



Artículo de investigación

Estudio estadístico de la influencia de la distribución geométrica del cátodo en la producción de energía eléctrica en una celda de combustible microbiana de sedimentos



Statistical study of the influence of the geometric distribution of the cathode in the production of electrical energy in a sediment microbial fuel cell

Marlenne Feregrino-Rivas¹ , Blenda Ramirez-Pereda^{2*} , Francisco Estrada-Godoy³

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, CP 80220, Culiacán, Sinaloa, México

²CONACYT-TecNM/Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, CP 80220, Culiacán, Sinaloa, México

³ESIA IPN Ticomán. Posgrado en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales. Av. Ticomán 600, Col. San José Ticomán, Delg. Gustavo A. Madero, Postal Code 07340. México

Autor de correspondencia: Dra. Blenda Ramirez-Pereda, CONACYT-TecNM/Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, CP 80220, Culiacán, Sinaloa, México. E-mail: blenda.rp@culiacan.tecnm.mx. ORCID:0000-0002-8341-3737.

Recibido: 14 de Septiembre del 2021

Aceptado: 18 de Enero del 2022

Publicado: 25 de Enero del 2022

Resumen. - *El impacto negativo al ambiente por la explotación y generación de energía a partir de combustibles fósiles impone la necesidad de búsquedas de nuevas fuentes de energías renovables y sustentables. Las Celdas de Combustible Microbianas de Sedimentos (CCM-S) son una tecnología en desarrollo para la producción de bioelectricidad. Se ha demostrado que algunos microorganismos presentes en sedimentos de ambientes fluviales son capaces de producir electrones durante las reacciones bioquímicas de su metabolismo. Uno de los aspectos fundamentales en la eficiencia de una CCM-S son los electrodos del biorreactor. La presente investigación se enfocó en el estudio y demostración estadística de la influencia del diseño del cátodo de una CCM-S sobre la producción de bioelectricidad a partir de sedimentos fluviales. Se diseñaron dos cátodos de una CCM-S no dividida. Los electrodos fueron fabricados de Fibra de Carbono Unidireccional (FCU). El área total del ánodo fue de 81 cm², los cátodos evaluados tuvieron áreas de 81 cm² y 40.5 cm². Se colectaron muestras de sedimentos y agua del Río Culiacán. El volumen total de trabajo fue de 1500 ml. Se estudiaron dos CCM-S, en el primer biorreactor el cátodo fue colocado verticalmente y sumergido en el electrolito de trabajo, mientras el cátodo de la segunda celda fue colocado horizontal y parcialmente sumergido. Se determinó la diferencia de potencial eléctrico producido por ambas celdas durante 40 días y se monitorearon algunos parámetros físicos. Los resultados de ambas CCM-S fueron comparados y las distribuciones de voltaje obtenidas fueron caracterizadas estadísticamente empleando el software R. Además se realizó un ANOVA mediante el test de Welch y comparaciones robustas mediante la función Lincon para comprobar la existencia de diferencias significativas entre ambos grupos. Los resultados demostraron que es posible obtener energía eléctrica a partir de los sedimentos fluviales. Se obtuvieron valores máximos de voltaje de 513 mV y 664.7 mV para las celdas 1 y 2, respectivamente, evidenciando que la disposición del cátodo en la celda influye en la energía producida. El estudio estadístico avanzado comprobó que existen diferencias significativas entre las medias de las distribuciones de voltaje de ambas celdas, con un p-value de 0.01 con un nivel de confianza de 95%.*

Palabras clave: Celda de combustible microbiana de sedimento; Sedimentos fluviales; Diseño de electrodos; Bioelectricidad; Técnicas estadísticas avanzadas.

Abstract. - *The negative impact on the environment by the exploitation and generation of energy from fossil fuels imposes the need to search for new sources of renewable and sustainable energy. Sediment Microbial Fuel Cells (S-MFC) are a developing technology to produce bioelectricity. Some microorganisms present in sediments of river environments can produce electrons during the biochemical reactions of their metabolism. One of the fundamental aspects in the efficiency of a S-MFC are the electrodes of the bioreactor. The present investigation focused on the study and statistical demonstration of the influence of the cathode design of a S-MFC on the production of bioelectricity from river sediments. Two cathodes of an undivided CCM-S were designed. The electrodes were made of Unidirectional Carbon Fiber (UCF). The total anode area was 81 cm², the evaluated cathodes had areas of 81 cm² and 40.5 cm². Sediment and water samples were collected from the Culiacán River. The total working volume was 1500 mL. Two S-MFC were studied, in the first bioreactor the cathode was placed vertically and completely submerged in the working electrolyte, while the cathode of the second cell was placed horizontally and partially submerged. The electric potential difference produced by both cells for 40 days was determined. An advanced ANOVA was performed to compare the means of the voltage distributions. The results showed that it is possible to obtain electrical energy from river sediments. Maximum voltage values of 513 mV and 664.7 mV were obtained for cells 1 and 2, respectively, showing that the arrangement of the cathode in the cell influences the energy produced. The advanced statistical study verified that there are significant differences between the means of the voltage distributions of both cells, with a p-value of 0.01 with a confidence level of 95%.*

Keywords: Microbial sediment fuel cell; River sediments; Electrode design; Bioelectricity; Advanced statistical techniques.



1. Introducción

La demanda energética mundial depende actualmente en gran medida de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural). La extracción y el consumo de estos combustibles tienen un impacto negativo en el medio ambiente, provocando un aumento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1-3].

El crecimiento económico mundial está directamente relacionado con la demanda y el consumo de energía. Actualmente se tiene un desabasto de energía a nivel mundial evidenciado especialmente en términos de transporte, industria y hogar. Por estas y otras razones, investigadores de todas las naciones preocupados por el abastecimiento de combustibles y la sostenibilidad del planeta, han dedicado esfuerzos al estudio de Nuevas Fuentes de Energía Renovable (NFER). Las energías eólica, geotérmica, hidráulica y solar son Fuentes de Energía Renovable (FER) ubicadas en zonas con alto potencial de implementación.

Las zonas geográficas para la instalación y producción de FER deben tener condiciones climáticas favorables para su desarrollo y de esta forma garantizar el suministro de energía actual y futura [4-6]. La preocupación por la crisis energética, los cambios ambientales y la dependencia de las FER de las condiciones climáticas de las zonas de ubicación han traído al foco de atención internacional las NFER. Una de las tecnologías más recientes planteadas en Foros Internacionales son las celdas de combustible microbianas (CCM) [7-9].

