

## Consorcio de Microorganismos para cosecha de electrones

NIVÓN-PELLÓN, Alejandra†\* & NIVÓN-BOLÁN, Carlos Alejandro

*Universidad Autónoma de Querétaro*

Recibido Enero 9, 2017; Aceptado Febrero 14, 2017

### Resumen

Un alternativa a los métodos convencionales para la generación de electricidad son las llamadas celdas de combustible microbianas CCM, estas son biosistemas en donde se genera una corriente eléctrica de un modo similar a una pila química de combustible pero con un catalizador biológico. Es decir, se obtiene energía eléctrica a partir de energía química gracias al metabolismo de algunos microorganismos (Bond y Lovley 2003) que degradan materia orgánica y algunos metales como sustrato (Pant et al., 2010). En teoría todo sustrato orgánico proveniente de mantos acuíferos como lagunas, aguas residuales o residuos orgánicos puede ser usados. Mientras que las condiciones sean las adecuadas para la supervivencia de los microorganismos, la CCM tiene el potencial de producir electricidad de forma indefinida (Franks y Nevin, 2010). El presente pretende dar a conocer el fundamento teórico y los alcances de uno de los proyectos de investigación llevados a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### Abstract

An alternative to conventional methods for generating electricity are the so-called CCM microbial fuel cells, these are biosystems where an electric current is generated in a way similar to a chemical fuel cell but with a biological catalyst. That is, electrical energy is obtained from chemical energy thanks to the metabolism of some microorganisms (Bond and Lovley 2003) that degrade organic matter and some metals as a substrate (Pant et al., 2010). In theory, all organic substrates from aquifers such as lagoons, wastewater or organic waste can be used. As long as conditions are adequate for the survival of microorganisms, CCM has the potential to produce electricity indefinitely (Franks and Nevin, 2010). The present aims to publicize the theoretical basis and scope of one of the research projects carried out in the Engineering Faculty of the Autonomous University of Querétaro.

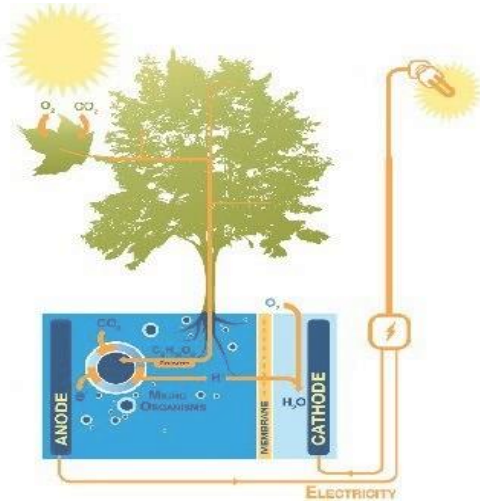
**Citación:** NIVÓN-PELLÓN, Alejandra & NIVÓN-BOLÁN, Carlos Alejandro. Consorcio de Microorganismos para cosecha de electrones. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2017. 4-10: 7-18

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alenivon@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La relación entre generación de electricidad y procesos metabólicos fue estudiada por primera vez en el siglo XVIII, cuando Luigi Galvani observó el efecto de la electricidad en patas de rana y estableció la primera teoría de “electricidad animal” (Ieropoulos. et al. 2005).



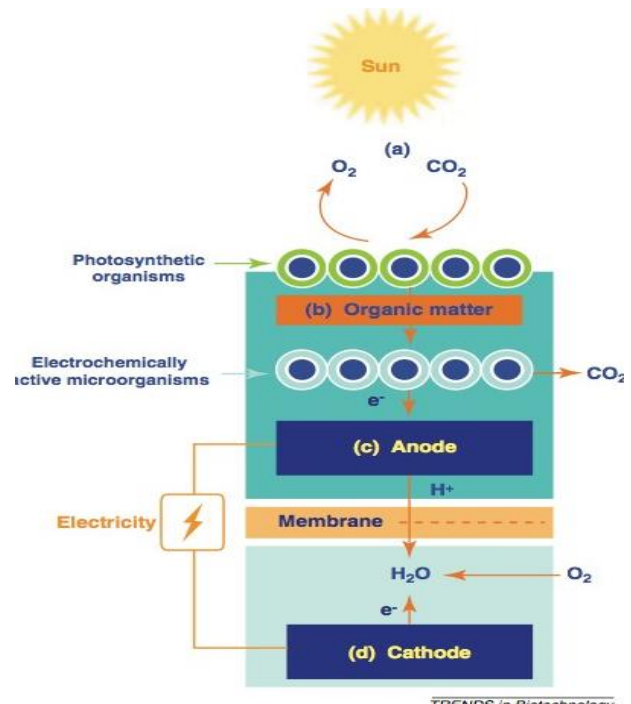
**Figura 1** Representación gráfica de una Celda de Combustible Microbiana

En 1910, Potter demostró la producción de energía eléctrica en cultivos vivos tanto de *Escherichia coli* como *Saccharomyces spp*, usando electrodos de platino.

