

Desarrollo de un sistema bioelectroquímico empleado para el crecimiento de *Stevia rebaudiana*

Development of a bioelectrochemical system used to grow *Stevia rebaudiana*

Wilgince Apollon^{1*}, Alejandro Isabel Luna-Maldonado¹, Sathish-Kumar Kamaraj², Juan Antonio Vidales-Contreras¹, Humberto Rodríguez-Fuentes¹, Juan Florencio Gómez-Leyva³

¹Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa S/N, col. Ex Hacienda El Canadá, CP 66050. Gral. Escobedo, N.L. México. ²Laboratorio de Medio Ambiente Sostenible, TecNM-Instituto Tecnológico El Llano, Km 18, Carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, CP 20330, El Llano, Aguascalientes, México. ³Laboratorio de Biología Molecular, TecNM-Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Km 10, Carretera a San Miguel Cuyutlán, CP 45640. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. Correo electrónico: wilgince.apollon@uanl.edu.mx (*Autor responsable)

RESUMEN

En este estudio se evaluó la producción de bioelectricidad y el crecimiento de la planta mediante una celda de combustible microbiana vegetal (P-MFC) durante un periodo de 43 días y de tres meses, respectivamente. La P-MFC se construyó con un cantarito, el cual tuvo dos compartimentos: ánodo y cátodo. El ánodo se colocó cerca de las raíces de la planta a profundidad de 15 cm; posteriormente, las P-MFC se inocularon con 642.86 mL de orina de diferentes animales domésticos. La mayor producción de bioelectricidad ($46.97 \pm 0.67 \text{ mW m}^{-2}$) se obtuvo con la orina de caprino (P-MFC-3). Para las variables de crecimiento, el testigo (P-MFC-1*, sin inocular) presentó la mayor altura ($p < 0.05$), y la P-MFC-3 (orina de caprino) un mayor número de brotes y diámetro, respectivamente ($p < 0.05$). El desarrollo del sistema P-MFC es una alternativa viable para la generación de energía sostenible y renovable.

Palabras Clave: altura de planta, bioelectricidad, celda de combustible microbiana vegetal (P-MFC), compuestos orgánicos, diámetro de tallo.

ABSTRACT

In this study, bioelectricity production and plant growth were evaluated using a plant microbial fuel cell (P-MFC) over a period of 43 days and three months, respectively. The P-MFC was built with a cantarito, which had two compartments: a) anode and b) cathode. The anode was placed (depth: 15 cm) close to the roots of the plant; subsequently, the P-MFCs were inoculated with 642.86 mL of urine from different domestic animals. The highest production of bioelectricity ($46.97 \pm 0.67 \text{ mW m}^{-2}$) was obtained with goat urine (P-MFC-3). For the growth variables, the control (P-MFC-1*, without inoculation) presented the highest height ($p < 0.05$); and P-MFC-3 (goat urine) presented a greater number of shoots and diameter, respectively ($p < 0.05$). The development of the P-MFC system is a viable alternative for the generation of sustainable and renewable energy.

Keywords: plant height, bioelectricity, plant microbial fuel cell, organic compounds, stem diameter.

INTRODUCCIÓN

El sistema bioelectroquímico (BES, por siglas en inglés), como la P-MFC es un dispositivo mediante el cual se produce energía eléctrica de manera sostenible. La P-MFC es capaz de convertir la energía química almacenada en cualquier sustrato biodegradable directamente en electricidad (Strik *et al.*, 2008). Esta tecnología se basa en dos procesos probados: rizodeposición (compuestos orgánicos o exudados liberados por la planta) y producción de electricidad por las bacterias electroquímicamente activas (EAB, por sus siglas en inglés) existentes en la superficie del electrodo (Tapia *et al.*, 2017), por lo cual también es capaz de mejorar la eficiencia de generación de energía eléctrica (Helder *et al.*, 2013). Durante este proceso, los electrones que se trans-

fieren al electrodo del ánodo, se consumen en el compartimiento del cátodo por reducción típica de oxígeno al agua (Strik *et al.*, 2011).

