

Evaluation of Activated Carbon Electrodes as Anodes in a Microbial Fuel Cell Using *Shewanella* *Putrefaciens*

Diana-Marcela Vanegas-Hernández; Mónica-Liliana Cardona-
Aristizabal; Zulamita Zapata-Benabithé

Citación: D.-M. Vanegas-Hernández, M.-L. Cardona-Aristizabal, and
Z. Zapata-Benabithé, “Evaluation of Activated Carbon Electrodes as
Anodes in a Microbial Fuel Cell Using *Shewanella Putrefaciens*,”
Revista Facultad de Ingeniería, vol. 29 (54), e10468, 2020.
<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10468>

Recibido: Diciembre 22, 2019; **Aceptado:** Mayo 2, 2020;
Publicado: Mayo 13, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto
distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de
intereses.

Evaluation of Activated Carbon Electrodes as Anodes in a Microbial Fuel Cell Using *Shewanella* *Putrefaciens*

Diana-Marcela Vanegas-Hernández¹

Mónica-Liliana Cardona-Aristizabal²

Zulamita Zapata-Benabithe³

Abstract

In this work, three types of activated carbons were evaluated as electrodes in the anode chamber of a two-chamber microbial fuel cell (MFC). The evaluation was applied using a pure *Shewanella Putrefaciens* culture due to its gram-negative characteristics. In the cathode chamber, a platinum electrode was used, and a Nafion® 117 proton exchange membrane was selected as a separator of both chambers. The activated carbons were obtained from different precursors (coffee husk, commercial coal, and mineral coal), with different microporous and surface properties. From the voltage and current measurements, it was found that the cell power values varied between 0.008 mW and 0.045 mW. The electrode obtained from chemical activation of coffee husk with H₃PO₄ at 450 °C (Q) showed the best electrochemical behaviour and highest power values. This result may be mainly related to the macroscopic morphology and mesopores that improve the wettability of the surface by the medium thought carbonaceous material. SEM images showed a better biofilm formation, larger filaments of the bacteria, and micro-beds formation

¹ Ph. D. Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín-Antioquia, Colombia). diana.vanegas@upb.edu.co. ORCID: [0000-0002-9519-0841](https://orcid.org/0000-0002-9519-0841)

² M. Sc. Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín-Antioquia, Colombia). monica.cardona@upb.edu.co. ORCID: [0000-0002-5829-3438](https://orcid.org/0000-0002-5829-3438)

³ Ph. D. Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín-Antioquia, Colombia). zulamita.zapata@upb.edu.co. ORCID: [0000-0002-4497-4865](https://orcid.org/0000-0002-4497-4865)

over the surface of bio-anode Q, which improved the interaction with the microorganism, its metabolism, and electrons extracellular transfer. Therefore, activated carbon from coffee husk could be considered as a promising material for electrodes of microbial fuel cells.

Keywords: activated carbon; anodic chamber; carbonaceous materials; mediators microorganism; *Shewanella Putrefaciens*; two chambers cells.

Evaluación de electrodos de carbón activado como ánodos de una celda de combustible microbiana usando *Shewanella Putrefaciens*

Resumen

En este trabajo se evaluaron tres tipos de carbones activados como electrodos en la cámara anódica de una celda de combustible microbiana (MFC) de dos cámaras. Se utilizó un cultivo de *Shewanella putrefaciens* puro debido a sus características gran-negativa. En la cámara catódica se utilizó un electrodo de platino y Nafion® 117 como membrana de intercambio de protones para separar las dos cámaras. Los carbones activados seleccionados presentaron diferentes precursores (cisco de café, carbón comercial, y carbón mineral), con diferentes morfologías y propiedades porosas y superficiales. A partir de las mediciones de voltaje y corriente se encontró que los valores de potencia de la celda variaron entre 0.008 mW y 0.045 mW. El electrodo preparado utilizando carbón activado a partir de cisco de café (Q) presentó el mejor comportamiento electroquímico y valores de potencia más altos; este carbón se obtuvo a partir de la activación de cisco de café con H_3PO_4 a 450 °C. La morfología macroscópica de este carbón activado permitió una mejor migración del medio de cultivo acuoso hacia los macroporos y posteriormente mesoporos que mejoran la mojabilidad de la superficie. Las microfotografías SEM mostraron una mejor formación de la biopelícula, filamentos más largos de la bacteria y la formación de microlechos en el bio-ánodo Q, que favoreció la interacción con el microorganismo, facilitando su metabolismo y la transferencia extracelular de electrones. Por tal motivo, el carbón activado a partir de cisco de café podría ser considerado como un material prometedor para su implementación como electrodos en celdas de combustible microbiana.