Con el descubrimiento de bacterias con capacidad de generar electricidad (microorganismos electrogénicos) nació el concepto de bioelectrogénesis, una nueva disciplina que se constituye como una fuente potencial de posibilidades en la búsqueda de nuevas alternativas a las energías convencionales (Borjas, 2012).

Hasta el momento el principal aporte de la bioelectrogénesis son las Celdas de Combustible Microbiano CCM, éstas emplean bacterias electroquímicamente activas (Cha et al., 2010) que convierten la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica.

Esto es posible ya que algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica, a través de biopelículas o de conductos proteicos denominados pili que sirven como nanoconductores, a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones como el oxígeno (Reguera et al., 2006).



**Figura 2** Modelo de una CCM, que incluye los principios básicos, a) fotosíntesis, b) transporte de materia orgánica al compartimento anódico en donde ocurre la oxidación de ésta, producción de electrones, c) reducción del oxígeno a agua en el compartimento catódico.

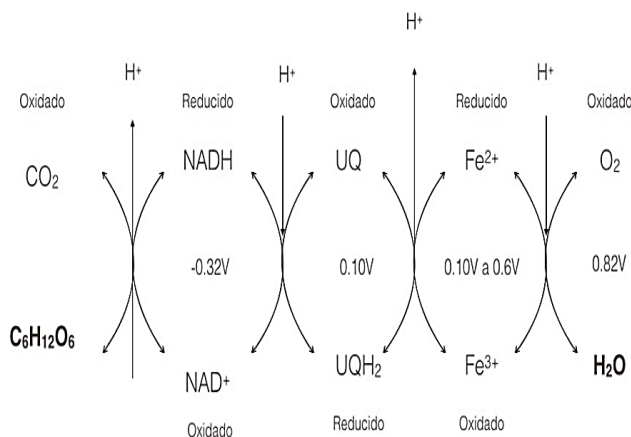
Fuente: Strik et al. (2011)

Un CCM está constituida básicamente por dos cámaras: una cámara anódica anaerobia y una catódica en contacto con el oxígeno. Ambas cámaras se encuentran separadas generalmente por una membrana de intercambio catiónico a través de la cual se crea un flujo de protones (del ánodo al cátodo) que, combinados con los electrones generados y con el oxígeno presente en la parte aerobia, forman agua (Strike et al. 2011), como se puede observar en la figura 2.

NIVÓN-PELLÓN, Alejandra & NIVÓN-BOLÁN, Carlos Alejandro. Consorcio de Microorganismos para cosecha de electrones. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2017

El ánodo puede ser conectado a través de una resistencia de carga (RL) o una batería al cátodo, vía un circuito eléctrico externo, a través del cual fluyen los electrones, originando una corriente (Fig. 2). Los electrones viajan del ánodo al cátodo debido a la diferencia de potencial redox que existe entre las soluciones catódica y anódica. Se ha demostrado que la transferencia directa de electrones desde las células microbianas hacia los electrodos ocurre con baja eficiencia (Park y Zekus, 2003), a menos que bacterias de algunos grupos especiales, principalmente geobacterias, sean utilizadas (Bond y Lovley, 2003). Dependiendo de las condiciones de la pila y del metabolismo del microorganismo, la diferencia de potencial que se obtiene puede oscilar normalmente entre 0.3-0.5 V según lo reportado por Franks y Nevin en 2010 utilizando sustratos orgánicos como la glucosa y el acetato en pruebas controladas en laboratorio.

Las llamadas celdas de combustible microbiana de tercera generación utilizan bacterias miembros de la familia Geobacteraceae y Shewanellaceae que presentan un tipo especial de citocromos unidos a su membrana, capaces de transferir electrones directamente a los electrodos (Ieropoulos, 2005) y (Yi.H, 2009).



**Figura 3** Reacciones acopladas en el proceso de oxidación de la glucosa

Fuente: elaboración propia, adaptado de ACS, 2005

Richter et al., 2008 han demostrado que cultivos mixtos de microorganismos fermentativos contribuyen a la generación de energía en la CCM ya que aportan subproductos que pueden ser utilizados como sustratos por otras poblaciones microbianas.

Lo anterior permite el establecimiento de interacciones sintróficas que consisten en que ciertos microorganismos hidrolizan y fermentan compuestos orgánicos complejos y otros utilizan los subproductos para la generación de corriente, estableciéndose una estructura jerárquica con microorganismos dominantes dependiendo del sustrato empleado (Kiely et al., 2011).

En base a lo anterior se recomienda, a nivel práctico, emplear cultivos mixtos como lodos anaeróbicos y otras fuentes de comunidades microbianas ya que estos generan mejores potenciales eléctricos y su manejo es más económico y menos exigente (Du et al., 2007). Según Schulz y Schoröderlas en 2003 y Sharma y Kundu en 2010 las bacterias más comunes en las mencionadas comunidades microbianas pertenecen a los géneros Shewanella, Geobacter, Proteobacter y Pseudomonas, se destacan las especies *S. putrefaciens*, *P. aeruginosa*, *G. sulfurreducens* y *G. metallireducens*.

