

The logo for infoANALÍTICA, with 'info' in a smaller blue font and 'ANALÍTICA' in a larger, bold blue font.

infoANALÍTICA

ISSN: 2602-8344

ISSN: 2477-8788

revistainfoanalitica@gmail.com

Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Ecuador

Rea, Santiago; Bahamonde Soria, Raúl; Zurita, Daniel; Cevallos, Carlos
CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE
COMBUSTIBLE MICROBIANA CON MATERIALES DE BAJO COSTO
infoANALÍTICA, vol. Especial, Esp., 2021, Junio, pp. 91-102
Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Ecuador

- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA CON MATERIALES DE BAJO COSTO

CONSTRUCTION AND PERFORMANCE OF A MICROBIAL FUEL CELL MADE WITH LOW-COST MATERIALS

Santiago Rea¹¹, Raúl Bahamonde Soria ^{1*}, Daniel Zurita¹, Carlos Cevallos¹

Recibido: 01 de octubre 2020 / Aceptado: 18 de febrero 2021

DOI: 10.26807/ia.vi.193

Palabras claves: Curvas de Polarización, Celdas de Combustible Microbianas, Densidad de Potencia

Keywords: Microbial Fuel Cell, Polarization Curves, Power Density,

RESUMEN

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos que permiten transformar energía química almacenada en compuestos orgánicos, en energía eléctrica, utilizando microorganismos depositados sobre un electrodo. Entre las ventajas que posee esta tecnología se destaca la posibilidad de limpiar o tratar matrices acuosas como aguas residuales. A continuación, se reporta, como prueba de concepto, la construcción de una celda de combustible microbiana, empleando materiales reciclados o de bajo costo. El consorcio de bacterias electrogénicas utilizadas se aisló de sedimentos del embalse Amaluza, en Cuenca, Ecuador. La celda se puso en funcionamiento utilizando aguas residuales domésticas reales, obtenidas del barrio Ubilus de la parroquia Pintag del cantón Quito, Ecuador. La celda de combustible construida generó una densidad de potencia de 40 mW/m² con un porcentaje de remoción de materia orgánica cercano al 80 %. Siguiendo el concepto de economía circular, se midió la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en la biomasa producida por la celda para su posible aplicación como aditivo ecológico de fertilizantes.

1 Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Químicas, Ecuador, Quito (santiagoarh@hotmail.com, rabahamonde@uce.edu.ec*, dazuritas@uce.edu.ec, cacevallosm@uce.edu.ec)

ABSTRACT

Microbial fuel cells are devices that convert chemical energy stored into the bonds of organic compounds in electric energy using microorganisms. The advantages of these devices are the capability of water treatment and cleaning. We report, as proof of concept, the construction and performance of a microbial fuel cell, employing reusable and low-cost materials. Microbial Consortium was isolated from Amaluza sludge, Cuenca-Ecuador. The microbial fuel cell was tested using domestic residual water, sampled from Ubilus's neighborhood, at the canton Quito, Ecuador. A power density of ca. 40 mW/m² and an 80 % of organic matter remotion were obtained with the final microbial fuel cell. On the concept of circular economy, nitrogen, phosphorus, and potassium were measured into the produced biomass, as possible applications in agronomy.

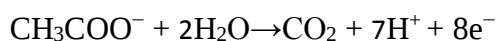
INTRODUCCIÓN

Las celdas de combustible microbianas, MFCs, por sus siglas en inglés Microbial Fuel Cells, son una tecnología novedosa para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa (Zhang et al., 2009). Estos dispositivos utilizan bacterias electrogénicas como catalizadores para oxidar materia orgánica e inorgánica disponible en un sustrato bioconvertible y transformarla directamente en energía eléctrica. Los electrones producidos por las bacterias a partir de estos sustratos se transfieren al ánodo y fluyen hacia el cátodo mediante un conductor electrónico que presenta resistencia óhmica. Esto puede lograrse cuando se cambia en la MFC el aceptor natural de electrones (oxígeno o nitrato) a un aceptor metálico como el ánodo (Do et al., 2018). Los electrones producidos pueden transferirse al ánodo: por mediadores de electrones, por