Las CCM son dispositivos que convierten la energía química de un sustrato en energía eléctrica debido a la acción biocatalizadora de microorganismos. Esta nueva tecnología proporciona energía, con perspectivas de desarrollo y se considera amigable con el medio

ambiente [10]. De manera general una CCM, es un biorreactor electroquímico, también conocido como biobatería o biopila. Una batería es un reactor electroquímico (celda galvánica) donde a partir de reacciones químicas espontáneas se produce energía eléctrica. La celda galvánica es un sistema electroquímico que consta de un par de reacciones químicas, conocido como reacciones REDOX. En el par redox, un agente reductor es capaz de perder electrones y producir una especie oxidada. Los electrones son tomados por un agente oxidante y se obtiene una especie reducida. Ambas reacciones deben ocurrir simultáneamente. El flujo de electrones que ocurre de una especie a otra da lugar a una corriente eléctrica que puede ser aprovechada [11, 12].

En el caso de las CCM los microorganismos son los principales responsables de ceder los electrones al sistema electroquímico mientras otra especie química los toma para asegurar la reacción complementaria del par redox. Para que ocurra la transferencia de electrones se necesita que las especies donadora y receptora estén en contacto con un material conductor, llamado electrodo. El electrodo que capta los electrones desde el donador es conocido como ánodo. Los electrones viajan a través de cables conductores mediante un circuito externo y llegan al electrodo que los recibe, conocido como cátodo [13, 14].

Los electrones cedidos por los microorganismos son obtenidos a partir de los procesos metabólicos de estos, específicamente la oxidación de un sustrato. Se han detallado el uso de numerosos sustratos empleados en CCM como sustratos convencionales [15], aguas residuales [16, 17], lodos activados o anaerobios [18, 19] o cualquier otro tipo de materia orgánica. La materia orgánica es considerada como un componente importante en la fertilidad de los suelos por su aporte de minerales y nutrientes en suelos. Estos componentes aportan energía a los



microorganismos que habitan en suelos y sedimentos. Además, se conoce que los minerales y nutrientes son acarreados mediante la acción fluvial de drenajes naturales como arroyos, ríos y finalmente se depositan en los mares, lo cual lleva a pensar que involucra funciones de tipo biológico, químico y físico [20, 21].

El uso de sedimentos como sustrato en CCM es una tecnología innovadora, llamada celda de combustible microbiana de sedimentos (CCM-S). La comunidad microbiana presente de forma natural en los sedimentos de ambientes marinos y fluviales puede generar energía eléctrica [22-24]. Una CCM-S funciona al introducir el ánodo en el sedimento conectado a un circuito eléctrico externo que llega al extremo de conexión con el cátodo. Por su parte, el cátodo se encuentra

sumergido o semisumergido en el electrolito, que en muchas ocasiones se emplean aguas tomadas del área donde se obtuvieron los sedimentos.

Al interior de la CCM-S tienen lugar reacciones tanto bioquímicas como electroquímicas; primero la oxidación bacteriana provenientes de la materia orgánica contenida en el sedimento conlleva a la producción de electrones, estos son captados por el ánodo y posteriormente fluyen a través de un circuito eléctrico externo hasta llegar al cátodo. En la superficie del cátodo los electrones entran en contacto con el O_2 y en presencia de protones (H^+) toma 4 electrones del medio para formar H_2O (Ecuación 1) (Figura 1) [25-28].

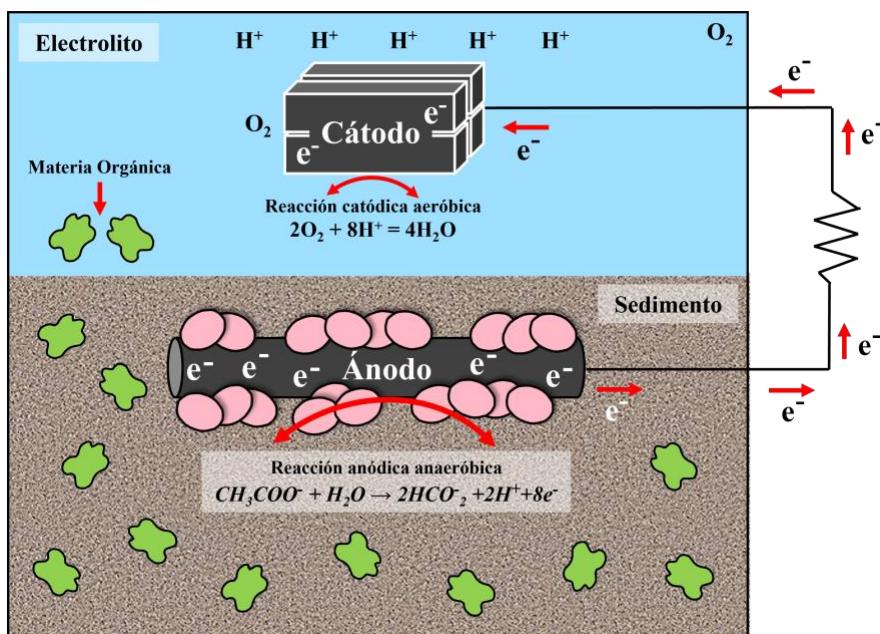
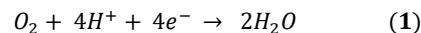


Figura 1. Esquema de la producción de energía eléctrica en una CCM-S.

Numerosos autores han referido la posibilidad de obtener energía eléctrica a partir de sedimentos. Los trabajos reportados han abordado las investigaciones desde diferentes puntos de vista

tales como origen del sedimento, materiales de electrodo, tipo de celda empleada, entre otros. La tabla 1 muestra algunas de las investigaciones más relevantes en ese sentido.

