80	94	0	-	34	0	0
43	30 de julio de 2014	94	97	59	100	55	52	55
44	1 de agosto de 2014	80	95	0	95	43	0	0
45	6 de agosto de 2014	84	82	0	89	51	0	0
46	8 de agosto de 2014	92	96	20	89	17	0	0
47	13 de agosto de 2014	67	89	0	85	29	0	0
48	15 de agosto de 2014	80	79	0	86	31	0	0
49	18 de agosto de 2014	84	73	0	84	0	0	0
50	20 de agosto de 2014	72	81	0	86	27	0	0
51	1 de septiembre de 2014	82	65	-	82	13	0	0
52	5 de septiembre de 2014	-	81	0	88	1	0	0
53	8 de septiembre de 2014	87	52	-	91	18	0	0
54	7 de septiembre de 2014	92	76	0	87	13	0	0
55	10 de septiembre de 2014	94	93	0	98	59	0	0
	Promedio	83	84	9	84	37	14	2
	Voltaje mayor	99	100	100	100	100	100	62
	Voltaje menor	0	8	0	50	1	0	0
	Desv. Est.	15	17	24	11	33	28	11

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Tabla A-1.2. Datos de temperatura en las celdas

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
1	21 de febrero del 2014	-	15.8	16.1	13.3	15.4	15.6	15.9
2	5 de marzo de 2014	12.1	11.7	11.6	11.7	11.4	11.4	11.4
3	14 de marzo de 2014	17.8	18.2	18.7	17.6	18.1	18.2	14.1
4	21 de marzo de 2014	17.4	16.9	16.4	17.1	16.3	16.3	16.3
5	26 de marzo de 2014	15.2	14.8	14.8	15.1	14.5	14.5	14.5
6	28 de marzo de 2014	14.1	14.2	15.6	13.8	14.37	14.8	15.43
7	31 de marzo de 2014	12.6	12.8	12.9	12.5	12.7	12.7	12.9
8	2 de abril de 2014	13.6	13.5	13.9	13.2	13.6	13.6	13.8
9	4 de abril de 2014	16.3	16.4	17.2	15.5	16.5	16.5	17.1
10	7 de abril de 2014	13.3	14.1	14.6	13	13.2	14.5	13.1
11	9 de abril de 2014	10.8	11.1	11	10.7	11	10.9	10.9
12	11 de abril de 2014	13.8	13.7	13.9	13.5	13.6	13.8	13.6
13	16 de abril de 2014	13.2	11.4	12.5	13	11.2	11.9	12.3
15	23 de abril de 2014	14	14.3	14.3	14.1	14.2	14.1	14.2
16	2 de mayo de 2014	15.1	14.9	15.1	14.7	15	14.8	15.1
17	5 de mayo de 2014	13.9	14.1	14.4	13.8	14	13.8	14.5
18	7 de mayo de 2014	15.8	15.7	15.6	15.4	15.9	15.7	15.6
19	9 de mayo de 2014	14.4	14.1	15.8	14.1	14.2	14.4	16
20	14 de mayo de 2014	17.5	17.1	17.5	11.8	17	16.9	17.3
21	16 de mayo de 2014	12	12.3	12.1	11.9	16	12	13.4
22	19 de mayo de 2014	14.3	15.5	14.3	13.4	14.3	13.8	13.7
23	21 de mayo de 2014	15.6	15.4	15.7	15.3	15.6	15.4	15.2
24	30 de mayo de 2014	17.9	17.9	17.9	17.7	17.9	17.6	17.8

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
25	2 de junio de 2014	16.5	15.3	15.3	15.3	16.3	16	16.6
26	4 de junio de 2014	16.7	16.8	16.9	16.7	16.3	16.2	16.5
27	9 de junio de 2014	17.3	17.2	17.3	17.4	18	11.87	18
28	11 de junio de 2014	17.5	17.6	17.8	17.6	17.4	17.4	17.6
29	13 de junio de 2014	18.4	17.9	18.7	18.4	18.1	17.9	18.2
30	18 de junio de 2014	20.2	19.5	19.4	19.6	17.5	18.1	17.1
32	25 de junio de 2014	16.4	16.5	16.7	16.9	17.1	16.13	17.2
33	27 de junio de 2014	16.6	16.2	16.5	16.2	16.2	16.3	16.3
34	2 de julio de 2014	18.2	17.5	17.7	18	16.7	16.7	17.2
35	7 de julio de 2014	17.4	17.2	17.6	17	18.8	16.6	16.9
36	9 de julio de 2014	20	19.8	19.2	20.9	20	18.8	18.6
37	11 de julio de 2014	16.1	15.7	15.8	15.7	15.8	15.6	15.8
38	18 de julio de 2014	18.1	19.2	21.4	19	20.5	21.1	21.1
39	21 ed julio de 2014	16	16	16	15.7	17.8	17.1	17.9
40	23 de julio de 2014	15.4	15.5	15.7	15.6	16	15.8	16
41	25 de julio de 2014	15.4	15.5	15.7	15.6	15.6	15.5	16.3
42	28 de julio de 2014	17.3	17	17	16.9	15.9	15.6	15.9
43	30 de julio de 2014	16.2	16.3	16.1	16.1	17	16.6	16.9
44	1 de agosto de 2014	17.4	16.9	17.3	16.1	16.1	16	16
45	6 de agosto de 2014	16.3	15.6	16.1	15.6	15.9	15.7	16
46	8 de agosto de 2014	17.9	17	17.3	17.4	16.5	16.3	16.5
47	13 de agosto de 2014	16.5	16.2	16.2	16.1	16.2	16.2	16.3
48	15 de agosto de 2014	16.4	16.5	16.8	16.5	16.5	16.2	16.4
49	18 de agosto de 2014	16.4	16.5	16.8	16.5	16.6	16.3	16.8
50	20 de agosto de 2014	-	16.1	16.4	16.1	16.1	15.8	16.3

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARS I	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
51	1 de septiembre de 2014	17.3	17	17.3	17	17	17	16.8
52	5 de septiembre de 2014	18.3	15.8	15.8	18.4	16	18.1	16
53	8 de septiembre de 2014	15.5	16.3	16.5	18.4	16	19.9	16.1
54	7 de septiembre de 2014	20.2	16.7	16.8	19.8	16.7	14	16.7
55	10 de septiembre de 2014	13.8	14	14.3	13.8	14.1	15.2	14.2
	Promedio	16.01	15.80	16.04	15.71	15.86	15.65	15.82
	Voltaje mayor	20.2	19.8	21.4	20.9	20.5	21.1	21.1
	Voltaje menor	10.8	11	11	10.3	9.9	10.9	10
	Desv. Est.	2.08	1.88	1.94	2.22	1.93	2.02	1.84

Tabla A-1.3. Datos de pH en las celdas

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARS I	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
1	21 de febrero del 2014	-	5.3	5.3	5.7	6.01	6.12	5.84
2	5 de marzo de 2014	5.8	5.9	5.6	6	6.11	6.23	5.84
3	14 de marzo de 2014	5.5	5.6	5.3	5.6	6.1	6.04	5.47
4	21 de marzo de 2014	5.6	5.4	5	5.9	6.16	6.14	5.16
5	26 de marzo de 2014	6.4	6.1	5.3	6.3	6.2	5.65	5.70
6	28 de marzo de 2014	6.5	-	6	6.5	7.29	6.79	6.45
7	31 de marzo de 2014	6.7	6.6	6	6.9	6.66	6.12	5.60
8	2 de abril de 2014	6.7	7.2	6	7	6.73	6.73	6.35
9	4 de abril de 2014	6.3	6.5	5.5	6.7	6.67	6.06	6.10
10	7 de abril de 2014	6	7.2	5.8	6.4	6.8	5.59	5.41

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
11	9 de abril de 2014	6.5	6.8	5.9	6.6	6	6.27	6.00
12	11 de abril de 2014	6	6.4	5.3	6.5	5.8	6.05	5.62
15	23 de abril de 2014	7.7	7.6	7.4	7.2	7.5	7.37	7.50
16	2 de mayo de 2014	6.7	7	6	6.7	7.25	6.21	5.82
17	5 de mayo de 2014	7.2	7.3	-	6.7	7.88	6.41	5.32
18	7 de mayo de 2014	6.6	7.7	5.8	6.5	7.19	-	5.38
19	9 de mayo de 2014	5.7	5.9	5.2	5.8	5.85	4.91	5.03
20	14 de mayo de 2014	7.4	7.4	-	7.2	6.89	6.46	6.00
21	16 de mayo de 2014	7.4	-	6.7	7.3	6.88	6.77	6.33
22	19 de mayo de 2014	6.24	-	-	6.59	6	5.86	-
24	30 de mayo de 2014	7	6.71	6.6	6.53	6.54	6.19	6.00
25	2 de junio de 2014	7.5	6.94	6.8	6.62	7.27	6.43	5.62
26	4 de junio de 2014	6.9	7.6	6.8	6.5	7.01	5.89	5.67
27	9 de junio de 2014	7.2	7.3	7	7.5	8.39	7.45	6.30
28	11 de junio de 2014	8	7.6	6.8	7.6	7.2	6.3	5.55
29	13 de junio de 2014	7.38	7.27	-	-	6.59	7.12	6.77
30	18 de junio de 2014	6.7	-	-	6.7	7.55	6.68	6.06
32	25 de junio de 2014	8.2	7.51	7.1	7.7	7.63	6.88	6.19
33	27 de junio de 2014	7.97	7.74	6.52	7.73	7.88	6.79	6.59
34	2 de julio de 2014	7.45	8.24	6.7	7.83	7.32	6.6	5.60
35	7 de julio de 2014	6.38	-	7.06	6.48	7.37	6.83	6.33
36	9 de julio de 2014	7.35	7.2	5.35	7.02	7.38	6.55	6.09
37	11 de julio de 2014	6.6	7.14	6.9	6.63	7.38	6.54	5.87
38	18 de julio de 2014	7.19	6.73	6.01	7.6	6.21	5.83	5.40

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARS I	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
39	21 ed julio de 2014	6.9	7	-	7.3	7.65	6.2	6.51
40	23 de julio de 2014	7.6	7.2	6.2	7.4	7.6	7.32	6.34
41	25 de julio de 2014	7.58	7.25	6.25	7.4	7.41	6.36	6.23
42	28 de julio de 2014	8	7.9	6.6	7.6	5.84	6.6	4.01
43	30 de julio de 2014	7.6	7.4	6.1	7.3	8.5	6.59	6.18
44	1 de agosto de 2014	7.4	7.45	6.11	7.8	7.43	6.05	5.92
45	6 de agosto de 2014	8.76	8.23	7.19	8.64	8.3	7.07	6.48
46	8 de agosto de 2014	8.79	8.1	7.08	8.67	8.1	6.77	6.84
47	13 de agosto de 2014	7.3	7.28	6.11	7.28	7.47	5.82	6.00
48	15 de agosto de 2014	7.9	5.3	6.8	8	7.29	5.93	6.20
49	18 de agosto de 2014	7.92	8.31	6.81	8.09	8.07	6.37	6.70
50	20 de agosto de 2014	-	7.98	6.72	8.28	6.1	6.71	7.85
51	1 de septiembre de 2014	7.7	7.2	-	7.7	7.42	5.62	5.68
52	5 de septiembre de 2014	7.73	7.17	6.56	7.74	8.32	6.47	6.73
53	8 de septiembre de 2014	8.24	-	-	8.13	-	-	-
54	7 de septiembre de 2014	6.97	7.87	6.33	8.06	8.09	5.4	6.63
55	10 de septiembre de 2014	7.57	8.19	6.67	7.6	8	7.26	7.16
	Promedio	7.1	7.1	6.3	7.1	7.1	6.4	6.0
	Voltaje mayor	8.79	8.31	7.4	8.67	8.39	7.45	7.85
	Voltaje menor	5.5	5.3	5	5.6	5.8	4.91	5.03
	Desv. Est.	0.78	0.78	0.63	0.74	0.76	0.52	0.64

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Tabla A-1.4. Datos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARS I	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
1	21 de febrero del 2014	-	745	537	1046	916	563	624
2	5 de marzo de 2014	760	678	468	822	822	489	535
3	14 de marzo de 2014	843	878	417	936	996	397	578
4	21 de marzo de 2014	725	809	514	815	813	432	465
5	26 de marzo de 2014	829	901	615	833	922	450	566
6	28 de marzo de 2014	853	-	620	889	1038	532	572
7	31 de marzo de 2014	1117	1183	761	1140	1165	638	629
8	2 de abril de 2014	1056	710		1057	1158	610	643
9	4 de abril de 2014	1071	1220	716	1152	1061	679	685
10	7 de abril de 2014	1022	-	-	1022	1222	-	599
11	9 de abril de 2014	988	1116	732	980	1093	551	635
12	11 de abril de 2014	934	1110	-	995	1065	-	613
13	16 de abril de 2014	920	-	-	-	-	-	-
15	23 de abril de 2014	910	1169	800	989	1119	470	591
16	2 de mayo de 2014	597	827	550	638	735	366	404
17	5 de mayo de 2014	835	1205	-	904	1025	546	569
18	7 de mayo de 2014	796	1030	-	850	933	-	554
19	9 de mayo de 2014	908	1070	-	995	1061	531	607
20	14 de mayo de 2014	1129	1437	-	871	1460	673	712
21	16 de mayo de 2014	1086	-	1052	1192	1242	654	740
22	19 de mayo de 2014	954	-	-	991	909	-	649
23	21 de mayo de 2014	930	1214	779	902	877	501	547

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
24	30 de mayo de 2014	891	987	-	809	722	494	525
25	2 de junio de 2014	1056	1135	-	946	939	570	590
26	4 de junio de 2014	1239	1145	-	1121	1083	606	664
27	9 de junio de 2014	959	1188	-	962	884	506	624
28	11 de junio de 2014	1134	1144	-	822	-	-	-
29	13 de junio de 2014	949	1179	-	-	850	465	520
30	18 de junio de 2014	924	-	-	1090	944	532	610
32	25 de junio de 2014	1022	1466	1018	1025	1089	602	616
33	27 de junio de 2014	1014	1202	847	1013	1017	847	561
34	2 de julio de 2014	1711	1871	1479	1272	1439	637	904
35	7 de julio de 2014	1671	716		1449	1255	671	801
36	9 de julio de 2014	1091	1447	838	1009	981	599	782
37	11 de julio de 2014	1164	1286	814	1166	1063	629	767
38	18 de julio de 2014	1172	1239	675	1180	1023	488	643
39	21 ed julio de 2014	1246	1470	-	1321	1165	580	741
40	23 de julio de 2014	1286	1699	990	1318	1226	629	752
41	25 de julio de 2014	1286	1491	874	1315	1201	627	719
42	28 de julio de 2014	1100	1457	-	1194	1119	553	647
43	30 de julio de 2014	1080	1342	836	1126	1079	531	618
44	1 de agosto de 2014	1318	1392	839	1127	1085	525	630
45	6 de agosto de 2014	1194	1637	887	1233	1233	596	722
46	8 de agosto de 2014	1447	1308	878	1213	1205	589	694
47	13 de agosto de 2014	1368	1624	858	1361	1329	603	701
48	15 de agosto de 2014	1322	1376	768	1215	1221	577	682

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

Día de análisis	Fecha	Celda 1 PARSI	Celda 3 PARS	Celda 4 PSN	Celda 5 ARSI	Celda 7 ARS	Celda 8 ALL	Celda 9 SN
		Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
49	18 de agosto de 2014	1301	1648	917	1336	1293	602	691
50	20 de agosto de 2014	-	1483	842	1218	1230	579	662
51	1 de septiembre de 2014	1140	1687	-	1295	1292	630	713
52	5 de septiembre de 2014	1125	1423	889	1033	1230	631	702
53	8 de septiembre de 2014	1218	1496	-	1106	1253	646	685
54	7 de septiembre de 2014	1333	1620	857	1287	1370	656	678
55	10 de septiembre de 2014	1238	1468	776	1094	1134	596	666
	Promedio	1084	1254	795	1072	1090	572	644
	Valor mayor	1711	1871	1479	1449	1460	847	904
	Valor menor	597	678	417	638	722	366	404
	Desv. Est.	219	289	196	174	170	83	87

Anexo A-2

Resultados del análisis estadístico

A continuación se muestran los resultados que arroja el *software Minitab 15* al hacer un análisis de estadística no paramétrica con la prueba de Friedman.

