

## Producción microbiana de bioenergía por medio de la planta *Crotón (Codiaeum variegatum)* como estrategia de aprendizaje basado en proyectos colaborativos

Bio-energy production using croton plant (*Codiaeum variegatum*)  
as strategy for learning based on collaborative projects

Sandra Bibiana Vargas<sup>1</sup>

Harold Rene Daniels Navarro<sup>2</sup>

Laura Daniela Muñoz Rodríguez<sup>3</sup>

Vivian Lorena Jiménez Baquero<sup>4</sup>

*Universidad del Cundinamarca*

Jack Fran Armengot Garcia Perez<sup>5</sup>

*Universidad de Tolima*

### Resumen

En la Universidad de Cundinamarca, el programa de Ingeniería Ambiental de la Seccional Girardot realiza Proyectos Integradores de Semestre (PIS). En el segundo semestre del 2020, en modalidad virtual con estudiantes de cuarto semestre y docentes de microbiología, ecología y química ambiental se desarrolló un proyecto de producción de bioenergía mediante una Celda de Combustible Biológica Acoplada a Plantas (CCBP). El aprovechamiento de la interacción metabólica de las bacterias electroquímicamente activas y las raíces (rizosfera) de la planta *Crotón* sirvió para realizar el montaje de un circuito eléctrico construido con materiales de bajo costo. Después de 40 días se obtuvo una potencia de 73,632mW y una corriente máxima de 235 mA a pH neutro y una temperatura entre 36.2 °C y 36.7 °C. Los estudiantes lograron interiorizar, articular y ensamblar conceptos y prácticas de diferentes disciplinas para la solución de un problema ambiental, mediante la

---

<sup>1</sup> sbvargas@ucundinamarca.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0002-6583-0932>

<sup>2</sup> hdaniels@ucundinamarca.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0001-7324-4442>

<sup>3</sup> ldanielamunozr@ucundinamarca.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0002-0391-8998>

<sup>4</sup> vlorenajimenez@ucundinamarca.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0002-2437-8409>

<sup>5</sup> jfarmengotg@ut.edu.co  
<https://orcid.org/0000-0002-3560-7297>

construcción y evaluación del prototipo para obtener energía alternativa, todo a través del aprendizaje colaborativo en ambientes virtuales.

**Palabras clave:** proyectos integradores de semestre, interdisciplinar, aprendizaje colaborativo, ambientes virtuales, celda de combustible microbiana, bioenergía, bacterias electroquímicamente activas, rizosfera.

## Abstract

Semester integrating projects (SIP) are carried out at environmental engineering program (Girardot-sectional) in University of Cundinamarca. During semester two of 2020 under virtual setting, second year students and professors of environmental engineering program from microbiology, ecology and environmental chemistry developed a bioenergy production project using a plant microbial fuel cells (PMFCs) with low-cost materials. Metabolic interaction of the electrochemically active bacteria and Croton plan roots (rhizosphere) was explored to assembly and electric circuit with low-cost elements. After 40 days an energy potential of  $73,632mW$  and maximum current of 235 mA was obtained with neutral pH and a range temperature of  $36.2\text{ }^{\circ}C$  to  $36.7\text{ }^{\circ}C$ . Students were successful interiorizing, articulating, and assembling concepts and practices from different disciplines to solve an environmental problem trough the construction and evaluation of a prototype to obtain alternative energy, everything under the frame of collaborative learning in virtual environments

**Keywords:** semester integrating projects, interdisciplinary, collaborative learning, virtual, microbial fuel cell, bioenergy, electrochemically active bacteria, rhizosphere.

## Introducción

Los estudiantes y profesionales cuyo objeto de estudio es el medioambiente deben integrar conceptos de sistemas complejos, es decir, sistemas compuestos por varias partes interconectadas o entrelazadas (Cocho *et al.*, 2014) Estos conceptos no son fáciles de entender y aplicar desde un único núcleo temático o disciplina (Welch-Devine *et al.*, 2014), sino que requieren una aproximación más interdisciplinar y, en ocasiones, transdisciplinar, especialmente cuando se trata de desafíos ambientales (Vedeld & Krogh, 2005).