**Tabla 1.** Producción de energía recuperada en CCM-S.

No.1	Tipo de Celda	Material anódico	Origen del sedimento	Energía producida	Ref.
1	No Dividida	Placa de Grafito	Sedimentos Marinos	Densidad de corriente 0.67 mA	[21]
2	No Dividida	Placa de Grafito	Sedimentos Agrícolas	Densidad de potencia 22.19 mW m ⁻²	[27]
3	No Dividida	Fielto Fibra de Carbono	Sedimentos Agrícolas	Densidad de potencia 73 mW m ⁻²	[29]
4	No Dividida	Cepillo de Fibra de Carbono	Sedimentos Fluviales	Eficiencia coulombica 0.56 ± 0.26 V	[30]
5	No Dividida	Fielto de Fibra Carbono	Sedimentos Fluviales	Densidad de potencia 28 mW m ⁻² ± 4 mW m ⁻²	[31]

Los resultados resumidos en la tabla 1 demuestran que las CCM-S no divididas son las que se han empleado con mayor frecuencia debido a ser una configuración sencilla y de fácil implementación y bajos costos al no incluir una membrana de intercambio [32, 33]. De la tabla 1 también destaca que los materiales de carbono se han utilizado ampliamente para la fabricación de electrodos en CCM-S.

Dentro del diseño y configuración de electrodos a base de este tipo de material se pueden identificar subgrupos de acuerdo a la estructura física-química del material. Por ejemplo, materiales de forma plana como la placa de grafito tienen una estructura compacta y una superficie relativamente lisa, lo que puede

facilitar la medición cuantitativa de la biomasa por unidad de área en la superficie del electrodo [34]. Por otro lado, los materiales como el fielto y la fibra son más flexibles y porosos, lo que permite una mayor superficie para el crecimiento microbiano [29].

Por último, los materiales 3D como el cepillo de fibra de carbono logra una mayor área superficial, ya que al contar con porosidades grandes se logra tener una buena difusión del sustrato en el interior del cepillo con mayor capacidad de corriente [30]. La Figura 2 evidencia la proporción del uso de materiales de carbono que se ha encontrado en los reportes de CCM-S.

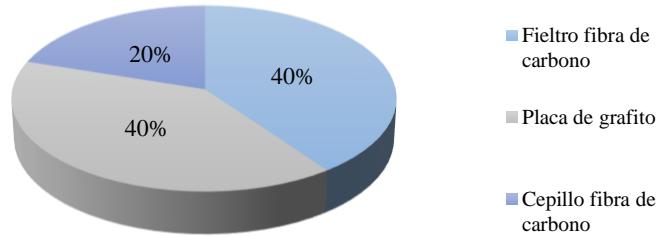


Figura 2. Proporción reportada del uso de materiales anódicos en CCM-S.

Si bien se ha demostrado que es posible la producción de electricidad en este tipo de celdas la cantidad de energía que se obtiene es muy baja (tabla 1). Al día de hoy las investigaciones para aumentar la densidad de potencia y por tanto, la eficiencia, en estos tipos de dispositivos sigue siendo de interés por parte de la comunidad científica. Se ha comprobado que el tipo y calidad de sustrato empleado, la comunidad microbiana y la arquitectura de las celdas, son aspectos fundamentales para incrementar la eficiencia de las CCM-S. Sin embargo, además de los anteriores, el estudio de los materiales de electrodos ha recibido una gran atención. Variaciones en el tipo de material, formas geométricas y ubicación dentro de las celdas han demostrado que tienen un impacto directo sobre la producción de energía, debido a que se favorece, entre otras cosas, la cinética del par REDOX. Por ello es importante el estudio de nuevos materiales, así como sus formas y en especial la ubicación dentro de las CCM, para hallar los mejores y aumentar la potencia de salida de las estas [22, 35, 36].

La presente investigación se enfocó en el estudio de la influencia de la distribución geométrica de dos cátodos en la producción de energía eléctrica de una CCM-S. Para esto dos celdas idénticas fueron diseñadas solamente cambiando el área y

posición geométrica de los cátodos de ambas celdas. A partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico para seleccionar el cátodo de mayor producción de energía.

2. Metodología experimental

2.1 Muestra de sedimento

Para llevar a cabo el presente estudio se colectaron muestras de agua y sedimento del río Culiacán (X: 241286 y Y: 2743591 UTM (Universal Transverse Mercator)). Los sedimentos fueron colectados a una profundidad de 20 cm por debajo de la interfaz agua-sedimento dentro del río. El agua fue colectada de las zonas donde se tomaron los sedimentos. Para su traslado al laboratorio y su preservación todas las muestras fueron conservadas a 4 °C.

2.2 Sistema experimental

Para realizar el trabajo experimental se diseñó una CCM-S con dos cátodos diferentes. Se empleó un biorreactor de material tipo PET de volumen total 2300 ml, el volumen de trabajo, considerado de manera general, fue de 2000 l, donde 1500 g correspondieron al sedimento y 500 ml de agua proveniente del cuerpo de agua del Río Culiacán. Se seleccionó una Fibra de



Carbono Unidireccional (FCU) 12 K como material de electrodo debido a su bajo costo, alta capacidad de transferencia de electrones, alta eficiencia en la producción de energía y alta resistencia a las condiciones ambientales a largo plazo. El ánodo se fabricó con un área total de 81.0 cm^2 y en el caso del cátodo se diseñaron dos tipos: el primero se fabricó con un área total de 81 cm^2 , para mantener una relación con el área anódica [1:1], para el segundo se redujo la relación A.ánodo/A.cátodo a [2:1] con un área total de 40.5 cm^2 . Dentro de la celda el ánodo se colocó de forma horizontal enterrado en el sedimento a una distancia de 3 cm del fondo, en

ambos casos. Por su parte, el primer cátodo se sumergió completamente en el electrolito colocado de forma vertical con respecto a la superficie del electrolito (celda CCM-S/1a) (Figura 3a), mientras el segundo cátodo se colocó de forma horizontal parcialmente sumergido en la interfase electrolito/aire (celda CCM-S/1b) (Figura 3b). Todos los electrodos se reforzaron con barras de grafito para darle estabilidad a la FCU. Para hacer la conexión eléctrica del circuito externo cada extremo de electrodo se conectó a un multímetro a través de un alambre de cobre.

