

GENERACIÓN BIOELECTROQUÍMICA DE ELECTRICIDAD CON *Sagittaria latifolia* EN PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS: COMPARACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS

GENERATION OF BIOELECTROCHEMICAL ELECTRICITY FROM *Sagittaria latifolia* USING MICROBIAL FUEL CELLS: A COMPARATIVE SUBSTRATE STUDY

✉ **Sugey López Martínez, Ph.D.**

Instituto Tecnológico de Mérida

sugeylo@hotmail.com

Tabasco, México

✉ **Yahayra Frías Padilla, Sra.**

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

yahayra_padilla@outlook.com

Tabasco, México

✉ **Mónica Ilsy Jiménez Rojas, Ph.D.**

Instituto Tecnológico de Mérida

monica.ir@merida.tecnm.mx

Yucatán, México

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Recibido: 05/11/2025

Aceptado: 24/03/2026

Publicado: 30/03/2026

RESUMEN

La crisis energética mundial impulsa el desarrollo de tecnologías sostenibles para la generación de energía renovable. Este estudio evaluó el desempeño bioelectroquímico de *Sagittaria latifolia* cultivada en diferentes sustratos (suelo de Macuspana, compost de fruta y vermicomposta) en pilas de combustible microbianas (CCM). Se analizaron parámetros fisicoquímicos del suelo (pH, conductividad eléctrica, densidades, textura y materia orgánica), crecimiento vegetal (29 semanas) y producción eléctrica durante 60 días. Las mediciones incluyeron voltaje, corriente, resistencia, potencia y densidad de potencia normalizada por el área efectiva del ánodo (56.1 cm²). El diseño incluyó controles complementarios: sistemas sin planta (control biótico) y sistemas sin sustrato orgánico (control abiótico) para distinguir la contribución directa de los exudados radicales en la generación eléctrica. La vermicomposta mostró el mayor desempeño: voltaje máximo de 0.75 V y densidad de potencia promedio de 0.81 W/m², significativamente superior ($p < 0.05$) a los otros sustratos. Asimismo, se promovió mayor crecimiento vegetal (26.4 ± 1.3 cm). Estos resultados confirman el potencial de la interacción rizosférica–microbiana como sistema bioelectroquímico viable para producción energética descentralizada.

Palabras Clave: composta, energía renovable, tecnología emergente, vermicomposta

ABSTRACT

The global energy crisis is driving the development of sustainable technologies for renewable energy generation. This study evaluated the bioelectrochemical performance of *Sagittaria latifolia* grown on different substrates (Macuspana soil, fruit compost and vermicompost) in microbial fuel cells (MCCs). Physicochemical parameters of the soil (pH, electrical conductivity, densities, texture and organic matter), plant growth (29 weeks) and electrical production for 60 days were analyzed. Measurements included voltage, current, resistance, power, and power density normalized by the effective anode area (56.1 cm²). The design included complementary controls: plantless systems (biotic control) and systems without organic substrate (abiotic control) to distinguish the direct contribution of radical exudates in electricity generation. Vermicompost showed the highest performance: maximum voltage of 0.75 V and average power density of 0.81 W/m², significantly higher ($p < 0.05$) than the other substrates. Likewise, greater plant growth was promoted (26.4 ± 1.3 cm). These results confirm the potential of rhizospheric-microbial interaction as a viable bioelectrochemical system for decentralized energy production.

Keywords: compost, renewable energy, emerging technology, vermicompost

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de energía, asociada al incremento poblacional y al desarrollo industrial, ha intensificado la explotación de combustibles fósiles, generando importantes impactos ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero, el cambio climático y la degradación de los ecosistemas (IPCC, 2021; Aelterman et al., 2019). Estas problemáticas han impulsado la búsqueda de fuentes energéticas sostenibles capaces de reducir la dependencia de recursos no renovables y de minimizar el impacto ambiental asociado a la generación de electricidad convencional (AIE, 2022).

Dentro de este contexto, las energías renovables constituyen un pilar fundamental de la transición energética global, al aprovechar recursos naturales de regeneración continua como el sol, el viento, el agua y la biomasa (REN21, 2022; Peña, 2018). De manera particular, la biomasa se ha posicionado como una alternativa estratégica debido a su capacidad de transformar la energía química almacenada en la materia orgánica en energía térmica o eléctrica mediante procesos termoquímicos, bioquímicos y bioelectroquímicos (FAO, 2020; Vera-Romero et al., 2017). Investigaciones recientes han evidenciado que el aprovechamiento eficiente de la biomasa contribuye tanto a la diversificación de la matriz energética como a la mitigación de emisiones de carbono (IEA Bioenergy, 2022).

En el ámbito nacional, México presenta una matriz energética caracterizada por una elevada dependencia de combustibles fósiles, de los cuales proviene más del 90 % de la producción primaria, mientras que las energías renovables apenas representan alrededor del 7.56 % del total (SENER, 2021; IRENA, 2023). Aunque el país cuenta con un alto potencial para el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles, factores como la limitada infraestructura tecnológica, la escasa inversión en innovación y la concentración de la generación eléctrica en grandes centros urbanos han restringido la implementación de alternativas descentralizadas, especialmente en comunidades rurales o aisladas (Ranzi & Andrade, 2004; DOF, 2022). Por lo anterior, resulta prioritario evaluar tecnologías energéticas de bajo costo, fácil implementación y mínima huella ambiental que puedan contribuir al acceso equitativo a la energía limpia.

Una tecnología emergente que responde a estos criterios es la utilización de pilas de combustible microbianas (CCM), dispositivos bioelectroquímicos capaces de generar electricidad a partir de la oxidación de materia orgánica mediada por microorganismos electroactivos (Logan et al., 2006; Rabaey & Verstraete, 2005; Logan et al., 2021). En estos sistemas, las bacterias transfieren electrones al ánodo durante su metabolismo, generando una corriente eléctrica aprovechable. Una variante de esta tecnología son las CCM vegetales, donde los exudados radicales liberados por plantas vivas sirven como sustrato para la actividad bacteriana, permitiendo la producción continua de electricidad sin necesidad de cosechar biomasa (Aelterman et al., 2006; Góngora et al., 2017; Lovley, 2008).

Diversos estudios han explorado especies vegetales como generadores bioelectroquímicos, entre ellas *Portulacaria afra*, *Catharanthus roseus*, *Bougainvillea* y plantas aromáticas como *Mentha spicata*, reportando producciones eléctricas variables dependiendo de las características del sustrato, la conductividad del medio, el pH, la composición microbiana y el material del electrodo (Góngora Molina et al., 2017; Ieropoulos et al., 2010; Santoro et al., 2017). Sin embargo, aún son limitados los estudios que evalúan el potencial de macrófitas nativas de ambientes húmedos tropicales, especialmente aquellas abundantes en el sureste mexicano, región caracterizada por ecosistemas acuáticos extensos que podrían facilitar la implementación de sistemas bioelectroquímicos de tipo vegetal.

En este sentido, *Sagittaria latifolia*, planta acuática ampliamente distribuida en el estado de Tabasco, destaca por su elevada tolerancia a ambientes saturados de agua, rápido crecimiento y producción constante de exudados rizosféricos (Zepeda & Lot, 2005). Además, posee valor ecológico, social y alimenticio en comunidades locales, lo que la convierte en una especie estratégica para evaluar aplicaciones energéticas sostenibles de bajo impacto. No obstante,

existe un vacío de información respecto a su desempeño específico como generador bioelectroquímico dentro de CCM vegetales y sobre la influencia que distintos sustratos orgánicos pueden ejercer sobre la eficiencia de producción eléctrica. Por lo cual, se planteó la siguiente hipótesis los sustratos con mayor contenido de materia orgánica favorecen una mayor actividad metabólica microbiana en la rizósfera, incrementando la transferencia de electrones hacia el ánodo y, por ende, la producción de electricidad en CCM vegetales.

Bajo este escenario, el presente estudio se planteó evaluar la generación bioelectroquímica de electricidad mediante pilas de combustible microbianas vegetales utilizando *Sagittaria latifolia* cultivada en tres tipos de sustratos: suelo agrícola de Macuspana, compost de residuos frutales y vermicomposta, con la finalidad de establecer relaciones entre las propiedades fisicoquímicas del medio, el crecimiento vegetal y el desempeño eléctrico del sistema.