Prueba de Friedman: Remoción (%) vs. Reactor bloqueado por día de observación

S = 199.72 GL = 6 P = 0.000

S = 218.86 GL = 6 P = 0.000 (ajustados para los vínculos)

Reactor	N	Mediana	Suma de
		Est.	clasificaciones
ALL	55	3.24	158.0
ARS	55	34.61	225.5
ARSI	55	80.90	342.0
PARS	55	83.11	363.5
PARSI	55	80.77	338.0
PSN	55	2.09	146.5
SN	55	-1.00	123.5

Mediana principal = 40.53

Prueba de Friedman: Voltaje (mV) vs. Reactor bloqueado por día de observación

S = 114.74 GL = 6 P = 0.000

S = 123.16 GL = 6 P = 0.000 (ajustados para los vínculos)

Reactor	N	Mediana	Suma de
		Est.	clasificaciones
ALL	55	-1.009	172.5
ARS	55	1.228	264.5
ARSI	55	-2.916	143.5
PARS	55	2.716	301.5
PARSI	55	7.641	342.0
PSN	55	1.228	266.5
SN	55	2.609	311.5

Mediana principal = 1.642

Anexo A-3

Protocolo para la preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido (bacterias)

Primera parte. Fijación de la muestra

1. Fijar la muestra con glutaraldehído al 3% en amortiguador de fosfatos por un día a temperatura ambiente.

NOTA: La solución debe ser al menos dos veces el volumen de la muestra.

1. Centrifugar (3000 rps por 5 minutos) y eliminar el sobrenadante.

2. Lavar 5 veces con el amortiguador de fosfatos por 5 minutos cada uno.

3. Centrifugar entre cada lavado.

4. Tinción con OsO_4 al 1% en amortiguador de fosfatos 2 horas.

NOTA: El OsO_4 es altamente tóxico. El tratamiento de la muestra con OsO_4 es opcional para dar más contraste a la muestra. Se requiere campana de extracción, guantes, lentes y mascarilla, tener el depósito para residuos ya que el OsO_4 es altamente tóxico (Mendoza-Garfias, 2016).

Segunda parte. Deshidratación de la muestra y secado a punto crítico

1. Lavar 3 veces con amortiguador de fosfatos.

2. Deshidratar las muestras en series graduales de etanol: comenzar con etanol al 30% y dejar ahí la muestra durante 10 minutos, repetir 2 veces, centrifugar, colocar la muestra en etanol al 50% durante 10 minutos, centrifugar, colocar en etanol al 70% durante 10 minutos, centrifugar, colocar en etanol al 85% durante 10 minutos, centrifugar, colocar la muestra en etanol al 100% durante 10 minutos y hacerlo 3 veces, centrifugar.

3. Secar la muestra en punto crítico con CO_2 (este tratamiento se hizo en el Instituto de Biología por la M. en C. Berenit Mendoza Garfias).

4. Cubrir con oro o con carbón.

5. Observar al microscopio.

NOTAS: No dejar que las muestras se sequen.

Si son bacterias que se desean observar en la matriz dejar sedimentar con el glutaraldehído por un día a temperatura ambiente.

Si sólo se desea observar la bacteria se fija la muestra con el glutaraldehído y se centrifuga.

Con la bacteria sola si al hacer los lavados se deshace la pastilla volver a centrifugar por 10 minutos.

Entre cada cambio de solución se debe centrifugar siempre para formar la pastilla.

Preparación de solución madre de amortiguador de fosfatos

Solución madre (*stock*) de amortiguador de fosfatos pH 7.3 (PBS 10X)

Tabla A-3. Tabla de compuestos y concentraciones que se utilizan para preparar solución madre (*stock*)

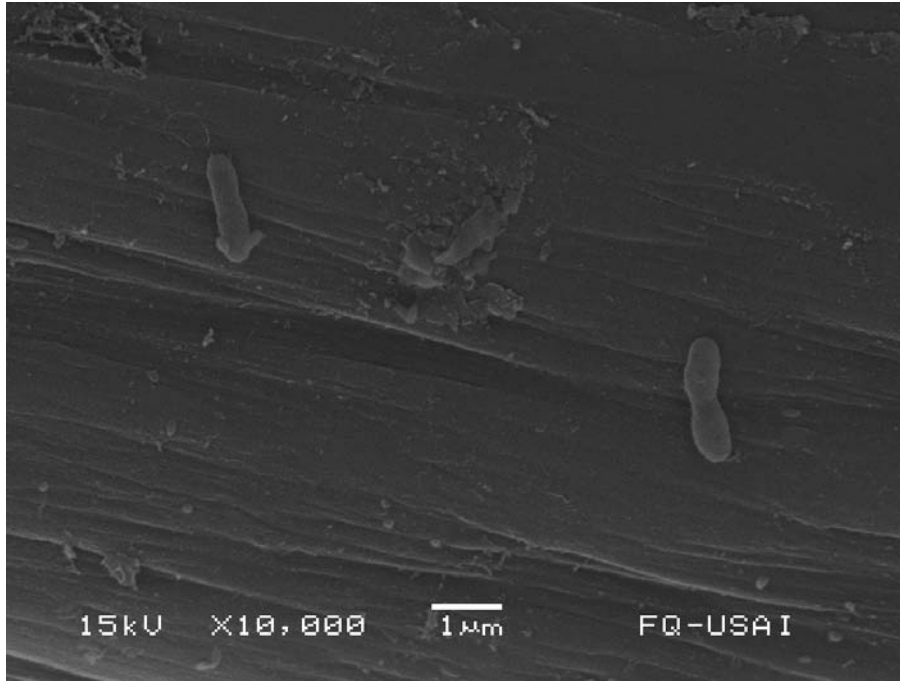
Compuesto	Concentración final
NaCl	1.3 M
KCl	270 mM
Na ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O	100 mM
KH ₂ PO ₄ ·H ₂ O	2 mM

1. Ajustar a pH 7.3 con HCl
2. Aforar a 1L con agua bidestilada
3. Esterilizar en autoclave por 15 minutos
4. Guardar a 4°C

NOTA: La solución es estable por tres meses o más. Desechar si aparecen cambios de color o precipitación. La solución madre (*stock*) se prepara 10X pero se utiliza 1X

Anexo A-4

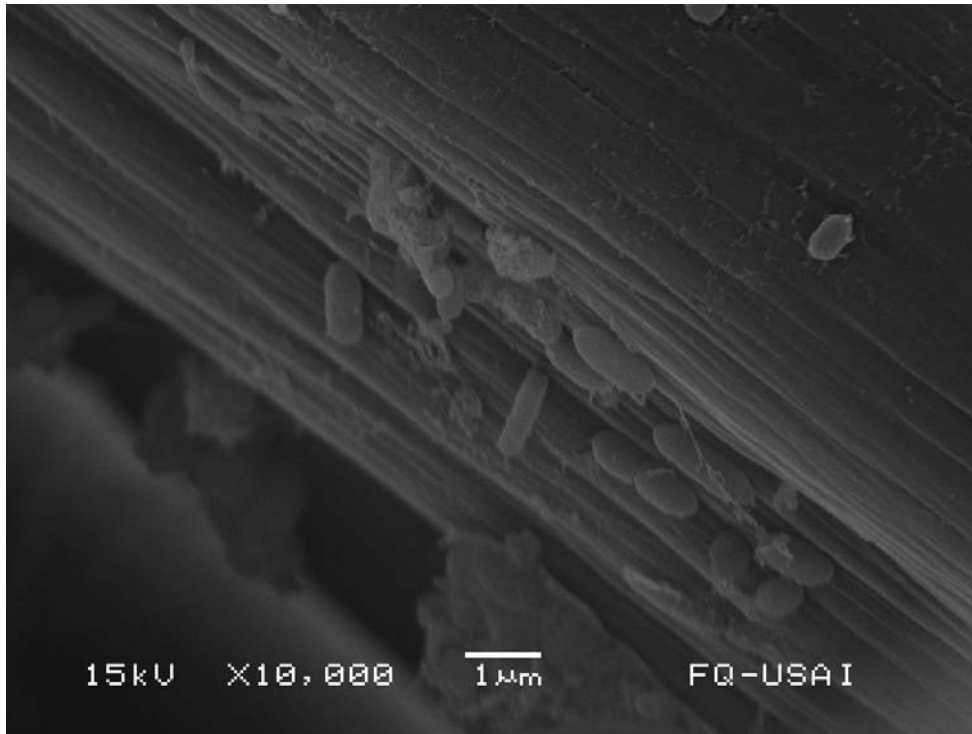
Micrografías obtenidas de los electrodos de los reactores



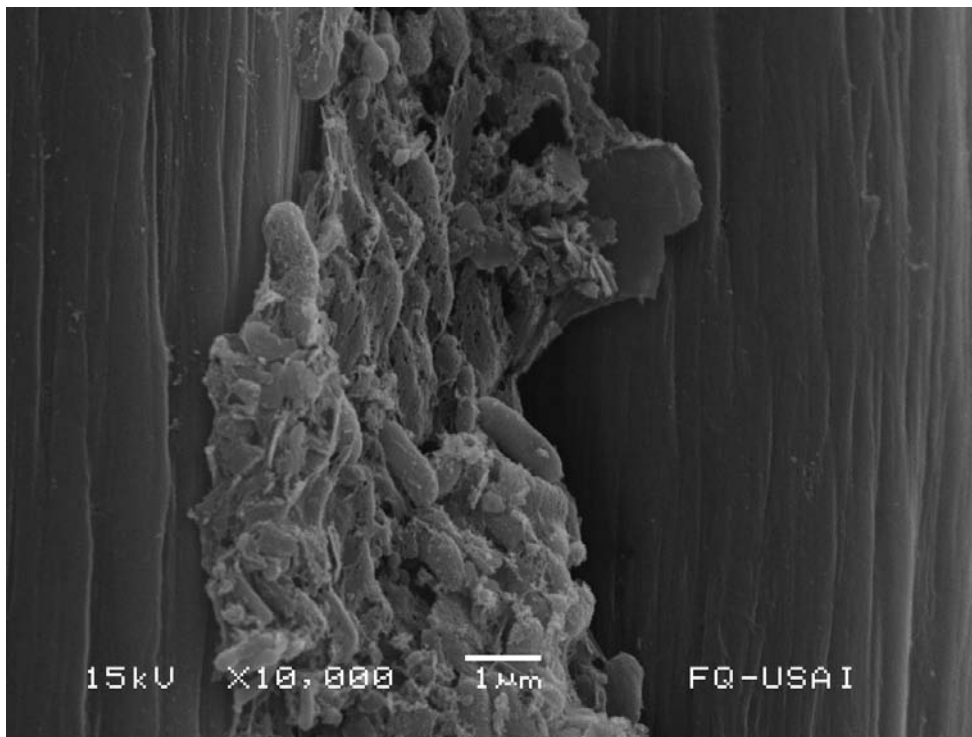
Micrografía 1. Celda 1 – PARSI. Ánodo (fibra del fieltro de grafito)



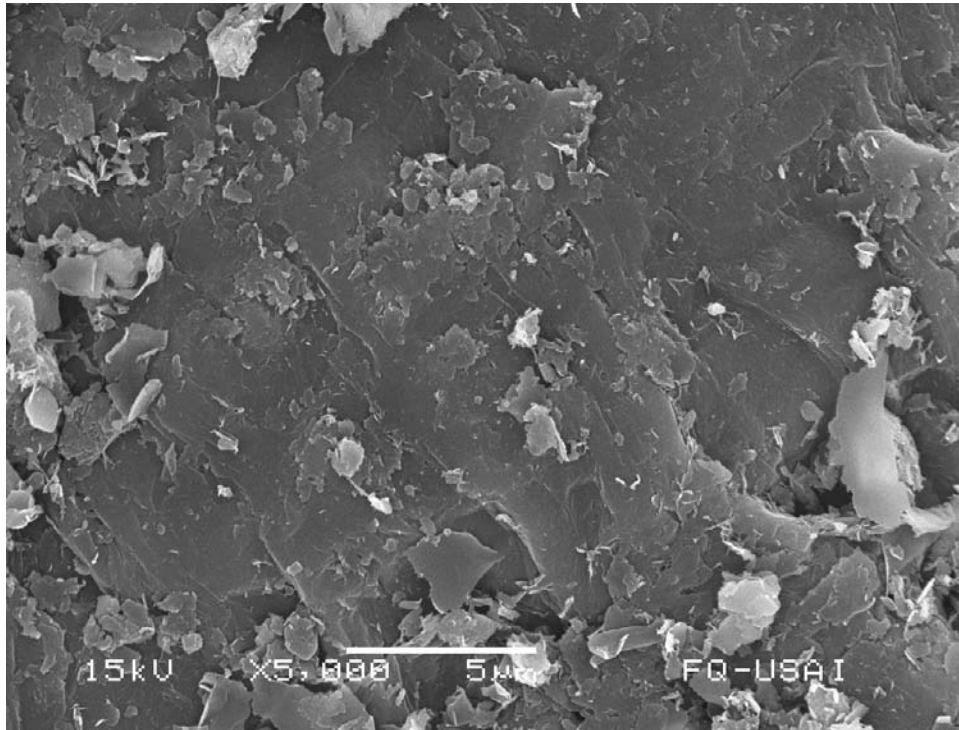
Micrografía 2. Celda 1 – PARSI. Ánodo (fibra del fieltro de grafito)



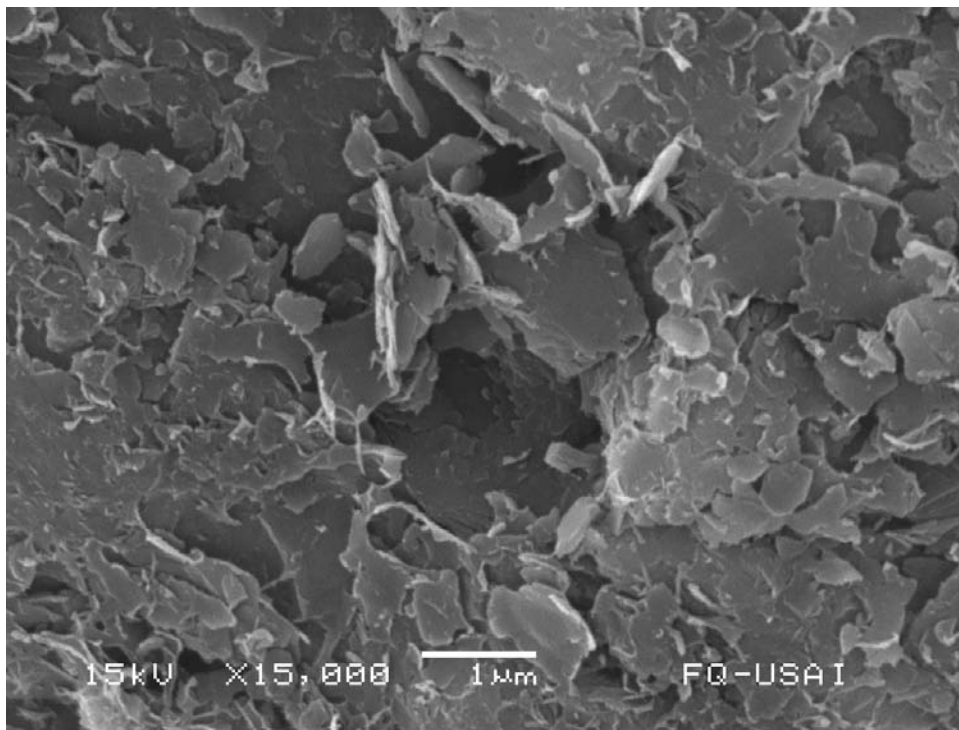
Micrografía 3. Celda 1 – PARSI. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)