En comparación con otras MFC, las P-MFC pueden producir electricidad de manera continua con la actividad de la especie vegetal utilizada, sin que sea extraída de su espacio de crecimiento; esta tecnología se puede operar sin restricción del lugar donde se coloque (Helder *et al.*, 2012). Actualmente, las características de mejora permiten incrementar el funcionamiento y la producción de electricidad, lo cual provocó que las P-MFC estén recibiendo más atención por los investigadores que las fuentes de energía tradicionales. Sin embargo, se requieren más investigaciones para implementar procesos innovativos que permitan su aplicación comercial.

En la última década se llevaron a cabo numerosas investigaciones (Tapia *et al.*, 2017; Wetser *et al.*, 2017; Sudirjo *et al.*, 2019; Apollon *et al.*, 2020) sobre los posibles usos de las P-MFC para el tratamiento de ecosistemas contaminados y también la producción de bioenergía, que han permitido aplicaciones prácticas con esta tecnología (Kabutey *et al.*, 2019). Nitisoravut y Regmi (2017) determinaron los factores que están relacionados con la eficiencia del sistema P-MFC, las perspectivas y los desafíos. Regmi *et al.* (2018) describieron el desarrollo histórico del sistema P-MFC y los parámetros operativos, tales como: la selección de especies vegetales, las características del suelo como pH, humedad, microbiota activa y conductividad eléctrica. Kabutey *et al.* (2019) plantearon acciones sobre las configuraciones y aplicaciones de las P-MFC.

Recientemente, Apollon *et al.* (2021) discutieron los avances y tendencias más recientes en término de configuraciones de las P-MFC, los factores que afectan el rendimiento de los sistemas de P-MFC, los tipos de materiales de membrana, ánodo y cátodo utilizados, los desafíos enfrentados por estos tipos de sistemas bioelectroquímicos y sus posibles aplicaciones en tiempo real. Además, se han desarrollado varios tipos de P-MFC para producir bioelectricidad, y también evaluar el crecimiento de las plantas (Helder *et al.*, 2012); se construyeron P-MFC en forma tubular (Wetser *et al.*, 2017), en forma cilíndrica (Sophia y Sreeja, 2017) y con barra de cerámica integrada verticalmente (Apollon *et al.*, 2020).

Por otra parte, la orina del ganado es otro factor importante para transportar los iones a través del sistema P-MFC, a la vez que facilita el buen desarrollo de las plantas. Se ha reportado que la P-MFC tiene efecto positivo en el crecimiento de las plantas (Apollon *et al.*, 2020). De acuerdo con lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: generar bioelectricidad a largo plazo (circuito cerrado) en un sistema P-MFC empleando *Stevia* (*Stevia*-MFC) con dosis de orina de diferentes tipos de animales domésticos, y evaluar el crecimiento de las plantas mediante el uso del sistema bioelectroquímico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo de investigación se llevó a cabo a la intemperie, en el municipio de General Escobedo, N.L., con ubicación geográfica 25° 78' 02" Latitud Norte y 100° 18' 58" Longitud Oeste; altitud de 500 msnm, con una precipitación anual de 300-600 mm y una temperatura media anual entre 18 y 24° C (INEGI, 2017).

Se seleccionaron plantas de *Stevia rebaudiana* de la misma edad, las cuales fueron propagadas previamente

bajo condiciones controladas. Posteriormente, las plantas se trasplantaron en macetas de plástico con capacidad de 7.25 L, en suelo proveniente de Atlacomulco, Estado de México, para llenar las macetas.

En este trabajo se evaluaron cinco tratamientos bajo un diseño completamente al azar con cinco repeticiones, lo que da un total de 25 unidades experimentales (UE). La unidad experimental fue una maceta de 7.25 L. Se aplicó una dosis de 642.86 mL de tres tipos de orina: bovino, ovino y caprino en las P-MFC. Los tratamientos evaluados se describen a continuación:

T_0 = planta de *Stevia* sin ningún tratamiento

T_1 = planta sin tratamiento + MFC (P-MFC-1*)

T_2 = planta con dosis de 642.86 mL de orina de bovino + MFC (P-MFC-2)