Estas interpretaciones interdisciplinarias exigen el uso de diversas habilidades que deben desarrollarse dentro de los currículos de las carreras relacionadas con las ciencias ambientales, ya que además de las habilidades analíticas y los procesos de planificación tradicionales, se requiere creatividad, competencias sociales y habilidades de comunicación para hacer frente a la dinámica de cambio que caracteriza el desarrollo de la mayoría de las

facetas de la sociedad en relación con la naturaleza (Steiner y Posch, 2006). Además, en marzo de 2020, se decreta el aislamiento preventivo obligatorio en el ámbito nacional en respuesta a una crisis pandémica mundial (Decreto N.º 457 de 2020). La nueva problemática, reto u oportunidad que se plantea es la virtualización de la educación inmersa en una cultura digital en tiempos de pandemia. Requiere estrategias de aprendizaje innovadoras, interdisciplinarias, flexibles, democráticas y de calidad que despierten el interés genuino de los estudiantes (Copertari, 2020).

En respuesta a estas problemáticas, la Universidad de Cundinamarca, a través del Modelo Educativo Digital Transmoderno (MEDIT), es una institución que contribuye activa y positivamente a la sociedad y al medioambiente, formando profesionales para la vida, los valores democráticos, la civilidad y la libertad (Barrera, 2019). Son profesionales para la generación de conocimiento, en la solución de problemas locales y en otros aspectos de importancia estratégica para el país, especialmente para el desarrollo sostenible, y donde la ingeniería ambiental juega un papel fundamental en la articulación de procedimientos que garanticen la seguridad del medioambiente. Los Proyectos Integradores Semestrales (PSI) son espacios académicos donde se orienta a los estudiantes en procesos de investigación formativa y formal (Programa de Ingeniería Ambiental, 2019), en los que se abordan diferentes problemáticas ambientales desde la interdisciplinariedad. Por ello, se consideró un proyecto colaborativo para el PIS IPA2020, en torno a la producción de energía renovable a partir de la construcción de prototipos de Células de Combustión Biológica (CCB) con materiales de bajo costo, donde se articulan los conocimientos conceptuales y procedimentales de la microbiología, la ecología y la química ambiental. Estos procesos de aprendizaje y formación están directamente relacionados con la Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel).

El siglo XXI ha traído consigo un aumento irreversible del consumo de energía, debido en gran medida al proceso de industrialización, la implementación de nuevas tecnologías y el crecimiento de la población (Bermúdez y Aragón, 2018). El 80 % de la producción mundial de energía está representada por los combustibles fósiles, que generan grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, y teniendo en cuenta la creciente demanda de energía y la disminución de las reservas, es necesario desarrollar fuentes de energía limpias, sostenibles y renovables (Antioquia, 2006).

Las Celdas de Combustible Microbianas acoplada a Plantas (CCMP) son una tecnología emergente que podría contribuir a la crisis energética (Revelo *et al.*, 2013). Una CCMP es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en los rizodispositivos en energía eléctrica (Antioquia, 2006). En determinadas condiciones, algunos microorganismos transfieren los electrones producidos por su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones, como el oxígeno (Revelo *et al.*, 2013).

Las CCMP utilizan la cooperación natural entre las bacterias electrogénicas del suelo y las plantas para convertir la energía solar en electricidad (Kabutey *et al.*, 2019). El sistema se basa en dos procesos, la rizodeposición de compuestos orgánicos por parte de las plantas vivas y la generación de electricidad a partir de los compuestos orgánicos en las CCMP (Strik *et al.*, 2008). Las plantas convierten la radiación solar en energía química (hidratos de carbono) para su metabolismo, y hasta el 40 % del carbono neto fijado puede ser liberado por las raíces, por ejemplo, para la absorción de nutrientes (Bermúdez y Aragón, 2018). Por lo tanto, la idea principal es que los rizodepósitos de las plantas sean utilizados como sustratos por las bacterias para generar electricidad en las CCMP.