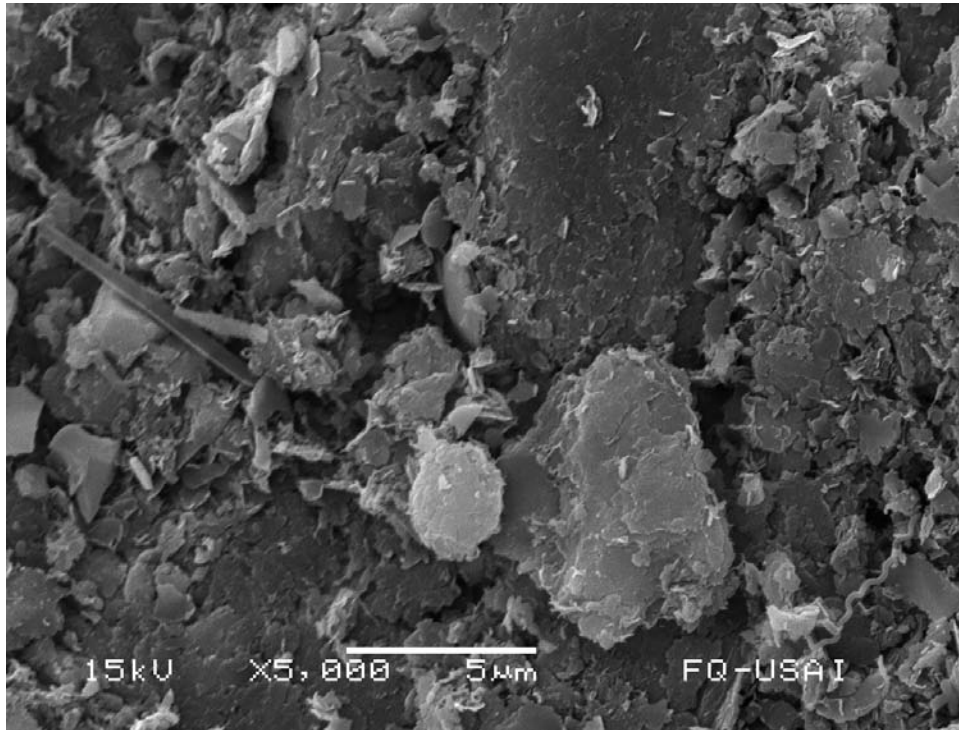
Micrografía 4. Celda 1 – PARSI. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)



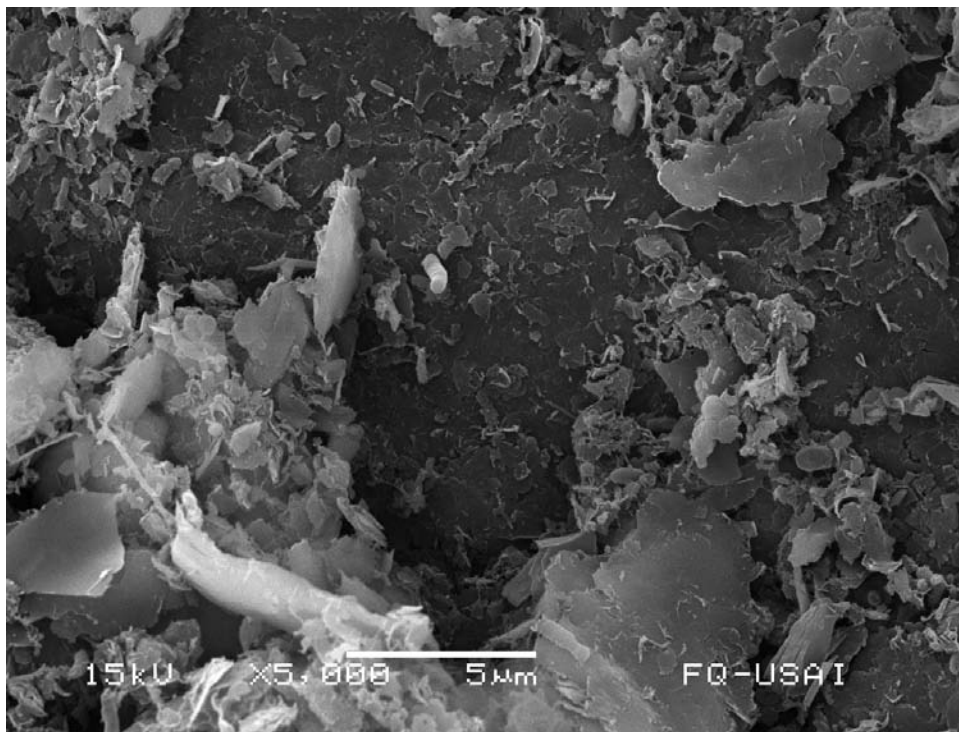
Micrografía 5. Celda 1 – PARSI. Empaque (granillo de grafito)



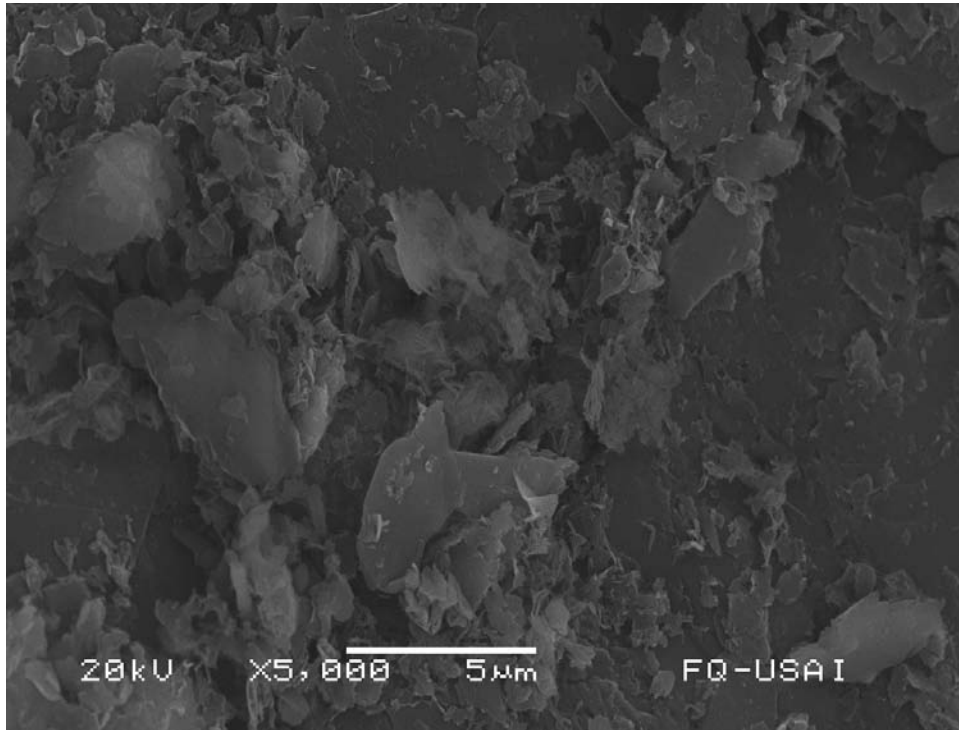
Micrografía 6. Celda 1 – PARSI. Empaque (granillo de grafito)



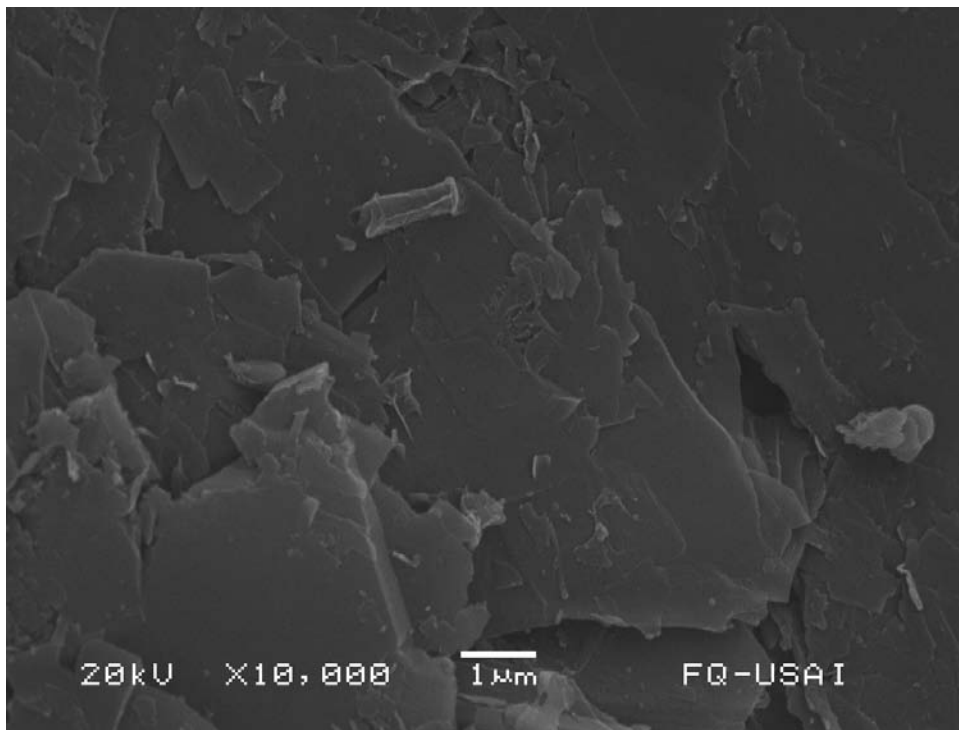
Micrografía 7. Celda 3 – PARS. Ánodo (granillo de grafito)



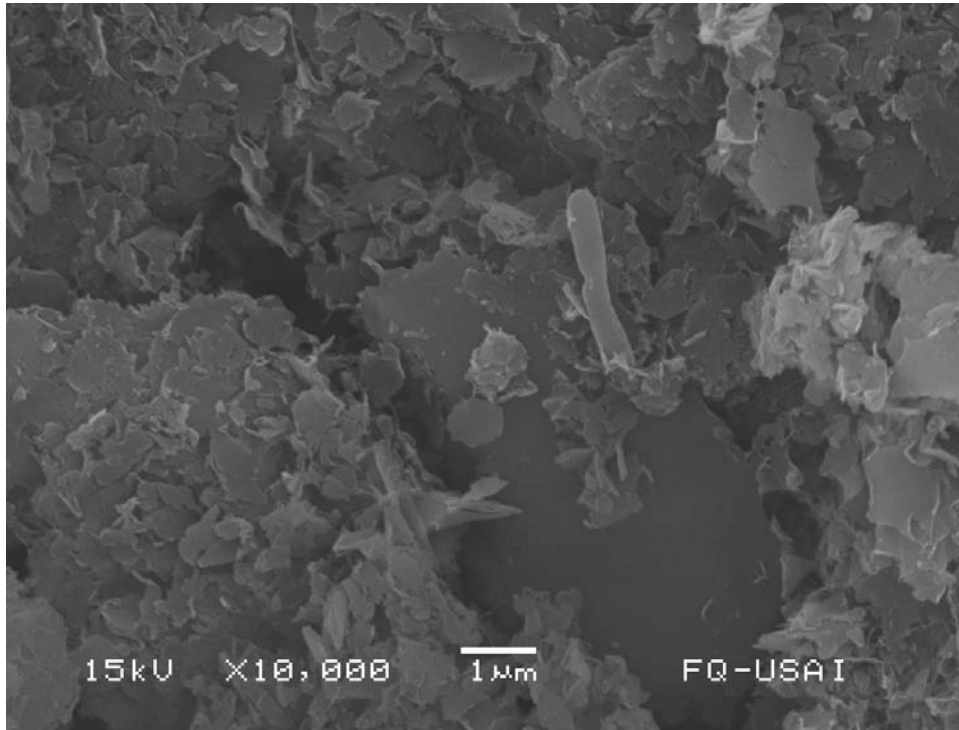
Micrografía 8. Celda 3 – PARS. Ánodo (granillo de grafito)



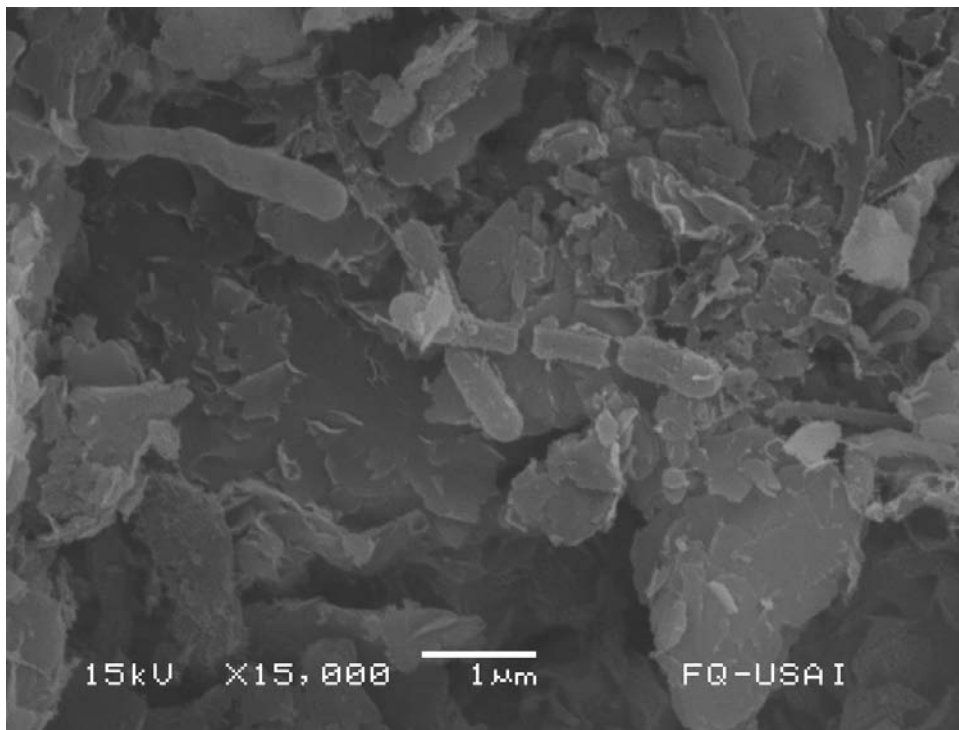
Micrografía 9. Celda 3 – PARS. Cátodo (granillo de grafito)



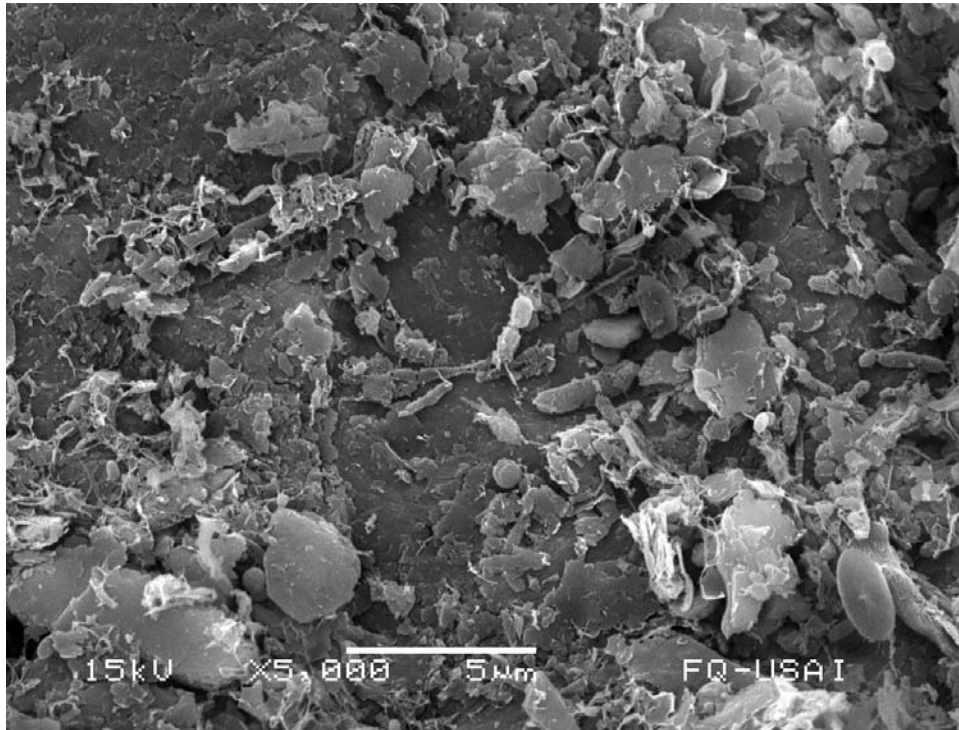
Micrografía 10. Celda 3 – PARS. Cátodo (granillo de grafito)



