

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Estudio de caso sobre la energía a partir de plantas vivas
y propuesta de prototipo**

Sallyslain Gisley Solognier Balcacer

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniería Ambiental

Dirección
Angélica María Candela Soto
Qca. MSc. PhD
Codirección
Viviana Sánchez Torres
Ing. Qca. PhD

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga
División de Ingenierías y Arquitectura
Facultad de Ingeniería Ambiental
2020

Tabla De Contenido

	Pág.
Resumen	10
1. Introducción	12
2. Objetivos	16
3. Marco Referencial	17
3.1. Marco Conceptual	17
3.1.1 Celdas De Combustible Microbianas Aplicadas En Plantas (CCM-P)	17
3.1.2 Plantas usadas en el sistema de CCM-P	18
3.1.3 Comunidad Microbiana en CCM-P	19
3.1.4 Microcosmos: Celdas de combustible microbianas en terrarios (CCM-T)	19
3.2. Marco De Antecedentes	21
4. Metodología	26
4.1 Proceso De Análisis	26
4.2 Población Y Muestra	28
4.3 Especies De Plantas Capaces De Producir Energía En La Región	29
4.4 Factores Y Parámetros Para El Funcionamiento De Una CCM-P	29
4.5 Diseño Del Prototipo: Celda De Combustible Microbiana En Terrarios	29
4.6 Recomendaciones Y Expectativas	29
5. Resultados Y Discusión	30
5.1 Análisis Cienciométrico De Los Procesos De Generación De Energía Eléctrica A Partir De Celdas De Combustible Microbianas Aplicadas En Plantas Desde El 2010 Hasta El 2020	30
5.1.1 <i>Tipo De Documento Y Lenguaje</i>	30
5.1.2 Producción De Investigación Anual	31
5.1.3 <i>Distribución Por Países</i>	32
5.1.4 <i>Autores En La Investigación</i>	37
5.1.5 Relevancia En Los Temas De Investigación De Esta Tecnología	38
5.2 Especies De Plantas Capaces De Producir Energía En La Región	39
5.2.1 Energía A Partir De Plantas: Resumen De Plantas Usadas En CCM	40
5.2.2 Diversidad En Colombia Capaz De Generar Energía	41
5.3 Factores Y Parámetros Escenciales Para El Óptimo Funcionamiento De Una CCM-P	42

ESTUDIO DE CASO: ENERGÍA A PARTIR DE PLANTAS VIVAS	4
5.4 Diseño Del Prototipo	44
5.4.1. <i>Materiales de ánodo</i>	46
5.4.2. <i>Materiales del cátodo</i>	47
5.4.3. Membrana o separadores en CCM-P	47
5.4.4. <i>Principio del prototipo</i>	49
5.5. Recomendaciones	51
5.6. Expectativas	52
6. Conclusiones	53
7. Bibliografía	55

Lista De Tablas

Tabla 1. <i>Resumen de sistemas de celdas de combustible microbiana aplicadas a plantas y las especies de plantas usadas en cada experimento.</i>	23
Tabla 2. <i>Resumen de formas de implementación del ánodo y el cátodo en diversos experimentos.</i>	25
Tabla 3. <i>Factores y parámetros para tener en cuenta respecto al funcionamiento de las CCM en plantas.</i>	42

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo ilustrativo. Proceso interno: 1. Bajo la influencia del sol, las plantas producen azúcares, oxígeno del agua y el CO ₂ captado, es decir, fotosíntesis; 2. Los azúcares no permanecen en las hojas, si no que son transportados hasta las raíces; 3. Algunos de estos azúcares son excretados por las raíces; 4. Los microorganismos que se encuentran de forma natural en la rizosfera, rompen los azúcares, liberando electrones y protones; 5. Los electrones son recolectados en el ánodo, el cual se encuentra dentro de la matriz del suelo; 6. Los electrones que fluyen por el conducto puede producir electricidad, y a su vez, continúan su viaje hacia el cátodo, en donde, en contacto con el oxígeno y humedad del ambiente y los protones liberados en el 4 paso, reaccionan y forman agua (Koen Wetser, 2016). <i>No representa el diseño del prototipo final.</i>	20
Figura 2. Diagrama de flujo para el análisis cuantitativo.	26
Figura 3. Análisis de los diferentes tipos de documentos.	30
Figura 4. Publicaciones referentes a las celdas de combustible microbianas en la base de datos de Scopus dentro del periodo del 2010 a noviembre del 2020.	31
Figura 5. Mapa de registro de publicaciones entre el 2008 y el 2010. Fuente: Autora.	33
Figura 6. Mapa de registro de publicaciones entre el 2010 al 2015. Fuente: Autora.	34
Figura 7. Mapa de registro de publicaciones entre el 2010 - 2020. Fuente: Autora.	35
Figura 8. Autores registrados por país (2010 - 2020)	36
Figura 9. Análisis del registro completo de publicaciones por país hasta la actualidad. 2010 – 2020.....	36
Figura 10. Análisis del número de artículos por autores	37
Figura 11. Visualización de la red respecto a los temas de investigación sobre celdas de combustible microbianas en plantas. Imagen extraída del VOSviewer.	38
Figura 12. Registro de plantas por familias.	39
Figura 13. Diseño del prototipo. -1. Cúpula. -2. Segmento destinado para soporte y distribución de los electrónicos. -3. Maceta. a. Agua. b. Soporte del suelo. c. ánodo. d. cátodo. Diseño: Autora.	45

Figura 14. <i>Configuraciones de las celdas de combustible microbianas en terrarios. A. Cúpula. B. Soporte. C. Maceta y reserva de agua.</i>	48
Figura 15. <i>Boceto representativo del prototipo de celdas de combustible microbianas en plantas de terrario. Diseño: Autora.</i>	49
Figura 16. <i>Proceso de obtención de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas aplicadas en terrarios.</i>	51

Lista De Abreviaturas

CCMs	Celdas de Combustible Microbianas
CCM-P	Celdas de Combustible Microbianas en/aplicadas en Plantas
CCM-T	Celdas de Combustible Microbianas en Terrarios
MFC	Microbial Fuel Cell
P-MFC	Plants on Microbial Fuel Cell
T-MFC	Terrarium Microbial Fuel Cell

GLOSARIO

Caja de Ward: Es un contenedor protector para plantas, el cual se encuentra completamente sellado. Fue usado, principalmente, en el siglo XIX, para transportar plantas extranjeras a Europa (Bagshaw Ward, 1899).

Vivario: Es un contenedor de vidrio en donde se permite la experimentación y la observación de macro y microsistemas vivos (*Cambridge Advanced Learner's Dictionary and Thesaurus*. URL: <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/vivarium?q=Vivarium>).

Terrario: Es un tipo de vivario en donde preserva un ecosistema vivo, el cual incluye plantas, hongos, reptiles, anfibios, entre otros (Brinker, 2012).

Mesocosmos: Es un sistema experimental que parte de un ecosistema natural (Clark, Choi, & Douglas, 2018). limitado y parcialmente aislado para así cerrar la brecha entre el laboratorio y el mundo real en las ciencias ambientales (Kwak & An, 2016).

Microcosmos: Recreación de un ecosistema completo, en un entorno de laboratorio interior o exterior (Clark et al., 2018).

Resumen

Ante la constante demanda de energía eléctrica, diversas tecnologías son estudiadas para así disminuir la dependencia a las energías convencionales que han llevado a un punto de quiebre las condiciones del medio ambiente. De esta forma, dentro de las biotecnologías recientes se encuentran las celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas, la cual será el pilar de esta investigación.

Así mismo, se busca realizar un estudio cuantitativo con la base de datos de Scopus, que permita la comparación de los documentos enfocados en la investigación respecto a la producción de energía eléctrica limpia a partir de celdas de combustible microbianas en plantas (CCM-P) con el fin de analizar los factores que principalmente abarcan el funcionamiento correcto de una CCM-P y estudiar la posibilidad de implementar las CCMs en plantas aisladas dentro de un microcosmos cerrado, es decir, un terrario. Esta investigación busca plantear un prototipo ideal basándose en los resultados, previamente comparados, de diversos autores; el análisis prospecta posibles escenarios en la implementación de la biotecnología autosostenible.

Palabras Claves: Microcosmos, Terrario, Celdas de Combustible Microbianas en Plantas (CCM-P), Energía sostenible, Fotosíntesis, Biotecnología.

Abstract

In the face of the constant demand for electrical energy, various technologies are studied to reduce dependence on conventional energies, which have led to a breaking point in environmental conditions. Thus, recent biotechnologies include microbial fuel cells applied to plants, which will be the mainstay of this research.

Likewise, the aim is to carry out a scientometric study with the Scopus database, which allows the comparison of documents focused on research regarding the production of clean electrical energy from microbial fuel cells in plants (P-MFC) to analyze the factors that mainly encompass the correct functioning of a P-MFC and study the possibility of implementing the MFC in isolated plants within a closed microcosm, in other words, terrarium. This research seeks to propose an ideal prototype based on the previously compared results of various authors, the analysis prospects possible scenarios in the implementation of self-sustaining biotechnology.

Keywords: Microcosm, Terrarium, Microbial Fuel Cell (MFC), Plant Microbial Fuel Cell (P-MFC), Sustainable energy, Photosynthesis, Biotechnology.

1. Introducción

El constante crecimiento poblacional ha generado un sin número de alteraciones y afectaciones al ambiente biofísico, provocado por la necesidad comunitaria o por apetencia individual (Koen Wetser, Sudirjo, Buisman, & Strik, 2015), esto se puede reflejar desde el surgimiento de la industrialización y la mecanización, en donde, por necesidad energética, surgió la dependencia al carbono a mediados del siglo XX. La carbono-dependencia ha producido una acumulación significativa de gases de efecto invernadero en la atmósfera, a causa del uso indiscriminado de combustibles fósiles; generando así, gases como CO₂, SO_x, y entre otros (Kumar, Kumar, Kumar, Malyan, & Pugazhendhi, 2019), los cuales han llevado a cambios drásticos en la calidad del aire, y por ende, en la calidad de vida en general.