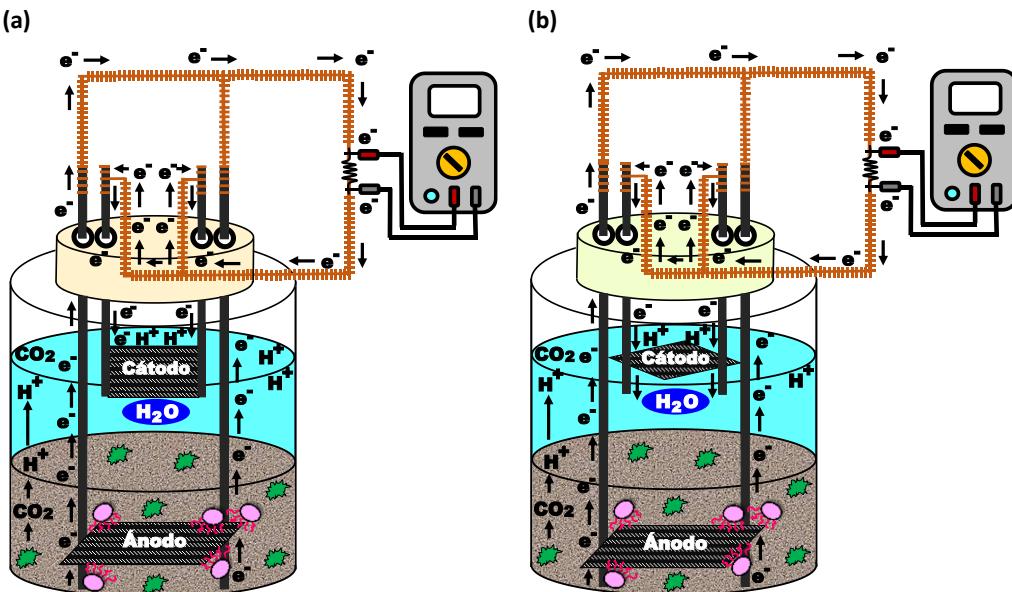


Figura 3. Esquema de CCM-S no dividida con sedimentos y electrolito fluviales. (a) CCM-S/1a cátodo vertical sumergido. (b) CCM-S/1b cátodo horizontal parcialmente sumergido.

2.3 Condiciones experimentales

Los experimentos se siguieron durante 40 días, se midió la diferencia de potencial eléctrico de las dos celdas estudiadas. Toda la experimentación se realizó en el laboratorio a temperatura ambiente. Los estudios de cada celda se realizaron por duplicado y se trabajó con el promedio de los valores de cada una de las celdas.

2.4 Análisis estadístico

Para determinar y corroborar cuál de las dos CCM-S tuvo un mejor desempeño en cuanto a la producción de energía eléctrica se realizó un análisis estadístico empleando el software R versión 4.0.5 [37]. Ambas distribuciones de voltaje se caracterizaron empleando técnicas de estadística descriptiva. La existencia de diferencias significativas entre la producción de energía de ambas celdas se comprobó mediante un análisis de varianza avanzado empleando



estadística robusta para tratar la falta de normalidad de las distribuciones [38]. Se utilizó el test de Welch, se obtuvo el valor de sus estadísticos F_{we} y el p-valores de cada análisis con un nivel de confianza del 95%. Comparaciones robustas Lincon fueron usadas para pruebas post hoc.

3. Resultados y Discusión

3.1 Influencia del diseño catódico en la producción de energía CCM-S/1a y CCM-S/1b

Para evaluar la producción de energía eléctrica de sedimentos fluviales y la influencia del diseño catódico se estudiaron dos celdas con cátodos diferentes. En la celda CCM-S/1a el cátodo se colocó sumergido de forma vertical con un área total de 81cm^2 . Mientras en la celda CCM-S/1b el cátodo se colocó parcialmente sumergido de forma horizontal con un área total de 40.5 cm^2 . Los resultados demostraron que es posible producir energía eléctrica a partir de sedimentos obtenidos del Río Culiacán. En ambas celdas se identificó un período de adaptación durante los primeros días, tal y como lo plantean [39] en su reporte. La CCM-S/1a inició con un voltaje de

37.8 mV en el día cero, alcanzando un voltaje máximo de 513.0 mV el día 25, luego alcanza un mínimo sin embargo se recupera hasta 504.8 mV y finalmente decae hasta un voltaje final de 12.0 mV al día 40. Por su parte, la CCM-S/1b comenzó con un voltaje de 156.0 mV en el día cero logrando un voltaje máximo el día 35 con 664.7 mV. Es importante señalar que al finalizar el experimento el día 40, los valores de voltaje de la celda CCM-S/1b se sostenían con un valor medio de 556.8 mV a diferencia de la CCM-S/1b en la cual no fue posible sostener una media máxima de voltaje luego de su punto máximo. La Figura 4 muestra el comportamiento de la producción de energía para ambas celdas de estudio. Los resultados logrados en la investigación son similares a resultados reportados por [40] donde los autores obtuvieron un voltaje a circuito abierto de 515 mV empleando un consorcio bacteriano halófilo en una CCM alimentada con aguas residuales de la industria pesquera. Por otra parte, los voltajes de ambas celdas son superiores al mayor voltaje obtenido por [25] donde solo alcanzaron un promedio de 280 mV en una CCM-S de sedimentos marinos.

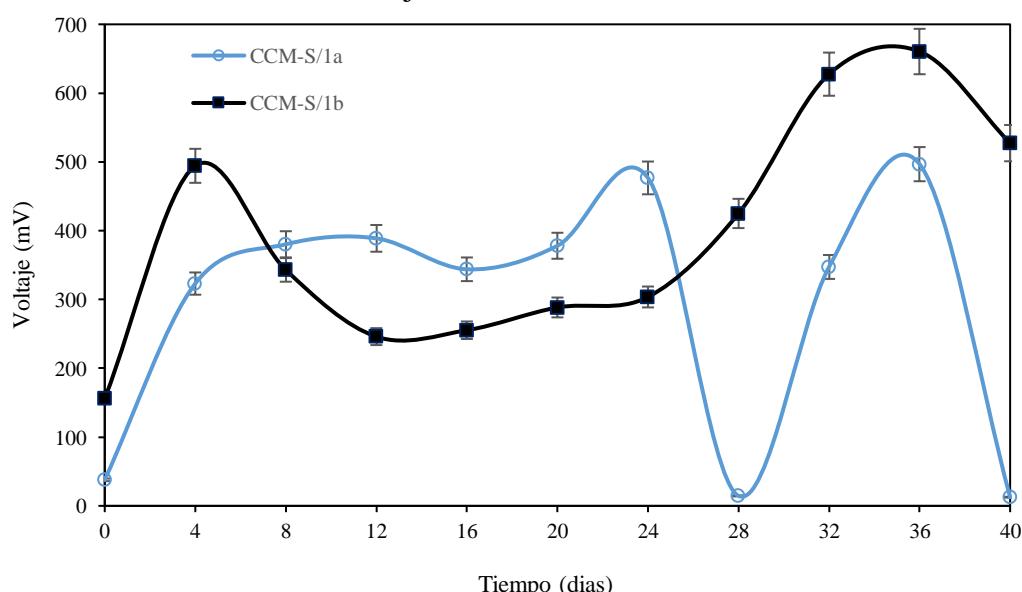


Figura 4. Voltaje producido por una CCM-S alimentada con sedimentos fluviales del Río Culiacán, electrodos de FCU 12K. (○) CCM-S/1a cátodo vertical completamente sumergido con $A_{\text{ánodo}} 81\text{ cm}^2$ y $A_{\text{cátodo}} 81\text{ cm}^2$. (■) CCM-S/1b cátodo horizontal parcialmente sumergido con $A_{\text{ánodo}} 81.0\text{ cm}^2$ y $A_{\text{cátodo}} 40.5\text{ cm}^2$.