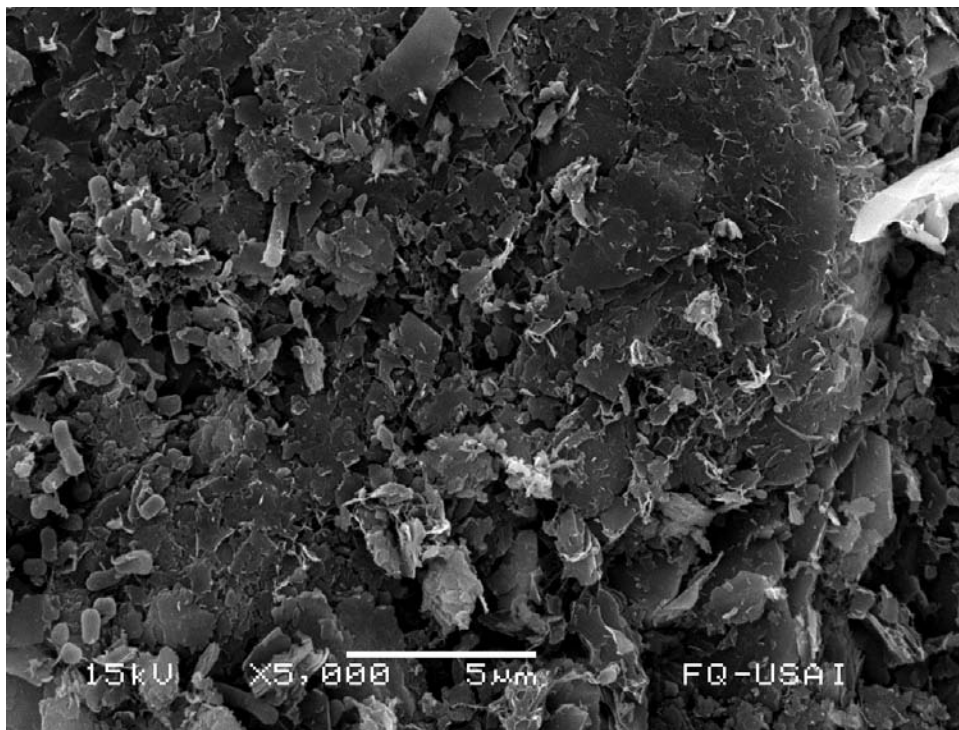
Micrografía 11. Celda 3 – PARS. Empaque (granillo de grafito)



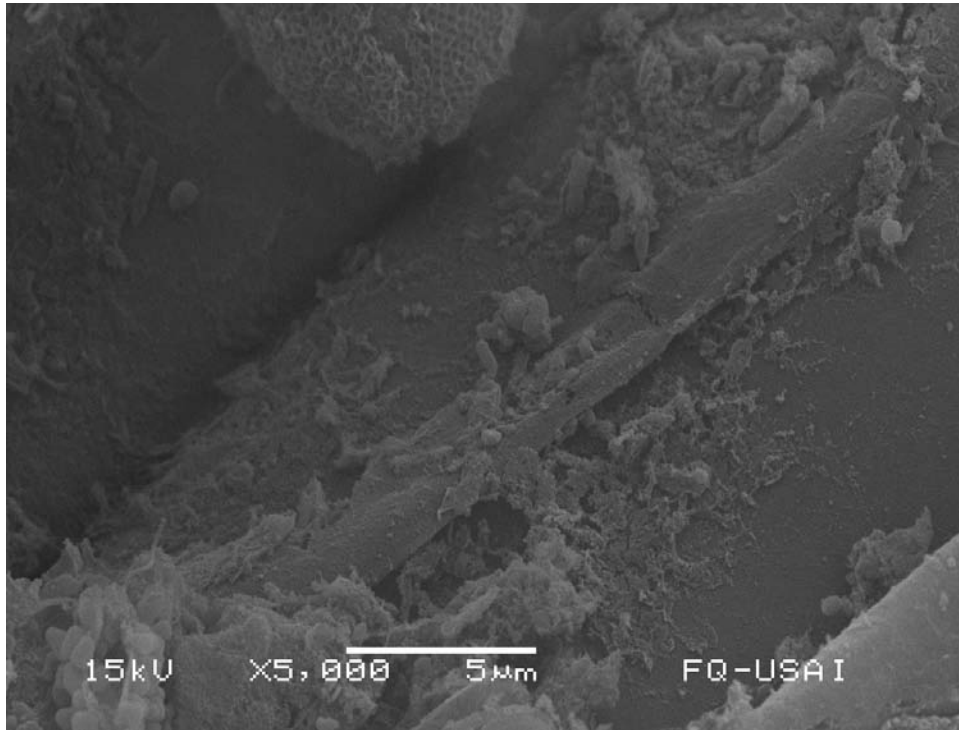
Micrografía 12. Celda 3 – PARS. Empaque (granillo de grafito)



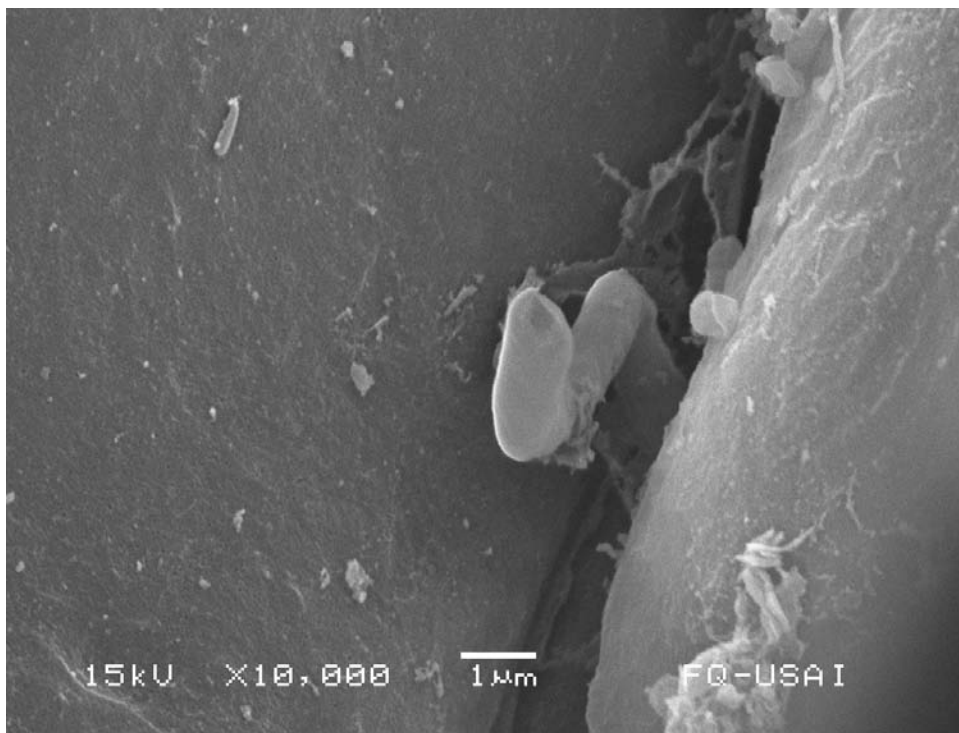
Micrografía 13. Celda 4 – PSN. Ánodo (granillo de grafito)



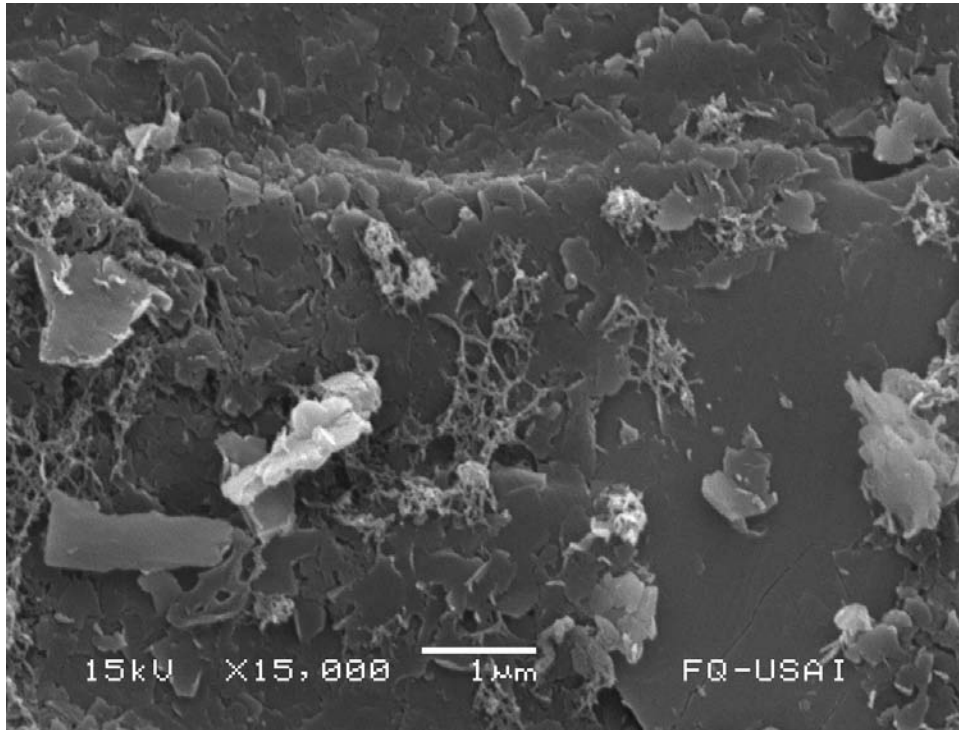
Micrografía 14. Celda 4 – PSN. Ánodo (granillo de grafito)



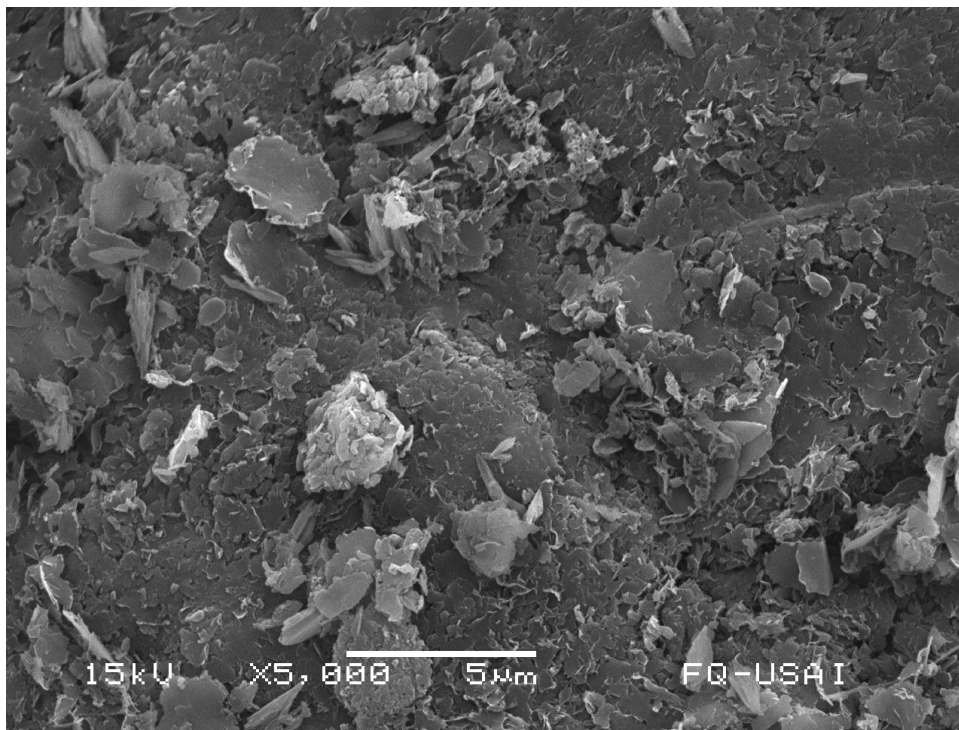
Micrografía 15. Celda 4 – PSN. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)



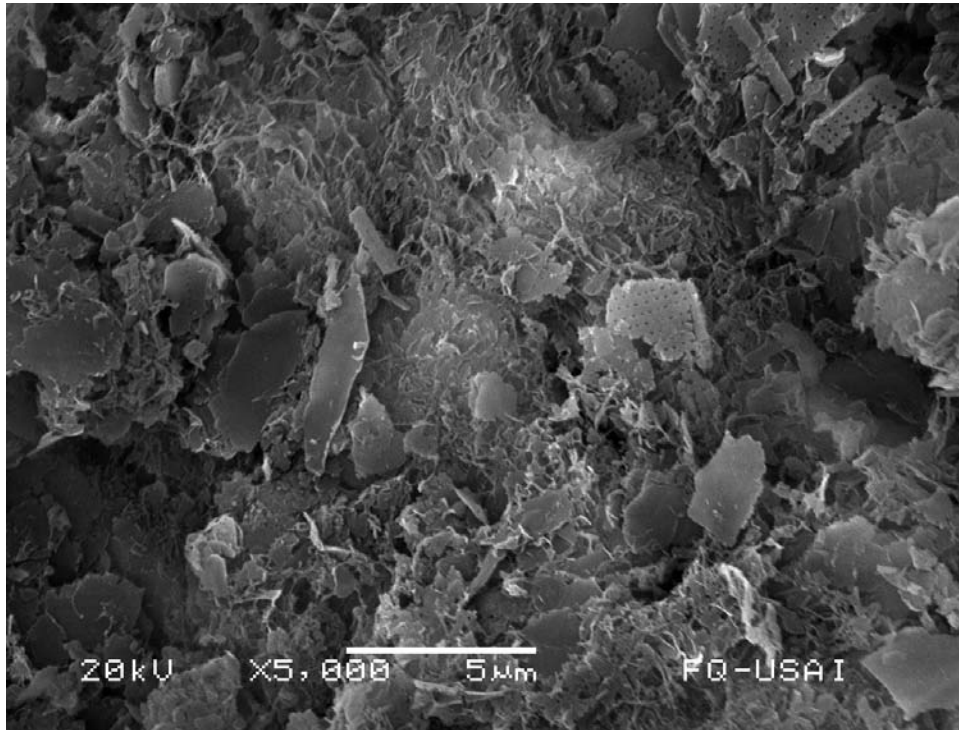
Micrografía 16. Celda 4 – PSN. Cátodo (fibra del fieltro de grafito)



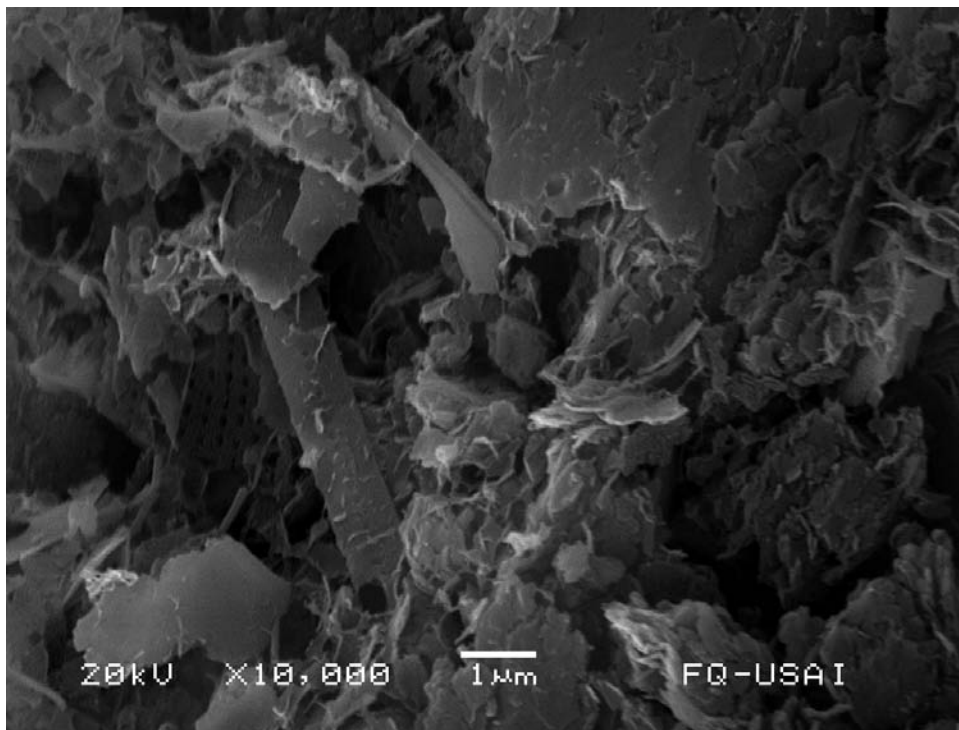
Micrografía 17. Celda 5 – ARSI. Ánodo (granillo de grafito)