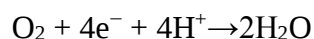
transferencia directa de electrones asociada a la membrana, o por enzimas respiratorias (citocromos) presentes en los nanocables de las bacterias. La cadena de transporte de los electrones comienza con el NADH, una molécula de transporte biológica, que en la respiración anaerobia libera un electrón (e⁻) y un protón (H⁺) (Do et al., 2018). El electrón cruza las proteínas de la membrana mitocondrial y a medida que este pasa por cada proteína, se bombea H⁺ a través de la membrana. En una célula bacteriana normal, el electrón continúa por el camino transmembrana para combinarse con el oxígeno y producir agua (Li et al., 2018; Logan & Rabaey, 2012). En una MFC, el electrón cruza la membrana celular de la bacteria, donde es recogido por una molécula mediadora y llevado al ánodo. A su vez, estos electrones producidos en el proceso de oxidación de la materia orgánica e inorgánica viajan del ánodo al cátodo,

donde se combinan con protones y oxígeno del aire para producir moléculas de agua (proceso de reducción). Las MFCs deben utilizar un separador (membranas o puente salino) que permita el transporte de protones desde el compartimento anódico hacia el cátodo y restrinja el transporte de oxígeno para mantener las condiciones anóxicas de la cámara anódica. A continuación, se muestran las reacciones sobre el electrodo, utilizando el ion acetato como sustrato ejemplo:

Reacción anódica:



Reacción catódica:



Se ha reportado, que los géneros más comunes de bacterias electrogénicas utilizadas en MFCs son: *Geobacter spp* y *Shewanella spp* (Choi, 2015) sin embargo, otros reportes han mostrado que, las MFCs operadas con cultivos mixtos alcanzan densidades de potencia sustancialmente mayores en comparación con cultivos puros (Li et al., 2018; Logan & Rabaey, 2012), de esta forma el ánodo es recubierto de una biopelícula bacteriana. (Sivasankar et al., 2018). Tanto el ánodo como el cátodo pueden estar constituidos de materiales como: grafito, fieltro de grafito, papel de carbón, tela de carbón, platino (Pt), negro de Pt, carbón vítreo reticulado entre otros (Hernandez-Fernandez et al., 2015).

La economía circular, es un sistema que busca el continuo uso de recursos eliminando desechos (Geissdoerfer et al., 2017). La tecnología de MFCs es un ejemplo claro de economía circular, dado que al producir energía eléctrica se está eliminando materia orgánica de matrices acuosas, por ejemplo, aguas residuales domésticas (Aelterman et al., 2006). La MFC que se presenta en este trabajo se construyó como prueba de concepto, con materiales de bajo costo, utilizando electrodos de carbono reciclados a partir de pilas comerciales, e inóculos bacterianos obtenidos de sedimentos naturales. Es importante señalar que la celda desarrollada puede usarse con fines educativos en el tratamiento de muestras reales de aguas residuales domésticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Todos los reactivos empleados se adquirieron de Fisher Chemical Supplies. Pilas usadas (tamaño DD marca Eveready®), medio de cultivo BHI (Difco TM & BBL, USA), agar, cloruro de potasio, ácido nítrico 65 %, ácido sulfúrico 98 %, tinta conductora (Bare Conductive®), resina epóxica (Loctite® Epoxi-Mil) voltímetro Digital Multímetro DT832 (1,0 MΩ de impedancia), conjunto de resistencias con valor nominal entre 100 y

1,0 MΩ, bomba de pecera (JAD-SC7500), alambre de níquel-titanio (Ni-Ti, Azdent, China). Espectrofotómetro marca DR1900 (Hach® Company, Loveland, CO)

Preparación del inóculo

El consorcio bacteriano se aisló de los sedimentos del embalse Amaluza de la represa Daniel Palacios, Cantón Paute, Cuenca, Ecuador (Bassante, 2018). Se recolectaron sedimentos, 68 m debajo de la superficie del agua y 40 m por debajo de la superficie del sedimento. Las pruebas bioquímicas cualitativas realizadas fueron: Simmons Citrato (+), Oxidasa (-), Catalasa (+), Tinción de Gram (-), Tinción de cápsula (-), Tinción de esporas (-), Reducción de hierro (+), Urea (-), LIA: Desaminación de lisina (-), descarboxilación de lisina (+), SIM: movilidad en agar (-), H₂S (-), Indol (-), TSI: H₂S (-), A/A, sugieren presencia positiva del género *Geobacter spp.*