Durante el tiempo de experimentación se comprobó una variabilidad en el voltaje, particularmente en la celda CCM-S/1a, este comportamiento puede estar relacionado con la propia naturaleza dinámica del sedimento [41]. Además en los sedimentos coexisten múltiples comunidades microbianas que tienen fases de adaptación, crecimiento y muerte diferentes, provocando variación en la energía producida por las celdas. Por otra parte en la celda CCM-S/1b se evidencia una tendencia a lograr períodos de estabilidad de voltaje mayor lo cual es favorable para plantear estrategias ingenieriles de implementación. Tomando en cuenta que ambas celdas fueron mantenidas en condiciones similares el comportamiento del voltaje en la celda CCM-S/1b indica que la distribución geométrica del cátodo mejora el desempeño del dispositivo. La idea anterior también fue reportada por [42], los autores demostraron que al sustituir el material catódico, carbón vegetal por carbón activado, la producción de electricidad fue incrementada debido a que se favoreció la reducción del oxígeno.

Como se evidencia en la Figura 4 existen diferencias entre los valores de diferencia de potencial eléctrico producidos por cada una de

las celdas. La CCM-S/1a con el cátodo totalmente sumergido alcanzó valores menores de voltaje durante todo el tiempo que se llevó a cabo el experimento, incluso teniendo un área catódica similar a la anódica y siendo el doble del área del cátodo de la celda CCM-S/1b. Además, se observó una gran variabilidad en su producción de voltaje evidenciado por la presencia de varios máximos y mínimos en su gráfica. Por el contrario, la CCM-S/1b demostró una mayor estabilidad en su producción de voltaje, se observa un mínimo en los primeros días de seguimiento que puede estar asociado a la adaptación de la comunidad microbiana a la restricción de sustrato disponible en el sedimento. Además, se lograron mayores valores de voltaje incluso con una relación $A_{\text{ánodo}}/A_{\text{cátodo}}$ de [2:1] (Figura 5). Al comparar los valores de voltaje obtenidos para cada celda se demuestra que la producción de energía eléctrica está influenciada por el diseño del cátodo. El cátodo parcialmente sumergido favorece la reducción del oxígeno a agua debido a que se elimina del sistema la transferencia de masa del aceptor de electrones a través del electrolito, por tanto, se aumenta la velocidad de la reacción catódica y con esto la producción de electricidad [43].

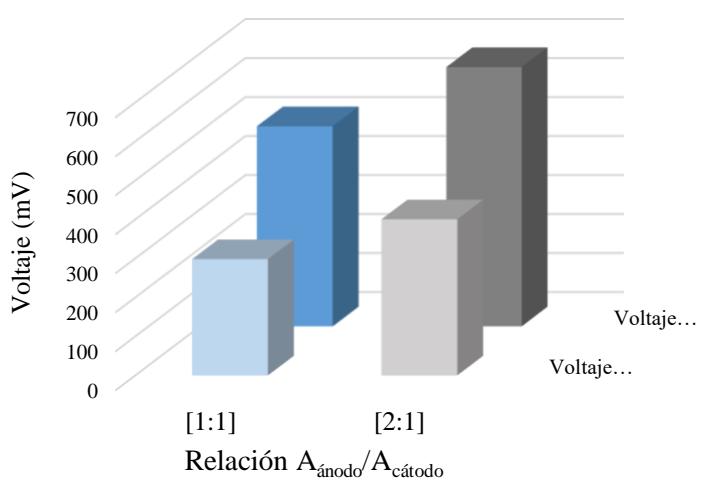


Figura 5. Relación entre $A_{\text{ánodo}}/A_{\text{cátodo}}$ y voltaje de una CCM-S de sedimentos fluviales del Río Culiacán, electrodos de FCU 12K. (■) CCM-S/1a cátodo vertical completamente sumergido con $A_{\text{ánodo}} 81 \text{ cm}^2$ y $A_{\text{cátodo}} 81 \text{ cm}^2$. (■) CCM-S/1b cátodo horizontal parcialmente sumergido con $A_{\text{ánodo}} 81.0 \text{ cm}^2$ y $A_{\text{cátodo}} 40.5 \text{ cm}^2$.



3.1. Análisis estadístico

A partir de los resultados obtenidos de voltaje para cada CCM-S se realizó un análisis estadístico detallado. La Tabla 2 muestra un resumen de los valores descriptivos de la distribución para cada CCM-S, donde Q_1 y Q_3 son el primer y tercer cuartil, respectivamente.

Tabla 2. Estadística descriptiva para las distribuciones de voltaje de las CCM-S

Celda	Cátodo	Mínimo (mV)	Q_1 (mV)	Mediana (mV)	Media (mV)	Q_3 (mV)	Máximo (mV)	Desviación estándar (mV)
CCM-S/1a	Vertical sumergido	12.2	199.9	343.9	298.0	385.4	513.0	163
CCM-S/1b	Horizontal parcialmente sumergido	156	288.4	368.5	400.2	504.2	664.7	142

Para realizar el análisis de varianza de un solo factor primeramente se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad para las distribuciones de voltaje de cada CCM-S. Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados obtenidos mediante el gráfico de normalidad y el gráfico de cajas y bigotes, respectivamente. Se encontró que no existe normalidad de los datos

Los valores demuestran que la media de producción de voltaje para la celda con el cátodo horizontal parcialmente sumergido es un 14% mayor que la media de producción de voltaje para la celda con el cátodo vertical sumergido. Este mismo comportamiento es observado para los máximos voltajes alcanzados en cada CCM-S.

ya que los puntos no están en la diagonal del gráfico de normalidad, además los histogramas de distribución de frecuencia de los voltajes para cada biorreactor no coinciden con la forma de una distribución normal (Figura 8). Así mismo, el gráfico de cajas y bigotes muestra diferencia entre las cajas por lo que no se puede admitir una varianza común.