T_3 = planta con dosis de 642.86 mL de orina de caprino + MFC (P-MFC-3)

T_4 = planta con dosis de 642.86 mL de orina de ovino + MFC (P-MFC-4)

Experimento 1. Configuración de las P-MFC y su operación

Las P-MFC se construyeron usando un vaso de arcilla en forma cilíndrica (cantarito, 3 mm de espesor), con una altura de 20 cm y un diámetro de 9 cm

$$(A = 2\pi rh + 2\pi r^2; \text{área} = 0.0693 \text{ m}^2)$$

Se utilizaron 648 cm² de fieltro de grafito (6 mm de espesor) como cámara anódica (colocada sobre la superficie del cantarito) y 270 cm² de malla de acero inoxidable (PLACA 9.5 mm 610 x 610 mm) (colocada dentro del cantarito) como cámara catódica. El ánodo se colocó cerca de las raíces de la planta a una profundidad de 20 cm. Posteriormente, dentro del vaso se adicionó la orina, que sirvió tanto como inóculo en la cámara catódica, así también como regulador de crecimiento para la planta.

Se caracterizó después de la realización de la curva de polarización (Logan y Regan, 2006), conectando la resistencia, la cual indicó la máxima densidad de potencia en la P-MFC. El voltaje se monitoreó con un sistema automático de adquisición basado en un microcontrolador (Arduino, 2560 Mega), en un intervalo de tiempo de 15 min por dato, durante 43 días. Posteriormente, mediante la Ley de Ohm se determinaron la corriente y la potencia. La densidad de corriente (mA m⁻²) y densidad de potencia (mW m⁻²) se estandarizaron al área de la superficie del ánodo (0.0693 m²) (Timmers *et al.*, 2013).

La humedad del sustrato se monitoreó en tiempo real, con un sensor de humedad por tratamiento (Sensor Capacitivo Anticorrosivo Arduino, KZR25884, China), el cual se conectó a una computadora personal (sistema automático de adquisición de datos, Arduino UNO). Los datos se tomaron en el mismo intervalo de tiempo que los del voltaje del sistema.

Experimento 2. Etapas fisiológicas de las plantas

De acuerdo con Spencer *et al.* (2006), mensualmente se monitoreó el crecimiento de las plantas: midiendo la altura (cm) desde la parte superior del lecho de arena hasta la punta y contando el número de brotes. Además,

se midió el diámetro (cm) del tallo con una cinta métrica. Los datos se monitorearon durante un periodo de tres meses.

El pH y la conductividad eléctrica (CE) de la orina se midieron previo a la inoculación de las P-MFC (tres días después de ser recolectada) y el día 57 después de haberse aplicado a las P-MFC. Se usó el COMBO Medidor de pH y CE de la marca HM DIGITAL, y los modelos fueron: pH-80 para medir pH y AP-2 para medir la CE. Además, el sustrato se analizó previo al inicio del experimento, así como al final, después de la aplicación de las orinas. Se determinaron los siguientes parámetros: pH y CE (extracto de saturación del sustrato) por el método de 1 g L⁻¹ a 20 °C, porcentaje de materia orgá-