Palabras clave: cámara anódica; carbón activado; celdas dos cámaras; materiales carbonosos; microorganismos mediadores; *Shewanella Putrefaciens*.

Avaliação de eletrodos de carvão ativado como ânodos de uma célula de combustível microbiana usando *Shewanella Putrefaciens*

Resumo

Neste trabalho avaliaram-se três tipos de carvões ativados como eletrodos na câmara anódica de uma célula de combustível microbiana (MFC) de duas câmaras. Utilizou-se um cultivo de *Shewanella putrefaciens* puro devido a suas características gram-negativa. Na câmara catódica utilizou-se um eletrodo de platino e Nafion® 117 como membrana de intercâmbio de prótons para separar as duas câmaras. Os carvões ativados selecionados apresentaram diferentes precursores (cisco de café, carvão comercial, e carvão mineral), com diferentes morfologias e propriedades porosas e superficiais. A partir das medições de voltagem e corrente encontrou-se que os valores de potência da célula variaram entre 0.008 mW e 0.045 mW. O eletrodo preparado utilizando carvão ativado a partir de cisco de café (Q) apresentou o melhor comportamento eletroquímico e valores de potência mais altos; este carvão obteve-se a partir da ativação de cisco de café com H₃PO₄ a 450 °C. A morfologia macroscópica deste carvão ativado permitiu uma melhor migração do meio de cultivo aquoso em direção aos macroporos e posteriormente mesoporos que melhoram a molhabilidade da superfície. As microfotografias SEM mostraram uma melhor formação da biopelícula, filamentos mais longos da bactéria e a formação de microleitos no bio-ânodo Q, que favoreceu a interação com o *microorganismo*, facilitando seu metabolismo e a transferência extracelular de elétrons. Por tal motivo, o carvão ativado a partir de cisco de café poderia ser considerado como um material promissor para sua implementação como eletrodos em células de combustível microbiana.

Palavras chave: câmara anódica; carvão ativado; células duas câmaras; materiais carbonosos; micro-organismos mediadores; *Shewanella Putrefaciens*.

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de energías renovables es cada vez más necesaria, con el fin de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, reducir el impacto ambiental y para ayudar a países en vía de desarrollo a proporcionar sistemas energéticos más confiables y seguros [1]. En Colombia un 22 % de la energía consumida proviene de fuentes renovables (uso tradicional de la biomasa e hidroeléctrica), y en menor proporción la energía proveniente de fuentes como el sol, el viento, el mar o biomasa para su conversión en energía térmica/eléctrica [1-2]. Las celdas de combustible microbiana (MFC, por sus siglas en inglés) pueden ser consideradas como una tecnología verde y una solución prometedora para satisfacer las necesidades energéticas futuras. A gran escala, este tipo de biotecnología puede ser integrada al tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y otros residuos orgánicos para producir electricidad, y para biorremediación de ambientes contaminados a bajo costo y de forma eficiente [3]. Adicionalmente, pueden operar a temperatura ambiente, no requiere de tratamiento de gases y tiene un amplio potencial de aplicación en zonas no interconectadas eléctricamente [4]. Los microorganismos en las MFC convierten energía química a energía eléctrica, mediante la oxidación de un sustrato en el ánodo como parte de su metabolismo. En condiciones anaeróbicas se produce CO_2 , protones y electrones, y en condiciones aeróbicas solo se produce CO_2 y agua [5-6].

La producción de energía a partir de estos sistemas son generalmente bajos debido a su diseño complejo, alta resistencia interna y las pérdidas en los electrodos [7]. En el ánodo se utilizan materiales conductivos, biocompatibles y químicamente estables en la solución del reactor, tales como productos del carbono debido a su alta estabilidad, conductividad eléctrica y área superficial. Algunos de los materiales utilizados son tela de carbono, fieltro de carbono o grafito, carbones activados, papel de carbono, “cepillo” de fibra de grafito, gránulos o esferas de carbono [8-11]. Varios microorganismos tienen propiedades de transferencia de electrones directa desde el interior de la célula hacia los aceptores vía citocromos tipo-c, biopelículas y nanocables altamente conductivos. Estos microorganismos tienen alta eficiencia Coulombica y pueden formar biopelículas en la superficie del ánodo, transfiriendo

los electrones directamente al ánodo y resultando en la producción de más energía [12].

En este trabajo se evalúa la producción de energía eléctrica en una MFC a escala de laboratorio, utilizando carbones activados como ánodos en una cámara que contiene un medio convencional apropiado para *Shewanella putrefaciens*. Esta cepa se ha utilizado previamente como organismo electrogénico [13-15] debido a su versatilidad de crecimiento, ya que tiene facultades anaeróbicas como aeróbicas, y a que es una bacteria Gram-negativa puede transferir electrones de forma directa a los electrodos para generar pequeñas corrientes eléctricas.