El estudio de biocátodos capaces de usar no solamente oxígeno sino también otros contaminantes como posibles aceptores de electrones, permite la remoción de nutrientes y la biorremediación conjuntamente con la generación de electricidad (Huang et al., 2011).

Teniendo en cuenta este fenómeno, las posibles aplicaciones de una CCM se pueden dividir en dos: la producción de energía eléctrica a partir de energía química y la biorrecuperación de suelos y aguas (Borjas, 2012).

Por sus características las CCM pueden ser una tecnología utilizada en tratamiento de aguas residuales (He et al., 2013), en bioremediación de compuestos xenobioticos o metales pesados debido a que diversos microorganismos pueden reducir diferentes compuestos volviéndolos ambientalmente más amigables como es el caso del Cr(VI) y la eliminación de cloro (Huang et al., 2011) y (Lovley, 2011); en el futuro podrían ser utilizadas en lugares remotos donde haya demanda de consumos básicos de energía eléctrica. (Du et al., 2007, Pant et al., 2010),

En la actualidad grupos de investigadores trabajan para hacer mas eficiente esta tecnología, su vasta aplicación ha creado grandes expectativas en la comunidad científica ya que es posible producir energía limpia mediante la explotación de la biomasa que existe en las aguas residuales domésticas e industriales. Al utilizar la materia orgánica de las aguas residuales como combustible simultáneamente con la producción de energía, se podría conseguir depuración de las aguas contaminadas, por otro lado se ha reportado que las CCM operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a temperaturas invernales en países nórdicos (Strike et al, 2013) y producen cantidades ínfimamente menores de CO<sub>2</sub> a las reportadas por cualquier otra tecnología actual que opere con combustibles fósiles para la generación de energía (Rabaey et al., 2003).

### **Propuesta**

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro se ha propuesto realizar estudios con respecto a las Celdas de Combustible Microbianas, como parte del proyecto FOMIX UAQ CONACyT “Diseño, construcción y puesta en marcha de un campo experimental de energías híbridas solar, eólica y bioenergéticas”.

Mismo que comenzó en el 2015 utilizando cultivos mixtos adaptados a la temperatura ambiente del estado de Querétaro, complementando con microalgas que generen suficiente materia orgánica para la alimentación de bacterias capaces de transferir electrones al ánodo.

Se propone el diseño y prototipado de una CCM de bajo costo construcción por un ánodo y un cátodo dentro de cámaras separadas por fibras inoculadas con microalgas con el fin de estabilizar la diferencia de potencia, aumentar la eficacia de la reacción de oxidación descrita para la CCM y dotar de materia orgánica a la celda que en descomposición pueda servir de sustrato para las bacterias productoras de electrones.

Las micro algas producirán oxígeno en la cama anódica como parte de su metabolismo y este actuará como aceptor final en el transporte de electrones (Strik, 2008). Este sistema de electrodos estará unido a una batería permitiendo almacenar los electrones producidos en las celdas prototipo. Con el fin de probar si la energía producida por las CCM conectadas a una batería pueda prender focos LED e iluminar el espacios por la noche.

Se considera el impacto ambiental como el principal motor para la investigación y desarrollo en biosistemas generadores de electricidad, es una oportunidad para incentivar proyectos innovadores en la generación de herramientas básicas en el uso cotidiano que desplacen a aquellas que dañan al medio ambiente o bien que tienen un impacto ambiental superior.

La aplicación de los biosistemas generadores de electricidad a la iluminación de áreas comunes, alumbrados y señalamientos en lugares públicos, permitirá el fomento y aprovechamiento de espacios verdes para la recreación.

La implementación de la tecnología de biosistemas generadores de electricidad en áreas urbanas podrá permitir el ahorro de energía eléctrica de alto impacto ambiental en señalamientos y alumbrado de caminos en áreas comunes. La tecnología desarrollada con los biosistemas generadores de electricidad puede implementarse en áreas rurales que no tiene acceso a la red de energía eléctrica, logrando beneficiar a sectores alejado o de difícil acceso.

### **Propuesta Metodológica**

El estudio de las CCM se dividió en 5 etapas: Acercamiento a la construcción y funcionamiento de una CCM; recolección de muestras de lodos, adaptación y estandarización de las mismas; estudio del material para electrodos, forma y disposición en las medias celdas de la CCM; uso de agentes biológicos productores de oxígeno en la cámara catódica y prueba de rendimiento de la celda y por último ejercicio de crowdsourcing para la construcción de CCM en diferentes partes del mundo.