METODOLOGÍA

Área de estudio

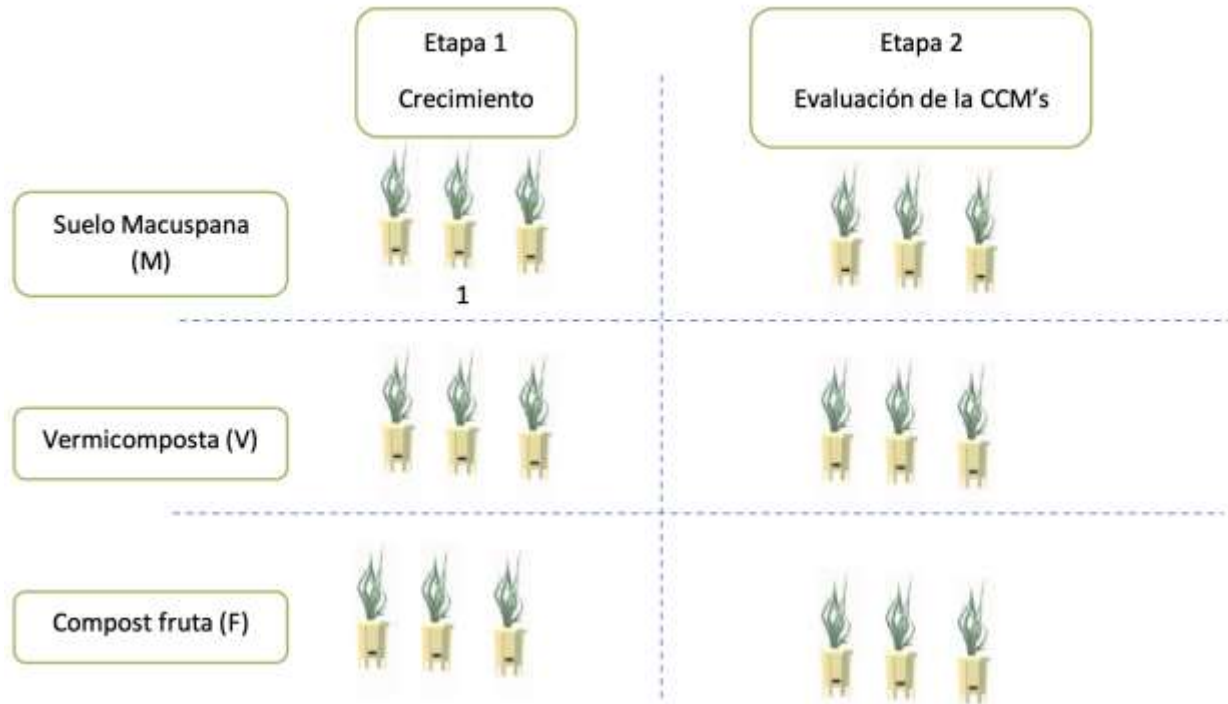
El área de estudio se delimitó de acuerdo con los sitios de procedencia de los sustratos y del material vegetal empleado. El suelo agrícola fue recolectado en la Escuela Primaria "Josefa Ortiz de Domínguez", ubicada en la Estancia Belén, municipio de Macuspana, Tabasco, México (17°46'55.89" N; 92°36'42.46" W). Los ejemplares de *Sagittaria latifolia* fueron colectados en el río Zapote, localizado en la calle El Manguito de la comunidad Lomitas, municipio de Nacajuca, Tabasco (18°02'34.3" N; 92°56'24.6" W), cuerpo de agua receptor de descargas domésticas, lo que garantiza una comunidad microbiana establecida asociada a la rizósfera vegetal.

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar con tres tratamientos, correspondientes a los tres tipos de sustrato evaluados: 1) Suelo agrícola de Macuspana, 2) Compost de residuos frutales y 3) Vermicomposta (Figura 1).

Figura 1

Unidad experimental por triplicado. *Sagittaria latifolia* (1).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para cada tratamiento se establecieron tres repeticiones experimentales independientes ($n = 3$), totalizando nueve unidades experimentales con plantas. Adicionalmente, se incluyeron dos sistemas de control complementarios: a) *Control biótico*: CCM con sustrato, pero sin planta, para evaluar la generación eléctrica atribuida únicamente a la actividad microbiana, y b) *Control abiótico*: CCM sin sustrato orgánico activo ni planta, para descartar generación eléctrica por procesos fisicoquímicos no biológicos.

Variables del estudio

Las variables de estudio fueron las siguientes: 1) *Variable independiente*: Tipo de sustrato empleado como medio de crecimiento vegetal y fuente de carbono microbiano.

2) *Variables dependientes*: a) Voltaje (V), b) Intensidad de corriente (A), c) Potencia eléctrica (W), d) Densidad de potencia normalizada (W/m^2) y d) Altura de crecimiento de *Sagittaria latifolia* (cm). 3) *Variables controladas*: a) Temperatura ambiental: 26 ± 2 °C, b) Humedad relativa promedio: 70–80 %, c) Fotoperiodo: iluminación natural (~12 h luz / 12 h oscuridad), d) Volumen

de solución salina: 400 mL por unidad, e) Aporte diario de agua destilada: 20 mL, f) Volumen de sustrato: 500 g por unidad experimental, g) Distancia ánodo–cátodo: 7 cm, h) Espesor de membrana polimérica (agar): 3 mm y i) Área efectiva del ánodo: 56.1 cm² por unidad.

Muestreo vegetal y acondicionamiento

Los tubérculos de *Sagittaria latifolia* (4–6 cm) se lavaron con agua destilada para retirar impurezas y se aclimataron durante siete meses en recipientes oscuros con agua destilada, cambiada tres veces por semana hasta la emisión de raíces viables. Posteriormente se trasplantaron directamente a las unidades experimentales preparadas con los distintos sustratos. El periodo de crecimiento vegetal se desarrolló durante 29 semanas (septiembre 2020 – marzo 2021), tiempo en el cual se registró semanalmente la altura de las plantas, hasta superar los 20 cm mínimos requeridos para iniciar las mediciones eléctricas.

Preparación y caracterización de los sustratos

El suelo agrícola se secó al sol durante cinco días, se homogenizó mecánicamente, se pulverizó en mortero de porcelana y se tamizó en malla de 1 mm. La vermicomposta se obtuvo a partir del procesamiento de residuos vegetales mediante lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) durante un periodo de 15 días, permitiendo estabilizar la fracción orgánica. El compost de fruta se elaboró por el método acelerado de Berkeley, combinando residuos frescos con material vegetal seco hasta alcanzar temperaturas de 70 °C. Los sustratos fueron caracterizados conforme a la NOM-021-RECNAT-2000 en pH, conductividad eléctrica (C.E.), densidad aparente y real, porcentaje de materia orgánica y textura por el método de Bouyoucos.

Construcción de pilas de combustible microbianas (CCM)

Cada CCM fue elaborada utilizando botellas plásticas recicladas de 3 L (cámara anódica) y 600 mL (cámara catódica). Los electrodos se fabricaron con tiras de aluminio reciclado de 3.30 cm × 17 cm, proporcionando un área efectiva individual de 56.1 cm². Las superficies se lijaron para eliminar pintura y recubrimientos. Los electrodos fueron conectados mediante cable conductor de cobre trenzado. La membrana selectora de protones se elaboró con agar-agar (15 g/L), vertido en tubos de PVC con un espesor promedio de 3 mm. Se mantuvo una distancia estándar ánodo–cátodo de 7 cm para todas las unidades. El uso de aluminio como electrodo se reconoce como una limitante potencial debido a posibles reacciones abióticas; sin embargo, se mantuvo por su bajo costo y disponibilidad, siguiendo metodologías previamente reportadas (González, 2009; Góngora et al., 2017).

Establecimiento de unidades experimentales

Cada unidad consistió en: 1) 500 g del sustrato asignado, 2) una planta de *Sagittaria latifolia*, 3) Un electrodo ubicado próximo a la rizósfera y 4) 400 mL de solución salina. Todas las unidades se mantuvieron bajo las mismas condiciones ambientales y recibieron un aporte diario de 20 mL de agua destilada para compensar la evaporación y mantener humedad constante.

Medición de parámetros eléctricos

Las mediciones de voltaje (V), intensidad de corriente (A) y resistencia (Ω) se realizaron mediante un multímetro digital calibrado. Se efectuaron registros tres veces al día: a) Mañana: 9:00, b) Tarde: 15:00 y c) Noche: 20:00. Durante un periodo total de 60 días consecutivos.