II. MÉTODOS

Esta sección describe la construcción de la cámara anódica, la caracterización morfológica y superficial de los carbones activados utilizados como ánodos, y las mediciones electroquímicas realizadas en el MFC.

A. Preparación de inóculo bacteriano

La cepa bacteriana *S. putrefaciens* ATCC 8071 fue preservada en crioviales, se cultivó aeróbicamente en 50 mL de medio Luria Bertani (LB) (Bacto Triptona, Extracto de levadura, NaCl y suplementado con Lactato a pH 7.4) y se incubó a 30 °C, por un periodo de 36 - 48 h a 160 rpm. Las células bacterianas fueron cosechadas por centrifugación (1500 rpm, 15 min, 4 °C) y se lavaron con solución buffer. Finalmente, las células se suspendieron en 250 ml de caldo LB a una concentración de 1.5×10^8 células/ml.

B. Preparación y caracterización material activo

El material Q es un carbón activado (CA) obtenido a partir de cisco de café, utilizando como agente activante ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85 % a una relación másica de Cisco/ H_3PO_4 de 2/1 a 500 °C durante 1 h a 5 °C/min. El material A es un CA obtenido a partir de antracita, utilizando como agente activante carbonato de potasio (K_2CO_3) 6 M a una relación másica de Antracita/ K_2CO_3 de 1/1 a 800 °C

durante 1 h a 5 °C/min. Finalmente, el material P es un CA comercial adquirido en Protokimica S.A.S.

Los materiales carbonosos fueron caracterizados morfológicamente mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un Jeol, JCM-6000plus, y porosa y superficial a partir de la construcción de las isotermas de N₂ a -196 °C en una ASAP 2020 Plus (Micromeritics). A partir de la isoterma se determinó el área superficial específica (ASE) aplicando el modelo BET (S_{BET}), el tamaño (D_{micro}) y volumen de microporos (V_{micro}) aplicando el modelo de Dubinin-Radushkevich, el volumen de mesoporos aplicando la regla de Gurdvich (V_{meso}). Adicionalmente, el crecimiento bacteriano sobre la superficie de los electrodos de carbono se analizó por SEM.

C. Celda electroquímica

En la Figura 1 se presenta un esquema de la celda de combustible microbiana de dos cámaras, cada una de 250 ml, separadas por una membrana de 2 cm de diámetro. En la cámara anódica se introdujo el medio de cultivo y se puso en contacto con 1.6 g de CA depositados dentro de una malla rectangular (2 cm × 3 cm) de acero inoxidable para permitir el contacto continuo del medio con los carbones activados.

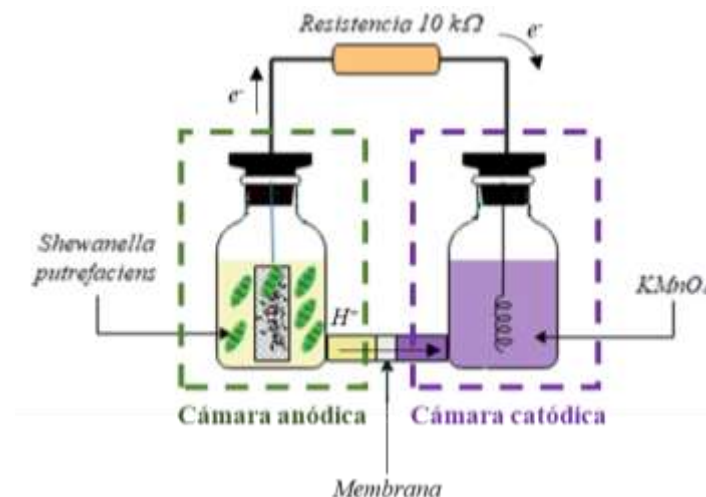


Fig. 1. Esquema de una celda de combustible microbiana de dos cámaras.

Las dos cámaras están separadas por una membrana de intercambio protónico (MIP) convencional, Nafion® 117 [3]. Las membranas fueron previamente activadas con 50 ml de una solución salina al 1 % a 40 °C durante 3 horas. En la cámara catódica se utilizó hilo de platino de 0.5 mm de diámetro con una longitud de 25 cm en una solución de permanganato de potasio (KMnO₄) 0.1 M como electrodo aceptor [16]. Los electrones producidos en la cámara anódica se hicieron pasar por una resistencia externa de 10 kΩ antes de llegar al cátodo.