Las bacterias electroquímicamente activas en las CCMP utilizan la energía química del sustrato para su metabolismo, y simultáneamente utilizan el ánodo de la pila de combustible como aceptor de electrones (Pliego-Arreaga *et al.*, 2013). La oxidación de la materia orgánica por las bacterias (mineralización) produce electrones en el compartimento anódico. Estos electrones llegan al ánodo, y de ahí al cátodo, circulando por un circuito conductor externo (Strik *et al.*, 2008). Finalmente, los protones se producen por la oxidación de la materia orgánica, que se difunde (a través de una membrana de intercambio iónico, un puente salino o una matriz, generalmente suelo o sedimento), hasta llegar al cátodo (Pasternak *et al.*, 2016).

Este proyecto se desarrolló durante el cuarto semestre del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cundinamarca como una estrategia de aprendizaje en un entorno virtual para producir energía limpia mediante la interacción de factores bióticos y abióticos y materiales de bajo costo.

## **Materiales y métodos**

La fase de exploración o saberes previos se inició con el acercamiento conceptual para el desarrollo de los prototipos de CCMP desde los núcleos temáticos de microbiología, química ambiental y ecología (Tabla 1), a través de seminarios en entornos virtuales, en donde se les proporcionaron a los estudiantes artículos científicos que explicaban los principios teóricos y prácticos para el desarrollo de las CCMP, que fueron discutidos durante los diferentes espacios.

**Tabla 1.**  
**Temáticas desde cada área de conocimiento**

Núcleos temáticos	Temáticas
Microbiología	Metabolismo microbiano
Química ambiental	Proceso Redox
Ecología	Bioindicadores-plantas acuáticas

Fuente: elaboración propia.

En el marco la política *Dialogando con el mundo* de la Universidad de Cundinamarca y aprovechando que las plataformas digitales favorecen el dialogo transfronterizo, dos asesores internacionales desde los Países Bajos (Sebastián Cañizales, Universidad de Wageningen) y de México (Kamaraj Sathish Kumar) asesoraron a los estudiantes en el diseño y elección de materiales para la construcción de los prototipos.

El *Codiaeum variegatum*, comúnmente conocido como Croton, fue seleccionado para la estructuración y el montaje experimental práctico; esta planta tiene 11 meses de vida. Los materiales utilizados fueron una lámina de zinc como cátodo, una lámina de cobre como ánodo, cable conductor de energía de cobre rojo (ánodo) y un cable conductor de cobre negro (cátodo) con sus debidas especificaciones.

Los sustratos para la planta que se utilizaron fueron: cáscara de huevo, cascarilla de arroz, tierra negra (abono) y agua. Los instrumentos de medición utilizados fueron un multímetro (amperios), un termómetro de mercurio (temperatura en °C) y unas tiras de pH.

Para iniciar el montaje, el cable rojo con la lámina de cobre se incrustó en el fondo de la maceta, haciendo contacto con sus raíces (rizosfera), luego se sujetó el extremo restante del cable con unas pinzas para poder hacer la lectura con el multímetro. En un segundo momento se da inicio la instalación del cátodo, incrustando la lámina de zinc de forma que queda la parte inferior en contacto con la tierra y la parte superior con el aire, y se le incorpora una pinza para ser más sencilla su conexión, como se muestra en la Figura 1. La recogida de datos comenzó el 1 de octubre, cuando se registraron la intensidad de la corriente, el pH y la temperatura.

Los valores de la intensidad de la corriente se tomaron cada 5 días, el pH y la temperatura una vez a la semana. Este procedimiento se realizó durante 40 días. Con los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico descriptivo de las variables estudiadas. La discusión de los resultados termina con la potencia del prototipo registrando el amperaje. Se realizaron sesiones virtuales para evaluar y el realizar el seguimiento de las CCMP.