Ante las crecientes problemáticas que aquejan a las energías convencionales, las cuales han llevado a una crisis mundial por su uso indiscriminado y su característica limitada ante las cantidades existentes (Kabutey et al., 2019), una alternativa de interés es plantear investigaciones en los diversos campos de la producción de energía de forma auto sostenible, en este caso, energía obtenida a partir de Celdas de Combustible Microbianas. Las CCMs logran mantener una estabilidad entre la relación humano-medioambiente (Strik et al., 2011); ya que este se basa en un sistema microbiano electroquímico, en donde se encuentran las celdas microbianas de desalinización, encargadas de la desalinización del agua y el reúso benéfico de esta; electrosíntesis microbiana, para la producción de químicos, al igual que las celdas de electrólisis microbiana y, por último, las celdas de combustible microbianas, las cuales se basan en la producción de electricidad; por ende, el interés de esta investigación se enfoca en la generación de energía, y de igual forma las celdas de combustible microbianas son una categoría basada en la conversión de materiales biodegradables en energía eléctrica por medio de procesos electroquímicos. Las CCMs

se divide en celdas de combustible microbianas de tratamiento de aguas residuales; celdas de combustible microbianas de sistemas bénticos, o también conocidos como sedimentos; celdas de remediación microbiana, usada en la remediación de los suelos. Y finalmente, las celdas solares microbianas, es decir, celdas microbianas que usan organismos fotosintéticos, tales como, celdas solares microbianas en plantas, o celdas de combustible microbianas en plantas; celdas solares microbianas fototróficas; y celdas solares microbianas en algas, o fotobioreactores (H. Wang & Ren, 2013). Sin embargo, a la fecha algunos estudios concluyen que dicha investigación genera una baja producción de electricidad (Chicas, Sivasankar, Omine, Valladarez, & Mylsamy, 2018), lo cual provoca una incertidumbre ante las aplicaciones industriales de las CCMs. Además, existen otras limitaciones de esta tecnología, tales como, el alto costo en las celdas de combustible microbianas en tratamiento de aguas residuales, debido al requerimiento de colectores y membranas; la aplicación a largo plazo, comprometiendo el material y el diseño del electrodo; la crisis energética, la contaminación ambiental, y entre otros (Kumar et al., 2019). Cabe reconocer que según Wang & Ren las celdas de combustible microbianas en plantas son las más populares dentro de las celdas solares microbianas, lo que abre paso a plantear la necesidad del estudio acerca del potencial que conservan las plantas para producir biomasa, y así generar un valor significativo para la transformación a energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas (CCM-P) (Chicas et al., 2018); esta tecnología es, significativamente sustentable, porque su proceso se basa en una conversión limpia sin emisiones, y no tiene competencia por tierra cultivable (Sivasankar, Mylsamy, & Omine, 2018), puesto que planteando la comparación por competencia por tierra cultivable, cabe reconocer que los actuales procesos de producción de bioenergía tales como, el bioetanol o el biodiesel, compiten con la tierra cultivable para la producción de comida. Esto afectaría notablemente en el incremento de los precios, lo que

concluiría con un aumento en la tasa de desnutrición, entre otros factores. Además, otro limitante en la producción de esta bioenergía surge con el incremento de los incentivos para deforestar aclamando tierra para producción de comida o bioenergía (Ruud A. Timmers, Strik, Hamelers, & Buisman, 2010).

Las celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas son un sistema con la estrategia de aprovechamiento de bioelectricidad, la cual, si se quiere pensar en aplicaciones más grandes, se puede plantear en una conexión en serie de múltiples unidades para así aumentar el voltaje del sistema (Kumar et al., 2019); incluso, se podría plantear una idea para la arquitectura moderna, en donde los diseños de techos verdes consideren estas posibilidades, siquiera, por eficiencia en materiales que son consecuentes a la creación de los techos verdes actualmente (Strik et al., 2011). Además, se puede pensar en la tecnología basada en CCM-P, como un aporte significativo para aldeas o comunidades, sociedades o poblaciones las cuales no cuentan con redes de distribución eléctrica (Chicas et al., 2018). Dicho esto, es una energía renovable y sustentable (Ruud A. Timmers et al., 2010), además de ser una producción de energía no destructiva para el medio ambiente (M. Helder et al., 2010). De esta manera, la base de este proyecto radica en la investigación consecuente a la generación de energía eléctrica mediante CCM-P, para así diseñar y sustentar acerca de la viabilidad de producción de energía en un prototipo que aislaría las plantas de las condiciones climáticas naturales, exceptuando el paso de la energía lumínica que provee el sol; a lo que se podría llamar celdas de combustible microbianas en terrarios, CCM-T. Esto se debe a que el sistema solo depende de un proceso natural, la fotosíntesis de las plantas, las cuales fijan el dióxido de carbono del aire para producir materia orgánica, siendo esta la principal fuente de carbono y energía para la mayor parte de organismos (Takanezawa, Nishio, Kato, Hashimoto, & Watanabe, 2010). Su principal aplicación se basaría en el crecimiento de plantas en todas las

situaciones, incluso en aquellas que no son favorables para su desarrollo al aire libre; mediante el proceso fotosintético, el ecosistema se adapta a las condiciones básicas de vida, una atmósfera creada, condiciones de humedad y temperatura óptimas, convirtiéndola, en autosostenible, como el planeta lo es.

Por esta razón, surge el estudio sobre la producción de energía eléctrica a partir de la biomasa y mediante CCMs (Kumar et al., 2019). Aunque se han realizado estudios de esta temática, se requiere aumentar la investigación, ya que, la indagación sobre las CCM-P, es reciente y requiere de un profundo análisis de diversos factores influyentes (Kabutey et al., 2019) (Strik et al., 2011). Este proyecto pretende ahondar en la temática y plantear, de forma teórica, un prototipo ideal basado en la autosostenibilidad de las plantas y su función en conjunto con una CCM. Las celdas de combustible microbianas en terrarios.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Plantear un diseño a escala de laboratorio de un prototipo teórico de celdas de combustible microbianas en terrario (CCM-T), con base en la información obtenida por el estudio cienciométrico.

2.2. Objetivos Específicos

Realizar un estudio cienciométrico de los procesos de generación de energía a partir de celdas microbianas aplicadas en plantas (CCM-P).

Identificar las especies de plantas presentes en la región, con características adecuadas para la producción de energía en celdas CCM-P

Analizar los factores y parámetros principalmente estudiados en el funcionamiento de una celda CCM-P.

Plantear el diseño de un prototipo teórico de celdas de combustible microbianas en terrarios con base a los resultados teóricos previamente estudiados.

Presentar recomendaciones y expectativas acerca del prototipo.

3. Marco Referencial

3.1. Marco Conceptual

3.1.1 Celdas De Combustible Microbianas Aplicadas En Plantas (CCM-P)

La producción de bioelectricidad a partir de las plantas vivas es un concepto el cual ha tomado fuerza en los últimos años, puesto que, se ha generado una crisis económica y energética alrededor del mundo a causa del uso extensivo de fuentes de combustibles no renovables. Por esta razón, es de gran importancia el dedicarse al desarrollo e investigación de sustitutos en los métodos de producción de electricidad (Hublikar, Ganachari, & Yaradoddi, 2019).

Las Celdas de Combustible Microbianas en Plantas o CCM-P (*P-MFC*, por sus siglas en inglés; *Plant Microbial Fuel Cell*), es una tecnología derivada de las Celdas de Combustible Microbianas o CCM (*MFC*, por sus siglas en inglés; *Microbial Fuel Cell*) (Kabutey et al., 2019), el cual funciona con energía solar por medio del proceso fotosintético de las plantas, es decir, no depende de la luz solar directa. La tecnología se basa en la actividad de la rizosfera; los depósitos en la rizosfera son realizados por las raíces de las plantas y estos consisten en secreciones, excreciones, gases y material vegetal muerto. Estos depósitos se descomponen por bacterias naturales que se encuentran en las raíces de la planta (Chicas et al., 2018).

La rizodeposición y la oxidación de estos depósitos por bacterias electroquímicas activas, son los dos principios fundamentales de la tecnología CCM-P. Así mismo, los componentes principales de una celda de combustible microbiana aplicadas en plantas son, plantas vasculares fotosintéticas para fijar el carbono y, producir rizodeposiciones por medio de su sistema de raíces (Chicas et al., 2018); sosteniendo una matriz en donde el ánodo conductor está insertado en el

substrato, y en paralelo, el cátodo colocado en aire o agua para convertir la energía química en bioelectricidad (Kabutey et al., 2019).

3.1.1.1 Materiales Del Ánodo En Las CCM-P. Los materiales más frecuentes, en cuanto al ánodo, incluyen carbón (fibras, mallas, esteras, fieltros, brochas, carbón activado granular (CAG), carbón vidrioso) y grafito (barras, granos, gránulos, discos, fieltros). Un experimento, en donde se comparó la idoneidad del carbono granular frente al fieltro de carbono y la tela de carbono; concluyó que, a pesar de que el fieltro de carbono obtuvo la densidad de corriente más alta, los gránulos de carbono resultan más adecuados para las plantas, puesto que se acomodan de acuerdo al crecimiento de la planta; provocando nuevas conexiones eléctricas (Arends, Blondeel, Tennison, Boon, & Verstraete, 2012). Por otro lado, en el 2016 un estudio comparó cuatro diferentes electrodos del ánodo; encontrando diferentes comunidades de microorganismos debido a los distintos materiales usados (Y. Wang et al., 2016), siendo una clave en la formación de comunidades con la capacidad de transferir electrones al ánodo (Chicas et al., 2018).

3.1.1.2 Materiales Del Cátodo En Las CCM-P. Los materiales más comunes para la fabricación del cátodo suelen ser similares a los usados en el ánodo; incluyendo carbón (tela fibra, fieltro, brocha, CAG, recubierto de carbón/ politetrafluoroetileno) y grafito (granulado, placa, esteras, fieltros, y acero inoxidable) (Chicas et al., 2018).