Para la primera etapa y como primer acercamiento se hizo la construcción en el laboratorio de Celdas de Combustible Microbiano (CCM) de manera que se pueda apreciar la existencia del metabolismo microbiano y la diferencia de potencial a partir de este. Se utilizaron diferentes tipos de lodo y materiales para electrodos como grafito, aluminio, cobre, plata, fierro galvanizado y sustratos agregados al lodo como miel, azúcar, mermelada, composta (MoodWhat, 2016). Se pidió a los estudiantes llenaran un envase de 200 – 250 ml de lodo especificando su procedencia y que se mezclara con alguna fuente de glucosa o fructosa o ambas como miel, mermelada etc...

Se introdujo el ánodo que anteriormente se convino en clase y se probó la diferencia de potencial que se generaba al sumergir un cátodo aéreo en la superficie humedad de la celda.

En la siguiente etapa, se recolectaron muestras de lodos de distintos mantos acuíferos ubicados en el estado de Querétaro y su adaptación a medio ambiente casa habitación.

La toma de muestra de lodos se hizo del fango cubierto totalmente de agua, generalmente a 15 o 20 cm de profundidad.

Esta toma de muestra se realizó con el correspondiente equipo de protección, tapaboca, guantes, bata de laboratorio y botas de caucho para evitar el contacto con piel y boca ya que se han tomado muestras con un olor desagradable que denota crecimiento bacteriano, producción de azufre y gran cantidad de materia orgánica.

Al tomar la muestra se tomo la temperatura inmediatamente y se prosiguió a adaptarlas a temperatura de 22-24°C, mismas que trataron de mantenerse constantes y en agitación con ayuda de una incubadora marca INCU-SHAKER de 10L de capacidad . Los lodos estuvieron en adaptación 24 horas antes de hacer las pruebas pertinentes para la medición de diferencia de potencial.

Durante la tercera etapa, haciendo uso de las “muestras de lodo estandarizadas” se realizaron pruebas de rendimiento de electrodos tanto de materiales como de forma y ubicación de ánodo y cátodo en la media celda, fue aquí en donde se observó y reportó el crecimiento de biopelícula alrededor de los electrodos.

Se probaron diferentes materiales para el cátodo: Plata, Cobre, Grafito, Fe galvanizado, estos sin darle forma alguna al alambre solo se introdujo dentro del lodo. Se observo que la mejor conductividad era con el Fe galvanizado y se procedió a darle algunas formas al alambre para ver si se podía mejorar obtener mejor rendimiento en la diferencia de potencial.

En la cuarta etapa se introdujo para las pruebas alga espirulina *Spirulina maxima* en la cámara catódica como agente productor de oxígeno que promueva la eficacia de la reacción de oxidación descrita para la CCM. Se ensamblaron CCM para la prueba de la generación de una celda de combustible simbiótica utilizando envases con 200 ml de lodo estandarizado un alambre de fierro en espiral con terminación en el centro con fama cóncava introducido en el lodo sin salida a la cámara catódica y alambre de cobre inserto en fibra como ánodo. En la cámara anódica se introdujo alga espirulina inoculada en diferentes formas para probar diferencia de potencial y duración de la celda.

Como un ejercicio de crowdsourcing en una quinta etapa se hizo llegar una invitación por medios electrónicos a conocidos que radican en diferentes partes del mundo, la mayoría de ellos en hemisferio norte, para solicitarles que nos apoyaran en la construcción de tres CCM y tomaran las lecturas de potencial eléctrico y flujo de electrones en un periodo de un mes, de la misma manera se les envió una guía para la construcción de las mismas que refiere los materiales y paso por paso el modo de ensamblar y construir una CCM como la anteriormente probada con lodos de un ojo de agua ubicado en el municipio del Marquez del estado de Querétaro.

Se solicitó a las personas que aceptaron participar en éste ejercicio que durante la semana del 5 al 11 de febrero (2017) recolectaran lodo del fondo de algún ojo de agua preferentemente de agua no corriente o sin caudal cercano a su localidad, para la toma de muestra se indicó adentrarse alrededor de un metro y medio y que además registraran la temperatura ambiente en el momento. Se recomendó que esta actividad se hiciera entre las 12:00 del día y las 16:00 horas ya que el sol habría calentado la masa de agua lo que activaría el metabolismo bacteriano.

Una vez echa la recolección les pedimos a los participante de la prueba que el agua con lodo la mantuvieran a temperatura ambiente de casa habitación y construyeran utilizando los materiales indicados tres Celda de Combustible Microbiano.

Después de armar tres CCM por participante se solicitó que 24 horas después se hiciera mediación del voltaje y amperaje producido por cada celda, registraran los datos y nos los hicieran llegar, lo mismo después de 7, 14, 21 y 28 días.

Cada grupo de tres celdas construidas en una región del mundo se le ha reconocido como tratamiento ya que se utilizó un tipo de lodo caracterizado por la microbiota de la región, la temperatura, la concentración de nutrientes, la calidad del agua etc, que determinan las colonias de microorganismos y la concentración de cada uno específicamente, así como la eficiencia en conjunto en la deposición de electrones en el ánodo para su posterior flujo por el circuito.