El voltaje y la corriente de la celda electroquímica se midieron mediante la conexión de un multímetro durante un periodo de 5 a 8 días. La potencia global de la celda ($P_{R_{ext}}$, W) se determinó mediante la medición del voltaje de la celda (V_{celda} , V) y la resistencia externa (R_{ext} , Ω), de acuerdo a la Ecuación (1), y la corriente (I, A) es calculada a partir de la ley de Ohm de acuerdo a la Ecuación (2) [12].

$$P_{R_{ext}} = V_{celda}^2 / R_{ext} \quad (1)$$

$$I = V_{celda} / R_{ext} \quad (2)$$

La potencia de salida es usualmente normalizada respecto al área superficial del ánodo (S_A , m²), debido a que es donde ocurre la reacción biológica. La densidad de potencia (DP_A , W/m²) se calculó basada en la Ecuación (3) [17].

$$DP_A = V_{celda}^2 / (R_{ext} \times S_A) \quad (3)$$

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan las microfotografías SEM y las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno a -196 °C de los carbones activados. Además, se sustenta el desempeño electroquímico de estos materiales en la MFC.

A. ELECTRODOS CÁMARA ANÓDICA

La morfología de los materiales utilizados como electrodos en la cámara anódica se evalúa a partir de las microfotografías SEM que presentan en la Figura 2. La superficie del cisco de café se caracteriza por ser rugosa, desigual y ondulante [18], y presenta una morfología de platos con una baja área superficial específica. En la Figura 2a se observa la morfología del carbón activado a partir del cisco de café con H₃PO₄, la cual después de activada presenta una estructura natural compuesta por “hojuelas” o platos que forman cavidades y macroporos amplios, similar a los

materiales preparados por Maimulyanti et al. [19]. La estructura porosa está conformada por poros homogéneos (figura insertada) en comparación con el cisco de café activado con NaOH/CO₂ por Ahmad et al. [18], y poros profundos en comparación con el cisco de café activados con ZnCl₂ por Kosaiyakanon et al. [20], cuya superficie está formada por cráteres poco profundos y heterogéneos.

En la Figura 2b se presenta la morfología del carbón activado A, la cual parece una estructura compacta, con caras grandes, lisas y agrietadas, con una leve presencia de macroporos (Figura 2b insertada). Finalmente, la morfología del carbón activado P (Figura 2c) también presenta superficies grandes, con secciones lisas y otras con alta rugosidad que promueve la formación de una estructura porosa.

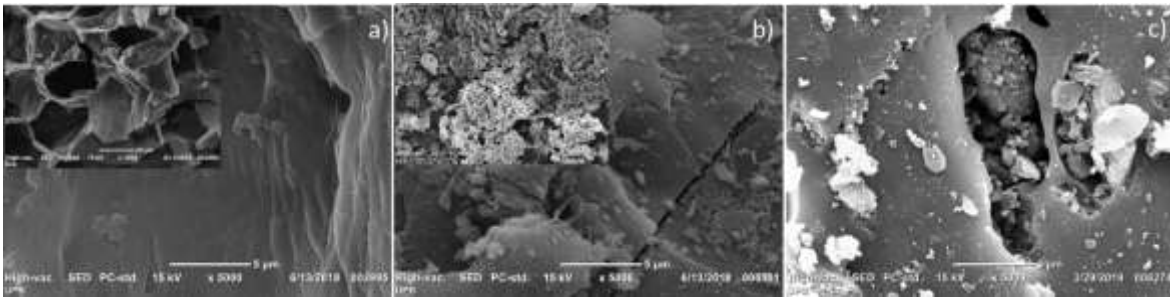


Fig. 2. Micrografías SEM de los carbones activados granulares a) Q y figura insertada a x1000, b) A y figura insertada a x800, y c) P.

Los CA presentaron características principalmente microporosas, isotermas tipo I según la IUPAC [21], con presencia de mesoporos pequeños en las muestras P y Q. El carbón activado P presentó el mayor valor de $S_{BET} = 816 \text{ m}^2/\text{g}$, seguido por Q = $541 \text{ m}^2/\text{g}$ y A = $114 \text{ m}^2/\text{g}$. El tamaño de los microporos fue muy similar para los tres carbones activados variando entre 1.20 y 1.31 nm, mientras que la muestra Q una mayor área superficial externa de $135 \text{ m}^2/\text{g}$ respecto a las muestras P de $62 \text{ m}^2/\text{g}$ y A de $9.6 \text{ m}^2/\text{g}$. Las isotermas de adsorción/desorción de N₂ a -196 °C se presentan en la Figura 3 y los valores de las propiedades superficiales y porosas de los carbones activados evaluados se presentan como material complementario.