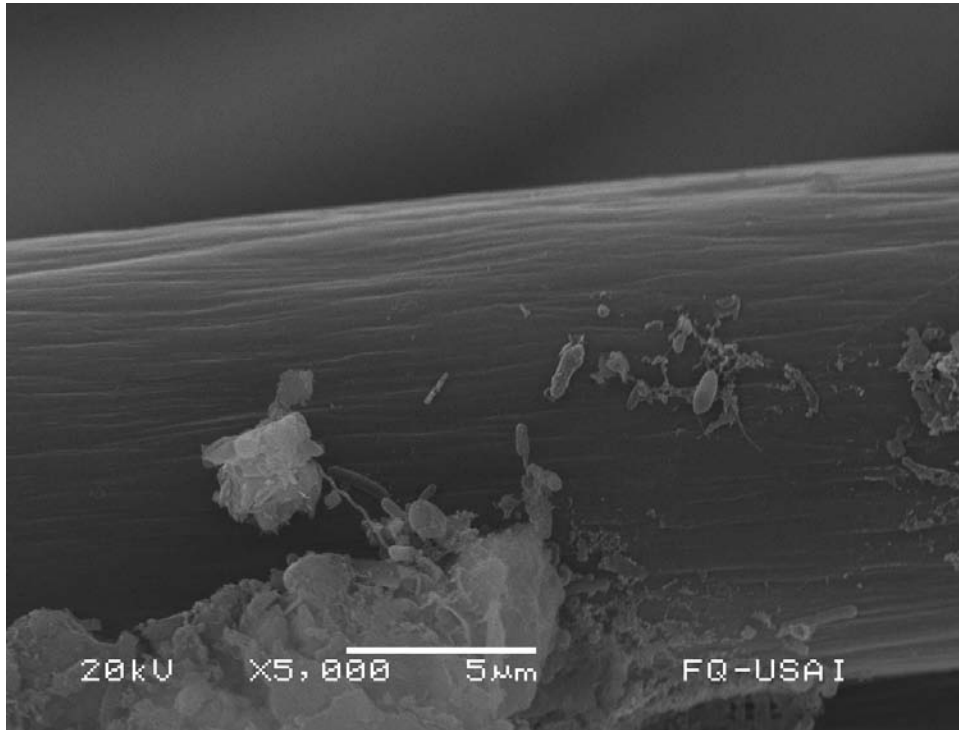
Micrografía 18. Celda 5 – ARSI. Ánodo (granillo de grafito)



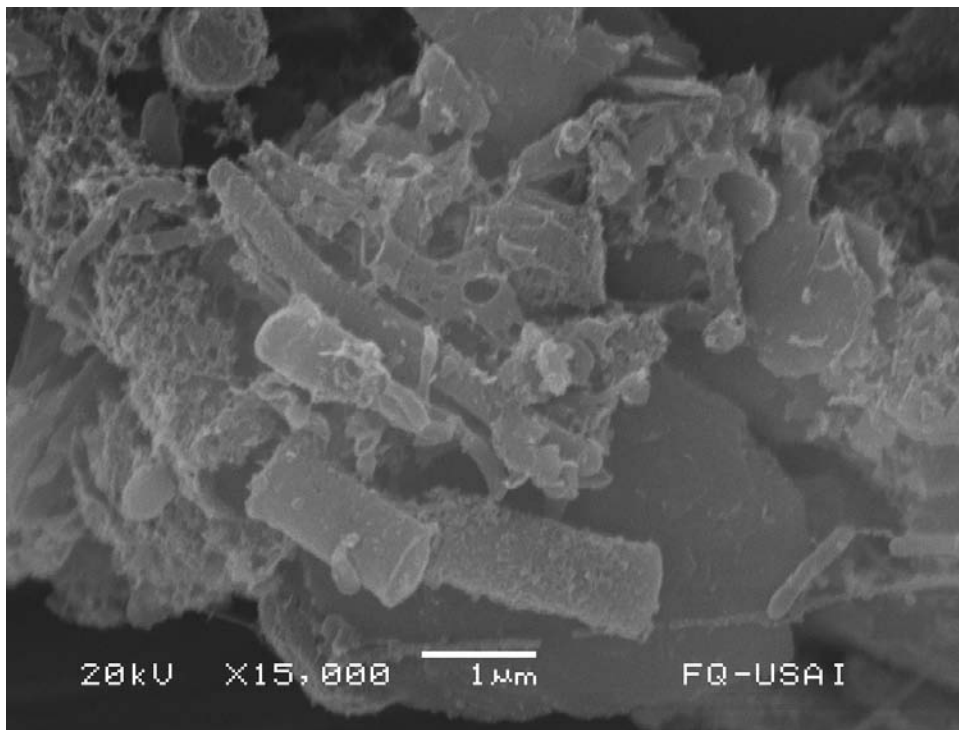
Micrografía 19. Celda 5 – ARSI. Cátodo (granillo de grafito)



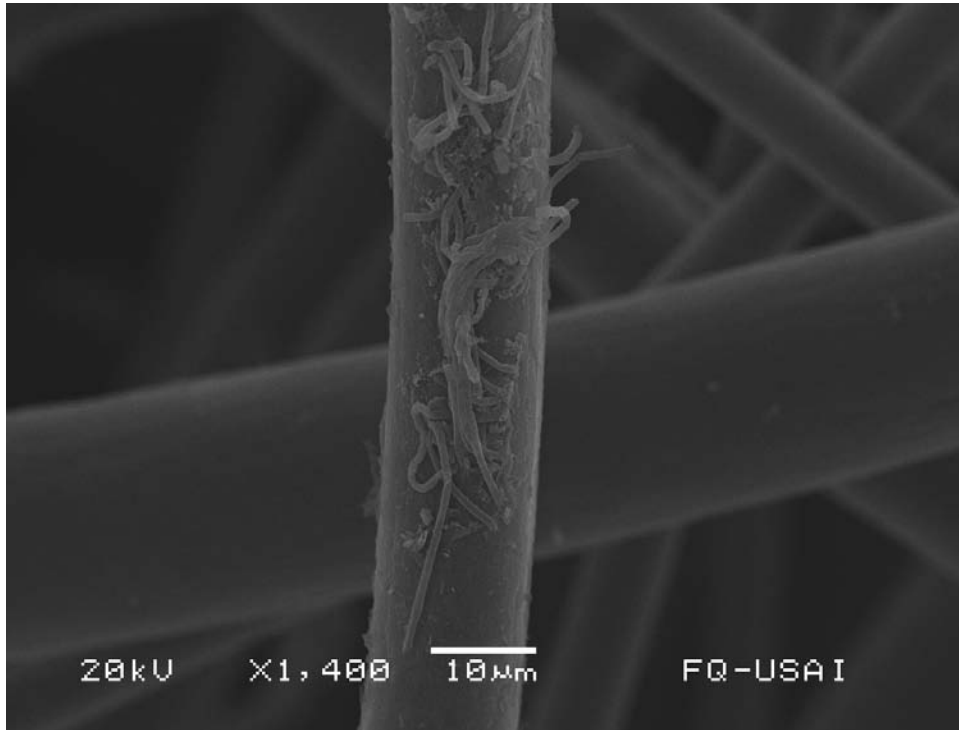
Micrografía 20. Celda 5 – ARSI Cátodo (granos de grafito)



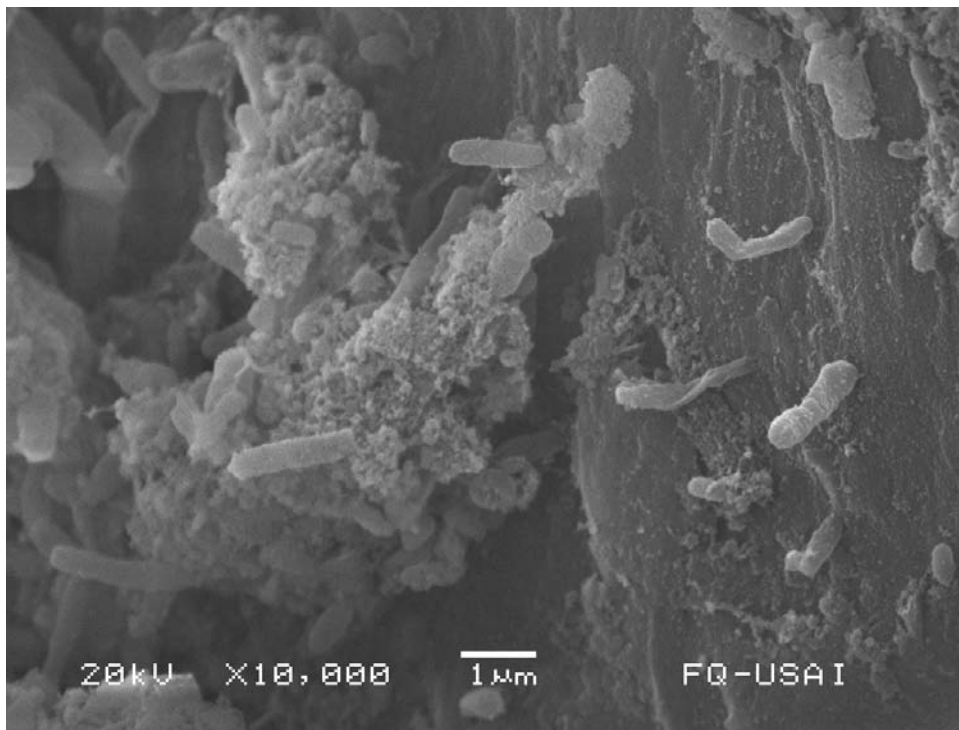
Micrografía 21. Celda 5 – ARSI. Empaque (fibras de fieltro de grafito)



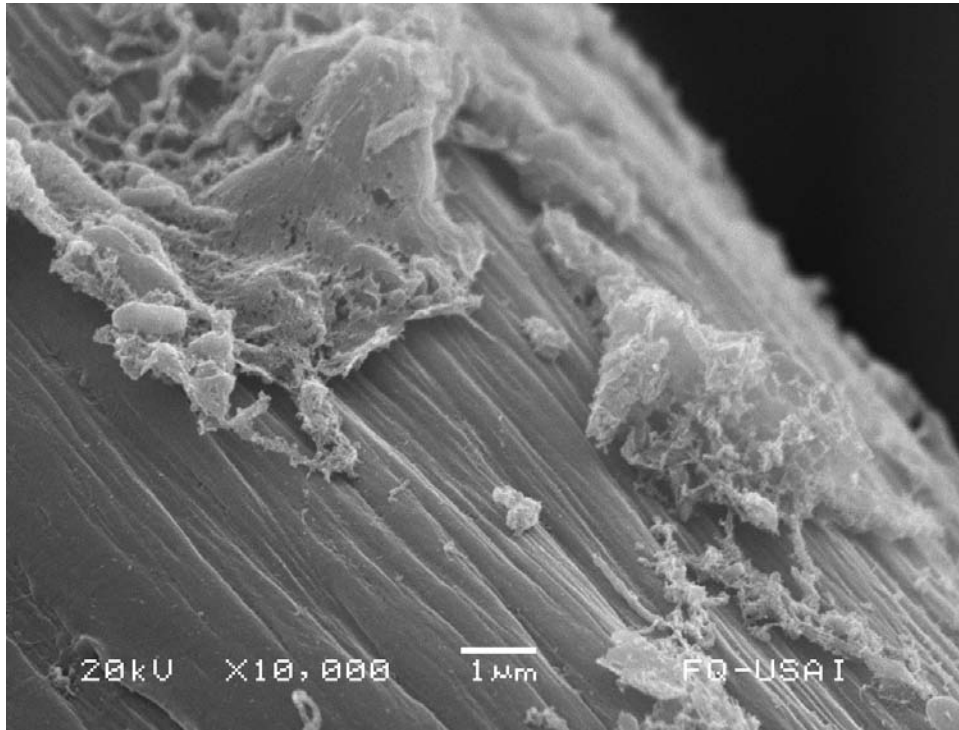
Micrografía 22. Celda 5 – ARSI. Empaque (fibras de fieltro de grafito)



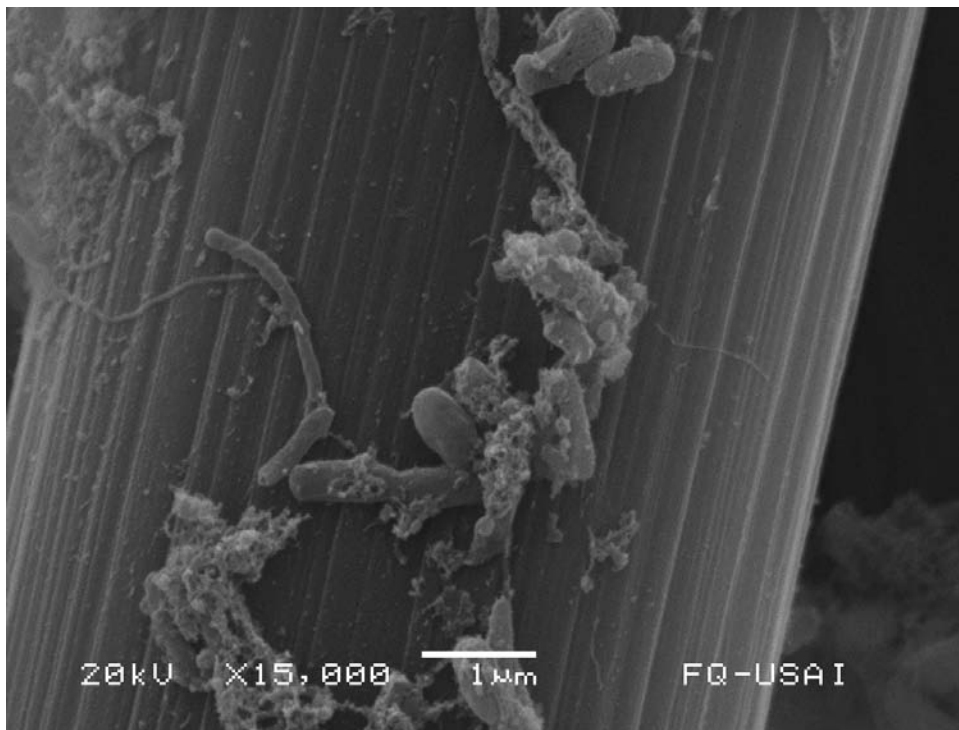
Micrografía 23. Celda 7 – ARS. Ánodo (fibra de fieltro de grafito)



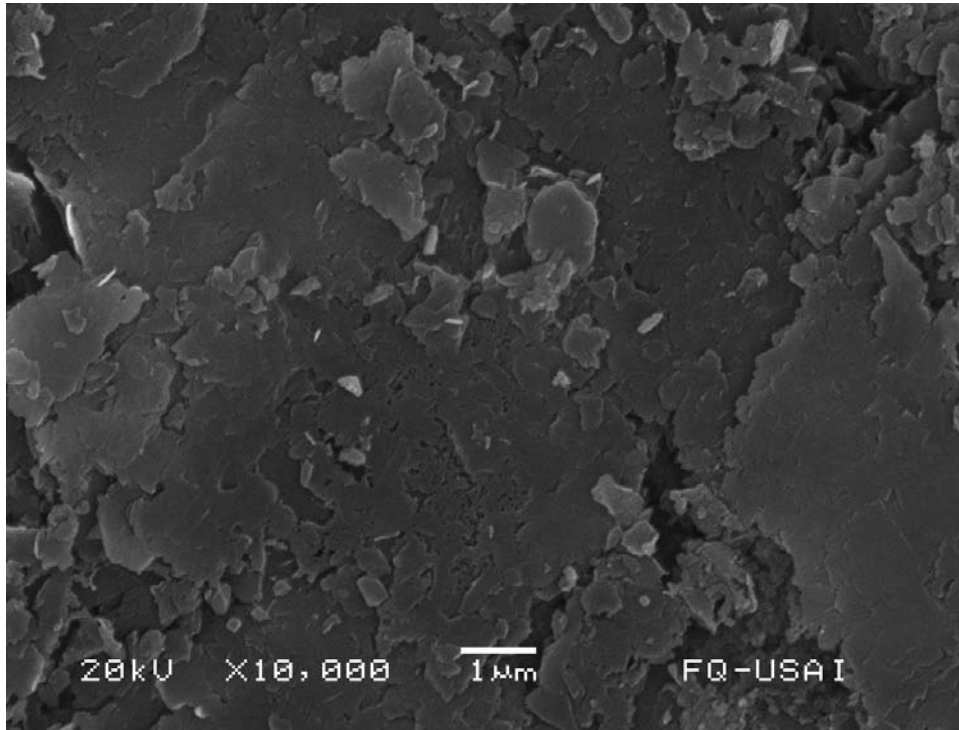
Micrografía 24. Celda 7 – ARS. Ánodo (fibra de fieltro de grafito)