3.1.2 Plantas usadas en el sistema de CCM-P

En múltiples estudios se han implementado diferentes tipos de plantas, con distintos propósitos de investigación; estos incluyen *Arundinella anomala*, *Acorus calamus*, *Arundo donax*, *Brassica juncea*, *Canna indica*, *Canna stuttgart*, *Echinochloa glabrescens*, *Eichhornia crassipes*, *Glyceria máxima*; consorcio de plantas hidropónicas, *Ipomoea aquatica*, *Lemna minuta*, *Lemna*

valdiviana, *Lolium perenne*, *Myrtillocactus*, *Oryz*, *Pennisetum setaceum*, *Phragmites australis*, *Sedum album*, *Sedum hybridum*, *Sedum kamtschat-icum*, *Sedum reflexum*, *Sedum rupestre*, *Sedum sexangulare*, *Sedum spurium*, *Spartina anglica*, *Trigonella foenum-graecum*, *Typha latifolia*; plantas hidropónicas, *Bryophyllum pinnatum*, *Solanum lycopersicum*, *Oryza sativa*, *Lycopodium and Adiantum*; plantas sumergidas, *Hydrilla verticillata*, *Myriophyllum* (Chicas et al., 2018). Por ahora, las salidas de potencia máxima más altas alcanzadas son de *Spartina anglica* con aproximadamente 679 mW/m² (Chicas et al., 2018).

3.1.3 Comunidad Microbiana en CCM-P

La actividad catalítica eléctrica de la rizosfera está estrechamente ligada a los microorganismos específicos que contengan la capacidad de intercambiar electrones a los electrodos; esto al momento de catalizar la oxidación de los substratos. Los análisis de cultivos de una sola especie han indicado que una amplia selección de familias microbianas poseen actividades exoelectrogénicas endógenas, y estas incluyen las *Alcaligenaceae*, *Aeromonadaceae*, *Bacteroidetes*, *Campylobacteraceae*, *Clostridiaceae*, *Desulfuromonadaceae*, *Enterococcaceae*, *Geobacteraceae*, *Pseudomonadaceae*, *Rhodobacteraceae*, *Shewanellaceae*, y *Vibrionaceae* (Chicas et al., 2018). Así mismo, en un estudio que evaluó los diversos materiales en la aplicación de celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas; concluyó que los diferentes materiales otorgaban distintas comunidades microbianas en la superficie del ánodo (Y. Wang et al., 2016).

3.1.4 Microcosmos: Celdas de combustible microbianas en terrarios (CCM-T)

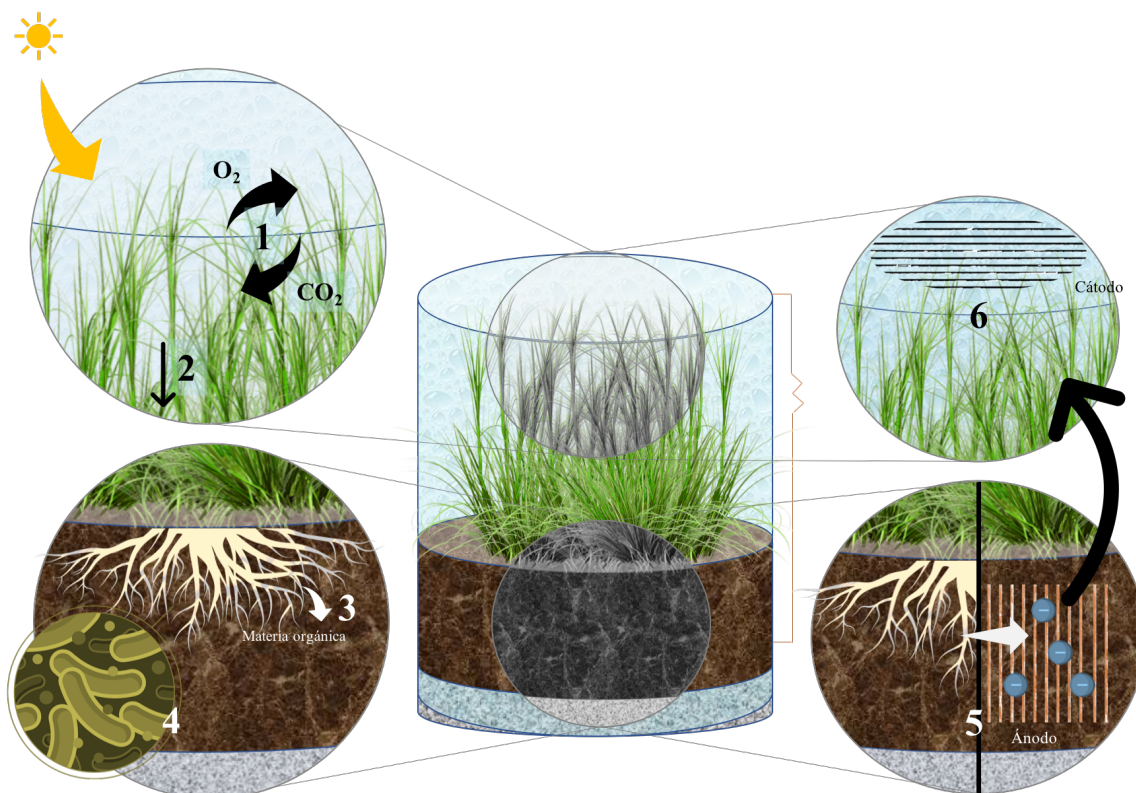
En las ciudades es reconocido la tendencia a una depresión vegetal a causa de diversas actividades antropogénicas que limitan las condiciones necesarias para el crecimiento, en su lugar, se ha creado un ambiente para la proliferación de microorganismos alterados por la contaminación,

es decir, estos se han desarrollado bajo una atmósfera de compuestos nocivos; a esto se le suma las partículas difundidas en el aire interfiriendo con las funciones respiratorias de las hojas, así como en los seres vivos (Bagshaw Ward, 1899).

El estudio de los cambios en la estructura de un ecosistema a causa de cambios en el medio ambiente (disturbios) o por fuerzas internas, se llama dinámica de un ecosistema. Los sistemas experimentales, generalmente, implican dividir una parte de un ecosistema natural que puede enfocarse en experimentos, denominado mesocosmos, o recrear un ecosistema completamente en un entorno de laboratorio interior o exterior, el cual se conoce como microcosmos. Una característica importante de estos enfoques es que eliminar organismos individuales de su ecosistema natural o alterar un ecosistema natural mediante la división puede cambiar la dinámica del ecosistema (Clark et al., 2018). De esta forma, en la Figura 1 se representa el arquetipo de un microcosmos aislado de las condiciones naturales del entorno, a excepción de la luz solar.

Figura 1. Modelo ilustrativo. Proceso interno: 1. Bajo la influencia del sol, las plantas producen azúcares, oxígeno del agua y el CO₂ captado, es decir, fotosíntesis; 2. Los azúcares no permanecen en las hojas, si no que son transportados hasta las raíces; 3. Algunos de estos azúcares son excretados por las raíces; 4. Los microorganismos que se encuentran de forma natural en la rizosfera, rompen los azúcares, liberando electrones y protones; 5. Los electrones son recolectados en el ánodo, el cual se encuentra dentro de la matriz del suelo; 6. Los electrones que fluyen por el conducto puede producir electricidad, y a su vez, continúan su viaje hacia el cátodo, en donde, en contacto con el

oxígeno y humedad del ambiente y los protones liberados en el 4 paso, reaccionan y forman agua (Koen Wetser, 2016). *No representa el diseño del prototipo final.*



3.2.Marco De Antecedentes

En 1910, Porter planteó la idea sobre el potencial de los microbios en el proceso de generación de electricidad (Nitisoravut & Regmi, 2017), sin embargo, más adelante Eugene Rabinowitch, pionero en la exploración del uso directo de la luz solar por medio de celdas fotogalvánicas, propuso que en reacciones químicas ordinarias, la energía de la reacción se da por el calor a partir de la energía cinética incrementada por las moléculas; mientras que en las reacciones electroquímicas, se extraen los electrones al insertar electrodos en la mezcla de reacción (French, 1952). De esta forma, Farrington Daniels, en 1971, expone como la aplicación fotoquímica de la energía lumínica tiene ventajas, puesto que los foto-productos químicos pueden

ser almacenados con una mayor facilidad en comparación con el almacenamiento del calor o la energía (Daniels, 1972).

Dentro de los años 2000, la investigación respecto a esta tecnología incrementó lentamente, sin embargo, surgieron estudios como *Microbial fuel Cells: Methodology and Technology* (Logan et al., 2006), donde diversos autores describieron la complejidad del funcionamiento de una celda de combustible microbiana, puesto que se requiere un análisis de diferentes factores influyentes; ante esto, realizaron una revisión frente a los múltiples materiales y métodos usados para las construcción de Celdas de Combustible Microbianas, y también técnicas usadas para analizar el sistema representado. En 2012, Marjolein Helder menciona la producción de bioelectricidad y biomasa simultáneamente en un sistema, llegando a la conclusión de la posibilidad de generar electricidad sin provocar afectaciones destructivas; incluso, expone a las plantas herbáceas como los mejores por su habilidad en crecimiento y facilidad en producción de energía a partir de celdas de combustible microbiana. Así mismo, en investigaciones contiguas, analizó las alteraciones y afectaciones frente al cambio estacional en Países Bajos; el autor demuestra que las celdas microbianas de combustible en plantas son una tecnología adaptable a las condiciones climáticas, puesto que, al exponerlas al invierno, logró reconocer la influencia negativa de las bajas temperaturas, y a su vez, la capacidad de resiliencia del sistema, puesto que, después del evento, la producción de electricidad retomó su proceso (Marjolein Helder, 2012).

Un año más tarde, las investigaciones acerca de incorporar celdas de combustible microbianas en otros sistemas fueron tomando terreno, en este caso en tratamiento de aguas residuales, trabajando en paralelo con la producción de energía eléctrica (Zhao et al., 2013), y de esta forma demostrar las múltiples aplicaciones. Mahwash Gul y Khuram Ahmad, plantean a las CCM como celdas con ventajas sobre las convencionales, puesto que resultan ser sostenibles al

tener la capacidad de auto repararse, a su vez son eficientes en la producción de energía sin emisiones netas de carbono, puesto que también pueden funcionar ante temperaturas extremas; demostraron, una vez más, la naturaleza resistente y potencial de los microorganismos en las celdas de combustible (Gul & Ahmad, 2019).