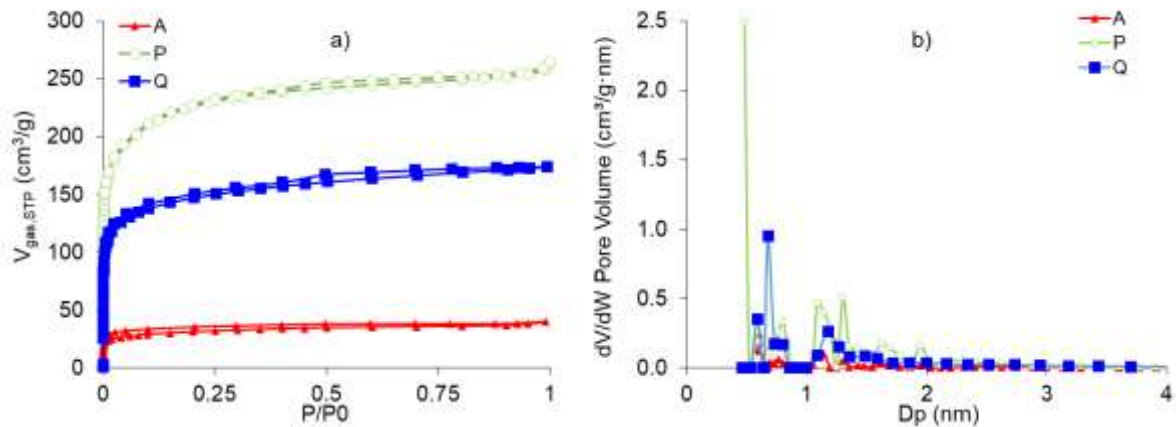


Fig. 3. a) Isothermas de N₂ a -196 °C y b) la distribución de tamaño de poros de carbones activados granulares.

B. Caracterización celda electroquímica

En la Figura 4a se observa que los valores registrados de voltaje en función del tiempo fueron más altos para la muestra Q, seguido por la muestra A y finalmente por la muestra P. Estos resultados pueden estar relacionados con una mayor fuerza capilar que permite la migración del medio acuoso hacia los macroporos y posteriormente mesoporos que mejoran la mojabilidad de la superficie [11]. Los valores de voltaje y comportamiento obtenidos son similares a los presentados por Kim et al. [12], trabajo en el cual se utilizó tela de grafito como electrodo. Además, se observa que el voltaje de salida alcanza un comportamiento estable aproximadamente después de 50 h. En la Figura 4b se observa un incremento de la corriente, seguido de una disminución, este comportamiento es similar al presentado por Schoen [9], quien utilizó fibras de carbono como electrodos en la cámara anódica.

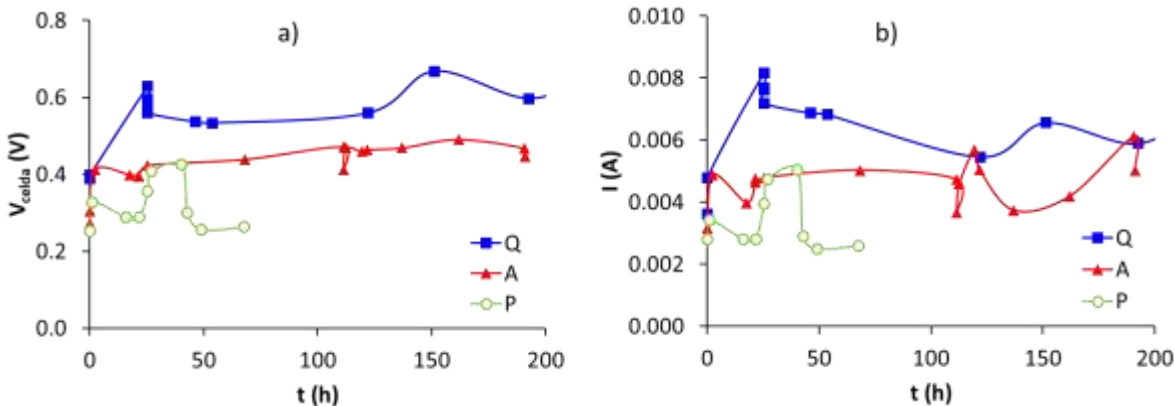


Fig. 4. a) Voltaje (E) y b) Corriente (I) de la celda en función del tiempo de los carbones activados granulares en el ánodo.

IV. DISCUSIÓN

En la Figura 5a se puede observar que el carbón Q presentó los valores más altos de potencia en el ánodo, presentando dos máximos uno de 0.039 mW a un tiempo de 25 h y otro a 0.045 mW correspondiente a un tiempo aproximado de 150 h. Al utilizar este carbón la mayor actividad del microorganismo se da durante las primeras 30 h de funcionamiento de la celda electroquímica, posteriormente se observa un ligero descenso de la corriente que puede estar relacionado con la disminución del sustrato en el medio que disminuye la población microbiana y a su vez el transporte de electrones. La disponibilidad del sustrato influye significativamente en el crecimiento de la población bacteriana y en la formación de la biopelícula en el ánodo, y por consiguiente en el rendimiento de la densidad de potencia y eficiencia de la celda [6]. El incremento de potencia después de 120 h de operación de la celda puede estar relacionado con la alimentación de los microorganismos vivos con la población muerta.