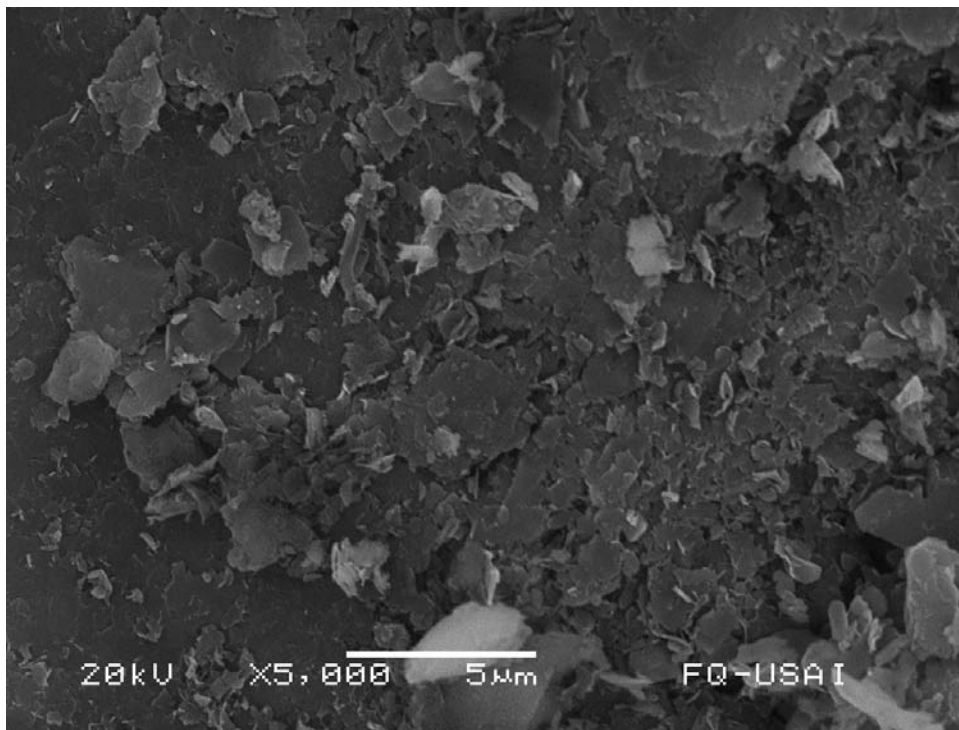
Micrografía 25. Celda 7 – ARS. Cátodo (fibras de fieltro de grafito)



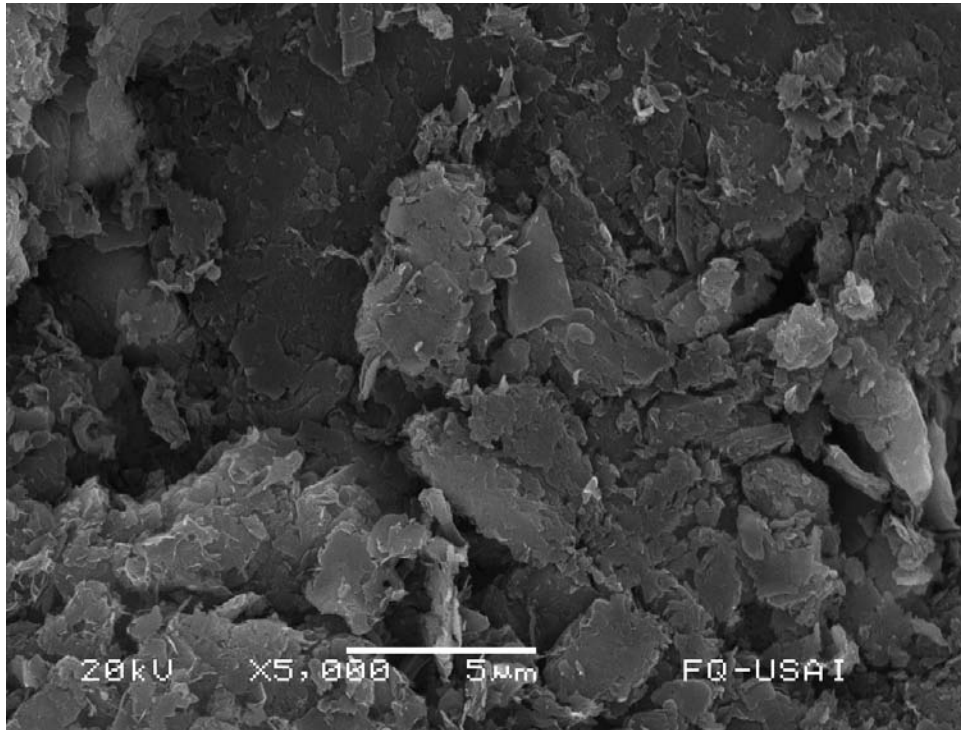
Micrografía 26. Celda 7 – ARS. Cátodo (fibras de fieltro de grafito)



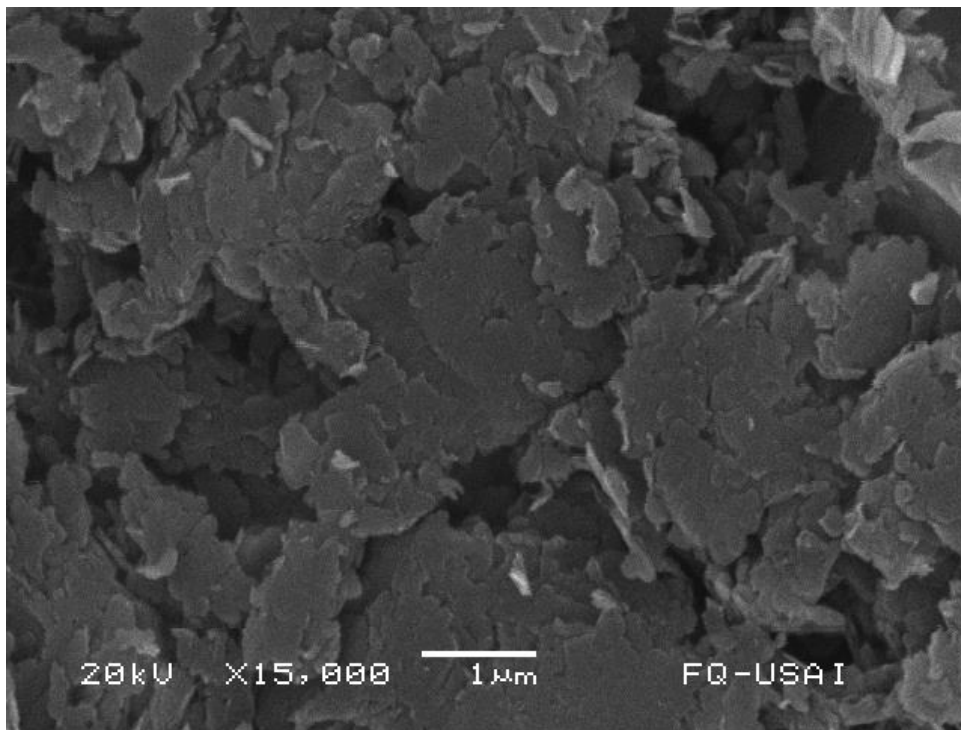
Micrografía 27. Celda 7 – ARS. Empaque (granos de grafito)



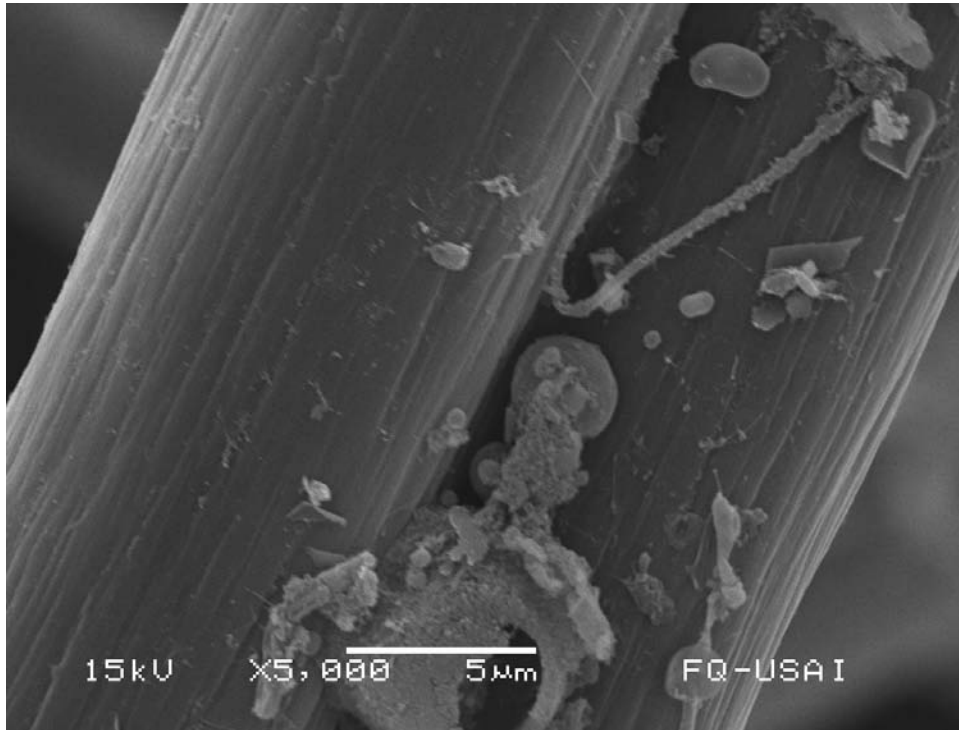
Micrografía 28. Celda 7 – ARS. Empaque (granos de grafito)



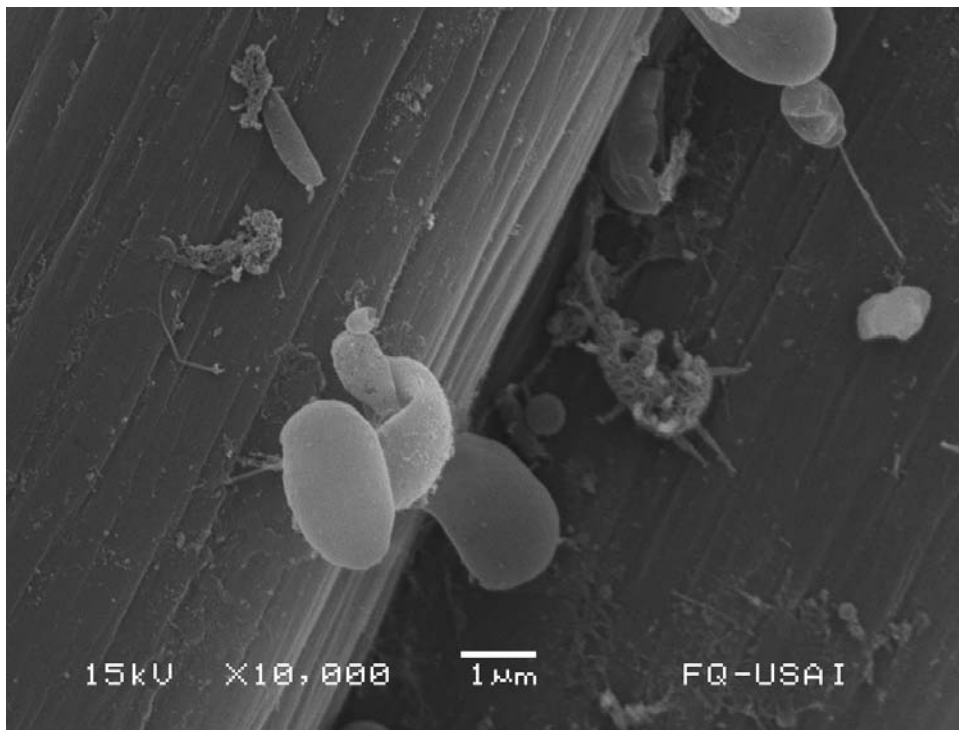
Micrografía 29. Celda 8 – ALL. Ánodo (granos de grafito)



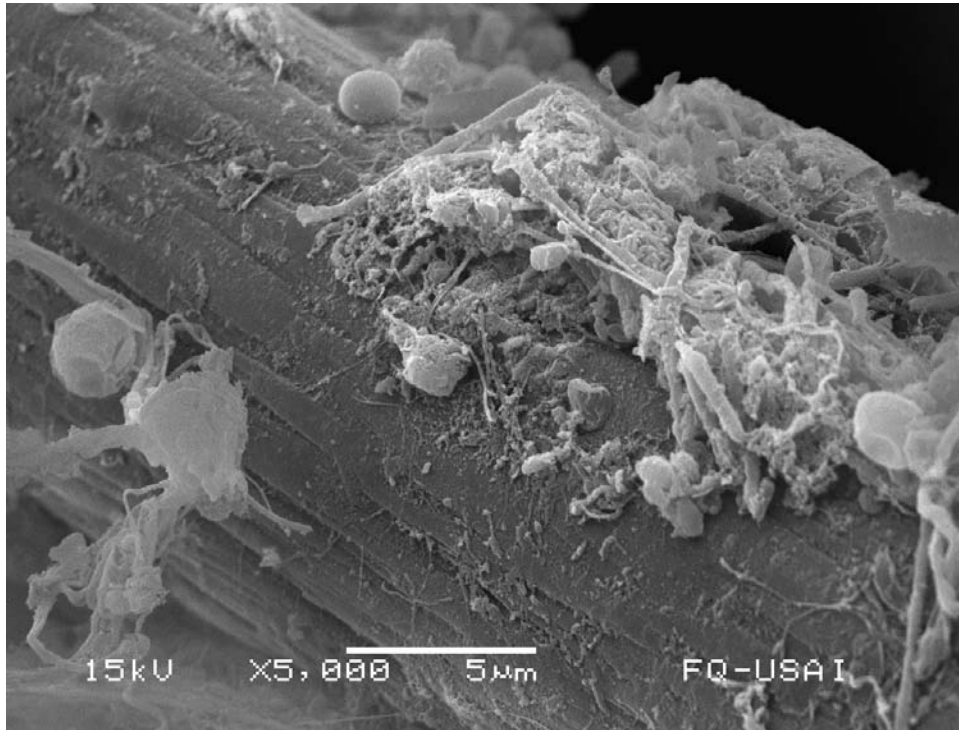
Micrografía 30. Celda 8 – ALL. Ánodo (granos de grafito)



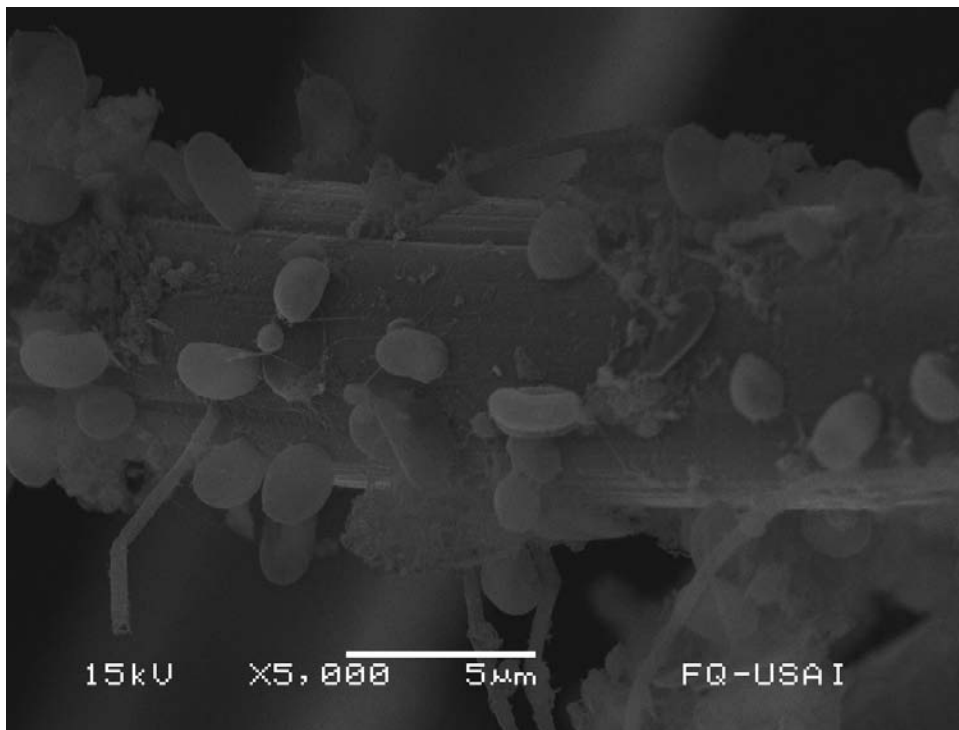
Micrografía 31. Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)