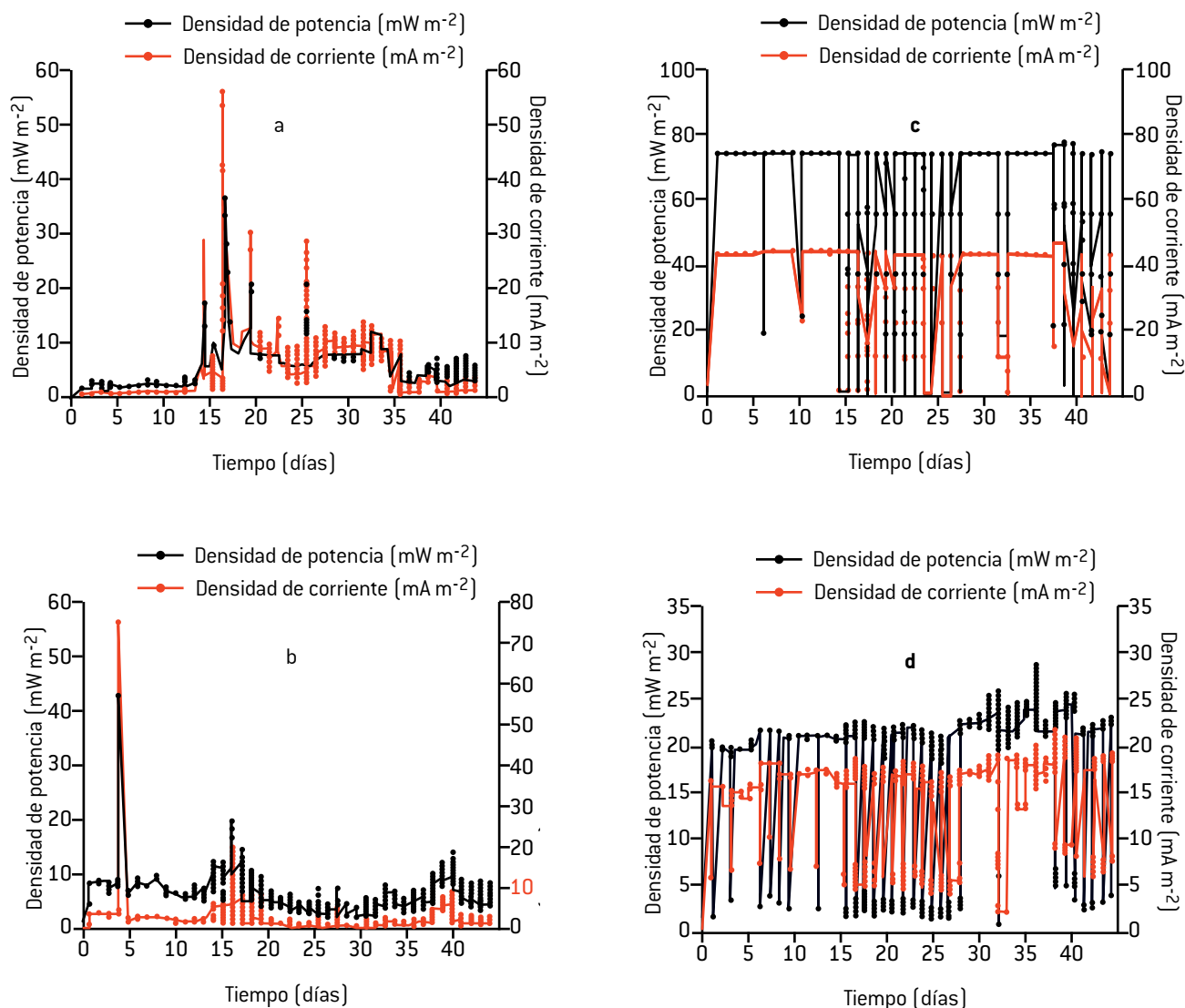


Figura 1. Comportamiento de la generación de bioelectricidad respecto a la humedad del sustrato vs el tiempo en los tipos de P-MFC: (a) P-MFC-1* (sin inocular), (b) P-MFC-2 (inoculada con orina de bovino), (c) P-MFC-3 (inoculada con orina de caprino), (d) P-MFC (inoculada con orina de ovino) durante 43 días de operación.

nica (MO), como se describe en otra parte (Dewis y Freitas, 1970) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) por la absorción atómica (Slavin, 1978).

Para la comparación de medias de los datos obtenidos, el análisis de varianza (ANOVA) y prueba Tukey ($p \leq 0.05$) se realizó con Minitab 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1a se muestra la generación de bioelectricidad que se obtuvo en la P-MFC-1* sin inocular. El mejor rendimiento se logró el día 16, ya que alcanzó densidades de corriente y de potencia de $56.48 \pm 20.14 \text{ mA m}^{-2}$ ($4.04 \pm 1.84 \text{ mA}$) y de $37.04 \pm 3.84 \text{ mW m}^{-2}$ ($3.21 \pm 0.96 \text{ mW}$), respectivamente, siempre y cuando el sustrato contuviera 100% de humedad. En la Figura 1b se obtuvo una densidad de potencia máxima promedio de