Preparación de los electrodos

Se extrajeron las barras de carbón de pilas comerciales usadas, puesto que son de fácil acceso. A continuación, se sometieron a un proceso térmico y posterior tratamiento químico que permite disolver metales (Rea, 2017). Las barras de carbón se calentaron en un mechero bunsen por 5 min, después de enfriarse, estas se sumergen en ácido nítrico al 5 % por 24 horas. A continuación, se lavan por triplicado con abundante agua desionizada, posteriormente, se incorporó

en la estructura de la barra un contacto eléctrico de alambre de Ni-Ti. La junta carbón-alambre se reforzó con tinta conductora y finalmente se cubrió con resina epóxica. Para la formación de la biopelícula sobre los ánodos, los electrodos de carbono limpios se sumergieron en un medio de cultivo del consorcio de bacterias aislado en BHI, durante 5 días.

Construcción de la celda

Se construyó una celda con dos matraces Erlenmeyer de 50 mL unidos mediante un puente salino de 10 cm de largo, rellenos con una mezcla acuosa de agar al 2 % con KCl 1,0 M. Los matraces se cerraron con tapones horadados de goma, como se esquematiza en la Figura 1.

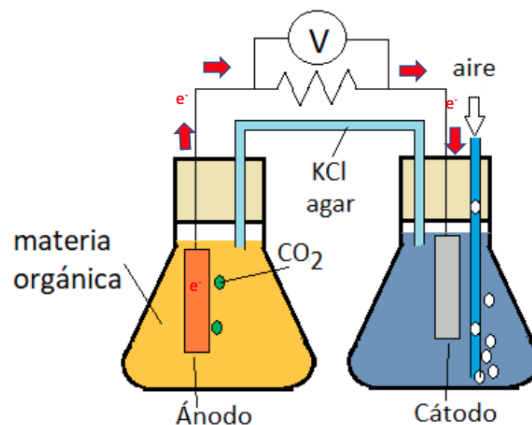


Figura 1. Esquema de la celda de combustible microbiana, MFC

Este diseño pretende ser lo más simple y familiar para estudiantes de química en los primeros años de universidad, así como para estudiantes de último año de bachillerato. De esta forma, se evitó el uso de membranas de intercambio protónico

para resaltar la capacidad de construir una celda “homemade” para tratar aguas residuales reales. Se emplearon las barras de carbón previamente tratadas como electrodos, con áreas geométricas de 0,94 cm² para el ánodo y cátodo, tradicionalmente se usan cátodos con platino. Sin embargo, en esta prueba de concepto se procuró abaratar todos los costos para enfocarse netamente en el desempeño del consorcio bacteriano aislado. La cámara catódica se alimentó con aire usando la bomba de pecera a un flujo de 40 mL/s.

Operación y desempeño

Las MFC, se evaluaron usando aguas residuales domésticas tomadas del colector de desfogues del barrio Ubilus, Parroquia Pintag, Cantón Quito, de la Provincia de Pichincha, Ecuador, la demanda química de oxígeno (DQO) inicial de todas las aguas residuales usadas fue 788 mg/L. Se midió el desempeño de las celdas determinando el potencial de la celda a diferentes tiempos, calculando corriente y densidad de potencia según las siguientes ecuaciones (Logan, 2007).

La corriente (I) se calculó para una resistencia dada (R) a partir de la tensión (V) utilizando la ley de Ohm, $I = V/R$ (considerando el valor real de la resistencia externa aplicada en el circuito). A partir de estos datos, las curvas de densidad de corriente y potencia se normalizaron a la superficie geométrica del

ánodo (A) (0,94 cm²) y se calcularon como $I \text{ (mA m}^{-2}\text{)} = V/(R \times A)$ y $P \text{ (mW-m}^{-2}\text{)} = (I^2 \times R)/A$. La eficiencia coulombica fue determinada a partir de la ecuación $CE = (8 \int I dt)/(\Delta DQO F v b)$.

Donde v es el volumen total del compartimento anódico (50 mL), F es la constante de Faraday (96485 C-mol⁻¹ electrón) y b es el número de electrones intercambiados por 1 mol de O₂, para este estudio $b = 4$. Adicionalmente se midió el valor de, DQO, del agua tratada utilizando el método colorimétrico (“5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD) (2017),” 2018) y el contenido de nitrógeno, (“4500-N NITROGEN (2017),” 2018)), fosforo (“4500-P PHOSPHORUS (2017),” 2018)) y potasio (“3111 METALS BY FLAME ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETRY (2017),” 2018)) de la biomasa generada.