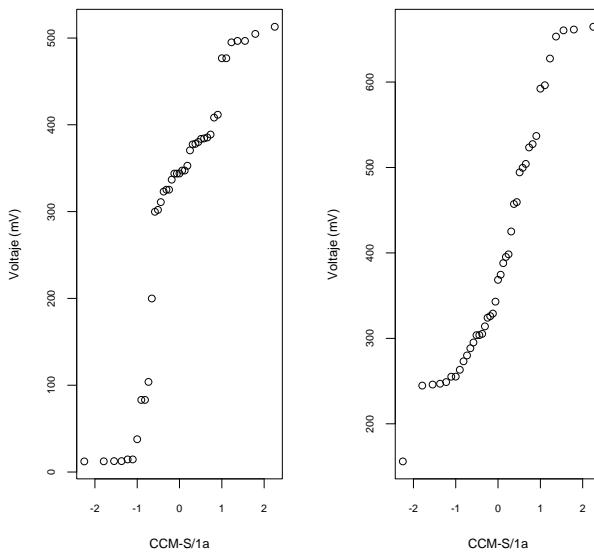


Figura 6. Gráficos de normalidad para las distribuciones de voltaje de las CCM-S. (1a) cátodo vertical sumergido. (1b) cátodo horizontal parcialmente sumergido.

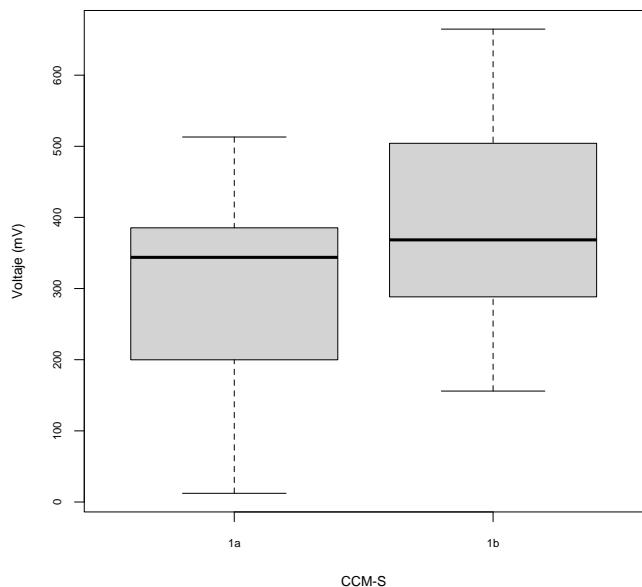


Figura 7. Gráfico de cajas y bigotes para las distribuciones de voltaje de las CCM-S. (1a) cátodo vertical sumergido. (1b) cátodo horizontal parcialmente sumergido.

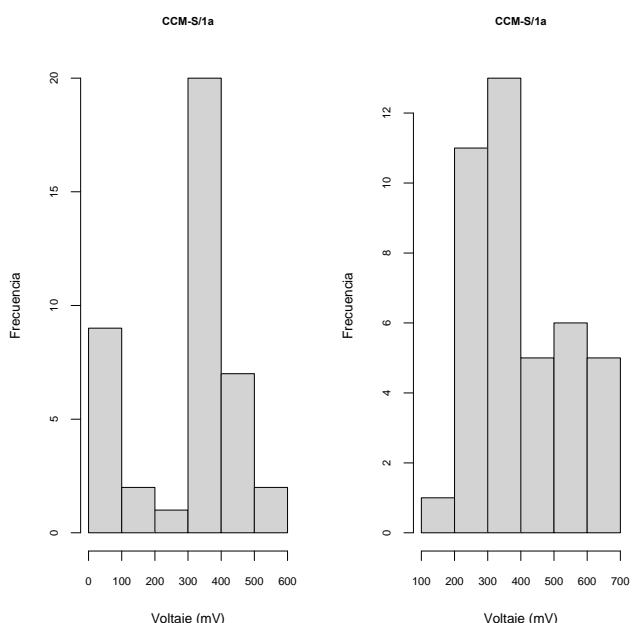


Figura 8. Histogramas de frecuencia para las distribuciones de voltaje de las CCM-S. (1a) cátodo vertical sumergido. (1b) cátodo horizontal parcialmente sumergido.

Al comprobar que las distribuciones de voltaje no cumplen con los supuestos para un análisis de varianza simple se realizó un ANOVA avanzado. Se comprobó que existen diferencias significativas entre las medias de distribución de voltaje de las CCM-S. La Tabla 3 muestra los

resultados obtenidos para el test de Welch donde se obtuvo un p-valor menor a 0.05 lo cual indica que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa de la existencia de diferencia entre la media de los grupos.

**Tabla 3.** Resultados del ANOVA avanzado realizado mediante el test de Welch.

TEST	No. Grupos	F _{we}	G.L Tratamientos	G.L Residuos	p-value	Ajuste (%)
Welch	2	6.570684	1	70.30385	0.01250846	5

G.L: grados de libertad

Durante la prueba post hoc realizada mediante la función Lincon se obtuvo un valor del estadístico

mayor al del criterio, por tanto, se comprueba que hay diferencia entre los grupos (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la comparación robusta Lincon.

Grupo	Grupo	Estadístico	Criterio	SE	G.L	Ajuste (%)
1	2	2.023841	1.999176	40.73712	61.68271	5

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo se demostró que el agua y los sedimentos del Río Culiacán funcionan como sustrato natural para la recuperación de energía en CCM-S. La comparación entre los dos cátodos diseñados evidenció que ambos son favorables para la recuperación de electricidad rindiendo un máximo voltaje de 513.0 mV para el cátodo colocado de manera vertical y sumergido completamente, mientras que el máximo para el cátodo horizontal parcialmente sumergido fue 664.7 mV. Igualmente se demostró que al favorecer la reacción catódica se aumenta el voltaje de la celda incluso con un área catódica menor. El ANOVA avanzado realizado mediante el test de Welch demostró que existen diferencias significativas entre las medias de las distribuciones de voltaje de ambas CCM-S con un p-valor igual a 0.0125. Las pruebas post hoc realizadas comprobaron las diferencias entre los grupos.