$42.79 \pm 14.62 \text{ mW m}^{-2}$ ($2.96 \pm 1.01 \text{ mW}$), a un nivel de densidad de corriente promedio de $74.36 \pm 27.20 \text{ mA m}^{-2}$ ($4.42 \pm 2.57 \text{ mA}$). Este rendimiento se alcanzó en el día cuatro de operación de la P-MFC-2 inoculada con orina de bovino. Sin embargo, el mejor rendimiento de generación de bioelectricidad en este estudio se obtuvo en los reactores (P-MFC-3) inoculados con orina de caprino (Figura 1c), los cuales mostraron una densidad de potencia promedio de $46.97 \pm 0.67 \text{ mW m}^{-2}$ ($3.70 \pm 0.00 \text{ mW}$) y una densidad de corriente promedio de $77.45 \pm 0.24 \text{ mA m}^{-2}$ (el día 38). Los reactores (P-MFC-4) inoculados con orina de ovino mostraron valores más bajos respecto al rendimiento de bioelectricidad (Figura 1d). El pico más alto de la densidad de potencia se logró el día 35, ya que alcanzó un valor de $19.28 \pm 1.97 \text{ mW m}^{-2}$ ($2.04 \pm 1.12 \text{ mW}$), para una densidad de corriente de $28.39 \pm 14.24 \text{ mA m}^{-2}$. Este rendimiento se obtuvo con 100% de humedad. Por otro lado, en un