En la tabla 1 se muestra el resumen de sistemas de celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas y las especies de plantas usadas y en la tabla 2 se recopila la información de los diferentes ánodos y cátodos utilizados en los diferentes sistemas de celdas microbianas.

Tabla 1. Resumen de sistemas de celdas de combustible microbiana aplicadas a plantas y las especies de plantas usadas en cada experimento.

Especies de plantas	Substratos	Periodo de Operación	Máxima densidad de energía	Aceptador de Electrones	Referencia
<i>Glyceria maxima</i>	Suelo	118 días	67 mW m ⁻²	Gránulos de grafito/ Oxígeno	(Strik, Hamelers (Bert), Snel, & Buisman, 2008)
<i>Oryza sativa L.cv. Sasanishiki</i>	Rizodeposición/ Suelo de arrozal	120 días	6 mW m ⁻²	Filtro de grafito / Oxígeno	(Kaku, Yonezawa, Kodama, & Watanabe, 2008)
<i>Spartina anglica</i>	Grafito granular y Solución Hoagland	119 días	79 mW m ⁻²	Filtro de grafito	(Ruud A. Timmers et al., 2010)
<i>Arundinella anomala</i> <i>Spartina anglica</i> , <i>Arundo donax</i>	Grafito granular/ Rizodisposición	26 semanas	22 mW m ⁻² – 222 mW m ⁻²	Ferricianuro y Oxígeno	(M. Helder et al., 2010)
<i>Oryza sativa cultivar Koral</i>	Suelo de arrozal	72 días	14 mW m ⁻²	Filtro de carbono entrelazado con barras de grafito	(Cabezas, 2010)
<i>Oryza sativa L. cv. Satojiman</i>	Rizodeposición/ Suelo de arrozal	N/A	14 mW m ⁻²	Filtro de grafito/Platino (Pt)	(Takanezawa et al., 2010)
<i>Glyceria máxima</i>	Grafito granular	40 días	80 mW m ⁻²	Filtro de grafito	(Ruud A. Timmers et al., 2012)
<i>Spartina anglica</i>	Microorganismo s en el suelo	365 días	469 mA m ⁻²	Cianuro Férrico	(M. Helder, Strik, Hamelers, Kuijken, & Buisman, 2012)

Especies de plantas	Substratos	Periodo de Operación	Máxima densidad de energía	Aceptador de Electrones	Referencia
<i>Glyceria máxima</i>	Speelzand y amonio rico con ½ de solución Hoagland	85 días	60 mW m ⁻²	Filtro de grafito	(Ruud A. Timmers, Strik, Hamelers, & Buisman, 2013)
<i>Oryza sativa ss. Indica</i>	Grafito granular/ Vermiculita	100 días	61.72 mW m ⁻²	Filtro de grafito entretejido con barras de carbono	(Arends et al., 2014)
<i>Spartina anglica</i>	Medio de crecimiento de las plantas	151 días	679 mW m ⁻²	Filtro de grafito	(Koen Wetser et al., 2015)
<i>Oryza sativa cultivar Koral</i>	Suelo de arrozal y rizodeposición	110 días	15 ± 1 mA m ⁻²	Cátodo de filtro de grafito	(Cabezas, Pommerenke, Boon, & Friedrich, 2015)
<i>Sporobolus arabicus</i>	Suelo	2 meses	120 mW m ⁻²	Cátodo de grafito	(Gilani, Yaseen, Zaidi, Zahra, & Mahmood, 2016)
<i>Brassica juncea</i> <i>Trigonella foenumgraecum</i> <i>Canna stuttgart</i> <i>Sedum album</i> <i>Sedum sexangulare</i> <i>Sedum rupestre</i> <i>Sedum hybridum</i> <i>Sedum reflexum</i> <i>Sedum kamishaticum</i> <i>Sedum purpureum</i>	Mezcla de suelo compostado	30 días	69.32 mW m ⁻² 80.26 mW m ⁻² 222.54 mW m ⁻²	Tela de carbono (Separador de mezcla de arcilla)	(Sophia & Sreeja, 2017)
	Arena, limo, arcilla, material orgánico.	360 días	0.0024 μW m ⁻² 0.0084 μW m ⁻² 0.0155 μW m ⁻² 0.092 μW m ⁻² >0.001 μW m ⁻² >0.001 μW m ⁻² >0.001 μW m ⁻²	Tela de fibra de grafito y fue reemplazado por carbón activado granular (después de 120 días de iniciado el experimento)	(Tapia, Rojas, Bonilla, & Vargas, 2017)
<i>Vetiveria zizanioides Nash</i>	Suelo de jardín	N/A	242 ± 10.5 mA m ⁻²	Alambre de grafito	(Regmi, Nitisoravut, Charoenroongtavee, Yimkhaophong, & Phanthurat, 2018)
<i>Puccinellia distans</i>	Rizodeposición/ Mezcla para macetas	114 días	83.7 mW m ⁻²	Carbón catalizado con manganeso	(Md Khudzari, Kurian, Gariépy, Tartakovsky, & Raghavan, 2018)

Tabla 2. Resumen de formas de implementación del ánodo y el cátodo en diversos experimentos.

Especie de plantas	Ánodo	Cátodo	Circuito eléctrico	Resistencia externa (Ω)	Referencia
<i>Glyceria maxima</i>	Tubo de vidrio envuelto en aluminio, y el compartimiento de lleno con fieltro de grafito en la parte inferior (diámetro de 3,5 cm y 3 mm de grosor) y gránulos de grafito. Altura de 30 cm y diámetro de 3,5 cm	Fieltro de grafito de 8 x 8 cm y 3 mm de grosor	Barras de grafito y alambre de cobre	1000	(Strik et al., 2008)
<i>Spartina anglica</i>	Fieltro de grafito	Grafito granular en un cilindro de vidrio	Alambre dorado pegado a un cobre recubierto de teflón	1000	(Ruud A. Timmers et al., 2010)
<i>Spartina anglica</i> , <i>Arundinella anomala</i> y <i>Arundo donax</i>	Cilindro de plexiglás de 9.9 cm de diámetro. Se llenó con granos de grafito (<1 mm)	Cilindro de plexiglás de diámetro de 12 cm	Barra de grafito puesto en los granos de grafito con un alambre conectado	1000	(M. Helder et al., 2010)
<i>Oryza sativa</i> <i>cultivar Koral</i>	Fieltro de carbono 10 x 10 cm ; 3,18 mm de grosor		Barra de grafito de 5 mm de diámetro	470 y 100	(Cabezas, 2010)
<i>Oryza sativa L.</i> <i>cv. Satojinam</i>	Fieltro de grafito circular, con 15 cm de diámetro y 3 mm de grosor.	Platino	Cables encapsulados con epoxi	100-1000	(Takanezawa et al., 2010)
<i>Glyceria maxima</i>	165 g de grafito granular con diámetros entre 1 y 2 mm, ubicado en un cilindro de vidrio con diámetro de 0,035 m y una altura de 0,30 m.	Beaker PVC con un diámetro de 0,11 mm y una altura de 0,04 m el cual contiene 6 mm de grosor de fieltro de grafito.	Dos alambres dorados de 4 cm pegados a alambre de cobre recubierto con teflón.	900	(Ruud A. Timmers et al., 2012)
<i>Spartina anglica</i>	Tres secciones de fieltro de grafito, 6 mm de grosor y 5 cm de altura	Cátodo químico (Ferrocianuro)	Alambre dorado	300-900	(M. Helder et al., 2012)

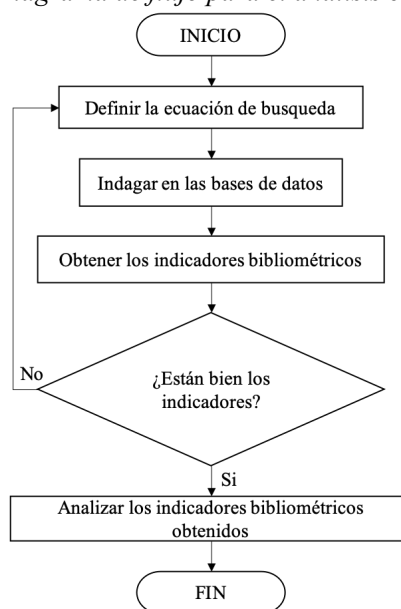
4. Metodología

En primera instancia el estudio se enfocó en el análisis de los principales indicadores bibliométricos relacionados con la investigación sobre las celdas de combustible microbianas en plantas a partir de la consulta de artículos científicos, artículos de revisión y patentes publicados en la última década, 2010 a 2020, en donde se empleó la base de datos de Scopus. Así mismo, para determinar su relevancia en la investigación, se tuvo en cuenta el año de publicación, autor(es) y distribución geográfica. Esto con el fin de crear un prototipo teórico capaz de producir energía eléctrica por medio de celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas dentro de un ecosistema aislado, mejor conocido como terrario; lo que abre el contexto de celdas de combustible microbianas en terrarios.

4.1 Proceso De Análisis

Para el análisis de la información obtenida y la generación de los resultados, fue necesario una secuencia de pasos. En la Figura 2 se ilustran los cuatro pasos a seguir en un estudio cienciométrico para la obtención de información científica (Salinas, Ochoa, & Cardenas, 2018).

Figura 2. Diagrama de flujo para el análisis cienciométrico.