De los datos registrados se obtuvieron parámetros estadísticos para describir los tratamientos por región, se realizó un análisis estadístico ANOVA para conocer si existe diferencia estadística debida a los tratamiento y posteriormente se hizo una prueba de Tukey que permite identificar si existe diferencia estadística significativa entre tratamientos.

## Resultados

### Primera etapa

Como puede apreciarse en la tabla 1, se usaron una diferentes sustratos y materiales para el ánodo, manteniendo el cátodo de cobre.

Las celdas necesitan ser alimentadas constantemente si se pretende propiciar el crecimiento de MO que consumen glucosa y fructosa.

Se observó también que las celdas se deshidratan de una semana a otra, la deshidratación impide la lectura de la diferencia de potencial hasta que se humedece nuevamente.

N	Can t./ vol.( ml)	Mate ria: gluco se	Materi al: ánodo	Proced en cia del lodo	Fecha: introduc ción del ánodo	Diferencia potencial (V)		
						05/10/15	12/10/15	19/10/15
1	200	Azúca r	Grafito	maceta	30/10/15	0,09	0,05	0
2	250	Miel	Alumin io	maceta	01/10/15	0,59	0,05	0
3	200	Merm elada	Grafito	maceta	30/10/15	0,59	0,15	0
7	200	Merm elada fresa	Alumin io silicio	maceta	31/10/15	0,05 0,07	0,52	0
8	200	Merm elada fresa, espesa	Fierro	Tierra UAQ	29/10/15	0,97	0,45	0
9	200	Merm elada fresa	Al y silicio	maceta	29/10/15	0,72	0,47	0

**Tabla 1** Primera etapa. Resultado de la construcción de celdas de CCM con lodo, diferente material para electrodos y sustrato añadido

El metabolismo de la fermentación de la glucosa y fructosa llevada a cabo por levaduras mayoritariamente no es una alternativa para la construcción de una CCM que sea autosustentable ya que la diferencia de potencia disminuye radicalmente a los 21 días.

Esto es congruente con lo encontrado en la literatura que señala que recientemente se ha demostrado en cultivos mixtos que los microorganismos fermentativos pueden tener poca o nula capacidad para transferir electrones al ánodo.

Sin embargo, su metabolismo contribuye a la generación de energía en la CCM (Richter et al., 2008) ya que aportan subproductos que pueden ser utilizados como sustratos por otras poblaciones microbianas, permitiendo el establecimiento de interacciones sintróficas.

Kiely et al. (2011) discuten diversas publicaciones que caracterizan la comunidad microbiana de los sistemas bioelectroquímicos destacan procesos sintróficos específicos que capacitan a una biopelícula para la generación de corriente eléctrica a partir de un sustrato.

La sintrofia consiste en que ciertos microorganismos hidrolizan y fermentan compuestos orgánicos complejos y otros utilizan los subproductos para la generación de corriente.

De esta primera etapa se concluye que se necesita encontrar una muestra de lodo con bacterias endógenas que estén produciendo una cantidad congruente de electrones por un periodo de tiempo más prolongado.

Segunda etapa:

En la siguiente tabla se encuentran los resultados obtenidos en la etapa dos: lugar de la recolección de muestras de lodos, temperatura de recolección, descripción física del lodo y diferencia de potencial obtenido al momento de armar la celda el mismo día.

La diferencia de potencial se midió utilizando un ánodo de Fe/Zn y cátodo de cobre.

Las coordenadas de los ojos de agua mencionados en las tablas son los siguientes:

Ojo de agua Residual La Griega, Querétaro. 20.672689, -100.240084; Presa Juriquilla Querétaro: Juriquilla, Querétaro. 20.695597, -100.456327 y Presa Santa María Begoña: Santa María Begoña, Querétaro. 20.751840, -100.317845.

Muestra	Fecha de recolección	Ubicación	Temperatura de toma de muestra/ °C	Observaciones	Descripción física del lodo	Diferencia de potencial (V)
1	2 de diciembre 2015	Presas de Juriquilla Santa Rosa Querétaro	29	El lodo no se encontraba cubierto por agua	Lodo café oscuro, se deshidrata con facilidad	max 0.9
2	15 de diciembre del 2015	Presas de Juriquilla Santa Rosa Querétaro	26	El lodo estaba totalmente cubierto por (5 cm) de agua		max 0.94
3	8 de enero 2016	Saldarriaga Querétaro	10	El lodo estaba cubierto por 15 a 20 cm de agua	El lodo parte tener buena cantidad de materia orgánica pasto sobre todo	max 0.64
4	20 de enero 2016	Presas Santa María Begoña	5	El lodo estaba cubierto de agua 15 20 cm	Alga, arena parda, conchas Temperatura de toma de muestra muy baja.	max 0.56
5	6 de marzo	Corregidora Querétaro	12	El lodo estaba cubierto de agua 10 cm	Lodo café claro, temperatura de toma de muestra baja	max 0.76
6	8 de abril	Laguna con agua residual La Griega	27	El lodo estaba húmedo pero se tomo de la superficie del canal de salida.	Mal olor (sulfídrico), poca consistencia, color verdoso	max 0.97
7	8 de abril	Presas Santa María Begoña	24	El lodo estaba cubierto de agua 15 cm	Alga, arena parda, conchas	max 0.96
8	8 de abril	Presas Santa María Begoña	22	El lodo estaba cubierto de agua 30 cm	Alga, arena parda, conchas	max 1V

**Tabla 2** Segunda etapa. Resultado de la construcción de celdas de CCM con lodo, diferente material para electrodos y sustrato añadido

Fuente *Elaboración propia*

Las bacterias productoras de electrones son bacterias por lo general mesófilas que gustan de temperaturas superiores a los 25°C.