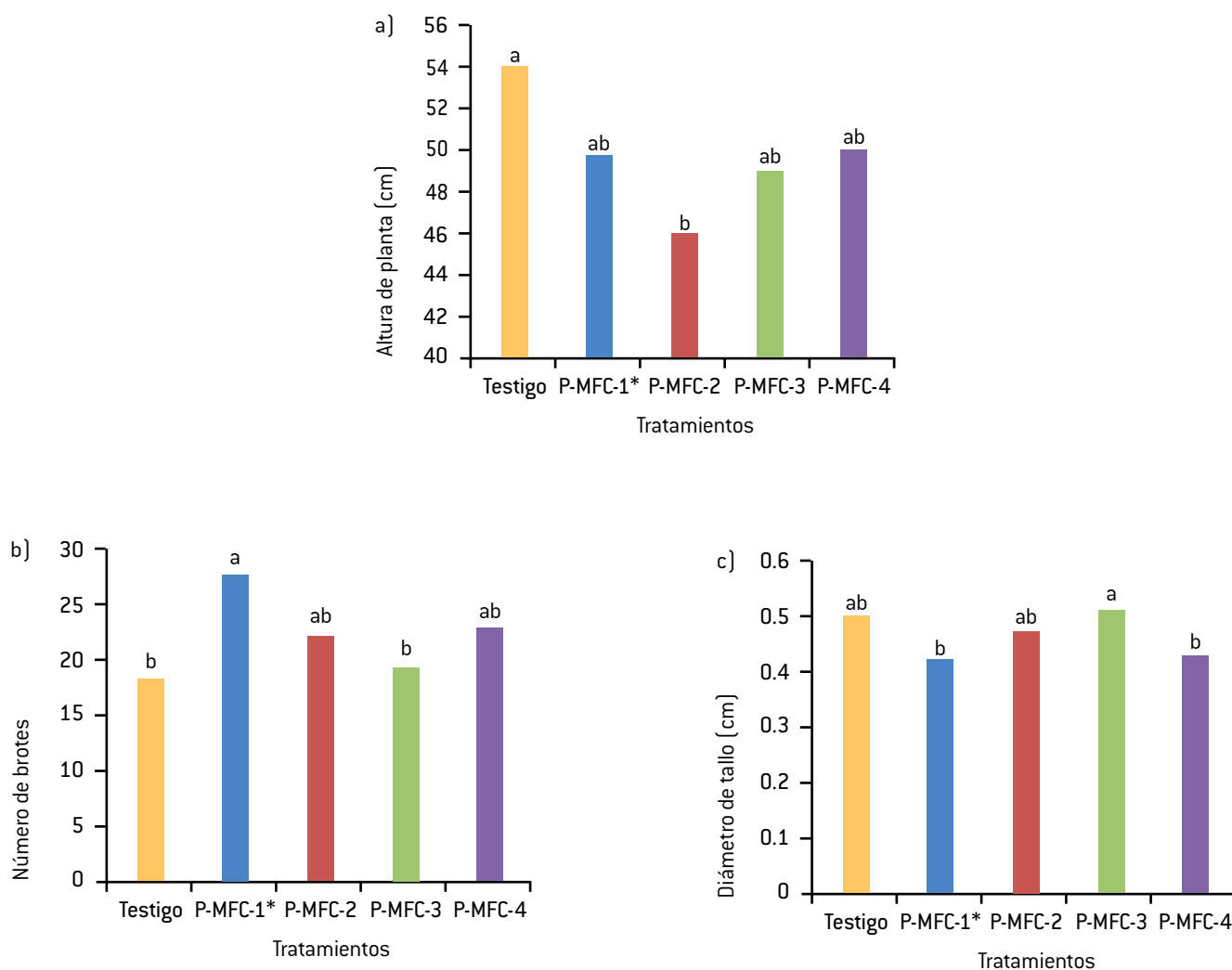


Figura 2. Monitoreo del crecimiento de la planta: (a) altura de planta [cm], (b) número de brotes y (c) diámetro de tallo, durante el experimento 2.

estudio previo en MFC inoculadas con orina humana y en operación por 90 días se reportó una densidad de potencia máxima de $29.64 \pm 2.3 \text{ mW m}^{-2}$ (Salar-García *et al.*, 2020). Este resultado fue de 30.73% siendo menor al compararse con lo obtenido en nuestro estudio. La P-MFC-2, que se inoculó con orina de bovino (día cuatro) y la P-MFC-3, que se inoculó con orina de caprino (día 38) con un 36.89%, respectivamente, la diferencia en la salida de potencia registrada entre ambos sistemas se debió a factores como: tipo de orina y dosis aplicada, tiempo de monitoreo y configuración de los sistemas. La salida de potencia lograda en la P-MFC-3 (Figura 1c) fue aproximadamente tres veces mayor (46.97 mW m^{-2}) en comparación con la potencia alcanzada en otro estudio en una MFC en cascada, inoculada con orina humana (Obata *et al.*, 2020).

Los resultados del ANOVA indicaron que el factor tratamiento tuvo efecto significativo (valor- $p < 0.05$) sobre el crecimiento de la planta. Para la variable altura de planta (cm), la prueba Tukey mostró que el testigo alcanzó la mejor altura (54.10 cm), mientras que P-MFC-1*, P-MFC-3 y P-MFC-4 resultaron ser iguales (Figura 2a). El valor más bajo lo presentó la P-MFC-2. La Figura 2b representa las medias de la variable número de brotes obtenidos en este experimento, en el cual se pudo observar que la P-MFC-1* alcanzó mayor número de brotes (28.06) en comparación con los demás P-MFC, incluso el testigo. Esto se debió al efecto del sistema bioelectroquímico sobre la cantidad de biomasa producida por la planta (Helder *et al.*, 2012). El testigo resultó ser igual que la P-MFC-3, pero menor a las P-MFC-2 y P-MFC-4. Para la variable diámetro de tallo (cm), la P-MFC-3 inoculada con orina de caprino logró el mayor diámetro (0.52 cm) respecto a los demás tratamientos (Figura 2c).