El porcentaje de remoción se calcula como la relación porcentual de DQO a lo largo del tiempo:

$$\text{Remoción (\%)} = 100(DQO)_t/(DQO)_{\text{inicial}}$$

RESULTADOS

Operación y desempeño

En la Figura 2 se presenta el comportamiento, a lo largo del tiempo, de la diferencia de potencial de circuito abierto (OCP por sus siglas en inglés Open Circuit Potential) (rombos rojos) y el porcentaje de remoción (triángulos azules).

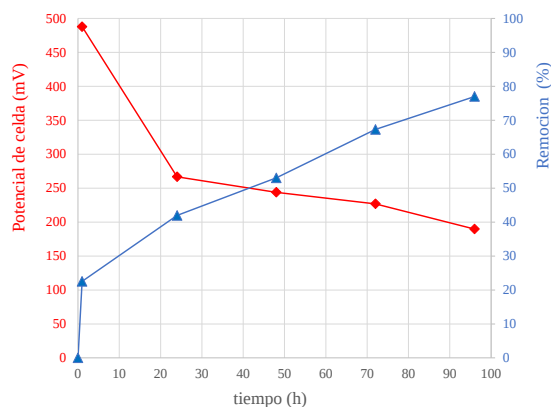


Figura 2. Potencial de celda, remoción de DQO porcentual en función del tiempo de operación de la MFC

En la Figura 3 se presentan las curvas de polarización (triángulos rojos) y de potencia (rombos azules) que describen el desempeño de la MFC, calculadas como se describe en la sección experimental.

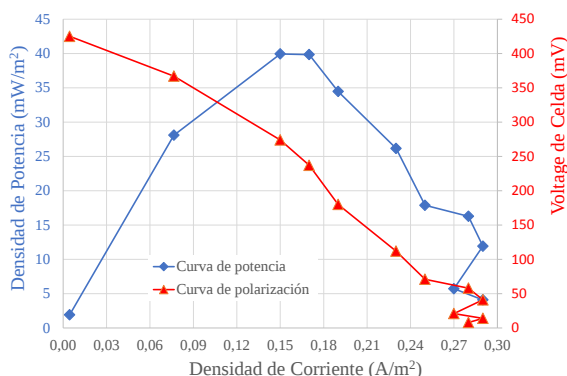


Figura 3. Curvas de desempeño de la celda de combustible microbiana

DISCUSIÓN

Construcción de la celda

Las celdas se construyeron con materiales de fácil acceso, con un costo total de alrededor de 10,0 USD por cada celda, al ser una prueba de concepto no se estudiaron parámetros como vida útil, diseño u

optimización. Inicialmente se debe invertir en la adquisición de materiales como la bomba de aire y los reactivos descritos en la sección experimental, necesarios para aislar las bacterias electrogénicas, pero esta inversión se realiza una sola vez, con la ventaja de poder reutilizar el material de vidrio y los electrodos. El consorcio de bacterias se aisló de sedimentos recolectados a una profundidad total de 108 m, donde la cantidad de oxígeno disuelto es menor a 31,3 μM (1,0 mg/L), estas condiciones anóxicas permiten el desarrollo de bacterias con respiración anaerobia, donde la acetil-CoA funciona como aceptor de electrones para luego ser procesado por el ciclo del ácido cítrico y generar ATP (Stryer, 1995). Es importante señalar que el proceso de aislamiento se realiza una sola vez, permitiendo almacenar un consorcio bacteriano desactivado, el cual puede activarse y emplearse en futuros ensayos e investigaciones.

Operación y desempeño

Las mediciones de potencial de celda se realizaron con un multímetro de alta impedancia cada 24 horas de forma simultánea al valor de DQO. El OCP, a corriente cero, en la primera hora fue de 488 mV. Este potencial decrece durante las primeras 24 horas a un valor de alrededor de 230 mV, después de este tiempo se mantiene relativamente estable durante las siguientes 72 horas, Figura 2. Este

comportamiento puede atribuirse al incremento en la resistencia interna de la celda debida al flujo de electrones a través de los electrodos, la conexión entre electrodos, el equipo de medida y el crecimiento de biopelículas sobre los electrodos (Logan et al., 2006). El porcentaje de remoción se calculó midiendo el valor de DQO, a tiempo cero las aguas residuales tenían un valor de 788 mg/L, a las 96 horas el valor disminuye a 172,2 mg/L que corresponde a un porcentaje de remoción de materia orgánica de 7,0 %, valor cercano al obtenido en estudios previos en condiciones similares (Buitrón & Cervantes-Astorga, 2013).