El primer paso se basa en definir la ecuación de búsqueda. Esta investigación de la ecuación está determinada por las palabras claves, puesto que facilitan la obtención de la información a analizar (Salinas et al., 2018). Así mismo, el tema específico en este estudio son las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas. A continuación se presenta la ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY (("Plant microbial fuel cell" OR pmfc OR p-mfc OR "Plant-microbial fuel cell") OR ("microbial solar cell")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010)) AND (EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Article") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Priority Journal")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "NEUR") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "DENT") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PHAR")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "HEAL") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PSYC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "ARTS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "DECI")) AND (EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Asphalt")) AND (EXCLUDE (EXACTKEYWORD , "Adult"))

En el segundo paso, las palabras claves previamente planteadas son usadas para la búsqueda de artículos para el análisis bibliométrico (Salinas et al., 2018). De esta forma, las bases de datos planteadas fueron Scopus, las cuales muestran todos los artículos relacionados con las palabras claves. Estas herramientas facilitan el trabajo en el paso tres, puesto que generan un archivo que permite la obtención de los indicadores bibliométricos. A continuación, se presenta las palabras claves más significativas:

- | | | |
|--|---|---|
| ○ Celdas de combustible microbianas | ○ Fuentes de energía bioeléctrica | ○ Electroquímica |
| ○ Celdas de combustible microbianas en plantas | ○ Celdas de poder en plantas | ○ Celdas de combustible solar |
| ○ Celdas de combustible | ○ Sistemas bioeléctricos | ○ Celdas solares |
| ○ Bioelectricidad | ○ Biocombustibles | ○ Biosensores |
| ○ Bioenergía | ○ Celdas de combustible microbianas en organismos | ○ Reducción electrolítica |
| ○ Fenómeno bioeléctrico | ○ fotosintéticos | ○ Oxígeno |
| ○ Energía solar | ○ Polarización | ○ Celdas de combustible fotomicrobianas |
| | | ○ Oxidación-reducción |

En el tercer paso, con la ayuda de VantagePoint se facilita la visualización de los indicadores biobliométricos, el archivo usado para esta información fue la producida por las bases de datos, con esto se generaron una serie de indicadores a analizar.

En el cuarto paso se realizó el análisis de los resultados obtenidos con el VantagePoint. Estos estudios son mostrados en las Figuras y tablas presentados en los resultados y discusión.

4.2 Población Y Muestra

El número de artículos que fueron estudiados, su población fue de 152, dividido en artículos de investigación, resúmenes de los estados de arte, artículos de revisión, patentes publicados y capítulos de libros. Estos documentos fueron desarrollados entre el periodo de 2010 a 2020. Cabe resaltar que, con base a estos estudios, se buscó estructurar un prototipo teórico a fin de producir energía eléctrica por largos periodos de tiempo. Así mismo, se abarcan los principales tópicos referentes a las celdas de combustible microbianas en plantas.

4.3 Especies De Plantas Capaces De Producir Energía En La Región

Para el análisis de las plantas capaces de producir energía, se realiza una recolección de información mediante la lectura y enlistado de datos referentes al uso de las plantas y su disposición en las celdas de combustible microbianas; además de los valores eléctricos obtenidos hasta la fecha por las diferentes configuraciones. Los resultados generados se mostrarán como una cartilla extra y anexada, dada la importancia de mostrar las ilustraciones botánicas de las especies.

4.4 Factores Y Parámetros Para El Funcionamiento De Una CCM-P

Frente a los factores y parámetros para el funcionamiento óptimo se presenta un esquema en donde se planteen los factores y parámetros significativos dentro del estudio cuantitativo. Dentro del capítulo de resultados se argumentará la estrecha relación con el buen funcionamiento de una CCM-P.

4.5 Diseño Del Prototipo: Celda De Combustible Microbiana En Terrarios

Una vez concluida la investigación y sintetizada la información necesaria para el buen funcionamiento de una CCM-P, se planteó el diseño de un prototipo a escala de laboratorio mediante bocetos, puesto que el prototipo se construyó teóricamente, la generación de planos detallados del diseño aún no es profundizado.

4.6 Recomendaciones Y Expectativas

Se realizó un análisis para determinar y exponer el buen uso, y mantenimiento del prototipo, además de plantear las expectativas respecto a la implementación de celdas de combustible microbianas en terrarios.

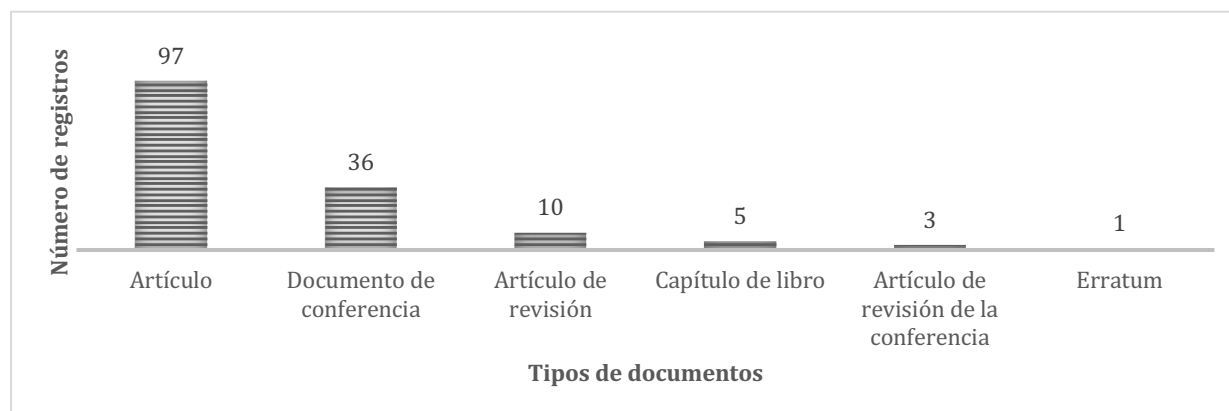
5. Resultados Y Discusión

5.1 Análisis Cienciométrico De Los Procesos De Generación De Energía Eléctrica A Partir De Celdas De Combustible Microbianas Aplicadas En Plantas Desde El 2010 Hasta El 2020

5.1.1 Tipo De Documento Y Lenguaje

En los 152 documentos encontrados, se observó que 97 de ellos correspondían a artículos, representando el 64% del total de los registros publicados en la base de datos de Scopus; lo que a su vez indica que el formato ‘artículo’ es uno de los medios más usados para la difusión de información dentro de la comunidad científica. Así mismo, se evidenció que 36 de estos documentos se basaban en conferencias o sesiones, lo que corresponde al 24% del total. Por otro lado, hay que tener en cuenta el 3% correspondiente a los capítulos de libros que se han producido hasta la actualidad, ya que estos tienen un peso significativo al momento de atribuir recopilación de información sobre la temática. En la Figura 3 se presenta un resumen de lo expuesto anteriormente.

Figura 3. Análisis de los diferentes tipos de documentos.

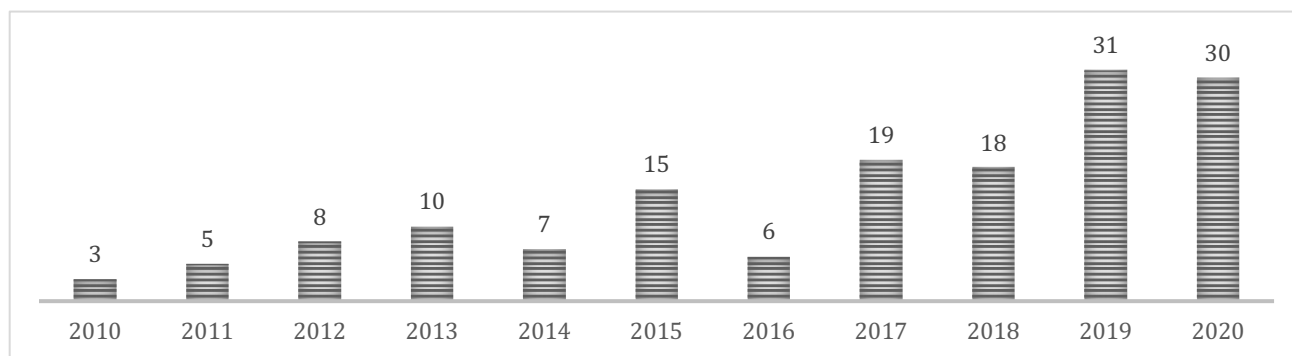


El 5% de los documentos investigados fueron escritos, originalmente, en chino; demostrando una influencia remarcable y creciente de la comunidad científica china frente a las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas. Aun así, cuentan con la traducción en inglés, que al igual que el 95% de los documentos registrados, se reconoce como el lenguaje mas usado en la comunidad científica.

5.1.2 Producción De Investigación Anual

Las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas son una tecnología reciente enfocada en la extracción de energía eléctrica mediante el uso de plantas vivas. De esta forma las primeras pruebas de laboratorio datan del 2008, puesto que Strik et al. Desarrolló y probó el principio de las celdas de combustible microbianas usando *Glyceria maxima*, lo que demostró la capacidad de la plantas para la producción de energía sin afectaciones negativas en el proceso (Strik et al., 2008); esto empezó a considerarse, en primera instancia, como una tecnología verde autosostenible. Así mismo, al ser una temática nueva, las investigaciones en esta área se han venido reforzando en la última década; el impacto en la comunidad científica se puede observar en la Figura 4, donde a partir del 2017 se identifica un incremento considerable a comparación de la produccion científica previa a dicho año.

Figura 4. Publicaciones referentes a las celdas de combustible microbianas en la base de datos de Scopus dentro del periodo del 2010 a noviembre del 2020.



El incremento en el interés por parte de la comunidad científica se puede basar en la versatilidad de las tecnologías basadas en celdas de combustible microbianas, puesto que haciendo un esquema sobre sus diversas aplicaciones, se encuentra la capacidad para implementar las CCM en tierras agrícolas sin afectar la producción de alimentos, además de que se pueden implementar en diversos escenarios, ya sean humedales, páramos o incluso baldíos (Kabutey et al., 2019); por otro lado, también se tiene en cuenta las recientes aplicaciones dentro de la arquitectura moderna, puesto que las plantas al tener la capacidad de crecer dentro de casas, techos, y adaptarse a diferentes condiciones, resulta conveniente la producción de bioelectricidad (Strik et al., 2011). Es una tecnología que a fin de cuentas es limpia, renovable e incluso no excede en costos de fabricación (Kabutey et al., 2019).