Aunque la toma de muestra se trato de hacer siempre a las 11am, las variaciones climáticas influyeron en la variación de la temperatura al momento de tomar la muestra.

Aquellas muestras que no alcanzaron una mínima de diferencia de potencial de 0.85 V a los 5 días de haber introducido el cátodo se desecharon como posibles candidatos para la construcción de más CCM.

### Tercera etapa

En la tabla 3 se muestran los promedios de tres celdas construidas por cada arreglo de electrodos usado, las celdas fueron construidas con “lodos estandarizados” en incubadora a 32°C con agitación durante 24 horas.

La diferencia de potencial se midió todos los días durante una semana y se registró el máximo promedio entre las tres celdas por tratamiento.

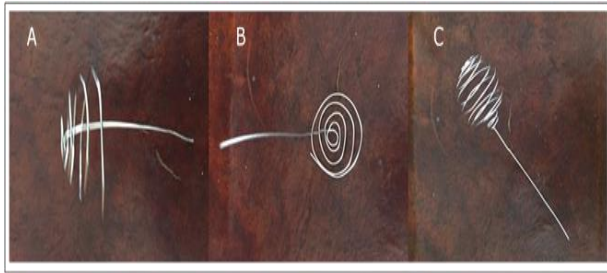
Tratamiento	Arreglo de electrodos en la CCM	Max diferencia de potencial promedio detectada en CCM por tratamiento.
1	Cátodo de plata , ánodo de cobre	0.97
2	Cátodo de Fe galvanizado, ánodo de cobre	0.98
3	Cátodo de grafito , ánodo de cobre	0.78

**Tabla 3** Tercera etapa. Diferencia de potencial reportada con los distintos materiales probados para el uso de ánodo y cátodo en la CCM

Fuente: *Elaboración propia*

Una vez seleccionados los materiales para el ánodo y cátodo, se probaron distintos acomodos en las medias celdas. A continuación se muestran algunas de las formas dadas a los electrodos probados:





**Figura 4** A. Electrodo en espiral con forma cóncava, B. Electrodo en espiral plano con salida por el centro y C. Electrodo en espiral con forma de esfera

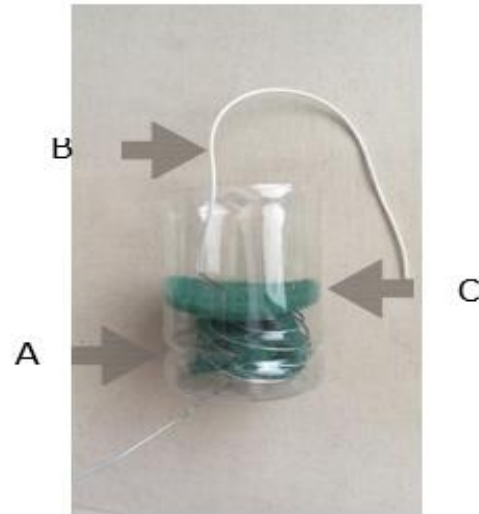
Cada arreglo se probó por triplicado, en la tabla que sigue se muestra la máxima diferencia de potencial promedio por tratamiento en el lapso de una semana.

Tratamiento	Diferentes formas de construcción del ánodo y disposición en la cámara anódica de la CCM	Max diferencia de potencial detectada
1	Alambre de hierro sin forma alguna introducido en el lodo salida por la cámara anódica	0.95
2	Alambre de hierro sin forma alguna introducido en el lodo salida a la cámara catódica.	0.97
3	Alambre de hierro en espiral con terminación en el centro introducido en el lodo salida a la cámara catódica.	0.99
4	Alambre de hierro en espiral con terminación al final de la espiral introducido en el lodo salida a la cámara catódica.	0.98
5	Alambre de hierro en espiral con terminación en el centro con forma cóncava introducido en el lodo y con salida a la cámara catódica.	1.00

**Tabla 4** Tercera etapa. Diferencia de potencial reportada utilizando diferentes formas en la construcción del ánodo de Fe galvanizado y cátodo aéreo de cobre.

Fuente: *Elaboración propia*

Se observó que la forma y extensión del ánodo es definitiva en la producción de diferencia de potencial y corriente en el sistema: tiene mayor eficiencia en el ánodo en espiral que si se deja solo varilla vertical de hierro galvanizado; también se observó que mientras más extendido se encuentre el electrodo mayor será la diferencia de potencial y corriente eléctrica producida.