## Resultados y discusión

Para la fase de evaluación o retroalimentación, se muestra el trabajo realizado por los estudiantes de Ingeniería Ambiental, Harold Rene Daniels, Vivian Lorena Jiménez Baquero, Raissa Valentina Mayorquin Cardoso y Laura Daniela Muñoz Rodríguez, como caso exitoso del aprendizaje colaborativo basado en proyectos. Los 4 estudiantes se encargaron del diseño, Harold realizó la construcción de la celda y Laura y Vivian se encargaron de el análisis estadístico y el análisis de resultados. Todo se enmarcó en la virtualidad, el diálogo transfronterizo y el conocimiento interdisciplinar.

### Figura 1.

#### Fotografía y modelo del montaje



Fuente: elaboración propia.

Al comienzo de este proyecto se manejó el grafito de lápiz como conductor de energía en el ánodo, sin embargo, el grafito no adquirió una carga positiva (datos no mostrados). Al pasar los días, en vez de aumentar el amperaje, comenzó a disminuir drásticamente hasta llegar a 0, por lo que se dedujo que el material de ánodo y el diseño fueran los principales factores para la respuesta registrada, ya que el circuito se mojaba cada vez que se regaba la planta. Por esta razón se cambió el ánodo por una lámina de zinc y el cátodo por una barra de cobre. Las capas del grafito presentan una conductividad de la electricidad baja que aumenta con la temperatura, comportándose como un semiconductor, mientras que el cobre se comporta como un mejor conductor de energía porque cada átomo de cobre que pierde un electrón se convierte en un ion positivo (Huang et al., 2021).

Con el nuevo montaje se comenzó a registrar los valores de amperaje cada 5 días, como se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2.**  
**Registro de la corriente (mA), pH y temperatura (°C)**

Días	INTENSIDAD (mA)	pH	Temperatura
1	87	6,5	36,7
5	153	6	36,6
10	235	7	36,5
15	166	7	36,3
20	132	6,5	36,2
25	170	7	36,3
30	196	7	36,4
35	114	7	36,3
40	153	7	36,2

Fuente: elaboración propia.

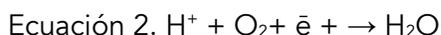
Los picos más altos en la intensidad de la corriente se dieron cuando se cortó el suministro del agua durante 5 días. Se observa que en los valores registrados no hubo un incremento constante. Por otra parte, del día 10 en adelante se comienza a evidenciar cómo disminuye y aumenta la intensidad de corriente, como se observa en la Figura 2. La humedad y la temperatura pudieron influir en este comportamiento. El proceso de producción de energía requiere un medio favorable para que la bacteria oxide materia orgánica y, al mismo tiempo, reduzca los iones metálicos eliminando el exceso de electrones generados a partir de la liberación de energía de los procesos catabólicos (Strik *et al.*, 2008).

Las bacterias encargadas de esta producción de energía son conocidas como electrogénicas (Kabutey *et al.*, 2019). La oxidación de materia orgánica en la capa anaerobia es realizada por microorganismos heterótrofos (Ecuación 1) en donde el aceptor final de electrones es el ánodo (Ecuación 2). Los electrones son conducidos por el ánodo conectado al circuito, en lugar de que algún otro compuesto o iones utilicen estos electrones para reducirse. Finalmente, el flujo de electrones generado a partir de la oxidación de materia orgánica es utilizado para la generación de energía eléctrica (Strik *et al.*, 2008).

**Figura 2.**  
**Intensidad de corriente con el tiempo**



Fuente: elaboración propia.



La temperatura de la planta varió en un rango de 36.2 a 36.7. Sin embargo, varió entre la semana uno a la tres por las fuertes lluvias que se presentan en la zona de Girardot, Colombia. Es decir, la intensidad de corriente va a depender de la temperatura en la que se encuentre la planta. La tierra negra al tener altas concentraciones de agua disminuye la energía significativamente como se demuestra en la Tabla 1.