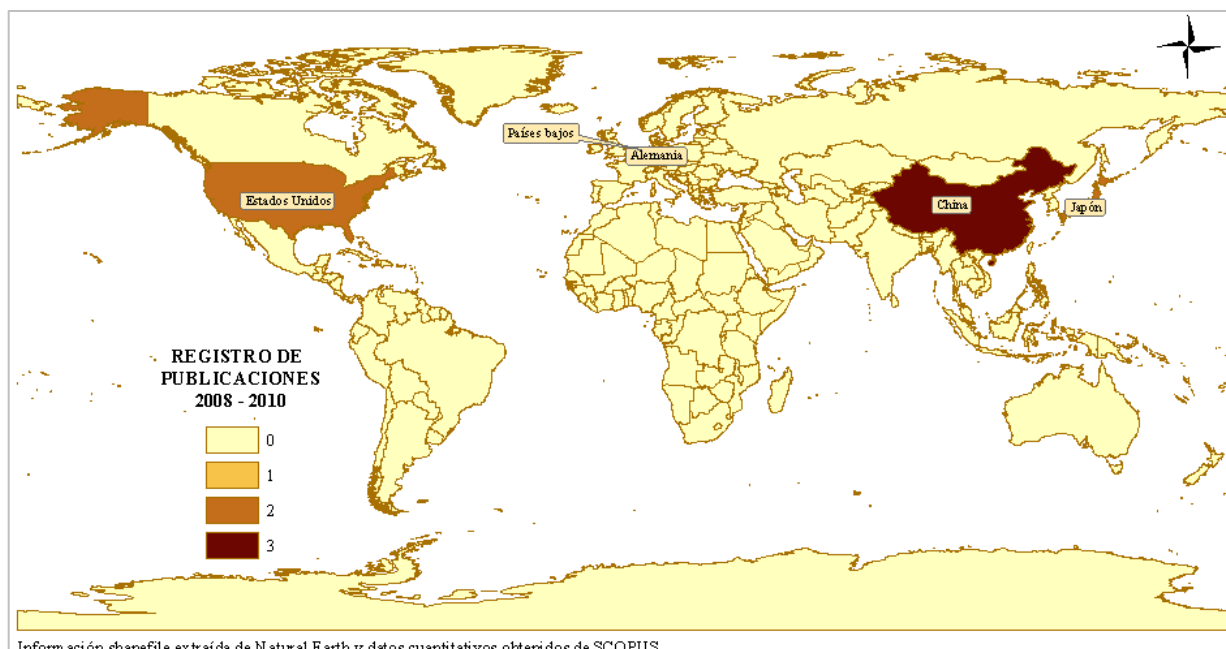
De esta forma, David Strik en 2011 describió los principios de una celda solar microbiana en donde incluyó las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas, al igual que planteó los retos y futuras aplicaciones de dicha tecnología. En 2012, Deng introdujo la tecnología de las CCM-P, en donde presentó los caminos prometedores al improvisar y variar las aplicaciones de las celdas. Así mismo, en 2017, Nitisoravut y Regmi plantearon los factores que afectan al sistema, a su vez describió los logros de la investigación hasta la fecha, al igual que retos y perspectivas (Nitisoravut & Regmi, 2017).

5.1.3 Distribución Por Países

La investigación sobre celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas, específicamente se remonta al 2008; en Países Bajos se presenta el primer esquema funcional del tema a cargo de Strik et al. Lo que produce que un año más tarde comience la investigación y el interés exclusivo por este tipo de biotecnología. En la Figura 5 se presenta un mapa sobre la

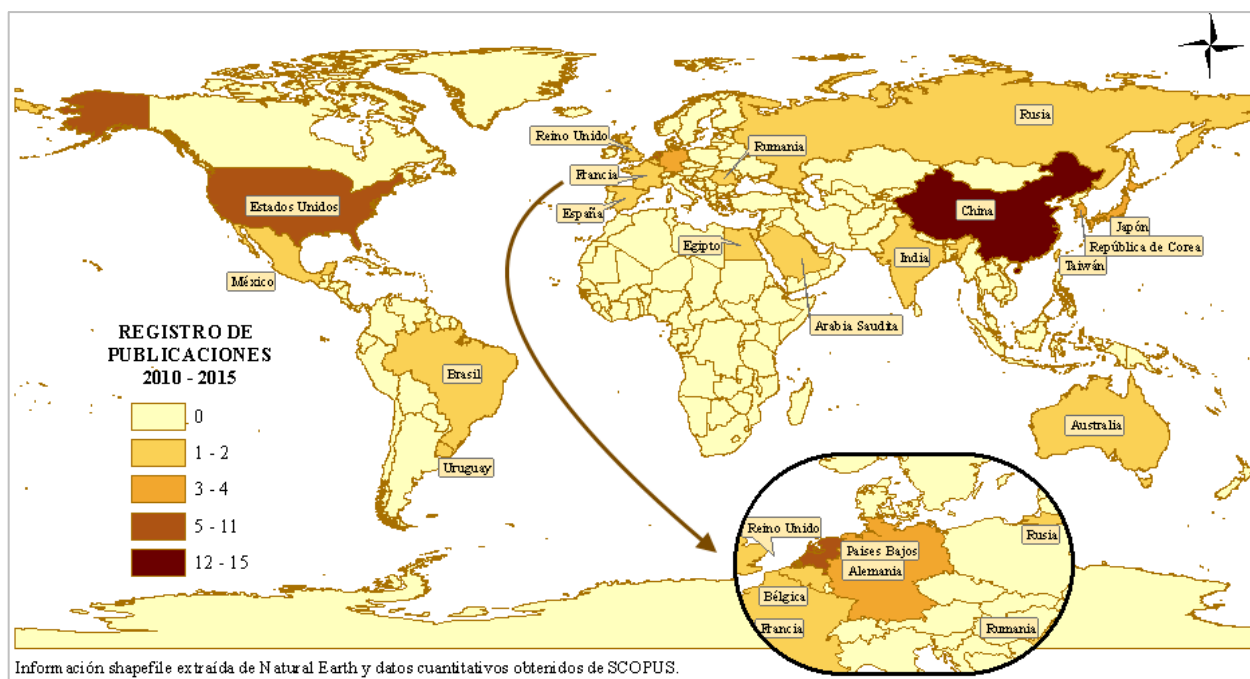
distribución de las publicaciones entre el 2008 y el 2010 en los países principales de esta investigación; China, Japón, Estados Unidos, Alemania y Países Bajos.

Figura 5. Mapa de registro de publicaciones entre el 2008 y el 2010. Fuente: Autora.



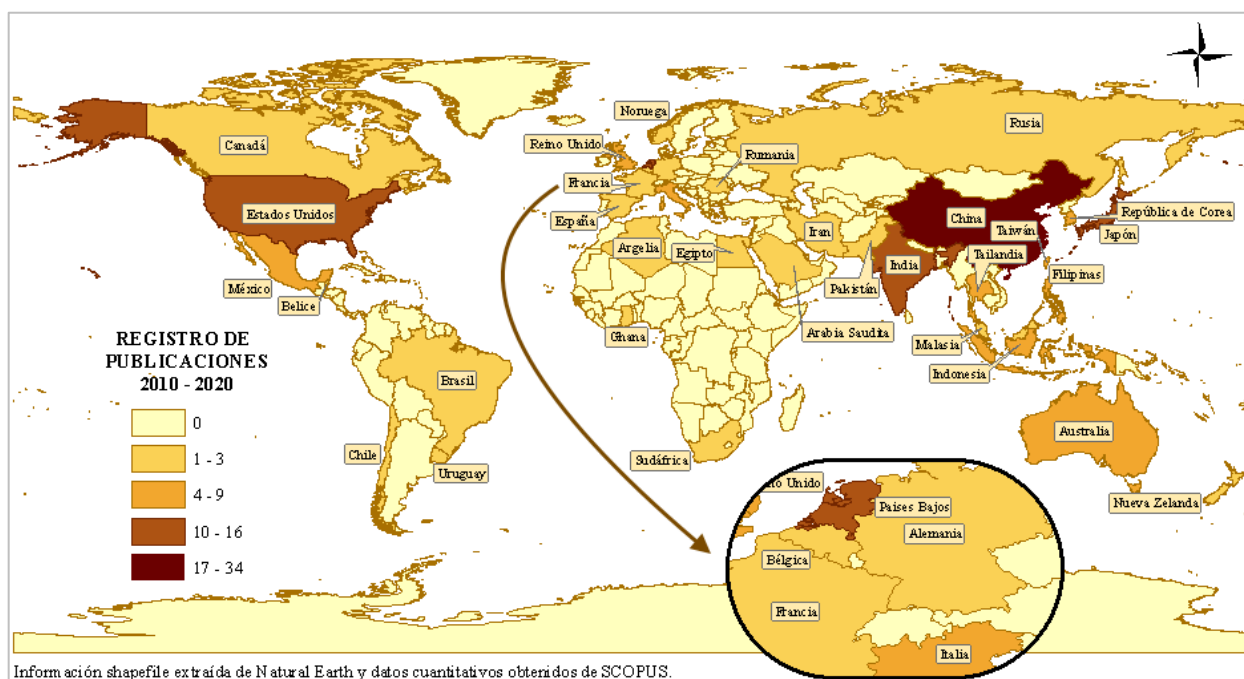
Sin embargo, la presente investigación se enfoca entre el periodo del 2010 al 2020, en donde se presenta una tendencia en el aumento del interés por los diversos países. Esto es importante puesto que la diversificación de esta tecnología representa una mejor sustentabilidad y conocimiento desde diversas perspectivas.

En la Figura 6 se presenta un mapa del registro de publicaciones en los diversos países, entre el 2010 y el 2015. Dentro de este periodo, 16 países iniciaron la investigación respecto al tema; entre estos se encuentra, Corea del Sur, Bélgica, Hong Kong, Australia, Brasil, Egipto, Francia, India, México, Rumania, Federación de Rusia, Arabia Saudí, España, Taiwán, Reino Unido y Uruguay. Sin embargo, China, Estados Unidos y Holanda, se mantuvieron como los principales investigadores hasta el 2015, con 13, 11 y 9 documentos registrados respectivamente.