**Figura 5** Elementos de la CCM: A) ánodo de Fe/galvanizado en forma de espiral cóncava, B) cátodo de cobre sobre fibra, C) contenedor de pet reciclado

Fuente: *Elaboración propia*

Se reiteró que tiene mayor diferencia de potencial registrada con el ánodo de hierro galvanizado en espiral y salida por abajo de la cámara anódica en comparación con ánodo en espiral con salida por la cámara catódica. Lecturas de voltaje por encima de 0.9 V a los 20 minutos de haber introducido el cátodo de hierro galvanizado en espiral. La diferencia de potencial se eleva y estabiliza a los tres días, que coincide con la formación visible bio-película sobre el cátodo de hierro.

Cuarta etapa

Para las pruebas se introdujo micro alga espirulina Spirulina maxima en la cámara catódica como agente productor de oxígeno. El oxígeno es el aceptor final de los electrones producidos por las bacterias que depositan sobre el ánodo y viajan por el circuito eléctrico hasta llegar al cátodo.

A continuación se muestran los tres grupos de tres celdas cada uno y los promedios presentados al hacer mediciones mensuales de voltaje.

Las celdas se construyeron usando fibra inoculada de alga espirulina por una semana para dividir la cámara anódica de la catódica.

Grupo	vol. (ml) total de	Material ánodo/ procedencia del lodo	Fecha de construcción de la celda	Diferencia de potencial (Volts)			
				02/7/ 16	2/8/ 16	2/9/ 16	
1	300	Fe/Cu	Estandarizado	30/6/16	0.96	0.98	0.90
2	250	Fe/Cu	Estandarizado	01/6/16	0.95	0.97	0.92
3	200	Fe/Cu	Estandarizado	0/6/16	0.99	1	0.89

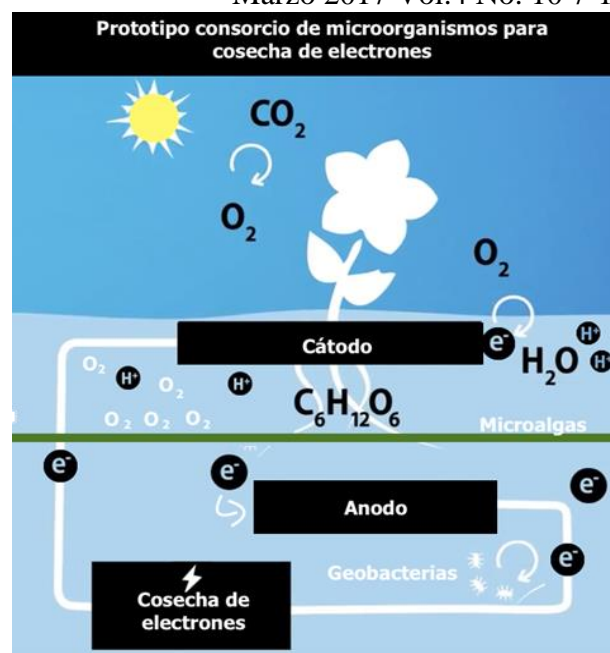
**Tabla 5** Cuarta etapa. Diferencia de potencial reportada al inocular micro algas y ponerlas en actividad en la cámara catódica

Fuente: Elaboración propia

Los tres grupos de CCM se mantuvieron a temperatura ambiente constante (22-23°C) y se mantuvo el agua 0.5 cm arriba de la fibra inoculada de *Spirulina maxima*. Por lo que ambas cámaras estuvieron sumergidas en agua procurando, la cámara catódica esté en contacto con el oxígeno y gases del ambiente.

La introducción de las microalgas permite mantener el flujo de oxígeno constante como receptor final de electrones en la celda de combustible microbiana, y la producción de fuentes de alimentación principalmente para las geobacterias que colonizan la cámara anódica.

La introducción de las microalgas a la celda de combustible microbiana ha permitido aumentar el tiempo de vida útil de las CCM probadas en laboratorio ya que anteriormente se había registrado una caída de la diferencia de potencial al mes y una semana en la mayoría de las CCM construidas dando valores entre 0.35 V y 0.55 V.



**Figura 5** Modelo del funcionamiento del biosistema productor de electricidad

Fuente: Elaboración propia basado en imagen de plant-e

## Conclusiones

Se pudieron probar distintos materiales para el arreglo de electrodos, el ánodo de hierro galvanizado y el cátodo de cobre se verificaron como el mejor arreglo para que a partir de una muestra de lodo estandarizado, con bacterias endógenas, a temperatura constante de 20 a 22°C exista producción constante de electrones con una diferencia de potencial de 1V, el amperaje se reporta entre 0.30 y 0.35 mA. La introducción de las microalgas *Spirulina maxima* a las CCM ha permitido ampliar su vida útil de un mes y medio a tres meses con actividad constante, con posibilidad de mantener la vida útil de la celda aun más tiempo con los cuidados pertinentes.