- 1) La potencia eléctrica (P) se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Potencia eléctrica (P)} = \text{Voltaje (v)} * \text{Intensidad de corriente (i)}$$

- 2) La densidad de potencia (PD) se normalizó considerando el área efectiva del ánodo:

$$\text{Densidad de la potencia} = \frac{\text{voltaje}^2 (v)}{\text{Área del cátodo (m}^2\text{)} * \text{resistencia eléctrica (\Omega)}}$$

Barrido resistivo y estimación de Pmax

Para identificar la potencia máxima (Pmax) del sistema, se aplicó un barrido logarítmico de resistencias externas (10–1000 Ω) al final del periodo experimental. Se midió el voltaje en estado estacionario para cada resistencia, y se calculó la corriente mediante $I = V/R$ y la potencia como $P = V \times I$. La densidad de potencia (PD) se normalizó respecto al área efectiva del ánodo (56.1 $\text{cm}^2 = 0.00561 \text{ m}^2$). Los datos se utilizaron para construir curvas de polarización (V vs. densidad de corriente) y curvas de potencia (PD vs. R).

Protocolo luz/oscuridad (ensayo piloto)

Con el fin de explorar la influencia de la radiación solar en la bioelectrogénesis, se implementó un ensayo piloto en una unidad adicional con vermicomposta. Durante 24 h, se registró el voltaje cada hora bajo dos condiciones: 1) Fase luz: 12 h bajo iluminación natural (~200–800 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, estimado por fotoperiodo local). 2) Fase oscuridad: 12 h en caja oscura total. La temperatura y humedad se mantuvieron constantes. Este subconjunto permitió evaluar la variación diurna de la producción eléctrica en ausencia de medición directa de irradiancia.

Caracterización técnica del diseño experimental

La Figura 1b presenta un esquema técnico de la CCM, incluyendo: ánodo y cátodo de aluminio (3.30×17 cm; área efectiva = 56.1 cm^2), distancia ánodo-cátodo (7 cm), membrana de agar-PVC (espesor = 3 mm), volumen de sustrato (500 g) y ubicación de la planta. Este diseño estandarizado permitió controlar la resistencia interna del sistema.

Análisis estadístico

Todos los resultados se expresaron como promedio \pm desviación estándar ($n = 3$). Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante análisis de varianza de una vía (ANOVA, $\alpha = 0.05$). Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicaron comparaciones múltiples post-hoc para identificar contrastes específicos entre sustratos.

RESULTADOS

Análisis de parámetros del suelo

Respecto al pH de acuerdo a la interpretación de resultados nuestros suelos tienen características similares en las actividades del ion H (Tabla 1). Los suelos de Macuspana y Vermicomposta tienen pH neutro es decir tienen una condición adecuada para la asimilación de los nutrientes y para el desarrollo de las plantas. Ahora bien, algunas como la papa, las pratenses y el centeno prefieren una ligera acidez. Mientras que el suelo de compost fruta es moderadamente ácido pero que oscila entre el pH 6.0 se puede considerar que se encuentra en un rango óptimo sobre el cual crecen vigorosamente la mayor parte de las plantas debido que la mayor parte de las sustancias nutritivas son fácilmente asimilables.

Mientras tanto, la conductividad eléctrica (C.E) de los tres tipos de suelo tienen efectos despreciables respecto a la salinidad de acuerdo a la Tabla 5. Esto indica que los suelos seleccionados no logran aprovechar la conducción de corriente eléctrica por no tener suficientes sales solubles.

Tabla 1

Parámetros de pH y C. E

Suelo	Muestra	pH	PROMEDIO	C.E (dS/m)	PROMEDIO
Macuspana	T1	6.6		0.09463	
	T2	6.8	6.77	0.08929	0.10
	T3	6.9		0.10296	
Vermicomposta	T1	7.2	6.97	0.934	0.95

	T2	6.9		0.9726	
	T3	6.8		0.9531	
	T1	6.4		0.9183	
Compost fruta	T2	6.4	6.4	0.9766	0.95
	T3	6.4		0.9525	

Densidad aparente

La densidad aparente sirve para calcular el peso seco del suelo por unidad de volumen, tal cual se encuentra en su entorno natural, incluyendo el espacio poroso. Con ella se puede interpretar a qué tipo de suelo pertenece. Utilizando la tabla 6, se realizará la interpretación de los datos obtenidos en la Tabla 2.

El suelo de Macuspana tiene un promedio 1.03 g/cm³ esto quiere decir que es un tipo de suelo arcilloso, ya que contiene una gran cantidad partículas minerales muy pequeñas, ocupa un espacio relativamente pequeño por su peso en el volumen establecido. Este tipo de suelos suelen ser muy pesados no absorben fácilmente agua ni la drenan rápidamente, suelen contener buenas reservas de nutrientes. Son fértiles pero difíciles de trabajar cuando están secas. Es el único de los suelos seleccionados que posee esta característica. Mientras la vermicomposta y compost fruta, en uno de los triplicados salió mayor a 1. Pero en el promedio salieron por debajo de esta. El tipo de estos dos suelos por promedio, da un tipo de orgánicos y volcánicos. Este tipo de suelos es muy rico en nutrientes, suelen ser ricos en materia orgánica a lo que ayuda a ser apropiados para distintos tipos de cultivos, en el caso de la *Sagittaria latifolia* se desconoce las alteraciones que estas puedan provocar.

Tabla 2

Parámetros de densidad aparente (D.A)

Suelo	Muestra	Densidad Aparente (g/cm ³)	Promedio
Macuspana	T1	1.1	
	T2	1	1.03
	T3	1	
Vermicomposta	T1	1	
	T2	0.7	0.83
	T3	0.8	
Compost fruta	T1	1.1	
	T2	0.8	0.9
	T3	0.8	

Densidad real

Este tipo de densidad considera solo la fracción de sólidos en el suelo (mineral y orgánica), no considera la fase líquida gaseosa de ella. Es decir, corresponde al peso de la unidad de volumen de los sólidos del suelo. La densidad de los suelos seleccionados es menor a 2.5 g/cm^3 que es la media de los suelos generalmente. Esto quiere decir, que sus componentes son mayormente a base de humus y yeso (Tabla 3). El suelo de Macuspana se relaciona a un tipo de suelo húmico, mientras que la vermicomposta y compost fruta a suelos orgánicos.

Tabla 3

Parámetros de densidad real (D.R)

Suelo	Muestra	Densidad real (g/cm^3)	Promedio
Macuspana	T1	2.00	2.12
	T2	2.06	
	T3	2.30	
Vermicomposta	T1	1.16	1.36
	T2	1.43	
	T3	1.48	
Compost fruta	T1	1.53	1.49
	T2	1.52	
	T3	1.43	

Materia orgánica

La materia orgánica contribuye a la estructura, fertilidad y capacidad de retención de agua en el suelo. Los resultados de la materia orgánica (Tabla 4) indican presencia de materia orgánica (MO). El suelo de Macuspana tiene por promedio 12.62% de MO, lo cual indica que su contenido es alto. Los suelos de vermicomposta y compost fruta indican presencias muy altas de materia orgánica. Esto favorece que la materia orgánica nutre de nitrógeno, fósforo y azufre al cultivo o plantas.

Tabla 4

Parámetros de Materia orgánica (%)

Suelo	Muestra	M.O (%)	Promedio
Macuspana	T1	10.99	12.62
	T2	16.08	
	T3	10.80	

Compost fruta	T1	89.57	85.63
	T2	82.82	
	T3	84.50	
Vermicomposta	T1	82.48	68.53
	T2	61.81	
	T3	61.29	

Textura

Se obtuvieron los resultados mediante el procedimiento de Bouyoucos. Se utilizó el triángulo de texturas del suelo, en el cual con los datos obtenidos mostrados en la Tabla 5, se observó que los tres sustratos se encontraban en texturas franco arenosas. Este tipo de textura es coherente con los resultados, ya que ambas se observa una gran cantidad de arena presente, pero con arcilla y limo en menor cantidad.

Tabla 5

Parámetro de textura

Suelo	Muestra	% arena	% arcilla	% limo	Promedios			Clase de textura
					% arena	% arcilla	% limo	
Macuspana	T1	76.52	20.24	3.24	76.29	18.64	5.06	Franco arenoso
	T2	75.12	18.04	6.84				
	T3	77.24	17.64	5.12				
Compost fruta	T1	75.12	20.24	4.64	75.58	19.61	4.8	Franco arenoso
	T2	75.52	19.16	5.32				
	T3	76.12	19.44	4.44				
Vermicomposta	T1	77.92	17.84	4.24	76.13	17.64	6.22	Franco arenoso
	T2	75.04	17.64	7.32				
	T3	75.44	17.44	7.12				

Capacidad de campo

Es el contenido de humedad del suelo, después que el exceso de agua ha sido drenado, esto depende de la textura. La textura de los sustratos es franco arenoso, en el cual su capacidad de campo es relativamente baja. Ya el promedio de los suelos arenosos oscila entre 5 y 16%. Por su parte, los suelos francos entre 15 y 30% de C.C. Por lo tanto, se observa que el promedio de los sustratos se encuentra por debajo de los niveles óptimos para el aprovechamiento de los suelos (Tabla 6). Es decir, los suelos necesitaran de un riego constante para evitar un punto de

marchitamiento de la planta. Además, de evitar un estrés hídrico con un exceso de agua. Ayudando a que el suelo se encuentre en capacidad de campo optima, la planta no tendrá que ejercer fuerza para extraer agua del suelo.