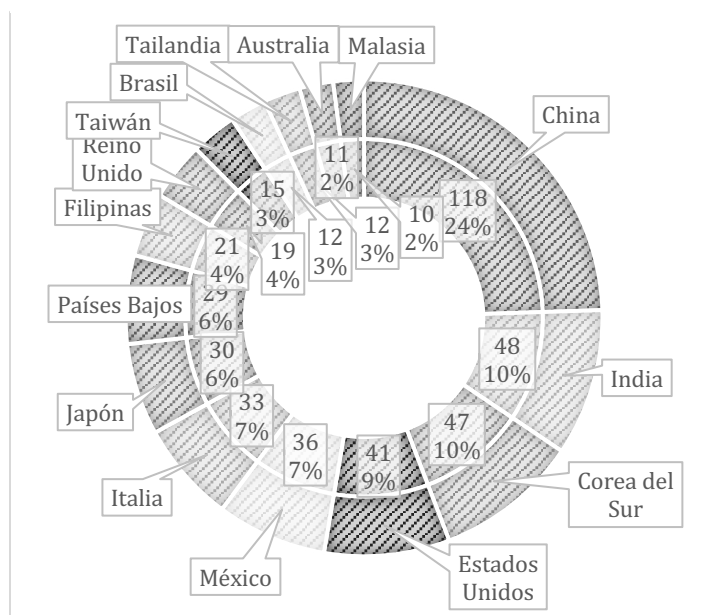
Figura 6. Mapa de registro de publicaciones entre el 2010 al 2015. Fuente: Autora.

Entre un periodo de 5 años, 16 países entraron a la búsqueda, de igual forma, desde el 2015 hasta la actualidad, 2020; 16 países más han ingresado en la investigación sobre la producción energética y la versatilidad de esta tecnología aplicada en plantas vivas. Los países más recientes son Argelia, Belice, Canadá, Chile, Filipinas, Ghana, Indonesia, Irán, Italia, Malasia, Noruega, Nueva Zelanda, Pakistán, República Popular China, Sudáfrica y Tailandia. Dentro de esto cabe destacar a China como el líder en producción de investigaciones, puesto que a la fecha ha registrado aproximadamente 30 publicaciones enfocando, en mayor parte, su búsqueda en la producción de energía a partir de las plantas en cultivos; teniendo presente que han logrado resultados respecto a óptimas producciones de biomasa, es decir, las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas, y con fines de generación eléctrica, no afectan negativamente a la cosecha y su proceso natural.

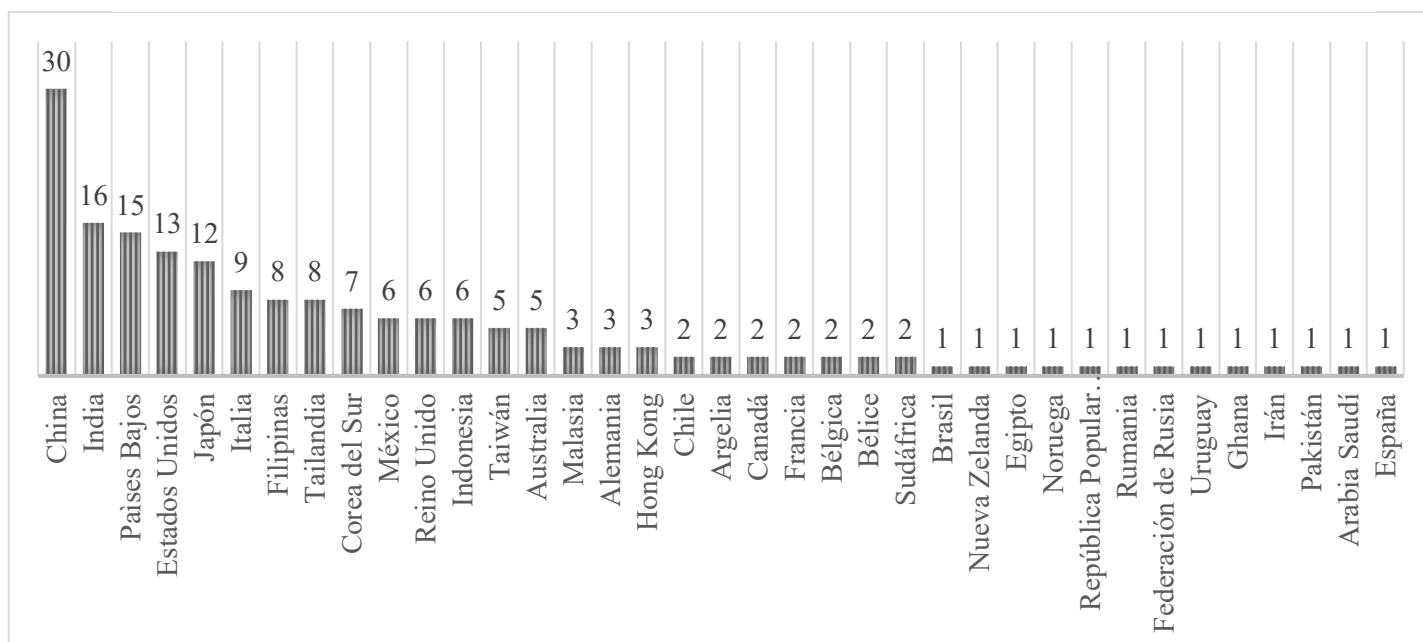
Figura 7. Mapa de registro de publicaciones entre el 2010 - 2020. Fuente: Autora.



De igual forma, China cuentan con un amplio cuerpo investigativo, que hasta el momento se han registrado 118 autores, es decir el 24% de los autores que actualmente están registrados en la base de datos de Scopus respecto a las CCM-P; Seguido a China, se encuentra India, Corea del Sur y Estados Unidos, con 48, 47 y 41 autores afiliados y en proceso investigativo. En la Figura 8 se resume lo expuesto anteriormente. Es importante destacar que Países Bajos y Japón son dos países que, aunque cuentan con aproximadamente una cuarta parte de los autores que mantiene China, sus investigadores han realizado un proceso constante frente a la búsqueda de información, experimentación y aplicación de las celdas de combustible microbianas en plantas.

Figura 8. *Autores registrados por país (2010 - 2020)*

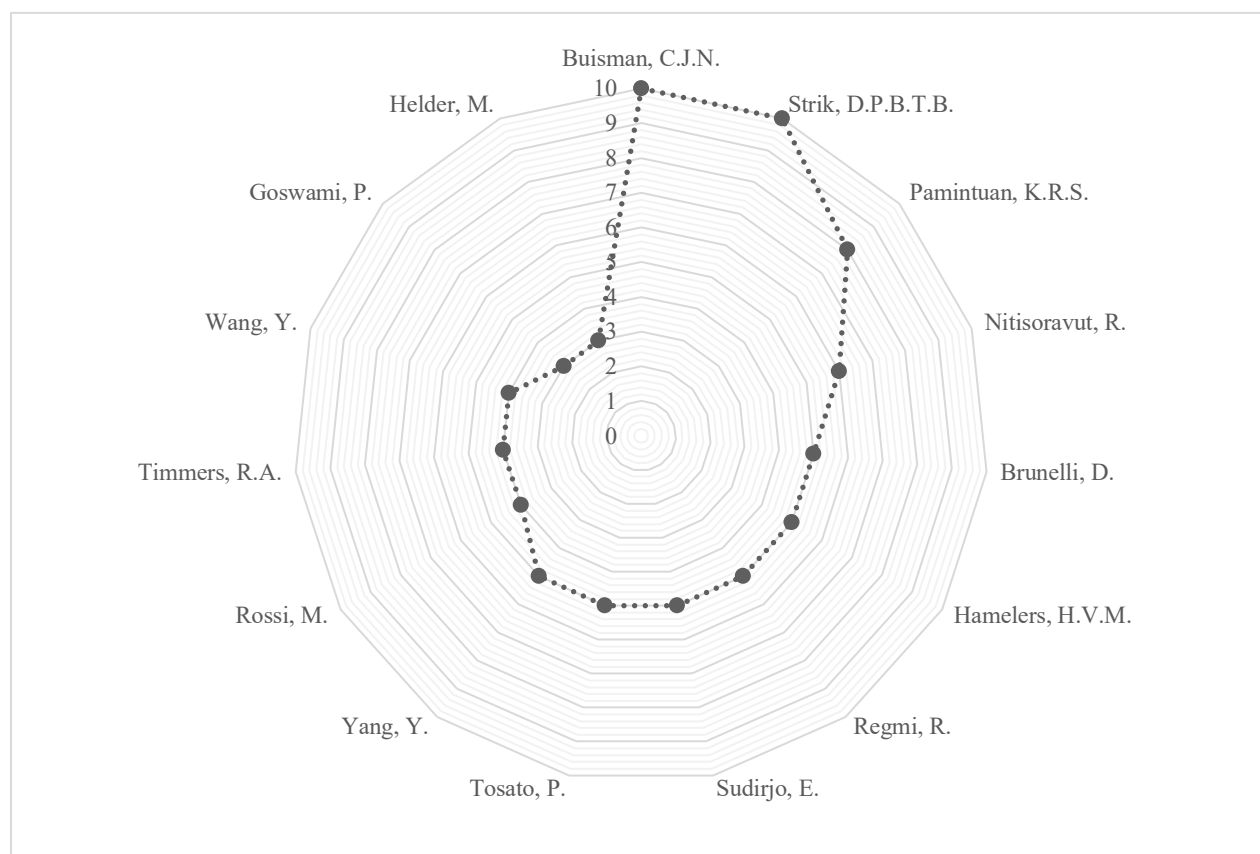
De esta forma, el impacto de la temática se puede observar en el Figura 9, en donde la predominancia de investigaciones proviene de China, seguido por India, Países Bajos, Estados Unidos y Japón. Cabe resaltar que, en la información completa sobre países actuales en la investigación sobre esta tecnología, Colombia aún no se encuentra presente.

Figura 9. *Análisis del registro completo de publicaciones por país hasta la actualidad. 2010 – 2020.*

5.1.4 Autores En La Investigación

Anteriormente se comentó la influencia demarcada por el neerlandés Strik, D.P.B.T.B, ya que en 2008 fue quien planteó, en primera instancia, el uso de las celdas de combustible microbianas en plantas de forma aplicada. Desde ese momento y hasta la fecha se ha encargado de realizar un proceso multidisciplinario en conjunto con otros autores, incluyendo a Buisman, C.J.N. De esta forma, en la Figura 10 se presentan los 15 autores más influyentes, y que hasta el momento han realizado más publicaciones respecto a la temática.