Para los valores del pH se realizaron dos muestras de tierra, uno cerca del ánodo y otro cerca del cátodo para observar la diferencia de estos, sin embargo, como se puede observar en la Tabla 1, los resultados fueron constantes para las dos muestras, ya que el único medio que las separaba era una capa de tierra negra, que sirvió como matriz de soporte y transporte de los  $H^+$ , permaneciendo entre un rango de 6 a 7. Es decir, el pH se mantuvo neutro, ya que los electrones que se liberan en el ánodo migran hacia el cátodo, permaneciendo su concentración constante y, por ende, el pH.

**Tabla 3.**  
**Análisis descriptivo**

	Intensidad de corriente	pH	Temperatura
Min	87	6	36,2
Max	235	7	36,7
Media	156,222	6,7778	36,3889
Varianza	1906,94	0,131944	0,0311111
Desviación estándar	43,6686	0,363242	0,176383

Fuente. elaboración propia.

Con los datos registrados se realizó un análisis estadístico-descriptivo donde se obtuvo la media, la varianza, la desviación estándar, el valor mínimo y el máximo.

Al pasar las 4 semanas se obtuvo una media de intensidad de corriente de 156,222 (mA), donde los resultados eran oscilantes desde el valor mínimo hasta el máximo. En cuanto al pH se obtuvo una media, es decir, un promedio entre todos los datos de 6,7. En cuanto a la temperatura, la media fue de un valor de 36,38 °C.

En la desviación estándar de las tres variables, la más uniforme fue la de la temperatura seguida del pH. La mayor variabilidad se obtuvo en la intensidad de corriente, como se puede observar en la Tabla 3.

El valor máximo registrado en la intensidad de corriente fue de 235 mA y el mínimo fue de 87 mA. En cuanto al pH, el valor máximo fue 7 y el mínimo fue de 6. Por último, en la temperatura se obtuvo un valor máximo de 36.7 °C y un valor mínimo de 36.2 °C (Tabla 4).

**Tabla 4.**  
**Correlaciones entre las variables amperios, pH y temperatura**

	Amperios VS Temperatura	pH VS Temperatura	Amperios VS pH
r	-0,100257187	-0,5311	0,39358
p	0,79746	0,1412	0,2946

Fuente: elaboración propia.

En este estudio se analizaron 3 correlaciones posibles. La primera y la segunda correlación son negativas entre (Amperaje vs pH) y (pH vs Temperatura), no obstante, estadísticamente no son significativas, ya que los valores de las probabilidades son mayores a 0,05, que es el rango establecido para que haya una diferencia entre los datos de estas dos variables.

Mientras que la tercera correlación entre (Amperios vs pH) es positiva, sin embargo, estadísticamente no significativa, al igual que las otras dos correlaciones porque el valor de la probabilidad supera el rango establecido.

Estimación potencia eléctrica

**Tabla 5.**  
**Registro de datos del voltaje**

Fechas	Voltaje (mV)
1/10/2020	494
5/10/2020	447
10/10/2020	505
15/10/2020	472
20/10/2020	485
25/10/2020	463
30/10/2020	482
5/11/2020	453
10/11/2020	447
Media	472

Fuente: elaboración propia.

Para hallar la potencia de electricidad que produce la planta en términos generales, se debe tener en cuenta la ecuación 3, donde P es la potencia en watts. El voltaje fue registrado en el mismo tiempo que el amperaje, como se observa en la Tabla 5. De esta forma se observa que el prototipo tiene una potencia eléctrica de 0,073632 W.

Ecuación 3.  $P = 0,156 A \times 0,472 V = 0,073632 W$

Al finalizar el proyecto colaborativo, como se ha evidenciado en los resultados presentados, demuestra que los estudiantes se apropiaron de los diferentes conceptos de la microbiología, ecología y química ambiental para construir un prototipo funcional y presentar una alternativa para la solución de un problema ambiental.