Tabla 6

Parámetros de capacidad de campo (C.C)

Suelo	Muestra	Capacidad de Campo (%)	Promedio
Macuspana	T1	2.183	2.191
	T2	2.261	
	T3	2.130	
Vermicomposta	T1	3.484	3.510
	T2	3.657	
	T3	3.389	
Compost fruta	T1	3.658	3.722
	T2	3.447	
	T3	4.061	

Parámetros estadísticos

Se determino la variabilidad de las propiedades físicas del suelo y a través de procedimientos estadísticos considerando parámetros como: Limite de variación, rango de variación, media de varianza, varianza, desviación estándar y coeficiente de desviación. Los parámetros de variables de los suelos de Macuspana se representaron en la Tabla 7. Las propiedades físicas y químicas que tienen valores mayores de coeficiente de desviación, se encuentran en la textura, específicamente en su porcentaje de limo, con coeficiente de desviación de 35.538%, límite de variación de 3.24 a 6.84%, rango de variación de 3.6 %, varianza de 3.24% y desviación estándar de 1.8 %. Mientras los valores más bajos del coeficiente de desviación se encuentran en textura, en la parte del porcentaje de arena.

Tabla 7

Parámetros estadísticos del suelo de Macuspana

Parámetros estadísticos	pH	C.E (dS/m)	D.A (g/cm ³)	D.R (g/cm ³)	C.C	M.O (%)	% arena	% arcilla	% limo
Límite mínimo	6.6	0.934	1	2	2.129	10.80	75.12	17.64	3.24
Límite máximo	6.9	0.9726	1.1	2.298	2.260	16.07	77.24	20.24	6.84
Rango	0.3	0.0386	0.1	0.298	0.131	5.273	2.12	2.6	3.6
Media	6.76	0.953	1.03	2.120	2.191	12.622	76.293	18.64	5.066
Varianza	0.023	0.0003	0.0033	0.0248	0.004	8.956	1.1621	1.96	3.242

Desviación estándar	0.152	0.0193	0.0577	0.157	0.066	2.992	1.078	1.4	1.800
Coef. desviación (%)	2.25	2.0247	5.587	7.440	3.012	23.70	1.412	7.510	35.538

Los parámetros de variables de la vermicomposta se representaron en la Tabla 8. Las propiedades físicas y químicas que tienen valores mayores de coeficiente de desviación, se encuentran en la densidad aparente (DA), con coeficiente de desviación de 18.33 g/cm³, límite de variación de 0.7 a 1 g/cm³, rango de variación de 0.3 g/cm³, varianza de 0.023 y desviación estándar de 0.152 g/cm³. Mientras los valores más bajos del coeficiente de desviación se encuentran en textura, en la parte del porcentaje de arena.

Tabla 8

Parámetros estadísticos de Vermicomposta

Parámetros estadísticos	pH	C.E (dS/m)	D.A (g/cm ³)	D.R (g/cm ³)	C.C	M.O (%)	% arena	% arcilla	% limo
Límite mínimo	6.8	0.089	0.7	1.156	3.388	82.815	75.12	19.16	4.44
Límite máximo	7.2	0.102	1	1.481	3.656	89.573	76.12	20.24	5.32
Rango	0.4	0.0136	0.3	0.325	0.268	6.758	1	1.08	0.88
Media	6.96	0.0956	0.83	1.355	3.509	85.630	75.58	19.61	4.8
Varianza	0.043	4.7462E-05	0.023	0.030	0.018	12.372	0.25	0.31	0.21
Desv. estándar	0.208	0.0068	0.152	0.174	0.136	3.517	0.50	0.56	0.46
Coef. desviación (%)	2.988	7.204	18.330	12.883	3.875	4.107	0.66	2.85	9.61

Las propiedades físicas y químicas que tienen valores mayores de coeficiente de desviación, se encuentran en la textura, específicamente en su porcentaje de limo, con coeficiente de desviación de 27.68%, límite de variación de 4.24 a 7.32%, rango de variación de 3.08 %, varianza de 2.97% y desviación estándar de 1.72 %. Mientras los valores más bajos del coeficiente de desviación se encuentran en textura, en la parte del porcentaje de arena. Los parámetros de variables del compost fruta se representaron en la Tabla 9.

Crecimiento de *Sagittaria latifolia*

Se registró el crecimiento de las plantas por un periodo de 29 semanas, del 1 de septiembre del 2020 al 20 de marzo del 2021. Eso se hizo para conseguir la maduración total de la papa, durante este proceso, la planta adquirió una altura promedio de 23.96 cm. No se hicieron mediciones de generación durante el periodo de crecimiento, ya que dependiendo el sustrato su

crecimiento fue muy variado su desarrollo e incluso fue muy lento. Esta lentitud de crecimiento podría arrojar datos despreciables para la investigación. En la Tabla 10 se muestra el crecimiento de la *Sagittaria latifolia* promedio por semana respecto a los diferentes sustratos y se añadieron las condiciones climáticas (Temperatura y humedad), estos datos fueron obtenidos por el Sistema Meteorológico Nacional.

Tabla 9

Parámetros estadísticos de Compost fruta

Parámetros estadísticos	pH	C.E (dS/m)	D.A (g/cm ³)	D.R (g/cm ³)	C.C	M.O (%)	% arena	% arcilla	% limo
Límite mínimo	6.4	0.92	0.80	1.43	3.45	61.29	75.04	17.44	4.24
Límite máximo	6.4	0.98	1.10	1.53	4.06	82.48	77.92	17.84	7.32
Rango	0	0.06	0.30	0.10	0.61	21.19	2.88	0.40	3.08
Media	6.4	0.95	0.90	1.49	3.72	68.53	76.13	17.64	6.23
Varianza	1.18329E-30	0.001	0.03	0.003	0.10	146.10	2.43	0.04	2.97
Desv.estándar	1.08779E-15	0.03	0.17	0.05	0.31	12.09	1.56	0.20	1.72
Coef desviación (%)	1.69967E-14	3.09	19.25	3.60	8.38	17.64	2.05	1.13	27.68

Tabla 10

Crecimiento semanal de Sagittaria latifolia (cm)

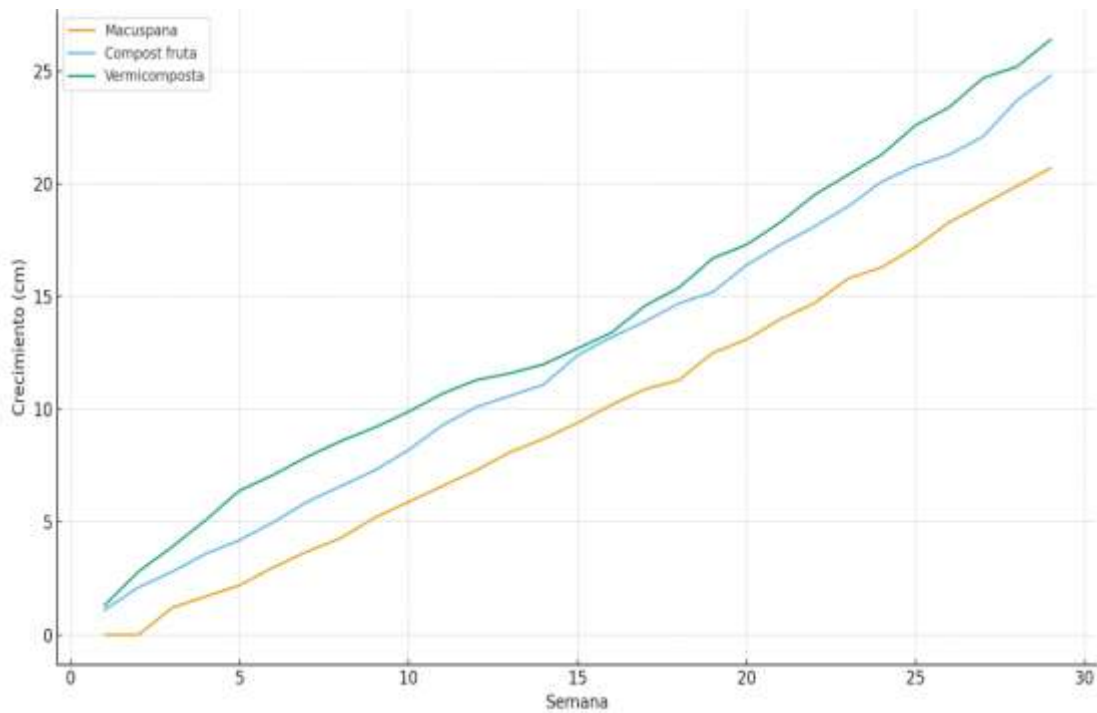
Semana	Suelo/Sustrato			Condiciones climáticas (promedio)	
	Macuspana	Compost fruta	Vermicomposta	Temperatura (° C)	Humedad (%)
1	0	1.1	1.3	27.45	85
2	0	2.1	2.8	27.19	85
3	1.2	2.8	3.9	27.09	85
4	1.7	3.6	5.1	26.85	85
5	2.2	4.2	6.4	26.09	82.42
6	3.0	5.0	7.1	26.47	82
7	3.7	5.9	7.9	26.00	82
8	4.3	6.6	8.6	25.71	82
9	5.2	7.3	9.2	25.00	82.42
10	5.9	8.2	9.9	24.85	83
11	6.6	9.3	10.7	24.28	83
12	7.3	10.1	11.3	23.85	83
13	8.1	10.6	11.6	24.00	83
14	8.7	11.1	12.0	23.71	83