Entre las observaciones mas destacadas de este trabajo se puede decir que la forma del ánodo es determinante para tener una mayor eficiencia de la CCM, el alambre de 1mm de hierro galvanizado con forma de media esfera y salida por la cámara anódica resulto ser el mejor arreglo.

Es necesaria una fuente de celulosa o glucosa para mantener activa la celda, la inclusión de microalgas en la cámara catódica como agente productor de oxígeno como aceptor final de los electrones del circuito eléctrico, permite que las células de *Spirulina* maximamente alimenten al morir a las geobacterias de la cámara anódica manteniendo su metabolismo activo.

Utilizando botellas de pet recicladas, cátodo de cobre, ánodo de hierro galvanizado y una fibra para separar las medias celdas se ha conseguido un costo de construcción de la celda cien veces menor al de los prototipos reportados en la literatura, ya que comúnmente se usan cajas de acrílico a la medida, membranas iónicas para separar las medias celdas y ánodos de platino.

### Referencias

American Chemical Society, 2005. Química: un proyecto de la American Chemical Society. España, Ed. Reverté

Bond, D.R., Lovley, D.R. 2003 Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 1548-55

Borjas H. Z. 2012 Biodegradación electrónica de acetato en pilas de combustible Microbianas. universidad Rey Juan Carlos, Alcala de Hnares España.

Cha, J., S. Choi, H. Yu, H. Kim y C. Kim, Directly applicable microbial fuel cells in aeration tank for wastewater treatment, *Bioelectrochemistry*: 78(1), 72-79 (2010).

Park ML, M.V. Guettler, M.K. Jain and J.G. Zeikus. 1999 "Microbial utilization of electrically reduced neutral red as the sole electron donor for growth and metabolite production", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 67, No. 7, pp.2912-2917, July, 1999

F. Scholz and U. Schoröder. 2003. "Bacterial batteries", *Nature*, Vol.21, No.10, pp.1151-1152, October, 2003

Franks Ashley E., Kelly P. Nevin. 2010. Microbial Fuel Cells, a current review. *Appl. Energies*. 3, 899-919.

Huang L., J.M. Regan y X. Quan, Electron transfer mechanism, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells, *Bioresource Technology*: 102(1), 316-323 (2011).

He, Y-R y otros nueve autores, Electricity generation from dissolved organic matter in polluted lake water using a microbial fuel cell (MFC). *Biochemical Engineering Journal*: 71(No.), 57-61 (2013).

Ieropoulos I. A., J. Greenman, C. Melhuish and J. Hart. 2005 "Comparative study of three types of microbial fuel cell". *Enzyme and Microbial Technology*, Vol.37, pp.38-245, March, 2005.

Kiely, P.D., J.M. Regan y B.E. Logan, The electric picnic: Synergistic requirements for exoelectrogenic microbial communities, *Current Opinion in Biotechnology*: 22(3), 378-385 (2011).

Logan, B.E. y J. M. Regan, Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells, *Trends in Microbiology*: 14(12), 512-518 (2006).

Lovley, D.R., Powering microbes with electricity: direct electron transfer from electrodes to microbes, *Environmental Microbiology Reports*: 3(1), 27-35 (2011).

Lovley, D.R., 2008 The microbe electric: conversion of organic matter to electricity, *Current Opinion in Biotechnology*: 19(6), 564-571.

Du, Z., H. Li y T. Gu. 2005 A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy, *Biotechnology Advances*: 464-482.

Pant, D., G. Van Bogaert, L. Diels y K. Vanbroekhoven. 2010 A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production, *Bioresource Technology*: 101(6), 1533-1543

Park, D.H y J.G. Zeikus, Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation, *Biotechnology and Bioengineering*: 81(3), 348–355 (2003).

Sharma, V. y P.P. Kundu, Biocatalysts in microbial fuel cells, *Enzyme and Microbial Technology*: 47(5), 179- 188 (2010).

Strik D, Timmers R, Helder M, Steinbusch K and Buisman C. 2011. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, Vol. 29, No. 1. Jan- 2011.

Strik PBTB, Terlouw H. Hamelers HVM, Snel JFH, Buisman CJN. 2008 Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC) . *Appl Microbiol Biotechnol*

Rabaey, K., G. Lissens, S. Siciliano y W. Verstraete, A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency, *Biotechnology Letters*: 25(3), 1531–1535 (2003).

Reguera, G. 2006, Biofilm and nanowire production leads to increases current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells, *Applied Environmental Microbiology*: 72(11), 7345-7348 (2006).

Richter, H. et al. Electricity generation by *Geobacter sulfurreducens* attached to gold electrodes, *Langmuir*: 24(8), 4376-4379 (2008).

Yi, H. et al, Selection of a variant of *Geobacter sulfurreducens* with enhanced capacity for current production in microbial fuel cells, *Biosensors and Bioelectronics*: 24(12), 3498-3503 (2009).