El trabajo realizado abre la investigación acerca del aprovechamiento de sedimentos de origen fluvial del municipio de Culiacán para la

producción de energía eléctrica, que hasta este momento no se contaba con estudios similares en la región. Además se concluye y proporciona el diseño de una CCM-S, específicamente de un cátodo, de fácil construcción e implementación que puede ser empleada para llevar a cabo estudios posteriores.

Los trabajos experimentales que se han realizado con CCM-S muestran que es una tecnología factible para la producción de electricidad, pero aun se requiere ampliar el conocimiento práctico capaz de producir la mayor cantidad de energía posible. Investigaciones tanto en los parámetros de operación de las celdas como en los sedimentos (su calidad, sus propiedades e influencia climatológica en ellos) deben ser realizadas.

Sin dudas la tecnología de CCM-S amplía las posibilidades de obtención de energía de forma sustentable. Las CCM-S son dispositivos sencillos que pueden ser implementados en zonas remotas para satisfacer necesidades energéticas; sin embargo, se debe continuar el trabajo de investigación para mejorar la eficiencia de las celdas.



A partir de este trabajo se evidenció que los sedimentos de cuerpos de agua de la región de Culiacán pueden ser aprovechados para producir electricidad. Se recomienda ampliar el estudio a sedimentos provenientes de cuerpos de agua similares o de distinto origen, pudiéndose incluir sedimentos de origen pecuario debido a la alta presencia de esta actividad en el estado de Sinaloa.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por los recursos económicos aportados mediante becas de posgrado en programa de doctorado 2019-2023 y el proyecto de Cátedras CONACYT 212-2018.

6. Agradecimiento de autoría

Marlenne Feregrino Rivas: Investigación, curación de datos, análisis formal, borrador original, visualización; *Blenda Ramirez Pereda:* Conceptualización, investigación, análisis formal, recursos, revisión y edición; *Francisco Estrada Godoy:* Recursos, investigación, análisis formal, revisión y edición.

Referencias

[1] C. K. Chanda, and D. Bose, "Challenges of employing renewable energy for reducing greenhouse gases (GHGs) and carbon footprint," Rev. Elsevier, vol. 3, pp. 346-365, 2020.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11170-1>

[2] J. Yan, "The impact of climate policy on fossil fuel consumption: Evidence from the Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI)," Rev. Energy Economics, vol. 100, August 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105333>

[3] B. A. Gyamfi, F. F. Adedoyin, M. A. Bein, F. V. Bekun, and D. Q. Agozie, "The anthropogenic consequences of energy consumption in E7 economies: Juxtaposing roles of renewable, coal, nuclear, oil and gas energy: Evidence from panel quantile method," Rev. Journal of Clearner Production, vol. 295, 1 May 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126373>

[4] I. Dincer, and M. F. Ezzat, "Renewable energy production," Rev. Elsevier, vol. 3, pp. 126-207, 2018.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00310-2>

[5] D. Icaza, D. Borge-Diez, and S. P. Galindo, "Analysis and proposal of energy planning and renewable energy plans in South America: Case study of Ecuador," Rev. Renewable Energy, vol. 182, January 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.126>

[6] D. Mazzeo, N. Matera, P. De Luca, C. Baglivo, P. M. Congedo, and G. Oliveti, "A literature review and statistical analysis of photovoltaic-wind hybrid renewable system research by considering the most relevant 550 articles: An upgradable matrix literature database," Rev. Journal of Cleaner Production, vol. 295, 1 May 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126070>

[7] T. D. Tessema, and T. A. Yemata, "Experimental dataset on the effect of electron acceptors in energy generation frem brewery wastewater via a microbial fuel cell" Rev. Elsevier, vol. 37, August 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107272>

[8] K. Obileke, H. Onyeaka, E. L. Meyer, and N. Nwokolo, "Microbial fuel cells a renewable



energy technology for bio-electricity generation: A mini-review," Rev. Elsevier, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>

[9] R. Suresh, S. Rajendran, P. S. Kumar, K. Dutta, and D. V. N. Vo, "Current advances in microbial fuel cell technology toward removal of organic contaminants - A review," Rev. Chemosphere, vol. 287, January 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132186>

[10] L. Mekuto, A. V. A. Olowolafe, S. Pandit, N. Dyantyi, P. Nomngongo, and R. Huberts, "Microalgae as a biocathode and feedstock in anode chamber for a selfsustainable microbial fuel cell technology: A review," Rev. Elsevier, vol. 31, pp. 7-16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.10.002>

[11] O. Modin, and F. Aulenta, "Three promising applications of microbial electrochemistry for the water sector," Rev. Environmental Science: Water Research and Technology, vol. 3, pp. 391-42, 2017. <https://doi.org/10.1039/C6EW00325G>

[12] S. Prathiba, P. S. Kumar, and D. V. N. Vo, "Recent advancements in microbial fuel cells: A review on its electron transfer mechanisms, microbial community, types of substrates and design for bio-electrochemical treatment," Rev. Chemosphere, vol. 286, January 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131856>

[13] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, and I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells: From fundamentals to applications," Rev. A review. Journal of Power Sources, vol. 356, pp. 225-244, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>

[14] K. Kim, S. Nakashita, K. Yoshimura, and T. Hibino, "In situ electrochemical remediation of brackish river sediment rich in aromatic organic matter using steel-slag-combined sediment microbial fuel cells" Rev. Journal of Cleaner Production, vol. 315, 15 September 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128206>

[15] J. Hwang, K. Kim, E. P. Resurreccion, and W. H. Lee, "Surfactant addition to enhance bioavailability of bilge water in single chamber microbial fuel cells (MFCs)," Rev. Journal of Hazardous Materials, vol. 368, pp. 732-738, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.007>

[16] N. Collins N, G. Solomon O, L. Abayomi T, K. Sidikat I, S. Olusegun D, O. Clement K, A. Jacob K, S. Abolade, and B. Ayoola, "Microbial fuel cell: Bio-energy production from Nigerian corn starch wastewater using iron electrodes," Rev. materialtoday; PROCEEDINGS, vol. 46, pp. 5565-5569, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.345>

[17] Z. Xu, S. Chen, S. Guo, D. Wan, H. Xu, W. Yan, X. Jin, and J. Feng, "New insights in light-assisted microbial fuel cells for wastewater treatment and power generation: A win-win cooperation," Rev. Journal of Power Sources, vol. 501, 31 July 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230000>