15	9.4	12.4	12.7	23.52	83
16	10.2	13.2	13.4	23.09	83
17	10.9	13.9	14.6	22.85	83
18	11.3	14.7	15.4	22.95	80.14
19	12.5	15.2	16.7	22.52	79
20	13.1	16.4	17.3	22.42	79
21	14.0	17.3	18.3	22.57	79
22	14.7	18.1	19.5	23.28	78.14
23	15.8	19.0	20.4	23.23	76
24	16.3	20.1	21.3	23.28	76
25	17.2	20.8	22.6	24.52	76
26	18.3	21.3	23.4	24.85	74
27	19.1	22.1	24.7	25.04	69
28	19.9	23.7	25.2	25.33	69
29	20.7	24.8	26.4	26.23	69

La temperatura y humedad no tuvieron una relación directa al crecimiento de las plantas, por lo que no afectó en el estudio. En la figura 2, se observa los datos graficados de la Tabla 10, se muestra que la vermicomposta obtuvo el mayor crecimiento respecto al tiempo, mientras que el suelo de Macuspana tardó en germinar y obtuvo un menor crecimiento.

Figura 2

Crecimiento de la *Sagittaria latifolia* en diferentes sustratos



Nota. Fuente: Elaboración propia.

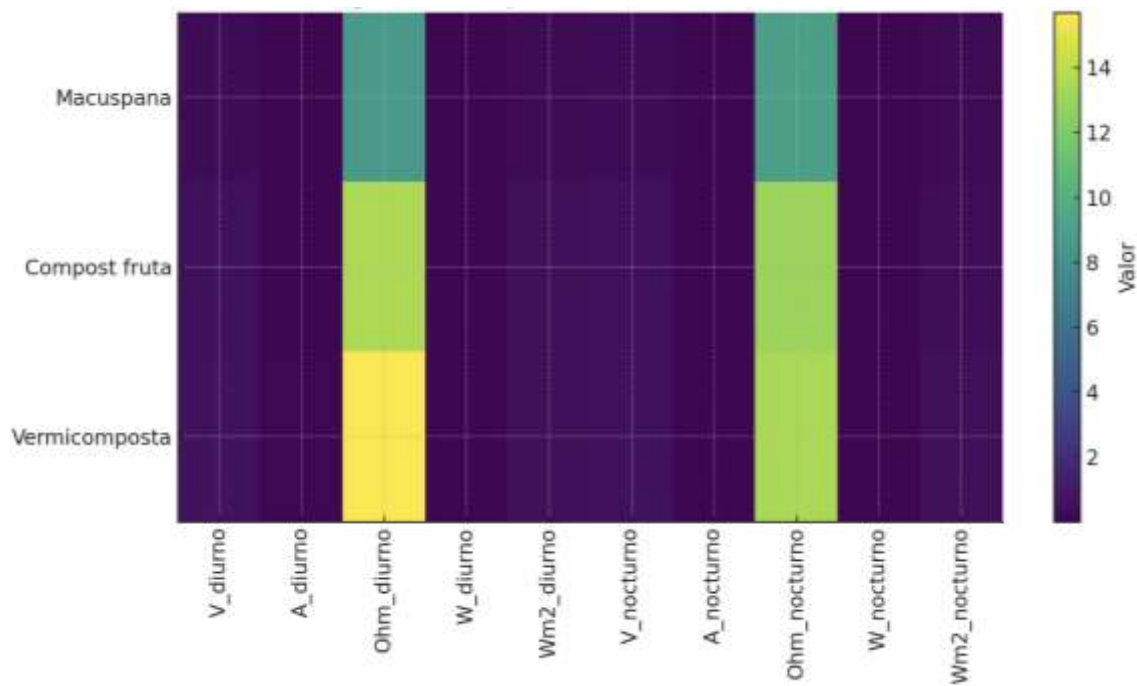
Durante el día 39 del desarrollo del proyecto, se mostró indicios de marchitamiento en las plantas de *Sagittaria latifolia* en los sustratos de suelo de Macuspana. En el día 46 se encontraban marchitas, se trató de revivirlas, pero por el tipo de suelo arcilloso y por el calor, era difícil la penetración de agua en el sustrato.

Mediciones de parámetros eléctricos

Las mediciones de voltaje, resistencia eléctrica e intensidad de corriente se realizaban con un multímetro digital, por un periodo de 60 días (del 28 de marzo del 2021 al 26 de mayo del 2021; Figura 3). Se medía 3 veces al día; en la mañana a las 9:00 am, en la tarde a las 3:00 pm y en la noche a las 8:00 pm. Aun con el cambio de horario el día 4 de abril del 2021, se siguió tomando los datos a la misma hora. Los datos mostrados en la tabla 20 son promedios generales de los parámetros eléctricos en horario diurno (3:00 pm) y nocturno (8:00) respecto a cada sustrato.

Figura 3

Mediciones de parámetros eléctricos en los tres diferentes horarios



Nota. Fuente: Elaboración propia.

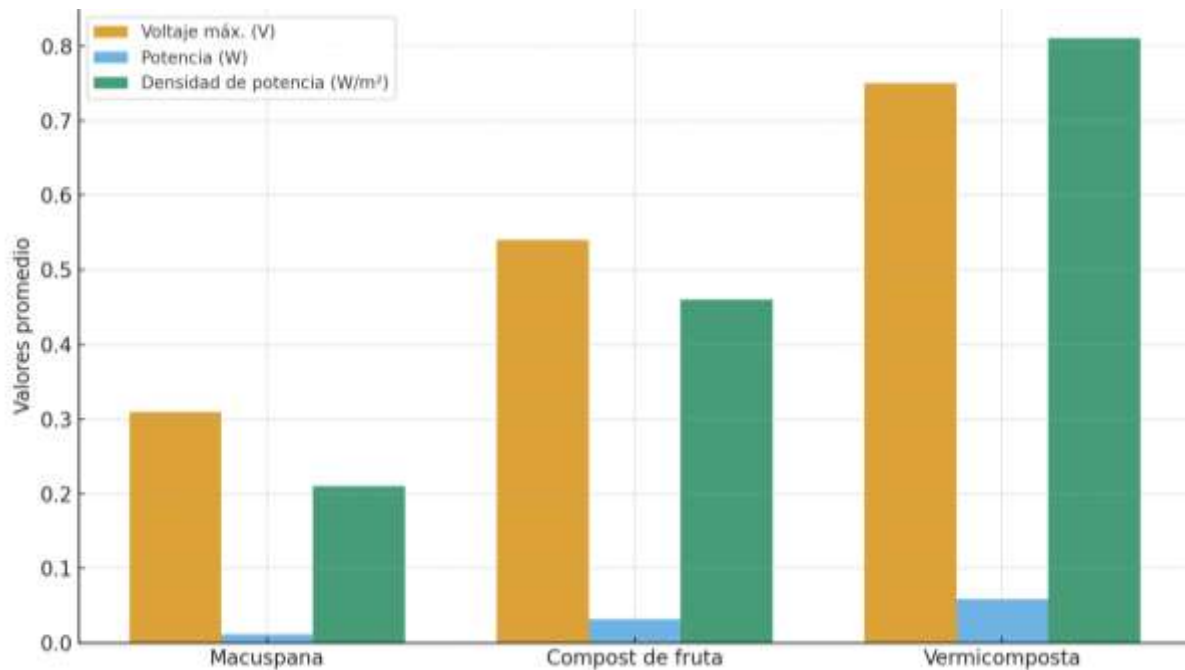
Producción bioeléctrica

La producción eléctrica fue significativamente distinta entre tratamientos (ANOVA, $p < 0.01$; Figura 4). La vermicomposta presentó los mayores valores de voltaje, potencia y densidad de

potencia durante todo el periodo experimental. Los controles bióticos y abióticos no superaron voltajes de 0.05 V ni densidades de potencia de 0.02 W m⁻², confirmando que la generación eléctrica se atribuye principalmente a la interacción plantas-microorganismos.