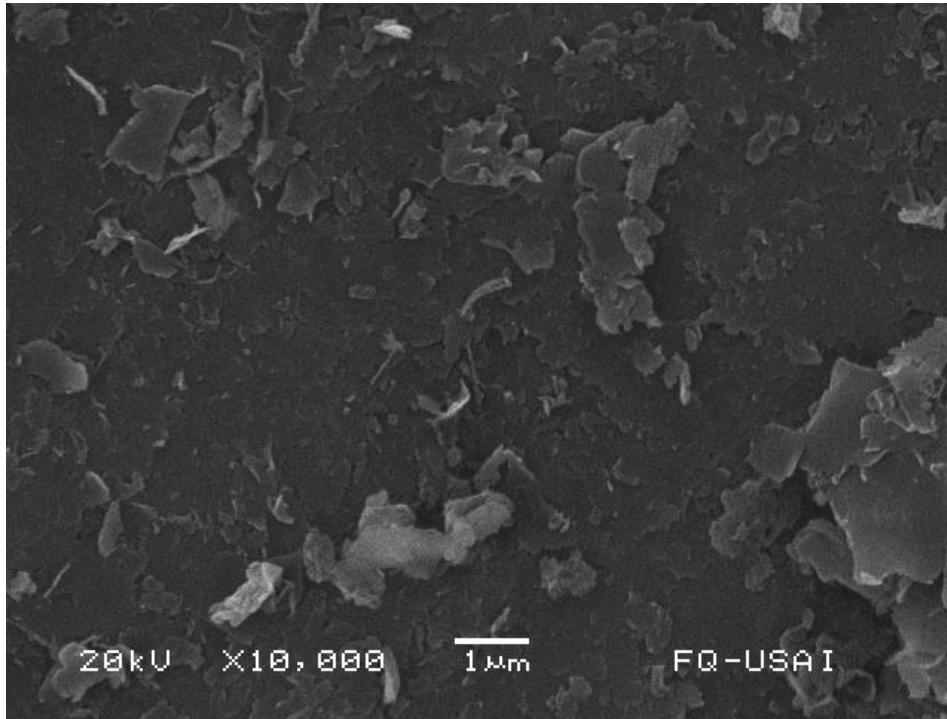
Micrografía 32. Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)



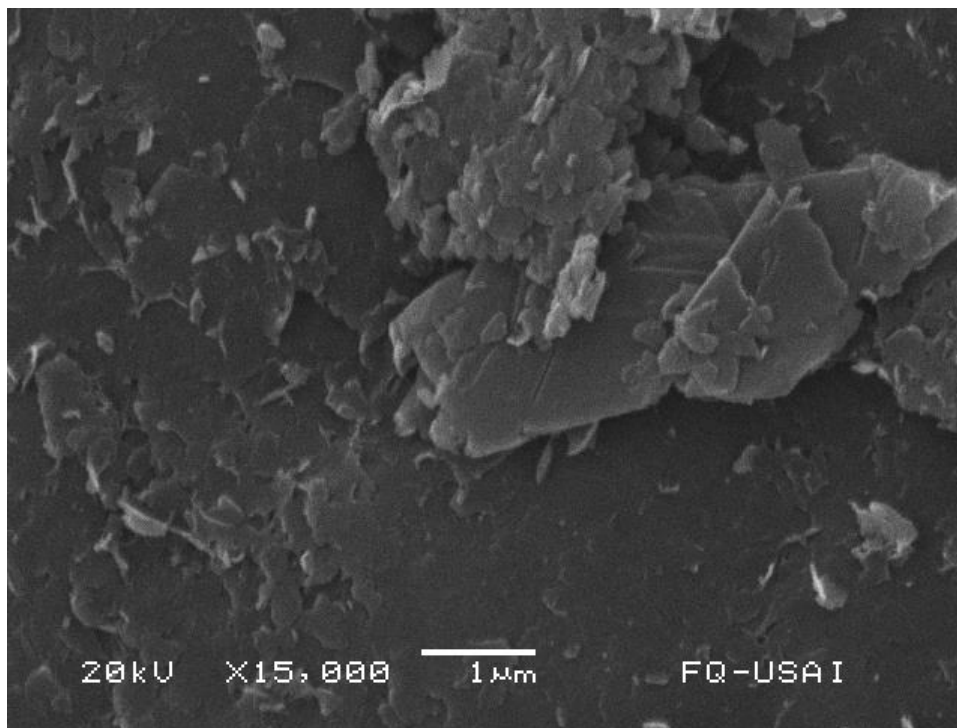
Micrografía 33. Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)



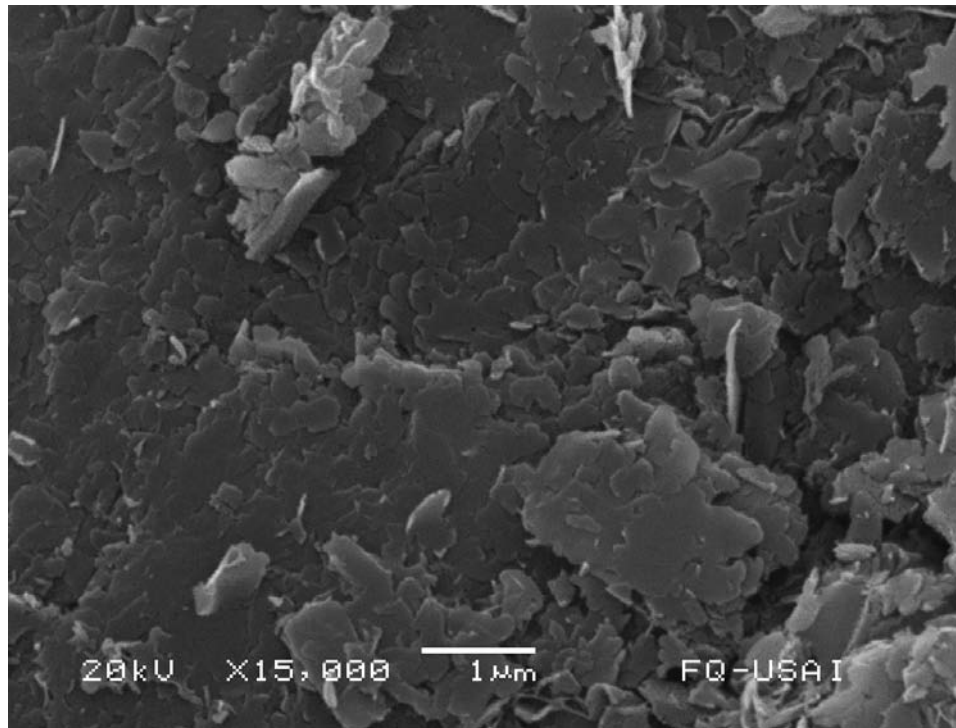
Micrografía 34. Celda 8 – ALL. Cátodo (fibra de grafito)



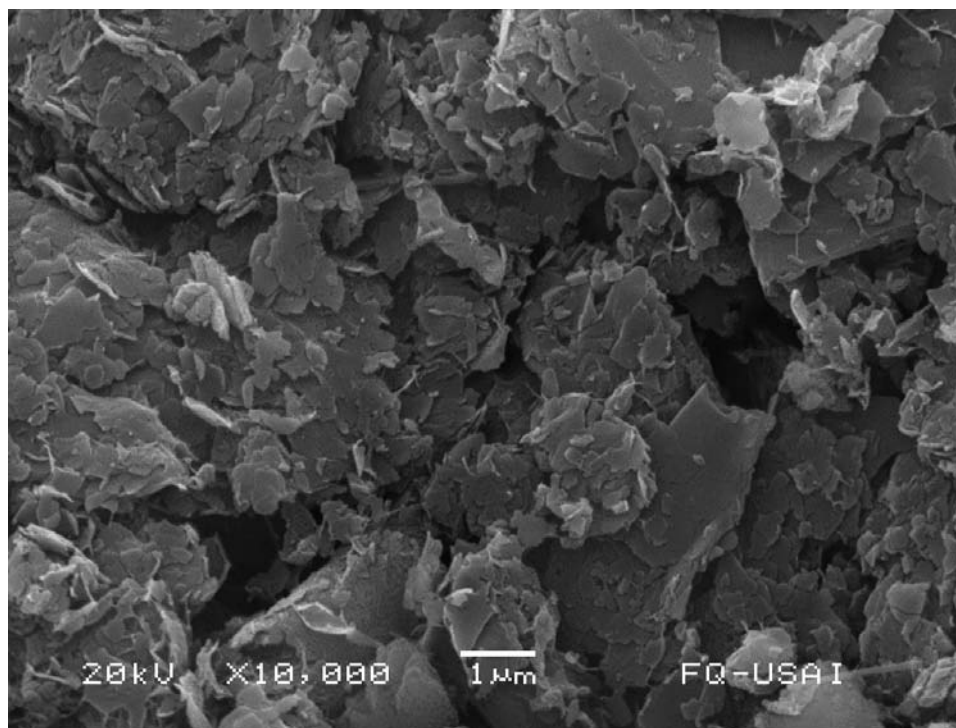
Micrografía 35. Celda 8 – ALL. Empaque (grano de grafito)



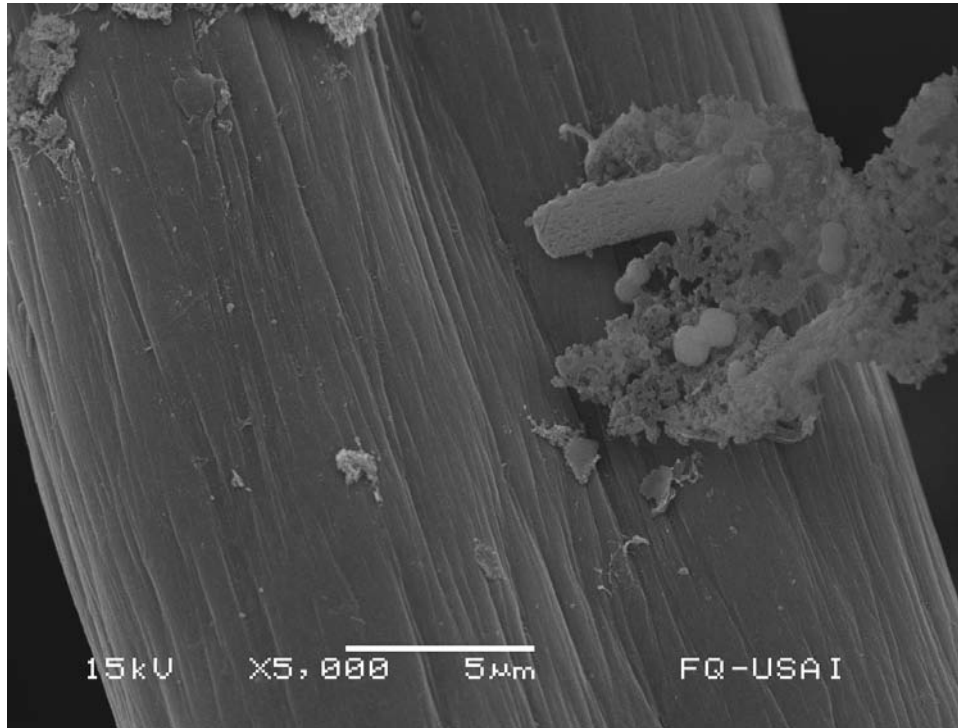
Micrografía 36. Celda 8 – ALL. Empaque (grano de grafito)



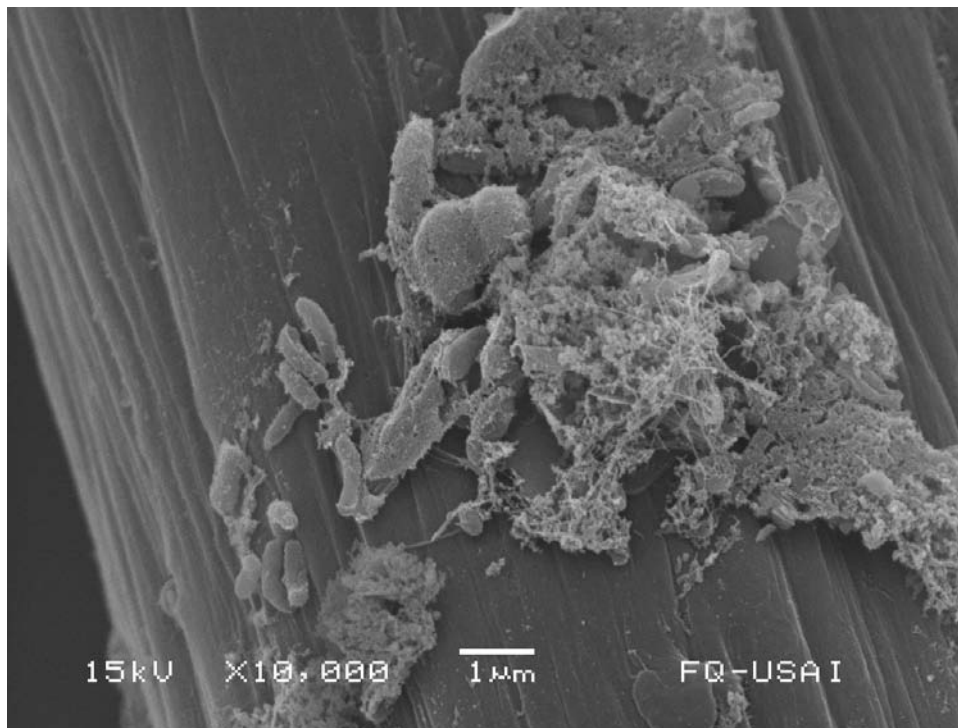
Micrografía 37. Celda 9 – SN. Ánodo (grano de grafito)



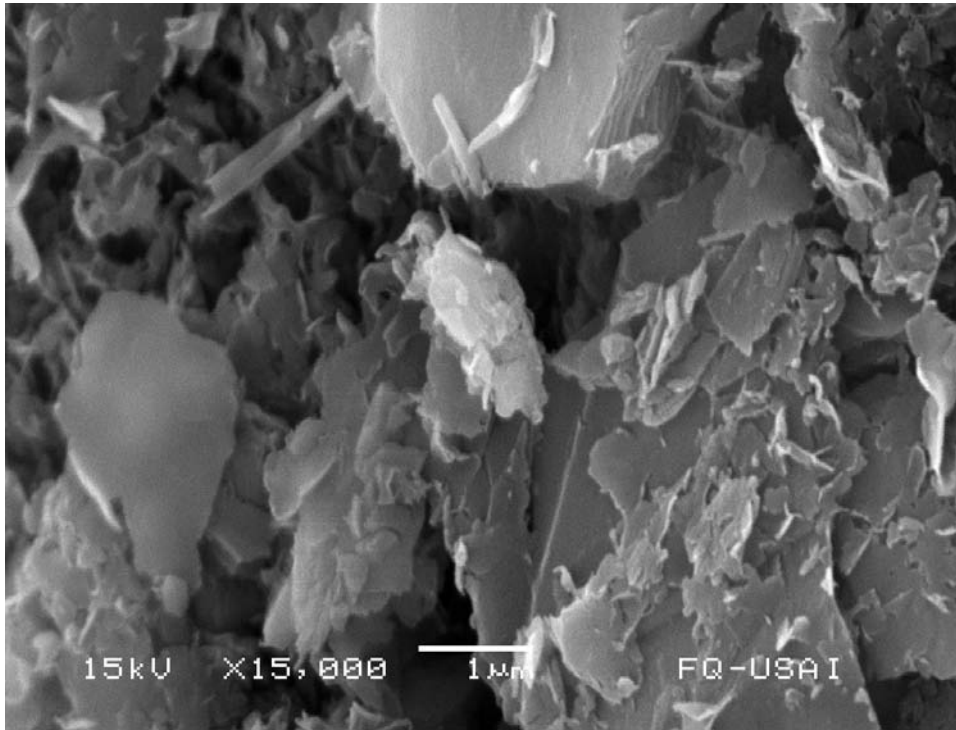
Micrografía 38. Celda 9 – SN. Ánodo (grano de grafito)