La Figura 3, muestra la curva de polarización en la MFC a las 24 horas, donde se observa un valor de 425 mV para el OCP. La curva tiene un comportamiento típico observado en las MFC (Logan et al., 2006): en la primera sección, desde 0,00 hasta 0,15 A/m², el potencial disminuye rápidamente, debido a los procesos de activación, donde se consume energía que es utilizada en la polarización de la interfase consorcio bacteriano-electrodo para iniciar la transferencia de electrones extracelulares al ánodo (Li et al., 2018; Rabaey & Verstraete, 2005). A continuación, desde 0,15 hasta 0,25 A/m² el voltaje decae lentamente, en esta zona las pérdidas óhmicas predominan, como consecuencia del crecimiento bacteriano y aumento de la

resistencia. En la sección final desde 0,25 hasta alrededor de 0,30 A/m², se observan pérdidas atribuidas al transporte de materia (Logan et al., 2006). Por ejemplo, falta de disponibilidad de aceptores de electrones, o limitación en el transporte de protones u oxígeno hacia el cátodo. La eficiencia coulombica calculada a partir del potencial de celda máximo a las 24 horas de funcionamiento y a condiciones de alta impedancia es 8,43 %, un valor intermedio comparado con estudios previos donde utilizan *Geobacter spp*, membranas de Nafion® y electrodos comerciales (Choi, 2015).

La celda construida en esta investigación produce un valor de densidad de potencia máximo de 39,93 mW/m², Figura 3. Este valor es destacable comparado con los valores reportados en la bibliografía, para MFCs construidas con materiales de bajo costo, ver la Tabla 1. Sacco y colaboradores, reportan un MFC con una densidad de potencia de 19,6 mW/m², usando electrodos comerciales de grafito y el ion acetato como fuente externa de carbono, los inóculos fueron obtenidos de lodos del Rio de la Plata Sudamérica. Un valor de 24,32 mW/m² fue presentado con una MFC construida usando como cámaras anódicas vasijas de barro y cátodos de grafito (Behera & Ghangrekar 2011). Estas últimas celdas funcionan en lotes “batch” con aguas sintéticas, usando sacarosa como

fuente de carbono. Para tener un panorama general, se presenta los resultados del grupo de Logan (Wei et al., 2012), quienes reportan una densidad de potencia de 1225 mW/m² con MFCs ensambladas con cátodos aéreos contruidos con carbón activado y aglutinante de politetrafluoroetileno (PTFE). El desempeño de la celda desarrollada en este trabajo se puede atribuir al consorcio bacteriano usado, puesto que no se trabajó con diseño y optimización de variables externas de la celda.

Tabla 1. Desempeño de varias celdas de combustible microbianas

Densidad de potencia (mW/m ²)	Electrodos	Microrganismo	Referencia
1255	Carbón activado sobre malla metálica	No reportado	(Wei et al., 2012)
19,60	Grafito comercial	<i>Geobacter spp.</i> <i>Bacillus spp.</i>	(Sacco et al., 2012)
24,32	Barras de grafito comercial	Consorcio Bacteriano aislado de Lodos anóxicos del Río de la Plata	(Behera & Ghangrekar, 2011)

39,93	Barras de grafito reciclado	Consorcio Bacteriano aislado del embalse Amaluza, <i>Geobacter spp</i> (+)	Este trabajo
-------	-----------------------------	--	--------------

Siguiendo el concepto de economía circular, se buscó darle un uso a la biomasa generada por el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Se pensó utilizar la biomasa como abono, por ello se determinaron las concentraciones de nitrógeno fósforo y potasio, reportándose como porcentajes de NPK en un abono agrícola, los valores se detallan en la Tabla 2. Las concentraciones de los elementos de interés en la biomasa son moderadas para usarse directamente como abono agrícola. Estos hallazgos abren el camino a nuevas investigaciones relativas al desarrollo de aditivos para abonos basados en biomasa generada por MFCs.