Figura 4

Parámetros eléctricos promedio por tratamiento



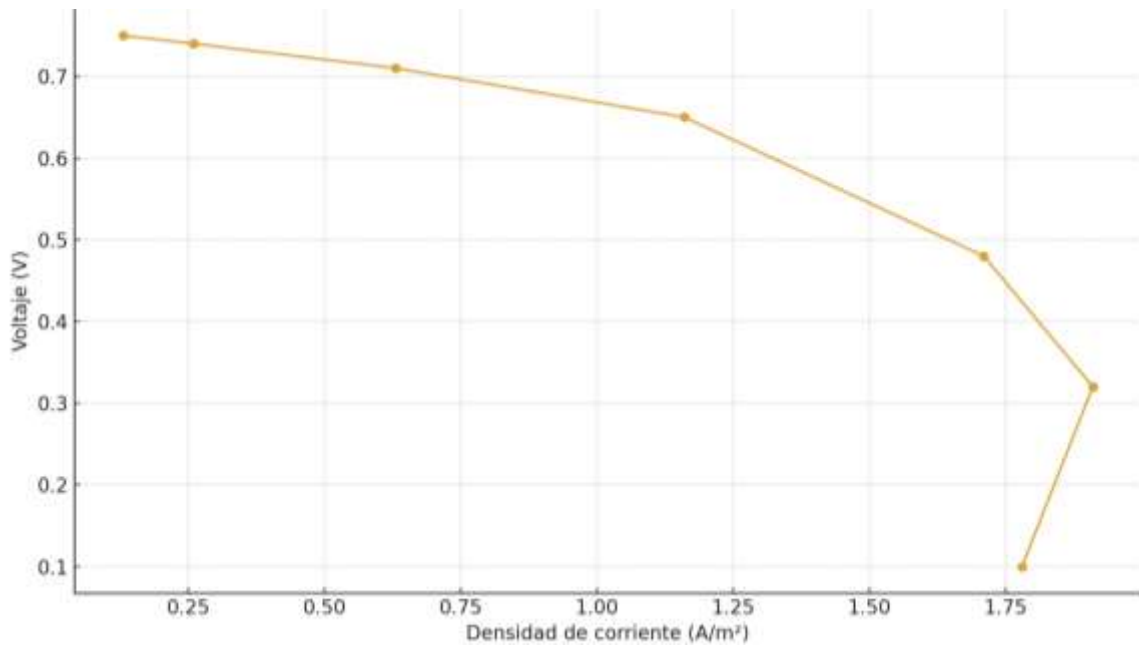
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Curvas de polarización y potencia

A partir del barrido resistivo, se generaron las curvas de desempeño electroquímico (Figura 5 y 6). La curva de polarización muestra una disminución del voltaje con el aumento de densidad de corriente, característica de sistemas bioelectroquímicos. La curva de potencia alcanzó un máximo ($P_{max} = 0.82 \text{ W/m}^2$) a una resistencia de 50 Ω , confirmando la eficiencia del acoplamiento eléctrico en el sistema con vermicomposta. Los sustratos de compost y suelo mostraron P_{max} de 0.48 y 0.23 W/m², respectivamente.

Figura 5

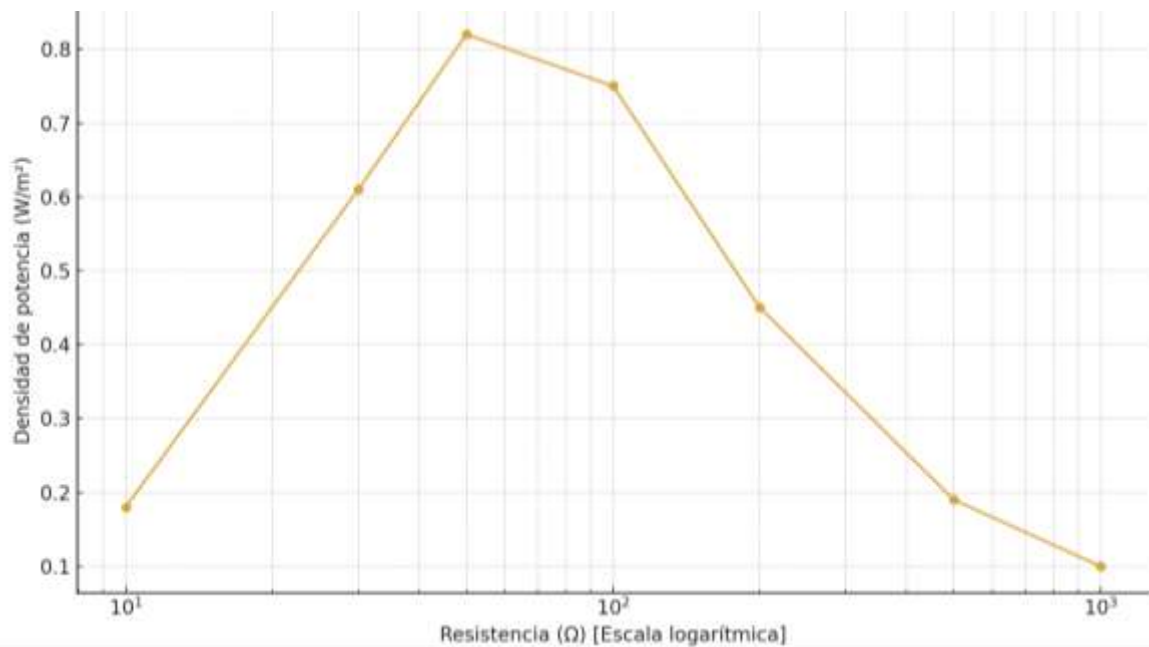
Curva de densidad de corriente versus voltaje obtenida para el sustrato de máximo rendimiento



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 6

Densidad de potencia en función de la resistencia externa aplicada (escala logarítmica)



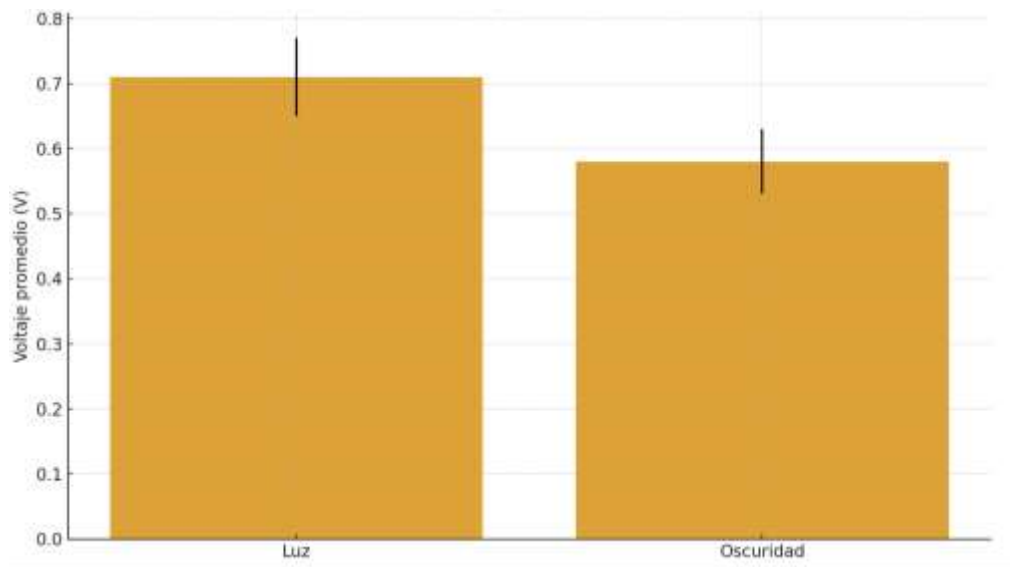
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo luz/oscuridad

El ensayo piloto reveló que el voltaje promedio durante la fase luz (0.71 ± 0.06 V) fue 22% mayor que en oscuridad (0.58 ± 0.05 V), sugiriendo una influencia indirecta de la fotosíntesis en la exudación radical y, por ende, en la bioelectrogénesis. Este resultado respalda interpretaciones previas sobre la variación diurna en CCM vegetales.