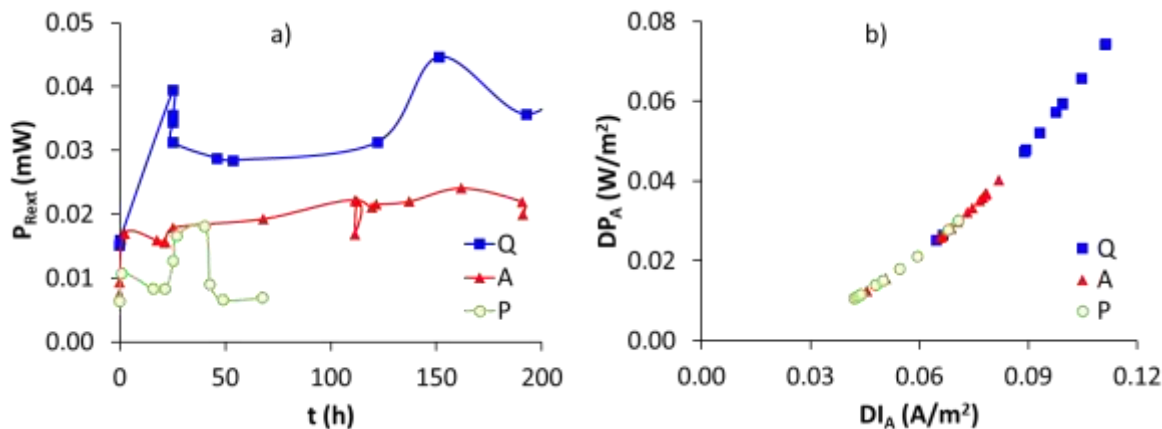


Fig. 5. a) Potencia respecto al tiempo y b) Densidad de potencia respecto a la densidad de corriente de la celda para los carbones activados granulares en el ánodo.

Por otra parte, los carbones P y A presentaron valores de potencia entre 0.008 mW y 0.018 mW, y entre 0.006 mW y 0.024 mW, respectivamente. El incremento y la disminución de potencia presentado por el carbón Q también se observan en el desempeño de los carbones P y A. A pesar de que el carbón P es el que tiene una mayor área superficial específica, fue el que presentó un menor desempeño electroquímico, lo cual indica que no toda el área aportada por los microporos está en contacto con el microorganismo, la formación de microlechos es menor y por lo tanto la transferencia de electrones disminuye. Cabe destacar que en algunos trabajos se utiliza una resistencia externa de menor valor (1 k Ω) y mayores áreas superficiales externas de los electrodos (25 - 50 cm²), con el propósito de maximizar el desempeño de la celda. En la Figura 5b, se observa que la relación de la densidad de potencia (DP_A) de la celda respecto a la densidad de corriente del ánodo (DI_A) es directamente proporcional. Los valores más altos son los presentados por el carbón Q, seguidos por el A y finalmente por el carbón P, valores del orden a los presentados por Zang et al. [22] y por Cui et al. [11].

La formación de biopelículas es variable y depende de cada bacteria, su crecimiento se da en tres etapas: microbios, glicocalix (matriz de polímero secretada que protege a las bacterias en la superficie) y una superficie [23-24]. Según Yang [25], *S. putrefaciens* es una de las bacterias más versátiles respecto a su respiración, por tal motivo una vez que el electrodo está cubierto de biopelícula, la donación de los

electrones podría darse directamente desde la biopelícula o que esta funcione como una mediadora entre el electrodo y la materia orgánica suspendida en el medio.

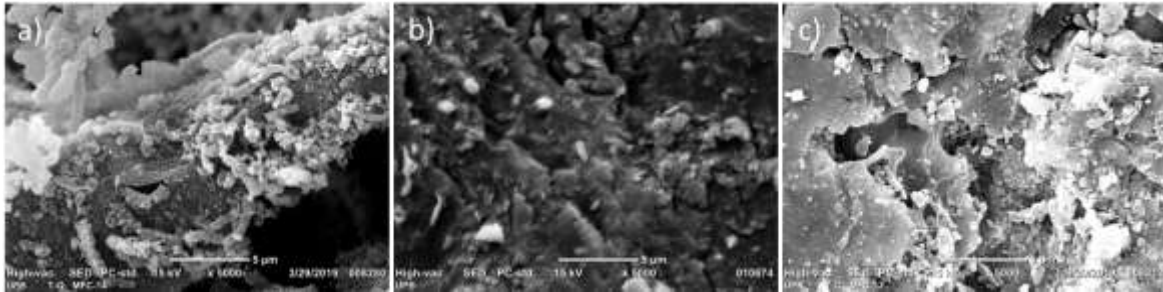


Fig. 6. Microfotografías SEM de la superficie de los carbones activados a) Q, b) A, y c) P después de finalizado el proceso electroquímico.