## Conclusiones

Las plantas producen energía eléctrica de manera constante como lo demuestran los resultados obtenidos, por lo que es posible hacer que este método de obtención de energía renovable sea sostenible. La temperatura del ambiente influye en la intensidad de corriente como se evidenció, ya que si se escogiera una planta de sol, el amperaje obtenido posiblemente hubiese sido más alto. Gracias a los dos montajes que se realizaron se demostró que los metales de transición como el cobre son mejores conductores que el grafito por la capacidad que tienen de transportar energía, ser poco reactivos y ser resistentes a la corrosión.

La aproximación interdisciplinar, el aprovechamiento de materiales sencillos, el uso de plataformas digitales y el diálogo transfronterizo permiten desarrollar con éxito proyectos colaborativos para resolver problemas complejos en entornos virtuales.

## Referencias

- Antioquia, U. de. (2006). *Celdas de combustible microbiano*. [https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/extencion/portafoliotecnologico/articulos/Celdas\\_de\\_combustible\\_microbiano](https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/extencion/portafoliotecnologico/articulos/Celdas_de_combustible_microbiano)
- Barrera, A. (2019). *Educacion Para La Vida, Los Valores Democraticos, La Civilidad Y La Libertad* (Vol. 2019). <https://www.ucundinamarca.edu.co/documents/varios/2019/medit-1.pdf>
- Bermudez Montaña, M. A., & Aragón Bernal, E. D. (2018). *Implementación De Una Celda De Combustible Microbiana A Escala Laboratorio Para Generación De Energía Eléctrica*. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6695/1/6131003-2018-1-IQ.pdf>
- Cocho, G., Torrez Alcázar, C., Torres Nafarrete, J., Duval, G., Miramontes, P., Miramontes, O., & Gutiérrez Sánchez, J. L. (2014). *Perspectivas en las teorías de sistemas*.
- Decreto numero 457 de 2020, 231 (2020). <https://www.mincit.gov.co/prensa/noticias/general/decreto-457-mediante-el-cual-se-imparten-instrucci#:~:text=El%20Gobierno%20Nacional%20expidi%C3%B3%20el,del%20lunes%2013%20de%20abril%2C>
- Copertari, S. (Universidad Nacional de R. (2020). Virtualización de la Educación en tiempos de pandemia. *Revista Científica Educ@ção*, 73(1), 202–246. <http://doi.org/10.3386/w22921>

Huang, X., Duan, C., Duan, W., Sun, F., Cui, H., Zhang, S., & Chen, X. (2021). Role of electrode materials on performance and microbial characteristics in the constructed wetland coupled microbial fuel cell (CW-MFC): A review. *Journal of Cleaner Production*, 301, 126951. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126951>

Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110(May), 402–414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>

Pasternak, G., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2016). Comprehensive Study on Ceramic Membranes for Low-Cost Microbial Fuel Cells. *ChemSusChem*, 9(1), 88–96. <https://doi.org/10.1002/cssc.201501320>

Pliego-Arreaga, R., Regalado, C., Amaro-Reyes, A., & García-Almendárez, B. E. (2013). Voltage Production In A Plant-Microbial Fuel Cell Using *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 505–511. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966013>

Programa de Ingeniería Ambiental. (2019). *Página 1 de 235*. Universidad de Cundinamarca.  
 Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Steiner, G., & Posch, A. (2006). Higher education for sustainability by means of transdisciplinary case studies: an innovative approach for solving complex, real-world problems. *Journal of Cleaner Production*, 14(9–11), 877–890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.054>

Strik, D. P. B. T. B., Hamelers (Bert), H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>

Vedeld, P., & Krogh, E. (2005). *Crafting interdisciplinary in an M . Sc . programme in*. 81, 330–336.

Welch-Devine, M., Hardy, D., Brosius, J. P., & Heynen, N. (2014). A pedagogical model for integrative training in conservation and sustainability. *Ecology and Society*, 19(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06197-190210>