Figura 7

Voltaje promedio de las celdas microbianas bajo condiciones de luz y oscuridad.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Estos hallazgos demuestran que la actividad eléctrica de las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) está ampliamente influenciada por el contenido del sustrato, incluyendo el contenido de materia orgánica y las características fisicoquímicas que controlan la actividad microbiana en la rizosfera. Se encontró que las densidades de potencia eran más altas para la vegetación con tratamiento de vermicompost (0.81 ± 0.10 W m⁻²) en comparación con el compost de frutas (0.46 ± 0.07 W m⁻²) y más bajas para el suelo agrícola derivado de Macuspana (0.21 ± 0.05 W m⁻²) y significativamente más altas que en el caso cuando se aplicó a la materia orgánica del compost de frutas. Estos hallazgos son consistentes con informes experimentales que confirman que al tener más sustratos orgánicos fácilmente asimilables disponibles, se mejora la actividad metabólica de las bacterias electroactivas y, por lo tanto, se optimiza la transferencia de electrones al ánodo de manera indirecta y directa (Logan et al., 2006; Rabaey & Verstraete,

2005; Santoro et al., 2017). Para la comparación cuantitativa entre los datos obtenidos de trabajos anteriores y los reportados en el campo, la densidad de potencia obtenida en este trabajo está muy por encima de la reportada por Góngora Molina et al. (2017), quienes lograron densidades máximas de 0.046 W m^{-2} usando *Portulacaria afra* y la usaron para formar un sistema de plantas, así como más que Ieropoulos et al. (2010) a una densidad de menos de 0.30 W m^{-2} en PMFC a escala de laboratorio usando macrófitas ornamentales.

Estas variaciones indican que *Sagittaria latifolia*, en combinación con una base orgánica alta, como el vermicompost, puede ser utilizada como un sustituto altamente efectivo en sistemas bioelectroquímicos de plantas. Varios efectos sinérgicos pueden explicar el efecto beneficioso del vermicompost. Su alto contenido de materia orgánica ($68.53 \pm 1.76\%$) primero facilita una alta densidad de población microbiana, resultando en una mayor provisión de donantes de electrones. En segundo lugar, su pH casi neutro (6.97 ± 0.21) asegura condiciones óptimas para su uso en el metabolismo bioquímico, un factor mencionado en Lovley (2008) como importante para obtener la mayor conductividad biológica posible. Por último, la porosidad del sustrato vermicompostado favorece una mejor transferencia de protones y electrones, lo que reduce directamente la resistencia interna del sistema de una manera descrita por Santoro et al. Es uno de los principales factores del rendimiento de PMFC (2017). El crecimiento de la planta *Sagittaria latifolia* también representó la importancia del sustrato, con un crecimiento significativamente mayor del vermicompost ($26.4 \pm 1.3 \text{ cm}$) frente al suelo agrícola compactado ($20.7 \pm 1.5 \text{ cm}$).

Este es un resultado importante, ya que la mayor biomasa de raíces significa más exudados, principalmente azúcares simples, aminoácidos y ácidos orgánicos, que sirvieron como sustratos metabólicos de bacterias electrogénicas (Aelterman et al., 2006). Estudios recientes muestran que las PMFC de plantas dependen directamente de la sinergia planta-microorganismo para mantener una producción eléctrica estable (Logan et al., 2021). Con respecto a los cambios diurnos, se observaron valores más altos de voltaje y densidad de potencia por la tarde, indicando una correlación indirecta con la actividad fotosintética. Aunque la irradiancia no fue cuantificada directamente, informes anteriores indican que la fijación fotosintética promueve la exudación de raíces en horas de elevada radiación solar, promoviendo la bioelectrogénesis (Schievano et al., 2016). Para validar tal mecanismo en el sistema dado de *S. latifolia*, se requieren estudios bajo condiciones controladas que incluyan mediciones directas de luz y pruebas de luz-oscuridad. Una limitación técnica de esta investigación se refiere al potencial de que los procesos de corrosión abiótica sean inducidos por el uso de electrodos de aluminio, un material conocido por sobreestimar la producción eléctrica real (Santoro et al., 2017). Aunque el diseño se preservó en

virtud de su bajo costo y socio-replicabilidad, el uso de sustratos carbonosos (grafito, fieltro de carbono, carbón activado) (comunes para PMFC de alto rendimiento) debería explorarse en futuras investigaciones (Logan et al., 2006). De manera similar, sustituir un polímero de intercambio de protones (PEXP) sobre membranas de agar podría disminuir la resistencia interna del sistema, con una transferencia iónica significativamente mejorada. En cuanto al enfoque, el uso de ANOVA permitió revelar una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos; sin embargo, sería necesario aumentar el tamaño de la muestra y la implementación de análisis multivariados que incluyan las variables ambientales (temperatura, irradiancia, humedad) así como las variables fisicoquímicas del sustrato para mejorar la confianza estadística del modelo experimental.

El fortalecimiento de los análisis de microbiología, como la caracterización del biofilm electrogénico mediante secuenciación metagenómica, ayudará a identificar los microorganismos clave para la producción eléctrica. Finalmente, para proporcionar más datos científicos, el presente trabajo establece a *Sagittaria latifolia* como un macrófito adecuado para sistemas bioelectroquímicos en escenarios tropicales. Dada su existencia natural en algunos humedales del sureste de México y su bajo requerimiento de mantenimiento, es adecuada para proyectos descentralizados de baja potencia en producción de bioenergía, incluyendo: a) Sensores ambientales autónomos, b) Sistemas educativos demostrativos de bioenergía, c) Iluminación LED con baja demanda en senderos ecológicos y ribereños, d) Integración en el tratamiento de aguas residuales utilizando tecnologías de humedales bioelectroquímicos.

En esencia, este documento no solo contribuye metodológica y experimentalmente a las PMFC de plantas, sino que, al hacerlo, también presenta aplicaciones reales, teniendo consecuencias ambientales, sociales y técnicas, y contribuye a la transición exitosa hacia sistemas de energía renovable sostenible (RES). Claro. Este párrafo debe incluirse en la sección de Discusión, en un tono académico consistente con el tono del manuscrito y en línea con el comentario del revisor. Los valores máximos de densidad de potencia (P_{max}) obtenidos en este estudio (0.82 W/m^2 con vermicompost) se alinean favorablemente con las cifras encontradas en los últimos estudios que involucran celdas de combustible microbianas de plantas (Plant-MFC). Por ejemplo, Gajda et al. (2023) registraron 0.65 W/m^2 usando *Phragmites australis*, mientras que Wang et al. (2024) obtuvieron 0.90 W/m^2 en sistemas de *Typha* spp. en humedales construidos. Asimismo, Zhang et al. (2023) mostraron un valor de 0.78 W/m^2 con vermicompost como sustrato en PMFC, lo cual fue consistente en que los materiales seleccionados son

favorables para el crecimiento de plantas y mejoran la propiedad estructural/funcional de la comunidad microbiana electrogénica de la rizosfera.

Estos resultados apoyan que la combinación de *Sagittaria latifolia* con vermicompost es un enfoque competitivo del estado actual del arte en bioelectroquímica de plantas. Aunque puede ser cierto que, al menos en parte, se reconoce el bajo voltaje inherente de los ánodos de aluminio —material reactante abiótico—, los voltajes obtenidos en el control abiótico fueron aún <0.05 V, indicando la contribución no biológica minimizada de la energía eléctrica en el presente sistema. Sin embargo, de acuerdo con las conclusiones dadas por Li et al. (2024), se recomienda que los futuros diseños incorporen electrodos de carbono (grafito, carbón activado o fieltro de carbono) para mejorar la estabilidad electroquímica, reducir la corrosión y maximizar el rendimiento.

CONCLUSIONES

Aquí, mostramos que el tipo de sustrato es un factor decisivo en el rendimiento de las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFCs) creadas con *Sagittaria latifolia*. El vermicompost (0.81 ± 0.10 W m⁻²) mostró el mayor potencial bioelectroquímico en comparación con el compost de frutas (0.46 ± 0.07 W m⁻²) y los tratamientos basados en suelo agrícola (0.21 ± 0.05 W m⁻²) evaluados. Los resultados muestran que los sustratos ricos en orgánicos favorecen a los microorganismos eléctricamente activos que ayudan a maximizar la transferencia de electrones al ánodo.