Los resultados indicaron que las orinas de ovino y de caprino mostraron CE similar antes de ser aplicadas a las P-MFC (Cuadro 1), mientras que la orina de bovino tuvo una CE diferente, en comparación con los otros tipos antes mencionados. Zang *et al.* (2012) reportaron CE de 8.43 mS cm^{-1} y 8.24 mS cm^{-1} en orina humana fresca y orina pretratada después de inocular un sistema de MFC, respectivamente. Los valores de pH de los tres tipos de orina fueron similares (Cuadro 1), los cuales coincidieron con los reportados en otro estudio (You *et al.*, 2016). Posteriormente, a los 57 días de operación de las P-MFC con la orina, se apreció un incremento tanto de la CE como del pH, donde la orina de ovino mostró la CE más alta ($10 \pm 0.76 \text{ mS cm}^{-1}$), y un pH de 9.03 ± 0.51 . En otro estudio (Dai *et al.*, 2014) se reportó una CE de 39 mS cm^{-1} , la cual fue 71.41% mayor en comparación con lo encontrado en este estudio, pero el pH (9.2) coincidió con lo hallado en este experimento.

Cuadro 1. Características de las orinas usadas en las P-MFC.

Tipos de orina	pH	CE (mS cm^{-1})
Bovino	6.57	8.65 ± 0.53
Caprino	6.67	9.18 ± 0.44
Ovino	6.80	9.42 ± 0.71

Nota: Datos obtenidos de la orina fresca.

Para las variables químicas del sustrato, los resultados de la etapa inicial indicaron una CE de 1.42 mS cm^{-1} , un pH de 7.56, MO de 5.6% y un CIC de 14.76 meq /100 g de suelo. Después de la inoculación de reactores, se observó un incremento tanto de la CE como la CIC en el sustrato (etapa final); sin embargo, se notó que el pH del sustrato no cambió en ninguno de los reactores. La P-MFC-4 indicó CE y CIC más altas de 18.10 mS cm^{-1} (92.15%) y $181.60 \text{ meq /100 g}$ de suelo (91.87%), respectivamente. Seguida por la P-MFC-3, que alcanzó una CE de 8.95 mS cm^{-1} (84.13%) y CIC de 90.56 meq/100 g de suelo (83.37%); P-MFC-2, con CE de 6.12 mS cm^{-1} (76.79%) y CIC de 62.84 meq/100 g de suelo (76.51%), y por P-MFC-1* con CE de 5.18 mS cm^{-1} (72.58%) y CIC de 52.75 meq/100 g de suelo (72.01%), respectivamente.

CONCLUSIONES

La producción de bioelectricidad se incrementó significativamente ($p < 0.05$) por los diferentes tipos de orina aplicados en este estudio. La mayor generación de bioelectricidad se alcanzó en la P-MFC-3 (inoculada con orina de caprino), ya que indicó una densidad de potencia promedio de $46.97 \pm 0.67 \text{ mW m}^{-2}$ ($3.70 \pm 0.00 \text{ mW}$) y una densidad de corriente promedio de $77.45 \pm 0.24 \text{ mA m}^{-2}$.

La producción más baja la presentó la P-MFC-4, inoculada con orina de ovino al lograr una densidad de potencia promedio de $19.28 \pm 1.97 \text{ mW m}^{-2}$. Para las variables morfológicas, la planta testigo presentó mayor altura (54.10 cm) en comparación con las P-MFC inoculadas; sin embargo, para el diámetro de tallo la P-MFC-3 (con orina de caprino), obtuvo el mayor diámetro (0.52 cm). P-MFC-2 (con orina de bovino) alcanzó mayor número de raíces (86 ± 39.50). El uso de la orina del ganado incrementó significativamente la produc-

ción de bioelectricidad (circuito cerrado). El sistema bioelectroquímico influyó tanto en el número de brotes como en la longitud de raíces de la planta que se utilizó en este experimento.