Tabla 2. Cantidad de macroelementos determinados en la biomasa de la MFC

Nutriente	Porcentaje en masa
N	0,04
P ₂ O ₅	3,30
K ₂ O	0,85

CONCLUSIÓN

Se construyeron celdas de combustible microbianas, como prueba de concepto, para el tratamiento de aguas residuales domesticas reales. Se utilizaron materiales de fácil acceso, de bajo costo como matraces de vidrio, tapones de goma horadados y como electrodos barras de carbono recicladas de pilas comerciales marca Eveready®. Estas celdas generaron una densidad de potencia de 40 mW/m² y un porcentaje de remoción de materia orgánica de cercano al 80 %. El costo promedio de la celda fue de 10,0 USD. Los resultados obtenidos en esta prueba de concepto son exitosos en comparación a los encontrados en la bibliografía, considerando que se usaron electrodos reciclados, un diseño de celda simple y un puente salino como separador. El buen desempeño de las celdas se puede atribuir al consorcio bacteriano utilizado, por lo que se sugiere profundizar los estudios del mismo.

LISTA DE REFERENCIAS

- 3111 Metals by flame atomic absorption spectrometry (2018). In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
<https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.043>
- 4500-N nitrogen (2018). In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
<https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.086>
- 4500-P phosphorus (2018). In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
<https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.093>
- 5220 chemical oxygen demand (COD) (2018). In *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
<https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.103>
- Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., & Verstraete, W. (2006). Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 54(8), 9–15.
<https://doi.org/10.2166/wst.2006.702>
- Bassante, N. (2018). *Evaluación del efecto de polímeros conductores en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas*. Universidad Central del Ecuador.
- Behera, M., & Ghangrekar, M. M. (2011). Electricity generation in low cost microbial fuel cell made up of earthenware of different thickness. *Water Science and Technology*,

- 64(12), 2468–2473.
<https://doi.org/10.2166/wst.2011.822>
- Buitrón, G., & Cervantes-Astorga, C. (2013). Performance evaluation of a low-cost microbial fuel cell using municipal wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(3).
<https://doi.org/10.1007/s11270-013-1470-z>
- Choi, S. (2015). Microscale microbial fuel cells: Advances and challenges. *Biosensors and Bioelectronics*, 69, 8–25.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.02.021>
- Do, M. H., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Nghiem, L. D., & Ni, B. J. (2018). Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *Science of the Total Environment*, 639, 910–920.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Hernandez-Fernandez, F. J., de Los Rios, A. P., Salar-Garcia, M. J., Ortiz-Martinez, V. M., Lozano-Blanco, L. J., Godinez, C., Tomas-Alonso, F., & Quesada-Medina, J. (2015). Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Processing Technology*, 138, 284–297.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.022>
- Li, M., Zhou, M., Tian, X., Tan, C., Cameron, T., Hassett, D. J., & Gu, T. (2018). Microbial fuel cell (MFC) power performance improvement through enhanced microbial electrogenicity Ming. *Biotechnology Advances, December 2017*, #pagerange#.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.010>
- Logan, B. E. (2007). *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9780470258590>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5181–5192.
<https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into

- bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science*, 337(6095), 686–690.
<https://doi.org/10.1126/science.1217412>
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291–298.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>
- Rea, H. S. (2017). *Evaluación de la biomasa producida por el tratamiento de aguas residuales domésticas usando celdas de combustible microbiano (MFCs) como posible abono agrícola*. Universidad Central del Ecuador.
- Sacco, N. J., Figuerola, E. L. M., Pataccini, G., Bonetto, M. C., Erijman, L., & Cortón, E. (2012). Performance of planar and cylindrical carbon electrodes at sedimentary microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 126, 328–335.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.060>
- Sivasankar, V., Mylsamy, P., & Omine, K. (Eds.). (2018). *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0>
- Wei, B., Tokash, J. C., Chen, G., Hickner, M. A., & Logan, B. E. (2012). Development and evaluation of carbon and binder loading in low-cost activated carbon cathodes for air-cathode microbial fuel cells. *RSC Advances*, 2(33), 12751–12758.
<https://doi.org/10.1039/C2RA21572A>
- Zhang, F., Cheng, S., Pant, D., Bogaert, G. Van, & Logan, B. E. (2009). Power generation using an activated carbon and metal mesh cathode in a microbial fuel cell. *Electrochemistry Communications*, 11(11), 2177–2179.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.elecom.2009.09.024>