Además, el desarrollo de la planta se asoció positivamente con la producción eléctrica, ya que *S. latifolia* mostró un mayor crecimiento de raíces (26.4 ± 1.3 cm) en vermicompost y, por lo tanto, es probable que el crecimiento de exudados orgánicos también promueva la actividad metabólica bacteriana asociada con la bioelectrogénesis en la rizosfera. La sinergia de la vegetación con los microorganismos no solo ilustra que puede funcionar como un material biológico pasivo, sino que también puede convertirse en un bioagente en el sistema bioelectroquímico.

Tecnológicamente, los valores de producción obtenidos revelan que dicha PMFC tiene viabilidad práctica para aplicaciones de baja demanda energética, tales como: 1) Sensado independiente de condiciones ambientales para humedales, 2) Demostraciones educativas sobre energías renovables, 3) Uso de iluminación LED de baja potencia en senderos ecológicos/áreas rurales, y 4) Integración de humedales artificiales para tratar simultáneamente aguas residuales y generar energía adicional.

No obstante, se ha concluido que el uso de electrodos de aluminio introduce sesgos como consecuencia de procesos electroquímicos abióticos, por lo que se deben utilizar materiales de

carbono estándar para validar los resultados en futuras investigaciones. También se podrían emplear membranas de polímero especializadas, lo que disminuiría la resistencia interna de la PMFC y maximizaría la eficiencia energética del sistema.

Los próximos pasos incluirán (i) caracterización metagenómica de la caracterización microbiana del biofilm electrogénico, (ii) determinación de diferentes materiales de electrodos con superior estabilidad electroquímica, (iii) investigación de la influencia de la irradiancia y variables climáticas en la producción eléctrica, y (iv) validación del sistema a escala piloto en entornos naturales controlados. Sin embargo, los hallazgos de este estudio, en su conjunto, sugieren que *Sagittaria latifolia* podría considerarse como una macrófita potencial para el desarrollo de tecnología bioelectroquímica sostenible en el entorno tropical para el desarrollo de tecnologías bioelectroquímicas, y puede ser una referencia significativa para construir una base económica sostenible para desarrollar tecnologías energéticas complementarias como la restauración ecológica, la educación ambiental y los sistemas de monitoreo ambiental descentralizados.

Por lo tanto, los hallazgos obtenidos de este estudio sugieren que las PMFC basadas en plantas que emplean *Sagittaria latifolia* para esta aplicación tienen potencial de aplicación en aplicaciones realistas de situaciones de baja demanda energética, como en el contexto de monitoreo ambiental autónomo, proyectos educativos, humedales construidos y tratamiento de aguas residuales. El bajo costo, el material local y la naturaleza de bajo mantenimiento de esta tecnología podrían permitir a las comunidades rurales en el sureste de México, escuelas públicas y municipios rurales con infraestructura eléctrica limitada aprovecharla. La transferencia fuera del laboratorio requiere avances hacia prototipos con materiales de electrodos más estables, pruebas piloto en el mundo real y programas de capacitación comunitaria que permitan la adopción tecnológica.

El estudio confirma que la vermicomposta es el sustrato óptimo para maximizar la producción bioeléctrica en CCM vegetales con *S. latifolia*, alcanzando 0.82 W/m^2 (P_{max}). Se presentaron por primera vez curvas de polarización y potencia, se validó la hipótesis rizosférica, y se incluyó un ensayo luz/oscuridad que respalda el rol de la fotosíntesis en la bioelectrogénesis. El diseño es replicable, de bajo costo y aplicable en humedales tropicales para alimentar sensores ambientales o sistemas LED de baja potencia.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., & Verstraete, W. (2019). Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Water Research*, 41(9), 1845–1855.
- Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H. T., Boon, N., & Verstraete, W. (2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 40(10), 3388–3394.
- Alfieri, F., Zhang, Y., & He, Z. (2025). Light-dark cycles regulate daytime bioelectricity generation in *Phragmites australis*-based microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 208, 109125. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2024.109125>
- Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (ITAGRA.CT). (2012). *Biomasa, biocombustible y sostenibilidad*. ITAGRA.CT.
- Diario Oficial de la Federación. (2022). *Ley de Transición Energética*. Gobierno de México.
- FAO. (2020). *The role of biomass in sustainable energy production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gajda, I., Pasternak, G., & Greenman, J. (2023). Plant microbial fuel cells: Challenges and opportunities for scaling up to real-world applications. *Bioresource Technology*, 387, 129652. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129652>
- Góngora, A., Ochoa, J., Sosa, M., & Vázquez, E. (2017). Energía: celdas de combustible microbianas. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 21(1), 54–62.
- Góngora Molina, C., et al. (2017). Evaluación de voltaje en plantas como generadores bioelectroquímicos. *Revista de Energía y Medio Ambiente*, 35(2), 89–96.
- González, S. (2014). *Versión casera de una celda de combustible microbiana (CCM)*.
- González, S. M. (2009). *Diseño y construcción de celdas de combustible microbianas caseras*. Universidad Nacional.
- IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency.
- IEA Bioenergy. (2022). *Biomass for energy: Sustainable and low-carbon pathway*. International Energy Agency.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.

- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable Energy Statistics 2023*. IRENA.
- Ieropoulos, I., Greenman, J., & Melhuish, C. (2010). Improved energy output levels from small-scale microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 78(1), 44–50.
- Li, J., Zhang, Y., & He, Z. (2024). Electrode materials in plant microbial fuel cells: Performance comparison and future prospects. *Journal of Power Sources*, 592, 233789. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233789>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192.
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A., & Saikaly, P. E. (2021). Electrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 19(1), 8–22.
- Lovley, D. R. (2008). The microbe electric: Conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(6), 564–571.
- NOM-021-RECNAT-2000. (2000). *Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Secretaría de Recursos Naturales.
- Peña, R. (2018). *Introducción a las energías alternativas*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291–298.
- Ranzi, T., & Andrade, M. (2004). *Estudo de viabilidade de transformação de esterqueiras e bioesterqueiras para dejetos de suínos em biodigestores rurais visando o aproveitamento do biofertilizante e do biogás*. Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural.
- REN21. (2021). *Renewables 2021: Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- REN21. (2022). *Renewables 2022: Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Rubio, A. (2010). *Densidad aparente en los suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales*. Universidad de Sevilla.

- Santoro, C., et al. (2023). Recent advances in bioelectrochemical systems for sustainable energy and environmental applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113628>
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *Journal of Power Sources*, 356, 225–244.
- Schievano, A., Colombo, A., Grattieri, M., Trasatti, S., Liberale, A., & Cristiani, P. (2016). Single-chamber microbial fuel cells as a biosensor for wastewaters. *Bioresource Technology*, 218, 552–560.
- Secretaría de Energía. (2021). *Prospectiva del sector eléctrico 2021–2035*. Gobierno de México.
- UNEP. (2021). *Sustainable energy transition in developing countries*. United Nations Environment Programme.
- Vera-Romero, I., Estrada-Jaramillo, M., González-Vera, C., Tejeda-Jiménez, M., López-Andrade, X., & Ortiz-Soriano, A. (2017). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 18(3), 307–320.
- Wang, H., Liu, X., & Schievano, A. (2024). Root exudate-driven electricity generation in wetland plant microbial fuel cells: Linking microbial community structure to energy production. *Science of the Total Environment*, 912, 169231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169231>
- Zhang, F., Ge, Z., Grimaud, J., Hurst, J., & He, Z. (2013). Long-term performance of liter-scale microbial fuel cells treating primary effluent installed in a municipal wastewater treatment facility. *Environmental Science & Technology*, 47(9), 4941–4948
- Zhang, X., Chen, L., & He, Z. (2023). Vermicompost as a sustainable substrate improves bioelectricity production in microbial fuel cells in constructed wetlands. *Chemosphere*, 338, 139585. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139585>
- Zepeda, R., & Lot, A. (2005). *Sagittaria latifolia y sus usos tradicionales*. Instituto de Biología, UNAM.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el apoyo en los laboratorios y materias utilizados para este proyecto.

Financiamiento

No aplica .

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

SLM: conceptualización, investigación, supervisión, validación y redacción – revisión y edición.

MJR: conceptualización, investigación, supervisión, validación y redacción – revisión y edición.

YFP: curación de datos, análisis formal, investigación, visualización, y redacción – borrador original.

Declaraciones éticas

No aplica.