[18] M. Gulamhussein, D. and G. Randall, "Design and operation of plant microbial fuel cells using municipal sludge," Rev. Elsevier,



vol. 38, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101653>

[19] C. T. Wang, T. Sangeetha, F. Zhao, A. Garg, C. T. Chang, and C. H. Wang, "Sludge selection on the performance of sediment microbial fuel cells," *Rev. Energy Research*, 26 June 2018.
<https://doi.org/10.1002/er.4168>

[20] C. Iwaoka, y S. Imada, T. Taniguchi, S. Du, N. Yamanaka, and R. Tateno, "The impacts of soil fertility and salinity on soil nitrogen dynamics mediated by the soil microbial community beneath the halophytic shrub tamarisk," *Rev. Microbial Ecology*, vol.75(4), pp. 985-996, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00248-017-1090-z>

[21] A. Zaeni, P. E. Susilowati, Alwahab, and L. O. Ahmad. "Renewable energy from sediment microbial fuel cell technology from Kendari Bay swamp sediments," *Rev. AIP*, 2 June 2020.
<https://doi.org/10.1063/5.0011271>

[22] X. Yang, y S. Chen, "Microorganisms in sediment microbial fuel cells: Ecological niche, microbial response, and environmental function," *Rev. Elsevier*, vol. 756, pp. 1441-1445, February 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144145>

[23] K. Joksimović, A. Žeradanin, D. Randjelović, J. Avdalović, S. Miletć, G. Gojgić-Cvijović, and V. P. Beškoski, "Optimization of microbial fuel cell operation using Danube River sediment," *Rev. Elsevier*, vol. 476, 15 November 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228739>

[24] X. Lu, K. A. Haxthausen, A. L. Brock, and S. Trapp, "Turnover of lake sediments treated with sediment microbial fuel cells: a long-term study in a eutrophic lake," *Rev. Science of the Total Environment*, vol.796, 20 November 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148880>

[25] M. A. Ghazi Azari, R. Gheshlaghi, M. A. Mahdavi, and E. Abazarian, "Electricity generation from river sediments using a partitioned open channel sediment microbial fuel cell," *Rev. Elsevier Ltd*, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.185>

[26] G. A. Mohammad Ali, G. Reza, A. Mahmood, and A. Elham, "Electricity generation from river sediments using a partitioned open channel sediment microbial fuel cell," *Rev. Elsevier*, vol. 42, pp. 5252-5260, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.185>

[27] B. Neethu, and M. M. Ghangrekar, "Electricity generation through a photo sediment microbial fuel cell using algae at the cathode," *Rev. Water Science & Technology*, 2017.
<https://doi.org/10.2166/wst.2017.485>

[28] P. Namour, and L. Jobin, "Electrochemistry, a tool to enhance self-purification in water systems while preventing the emission of noxious gases (greenhouse gases, H2S, NH3)," *Rev. Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 11, pp. 25-33, October 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.07.003>

[29] H. U. D. Nguyen, D. T. Nguyen, and K. Taguchi, "A Novel Design Portable Plugged-Type Soil Microbial Fuel Cell for Bioelectricity



Generation," Rev. Energies MDPI, 20 December 2020. <https://doi.org/10.3390/en14030553>

[30] F. T. Kabutey, J. Dinga, Q. Zhao, P. Antwi, F. K. Quashie, V. Tankapa, and W. Zhang, "Pollutant removal and bioelectricity generation from urban river sediment using a macrophyte cathode sediment microbial fuel cell (mSMFC)," Rev. Bioelectrochemistry, 25 January 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.01.007>

[31] T. Ewing, P. T. Ha, and H. Beyenal, "Evaluation of long-term performance of sediment microbial fuel cells and the role of natural resources," Rev. Elsevier Ltd, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.177>

[32] F. Vicari, M. Albamonte, A. Galia, and O. Scialdone, "Effect of mode of operation, substrate and final electron acceptor on single-chamber membraneless microbial fuel cell operating with a mixed community," Rev. Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 814, pp. 104-110, 1 April 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.044>

[33] K. Obileke, H. Onyeaka, E. L. Meyer, and N. Nwokolo, "Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review," Rev, Vol. 125, April 2021. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>

[34] Z. Najafgholi, and M. Rahimnejad, "Improvement of sediment microbial fuel cell performance by application of sun light and biocathode," Rev. Springer, 17 August 2015. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0123-x>

[35] A. Anjum, S. A. Mazari, Z. Hashmi, A. S. Jatoi, and R. Abro, "A review of role of cathodes in the performance of microbial fuel cells," Rev. Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 899, 15 October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115673>

[36] J. Prasad, and R. K. Tripathi, "Scale Up Sediment Microbial Fuel Cell for Powering Led Lighting," Rev. Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED), Vol. 7, pp. 53-58, 2018. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.1.53-58>

[37] R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

[38] Wilcox, R.R., and Schönbrodt, F.D. (2014). The WRS package for robust statistics in R (version 0.24). Retrieved from <http://r-forge.r-project.org/projects/wrs/>.

[39] J. Prasad, and R. K. Tripathi, "Effect of sediment microbial fuel cell stacks on 9 V/12 V DC power supply," Rev. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46, pp. 14628-14638, 19 April 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.187>

[40] M. T. Jamal, and A. Pugazhendi, "Treatment of fish market wastewater and energy production using halophiles in air cathode microbial fuel cell," Rev. Journal of Environmental Management, vol. 292, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112752>

[41] J, Prasad, and R. K. Tripathi, "Energy harvesting from sediment microbial fuel cell to supply uninterrupted regulated power for



small devices," Rev. Int J Energy, vol.43, pp. 2821-2831, 2019.
<https://doi.org/10.1002/er.4370>

[42] J. Lawan, S. Wichai, C. Chuaypen, A. Nuiyen and T. Phenrat, "Constructed sediment microbial fuel cell for treatment of fat, oil, grease (FOG) trap effluent: Role of anode and cathode chamber amendment, electrode selection, and scalability," Rev. Elsevier, vol. 286, 21 July 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131619>

[43] E. Goleij, H. G. Taleghani, and M. S. Lashkenari, "Modified carbon cloth flexible electrode with ternary nanocomposite for high performance sediment microbial fuel cell," Rev. Elsevier, vol. 272, 1 November 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124961>

Derechos de Autor (c) 2022 Marlenne Feregrino-Rivas, Blenda Ramirez-Pereda, Francisco Estrada-Godoy



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciatario o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) - [Textocompletodelalicencia](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)