En la Figura 6 se puede observar que sobre la superficie de los tres tipos de carbones quedan residuos del microorganismo, que pueden ser asociados con la biopelícula; estos residuos no son uniformes y con una longitud entre 1 μm y 3 μm (Medidas presentadas en el material complementario). La formación de microlechos de *S. putrefaciens* son similares a los presentados por Cui et al. en materiales compuestos a partir de polianilina, tela de grafito y nanotubos de carbono [11]. En el carbón Q (Figura 6a) se puede observar que los microorganismos en forma de varilla cubren completamente la superficie, y que están ligeramente adheridos a la superficie y algunos superpuestos sobre otros, sugiriendo que esta biopelícula está conformada por varias comunidades de células microbianas [26]. En el caso de los materiales A y P los microorganismos se adhirieron a la superficie en forma esférica y en algunas partes de la superficie difícil de identificar. La morfología del material carbonoso Q, al tener una estructura abierta y en forma de “hojuelas” permitió una mayor formación de la biopelícula y adherencia a la superficie, lo cual se refleja en una mejor respuesta electroquímica de la celda.

V. CONCLUSIONES

El material del ánodo tiene un papel importante en la producción de electricidad, ya que, dependiendo de la nanoestructura, se puede mejorar la transferencia de electrones y la densidad de potencia de la MFC. *S. putrefaciens* es un

microorganismo exoelectrógenos, generador de electricidad que puede usar electrodos como aceptores de electrones. La morfología macroporosa del carbón activado a partir de cisco de café mejoró la formación de microlechos sobre la superficie del electrodo, factores que pueden facilitar el metabolismo de este microorganismo a través del ánodo MFC favoreciendo la transferencia extracelular de electrones.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

La idea principal y desarrollo estuvo a cargo de Zapata-Benabithé, Vanegas-Hernández y Cardona-Aristizabal. Cardona-Aristizabal preparó el cultivo microbiano, Zapata-Benabithé sintetizó los carbones activados Q y A. Vanegas-Hernández realizó el montaje de la celda y las mediciones electroquímicas. El análisis de resultados estuvo a cargo de Zapata-Benabithé, y su verificación a cargo de Vanegas-Hernández y Cardona-Aristizabal.

FINANCIAMIENTO

El proyecto fue financiado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) mediante el proyecto No 366B-03/15-19 del cual se derivaron estos resultados.

AGRADECIMIENTOS

A los Laboratorios de Materiales de la UPB por la realización de las microfotografías SEM.

REFERENCIAS

- [1] T. González Estrada, and J. A. Valencia, Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá D.C.: UPME, MINMINAS, BID, FMAM, 2015.
- [2] F. N. Jiménez-García, A. M. Restrepo-Franco, and L. F. Mulcue-Nieto, "Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (52), pp. 9-26, 2019. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9651>
- [3] D. R. Lovley, "Bug juice: harvesting electricity with microorganisms.," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 4 (7), pp. 497-508, Jul. 2006. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1442>
- [4] P. Sengodan, and D. B. Hays, "Topic paper #13 Microbial Fuel Cells," *NPC Future Transportation Fuels Study: Advancing Technology for America's Transportation Future Study Topic Papers*. Texas, 2012.