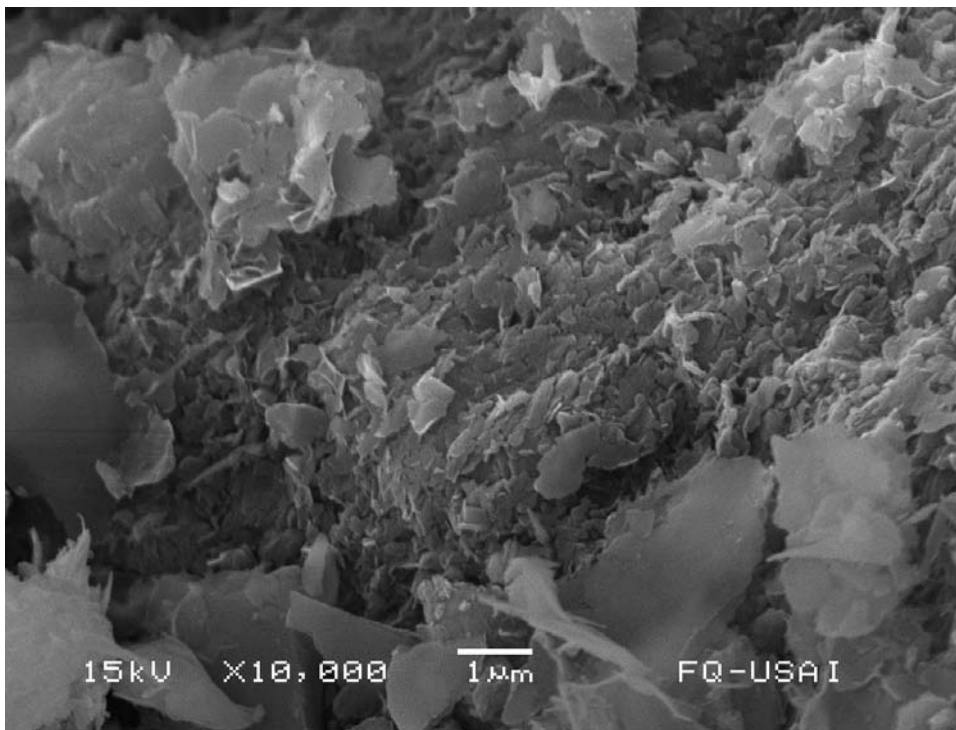
Micrografía 39. Celda 9 – SN. Cátodo (fibra de grafito)



Micrografía 40. Celda 9 – SN. Cátodo (fibra de grafito)



Micrografía 41. Celda 9 – SN. Empaque (grano de grafito)



Micrografía 42. Celda 9 – SN. Empaque (grano de grafito)

Anexo A-5

Disposición controlada de los residuos producidos en esta experimentación

Cabe mencionar que los residuos producidos en esta experimentación no fueron tratados en el laboratorio, sino que se almacenaron y posteriormente se entregaron a la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, (UGA) para su tratamiento y disposición controlada.

En caso de querer hacer el tratamiento para el residuo de la prueba de la demanda química de oxígeno (DQO) debe llevarse a cabo el siguiente protocolo (Montuy-Hernández, 1997):

1. Utilizar bata de algodón, guantes de látex y lentes de protección
2. Colocar 1L de residuo en un vaso de precipitado de plástico de 4L
3. Agregar 20mL de ácido clorhídrico 2N (bajo la campana)
4. Agitar durante 1 minuto por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
5. Centrifugar el residuo a 3500 r. p. m durante 5 minutos
6. La fase líquida se coloca en un vaso de precipitado de plástico de 4L
7. La fase sólida es colocada en un envase de plástico exclusivo para esto
8. A la fase líquida obtenida en el paso número 6 se le agregan 20g de sulfato ferroso amoniacal (FAS) grado industrial y se agita durante 5 minutos por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
9. Agregar hidróxido de sodio 8N, hasta un pH = 9.5 (bajo la campana)

Nota 1: Para poder realizar el paso anterior adecuadamente se debe hacer lo siguiente:

- a) Agregar 600mL de hidróxido de sodio 8N, lentamente (bajo la campana) debido a que la reacción es muy exotérmica.
- b) Dejar enfriar durante 45 minutos aproximadamente en la campana o el tiempo necesario para que alcance una temperatura de 25°C.
- c) Una vez frío se lleva el potenciómetro, se mide el pH y se agrega el hidróxido de sodio 8N necesario para llegar al pH = 9.5.

- d) Si por alguna razón el pH es mayor de 9.5 se debe agregar ácido sulfúrico concentrado hasta obtener el pH deseado.
- e) Durante las adiciones de hidróxido de sodio o de ácido sulfúrico se debe estar agitando constantemente mediante un agitador de vidrio.

10. Una vez que el residuo tiene el pH deseado se centrifuga inmediatamente debido a que si se deja por mucho tiempo el residuo cristaliza. La centrifugación se lleva a cabo a 3500 rpm, -10 °C y durante 8 minutos.

11. El residuo líquido es colocado en un vaso de plástico de 4L y se le agrega ácido sulfúrico concentrado hasta un pH = 7 (se necesitan aproximadamente 3 mL).

12. Una vez neutralizado el residuo líquido puede ser vertido por el drenaje sin ningún problema.

13. En una charola de metal se le pone un plástico grueso a la medida de ésta y se coloca el residuo sólido.

14. En una parrilla de calentamiento a 75°C se coloca la charola con el residuo durante 24 horas para que éste se seque.

15. Una vez seco el residuo es colocado en un recipiente exclusivo para éste.

Proceso fisicoquímico de eliminación de metales en residuos de DQO

El proceso fisicoquímico de eliminación de metales consiste en tres etapas (Montuy-Hernández, 1997):

En la etapa 1 se adiciona el ácido clorhídrico HCl, precipitando el catión Ag^+ como cloruro de plata AgCl y el catión mercurioso Hg_2^{2+} como cloruro mercurioso Hg_2Cl_2 .

En la etapa 2 se adiciona el sulfato ferroso amoniacal $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$, para reducir el Cr^{6+} a Cr^{3+}

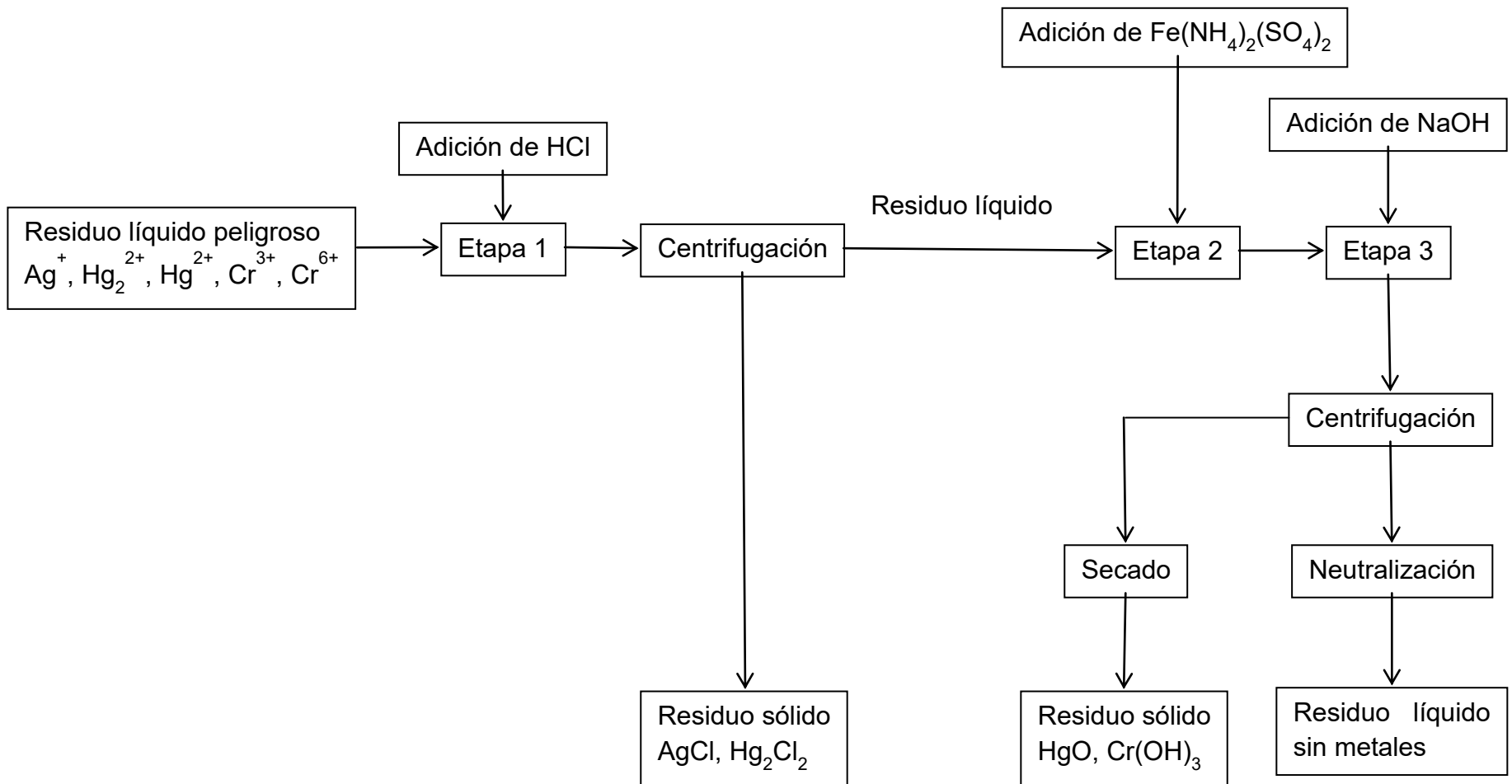
Y, por último, en la etapa 3 se adiciona el hidróxido de sodio NaOH para precipitar el catión mercúrico Hg^{2+} como óxido mercúrico HgO y el catión Cr^{3+} como hidróxido de cromo $\text{Cr}(\text{OH})_3$.

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio - Anexos

En este proceso se emplean las operaciones de precipitación, óxido-reducción, centrifugación y neutralización. La Figura A-5.1 muestra el diagrama de bloques respectivo

.

Figura A-5.1. Diagrama de bloques de los procesos empleados para eliminación de metales en residuos de DQO



Bibliografía

Alzate, L. 2014. Aguas residuales domésticas, fuente de energía renovable. *Ciencia y Desarrollo*. 269(40):46-49.

APHA-AWWA-WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 18ª edición. Díaz de Santos. Madrid, España.

Arias, I., Carlos, A., Brix, H. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Núm. 13; 17-24. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. <http://www.redalyc.org/pdf/911/91101302.pdf>

Rittmann, B. E., Mc Carty, P. L. 2001. *Biotecnología del Medio Ambiente: Principios y Aplicaciones*. Ed. Mc Graw-Hill. Madrid, España.

Carmona, A., Harnisch, F., Kuhlicke, U., Neu, T., Schröder, U. 2012. Electron transfer and biofilm formation of *Shewanella putrefaciens* as function of anode potential. *Bioelectrochemistry*. 93:23-29.

Centro Virtual de Información del Agua. 2004. Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A. C., Fundación Gonzalo Río Arronte, <https://www.agua.org.mx/index.php/el-agua/que-es> (consultado el 10 de noviembre de 2014).

CONAGUA 2013. Estadísticas del agua en México, edición 2013. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: México D.F., México.

CONAGUA 2014. Estadísticas del agua en México, edición 2014. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: México D.F., México.

CONAGUA 2015. Estadísticas del agua en México, edición 2015. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: México D.F., México.

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio

Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Ramsar, Irán 2 de febrero de 1971. Modificada según el Protocolo de París, 3 de diciembre de 1982 y las Enmiendas de Regina, 28 de mayo de 1987. París, 13 de julio de 1994 París, Francia. http://archive.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-texts/main/ramsar/1-31-38_4000_2__

Crites, R., Tchobanoglous, G. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw Hill. Bogotá, Colombia.

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., Andrade, M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Cochabamba Bolivia. http://www.centro-agua.org/wp-content/uploads/2011/12/2010_delgadilloytotros_depuracin%20de%20aguas%20residuales%20por%20medio%20de%20humedales%20artificiales_finalc.pdf

De Schamphelaire, L., Den Bossche, L., Son Dang, H., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., Verstraete, W. 2008. Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Science Technology*. 42:3053-3058.

Devore, J. 2008. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. CENGAGE Learning. Séptima edición, México D. F. México.

DCC. 2012. Dirección de Cambio Climático. MINAE, Ministerio del Ambiente y Energía. Costa Rica. <http://www.cambioclimaticocr.com/2012-05-22-19-47-24/programas/programa-pais>

Durán, M. C. 1994. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso. PIQA y QA, UNAM, Facultad de Química, México D. F. México.

Erazo Cortés. 2015. Evaluación de medios de empaque para un reactor que simula un humedal artificial asistido electroquímicamente. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México D. F. México.

Falcón, A., Lozano, E. J., Juárez, K. 2009. Bioelectricidad. *BioTecnología*. 13(3):62-78.

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio

Fang, Z., Song, H. L., Cang, N., Li, X. N. 2013. Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresource Technology*. 144:165–171.

Ferrer, J., Seco, A. 2007. *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Helder, M., Strik, D.P.B.T.B., Hamelers, H.V.M., Kuhn, A.J., Blok, C., Buisman, C.J.N. 2010. Concurrent bio-electricity and biomass production in three plant-microbial fuel cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*. 101:3541-3547.

INEGI. 2014. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Folleto sobre el día mundial del agua. <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2014/agua0.pdf> (consultado el 24 de septiembre 2014).

Jiménez, B., Torregrosa, M.L., Aboites L. 2010. *El agua en México: cauces y encauses*. Ed. CONAGUA-AMC. México D.F., México.

Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., Watanabe, K. 2008. Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 79:43-49.

Kim, S., Chae, K.J., Choi, M.J., Verstraete, W. 2008. Microbial fuel cells: recent advances, bacterial communities and application beyond electricity generation. *Environ. Eng. Res.* 13(2):51-65.

Liu, S., Song, H., Wei, S., Yang, F., Li, X. 2014. Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow constructed wetland - Microbial fuel cell systems. *Bioresource Technology*. 166:575–583.

Masters, G. M., Ela, W. P. 2008. *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Pearson Educación. Madrid, España.

Montuy-Hernández, R. 1997. Proceso fisicoquímico para eliminar plata, mercurio y cromo, del residuo generado en la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO). Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México D. F. México.

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio

NOM-002-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998. México D.F. México.

Salinas-Juárez, M. G., Roquero, P., Durán-Domínguez-de-Bazúa, C. 2016. Plant and microorganisms support media for electricity generation in biological fuel cells with living hydrophytes. *Bioelectrochemistry*. 112:145-152.

Seoánez, M., y Ojesto, A. 1999. Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales, fundamentos científicos, tecnología, diseño. Col. Ingeniería del medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Skoog, A. 2001. Principios de análisis instrumental. McGraw Hill. Quinta edición. Madrid, España.

Strik, D. P. B. T. B., Bert, H. V. M. H., Snerl, J. F. H., Buisman, C. J. N. 2010. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*. 86(3):973-981.

Strik, D., Timmers, R., Helder M., Steinbusch, K., Hamelers, H., Buisman, C. 2011. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*. 29(1):41-49.

Toyama, T., Furukawa, T., Maeda, N., Inoue, D., Sei, K., Mori, K., Kikuchi, S., Ike, M. 2011. Accelerated biodegradation of pyrene and benzo[a]pyrene in the *Phragmites australis* rhizosphere by bacteria-root exudate interactions. *Water Res.* 45(4):1629–1638.

UNESCO. 1982. Oficina de Normas Internacionales y Asuntos Legales Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=12033&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

UNESCO 2006. Manual de la Convención de Ramsar. Cuarta edición. http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf

Vymazal, J. 2011a. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environ. Sci. Technol.* 45(1):61–69.

Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio

Vymazal, J. 2011b. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*. 674(1):133–156.

Zarco, Y. 2013. Inoculación con micorriza arbuscular y uso de vermicomposta en el cultivo de albahacar (*Ocimum basilicum* L.) en una azotea naturada. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México D. F. México.