LITERATURA CITADA

- APOLLON, W., A.I. Luna-Maldonado, S.-K. Kamaraj, J.A. Vidales-Contreras, H. Rodríguez-Fuentes, J.F. Gómez-Leyva, J. Aranda-Ruíz. 2021. Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review. *Biomass Bioenergy* 148(5):106028.
- APOLLON, W., S.-K. Kamaraj, H. Silos-Espino, C. Perales-Segovia, L.L. Valera-Montero, V.A. Maldonado-Ruelas, M.A. Vázquez-Gutiérrez, R.A. Ortiz-Medina, S. Flores-Benítez, J.F. Gómez-Leyva. 2020. Impact of *Opuntia* species plant bio-battery in a semi-arid environment: demonstration of their applications. *Appl. Energy* 279(23):115788.
- DAI, J., W. Tang, Y. Zheng, H.R. Mackey, H. Kwong. 2014. An exploratory study on Seawater-Catalysed Urine Phosphorus Recovery (SUPR). *Water Res* 66(19):75-84.
- DEWIS J. and F. Freitas. 1970. Physical and chemical methods of soil and water analysis. FAO, Soils Bulletin N° 10, Rome, Italy, 275 p.
- HELDER, M., D. P. B. T. B. Strik, H.V.M. Hamelers, R.C.P. Kuijken, C.N.J. Buisman, 2012. New plantgrowth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresour. Technol.* 104(2):417-423.
- HELDER, M., D. P. B. T. B. Strik, R.A. Timmers, S.M. Raes, H.V.M. Hamelers, C.N.J. Buisman, 2013. Resilience of roof-top plant-microbial fuel cells during dutch winter. *Biomass Bioenergy* 51(4):1-7.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Gobierno del Estado de Nuevo León, 614 pp.
- KABUTEY, F. T., Q. Zhao, L. Wei, J. Ding, P. Antwi, F.K. Quashie, W. Wang. 2019. An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable Sustainable Energy Rev* 110(12):402-414.
- LOGAN B. E. and J.M. Regan. 2006. Electricity producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends Microbiol* 14(12):512-518.
- NITISORAVUT R. and R. Regmi. 2017. Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering, *Renewable Sustainable Energy Rev* 76(10):81-89.
- OBATA, O., M.J. Salar-Garcia, J. Greenman, H. Kurt, K. Chandran, I. Ieropoulos, 2020. Development of efficient electroactive biofilm in urine-fed microbial fuel cell cascades for bioelectricity generation. *J. Environ. Manage* 258(6):109992.
- REGMI, R., R. Nitorisravut, J. Ketchaimongkol, 2018. A decade of plant-assisted microbial fuel cells: looking back and moving forward. *Biofuel Bioprod Bior* 9(5):605-612.
- SALAR-GARCÍA, M. J., O. Obata, H. Kurt, K. Chandran, J. Greenman, I.A. Ieropoulos, 2020. Impact of Inoculum Type on the Microbial Community and Power Performance of Urine-Fed Microbial Fuel Cells. *Microorganisms* 8(12):1921.
- SLAVIN, M. 1978. Atomic Absorption Spectroscopy. John Wiley & Sons, New York.
- SOPHIA C. and S. Sreeja. 2017. Green energy generation from Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustain. Energy Technol. Assess* 21(3):59-66.
- SPENCER, D.F., P.S. Liow, W.K. Chan, G.G. Ksander, K.D. Getsinger. 2006. Estimating *Arundo donax* shoot biomass. *Aquat. Bot*, 84(3), 272-276.
- STRIK, D. P. B. T. B., H.V.M. Hamelers, F.H. Jan Snel, C.J.N. Buisman. 2008. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *Int. J. Energy Res* 32(9):870-876.
- STRIK, D. P. B. T. B., R.A. Timmers, M. Helder, K.J. Steinbusch, H.V. Hamelers, C.J.N. Buisman. 2011. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends Biotechnol* 29(1):41-49.
- SUDIRJO, E., P. de Jager, C.J.N. Buisman, D. P. B. T. B. Strik. 2019. Performance and Long-Distance Data Acquisition via LoRa Technology of a Tubular Plant Microbial Fuel Cell Located in a Paddy Field in West Kalimantan, Indonesia. *Sensor* 19(21):46-47.
- TAPIA, N. F., R. Claudia, A.B. Carlos, T.V. Ignacio. 2017. Evaluation of *Sedum* as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecol. Eng* 108(11):203-210.
- WETSER, K., D. Kim, C.J.N. Buisman, D.P.B.T.B. Strik. 2017. Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Appl. Energy* 185(1):642-649.
- You, J., J. Greenman, C. Melhuish, I. Ieropoulos. 2015. Electricity generation and struvite recovery from human urine using microbial fuel cells. *J. Chem. Technol. Biotechnol* 91(3):647-654.