- [5] I. Kim, K.-J. Chae, M.-J. Choi, and W. Verstraete, "Microbial Fuel Cells: Recent Advances, Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation," *Environmental Engineering Research*, vol. 13 (2), pp. 51-65, 2008. <https://doi.org/10.4491/eer.2008.13.2.051>
- [6] D. Pant, G. Van Bogaert, L. Diels, and K. Vanbroekhoven, "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production," *Bioresource Technology*, vol. 101 (6), pp. 1533-1543, Mar. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- [7] M. Osman, A. Shah, and F. Walsh, "Recent progress and continuing challenges in bio-fuel cells. Part II: Microbial," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 26 (3), pp. 953-963, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.08.057>
- [8] A. Falcón, J. E. Lozano, and K. Juárez, "Bioelectricidad," *Rev. la Soc. Mex. Biotecnol. y Bioingeniería A.C.*, vol. 13 (3), pp. 62-78, 2009.
- [9] A. R. Schoen, "Carbon fiber electrode as an electron acceptor for a microbial fuel cell using geobacter," *Cantaurus J. McPherson Coll. Sci.*, vol. 15, pp. 24-26, 2007.
- [10] K. Scott, G. Rimbu, K. Katuri, K. Prasad, and I. Head, "Application of modified carbon anodes in microbial fuel cells," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 85 (5), pp. 481-488, 2006. <https://doi.org/10.1205/psep07018>
- [11] H. F. Cui, L. Du, P. B. Guo, B. Zhu, and J. H. T. Luong, "Controlled modification of carbon nanotubes and polyaniline on macroporous graphite felt for high-performance microbial fuel cell anode," *Journal of Power Sources*, vol. 283, pp. 46-53, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.088>
- [12] H. J. Kim, H. S. Park, M. S. Hyun, I. S. Chang, M. Kim, and B. H. Kim, "A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*," *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 30 (2), pp. 145-152, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00478-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00478-1)
- [13] C. K. Lee, A. J. Kim, G. S. Santos, P. Y. Lai, S. Y. Lee, D. F. Qiao, J. De Anda, T. D. Young, Y. Chen, A. R. Rowe, K. H. Neilson, P. S. Weiss, and G. C. L. Wong, "Evolution of Cell Size Homeostasis and Growth Rate Diversity during Initial Surface Colonization of *Shewanella oneidensis*," *ACS Nano*, vol. 10 (10), pp. 9183-9192, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b05123>
- [14] E. Marsili, D. B. Baron, I. D. Shikhare, D. Coursolle, J. A. Gralnick, and D. R. Bond, "Shewanella secretes flavins that mediate extracellular electron transfer," *PNAS*, vol. 105 (10), pp. 3968-3973, 2008. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710525105>
- [15] H. H. Hau, and J. A. Gralnick, "Ecology and Biotechnology of the Genus *Shewanella*," *Annual Review of Microbiology*, vol. 61 (1), pp. 237-258, 2007. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.61.080706.093257>
- [16] S. You, Q. Zhao, J. Zhang, J. Jiang, and S. Zhao, "A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor," *Journal of Power Sources*, vol. 162 (2), pp. 1409-1415, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.063>
- [17] B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, and K. Rabaey, "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology," *Environmental Science and Technology*, vol. 40 (17), pp. 5181-5192, 2006. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- [18] M. A. Ahmad, and N. K. Rahman, "Equilibrium, kinetics and thermodynamic of Remazol Brilliant Orange 3R dye adsorption on coffee husk-based activated carbon," *Chemical Engineering Journal*, vol. 170 (1), pp. 154-161, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.045>

- [19] A. Maimulyanti, A. R. Prihadi, T. Rosita, and I. Safrudin, "Adsorption and recovery of aroma compounds from wastewater of clove oil distillation using coffee husk biosorbent," *ScienceAsia*, vol. 45 (5), pp. 446-451, 2019. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2019.45.446>
- [20] L. C. A. Oliveira, E. Pereira, I. R. Guimaraes, A. Vallone, M. Pereira, J. P. Mesquita, and K. Sapag, "Preparation of activated carbons from coffee husks utilizing FeCl₃ and ZnCl₂ as activating agents," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 165 (1-3), pp. 87-94, Jun. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.064>
- [21] M. Thommes, K. Kaneko, A. V. Neimark, J. P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, and K. S. W. Sing, "Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 87 (9-10), pp. 1051-1069, 2015. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- [22] X. Zhang, J. Shi, P. Liang, J. Wei, X. Huang, C. Zhang, and B. E. Logan, "Power generation by packed-bed air-cathode microbial fuel cells," *Bioresource Technology*, vol. 142, pp. 109-114, Aug. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.014>
- [23] W. Michael Dunne Jr., "Bacterial Adhesion: Seen Any Good Biofilms Lately?," *Clinical Microbiology Reviews*, vol. 15 (2), pp. 155-166, 2002. <https://doi.org/10.1128/cmr.15.2.155-166.2002>
- [24] J. C. Biffinger, J. Pietron, R. Ray, B. Little, and B. R. Ringeisen, "A biofilm enhanced miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10 and oxygen reduction cathodes," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 22 (8), pp. 1672-1679, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.07.027>
- [25] Y. Yang, G. Sun, J. Guo, and M. Xu, "Differential biofilms characteristics of *Shewanella decolorationis* microbial fuel cells under open and closed-circuit conditions," *Bioresource Technology*, vol. 102 (14), pp. 7093-7098, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.073>
- [26] T. H. Pham, P. Aelterman, and W. Verstraete, "Bioanode performance in bioelectrochemical systems: recent improvements and prospects," *Trends in Biotechnology*, vol. 27 (3), pp. 168-178, Mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.11.005>