Figura 10. *Análisis del número de artículos por autores*

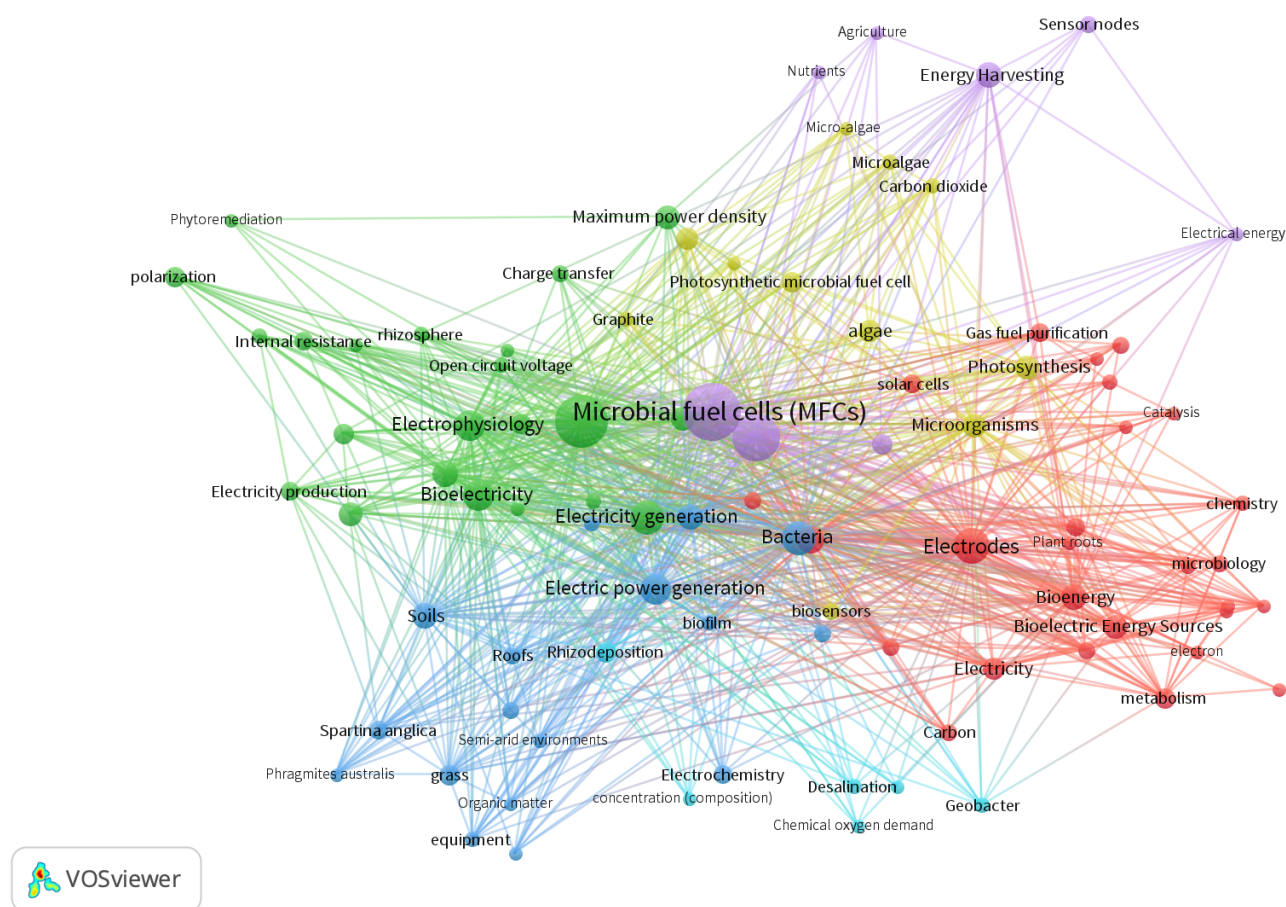


Estos autores representan, hasta el momento, la experticia desde su perspectiva del amplio campo investigativo sobre las celdas de combustible microbianas usando plantas vivas.

5.1.5 Relevancia En Los Temas De Investigación De Esta Tecnología

En la Figura 11 se puede observar una visualización de red en donde cada nodo representa una palabra clave respecto al tema de investigación; puesto que la búsqueda es más viable realizarla en inglés, el diagrama mantiene este lenguaje. Los nodos más grandes son las palabras claves más citadas; así mismo, los nodos pequeños tienen menor incidencia. El tamaño de los nodos, en otras palabras, depende de la cantidad de veces usadas en artículos basados en las celdas de combustible microbianas en plantas y celdas solares microbianas.

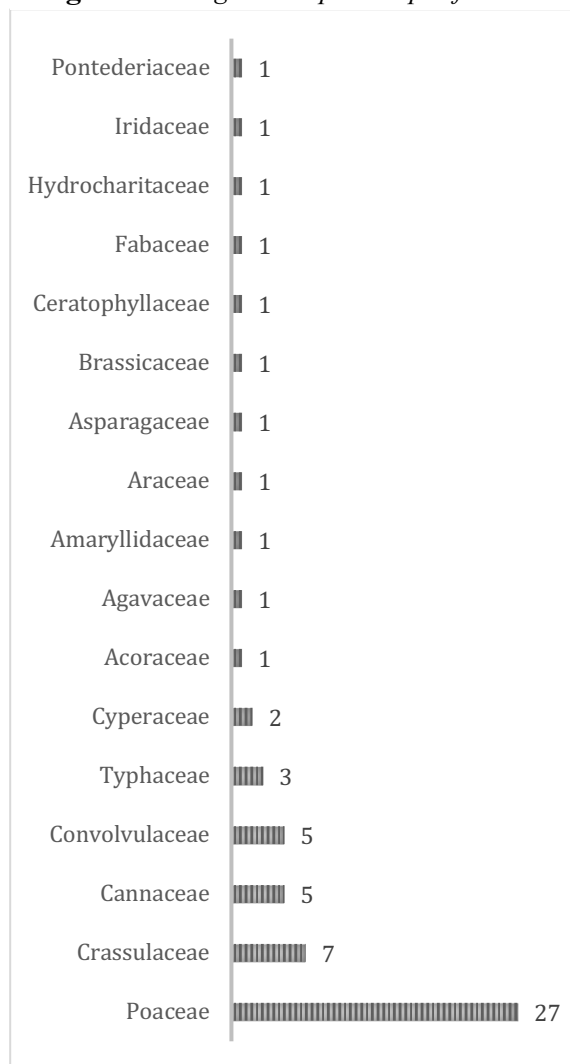
Figura 11. Visualización de la red respecto a los temas de investigación sobre celdas de combustible microbianas en plantas. Imagen extraída del VOSviewer.



De esta forma, se observa como el tema principal radica las celdas de combustible microbianas (microbial fuel cells), y seguido a este a su izquierda, y en verde, se encuentra las celdas de combustible microbianas aplicadas a plantas (plant microbial fuel cells). Este diagrama demuestra la concurrencia entre los términos referentes a la investigación y las temáticas que puede abarcar.

5.2 Especies De Plantas Capaces De Producir Energía En La Región

Figura 12. Registro de plantas por familias.



Las especies herbáceas parecen tener la capacidad de crecer y otorgar la producción de electricidad mediante una celda de combustible microbiana, esto se ha datado desde que se ha usado *glyceria máxima*, *spartina anglica* y *arundinella anomala* (M. Helder et al., 2010).

En la Figura 12 se presenta un resumen de algunas de las familias de plantas involucradas en la producción de energía. La familia Poaceae integra especies como *spartina anglica* (Ruud A. Timmers et al., 2010) (K. Wetser, Liu, Buisman, & Strik, 2015) (M. Helder et al., 2010) (Marjolein Helder et al., 2013), *arundinella anomala* (M. Helder et al., 2010), *glyceria máxima* (Ruud A. Timmers et al., 2012) (R. A. Timmers, Strik, Arampatzoglou, Buisman, & Hamelers, 2012) (Ruud A. Timmers et al., 2013), *prhagmites australis* (K. Wetser et al., 2015) (Moqsud, Gazali, Omine, & Nakata, 2017) (K. Wetser, Dieleman, Buisman, & Strik, 2017), *puccineilla distans* (Md Khudzari et al., 2018), y entre otras especies que han demostrado la capacidad de producir energía con diversas aplicaciones funcionando en paralelo y en sinergia.

La diversidad de las plantas es un factor clave puesto que aporta un reto al desarrollo de una CCM adaptada a su estructura ecosistémica, de igual forma, es importante analizar una gran diversidad de especies vegetales con el fin de profundizar en el análisis del comportamiento de la planta, especialmente de sus vías fotosintéticas (Kabutey et al., 2019); estas han registrado comportamientos más eficientes de algunas plantas C3 en comparación con plantas C4; aun sabiendo que las plantas C4 son mejores (Tou, Azri, Sadi, Lounici, & Kebbouche-Gana, 2019).

5.2.1 Energía A Partir De Plantas: Resumen De Plantas Usadas En CCM

Inicialmente se había pensado hacer un anexo con datos botánicos de las plantas que se han venido usando en diversas configuraciones de celdas de combustible microbianas; sin embargo, la información fue sustancialmente significativa para realizar una cartilla que complementa este estudio. ‘Energía apartir de plantas vivas’ recopila informacion respectiva a las especies de plantas usadas en las celdas, con la finalidad de comprender el comportamiento individual de la planta respecto a la diversidad de aplicaciones que se les pueda otorgar en sinergia con la producción de

electricidad. Es una cartilla que seguirá en construcción, aspirando e inspirando que la investigación de la diversidad vegetal sea un factor ponderante para el diseño de CCM.

5.2.2 Diversidad En Colombia Capaz De Generar Energía

Con la ayuda de las bases de datos colombianas, tales como la de la Universidad Nacional (Universidad Nacional de Colombia, 2019) y el Sistema de informaciones de Biodiversidad en Colombia (SiB, s.f.), se encontró algunas especies vegetales que han sido previamente estudiados para la producción de energía a partir de una CCM. Especies como *canna indica* han sido registrados en gran parte del país, abarcando Norte de santander, Bogotá, Vaupés, Cundinamarca, Nariño, Putumayo, Santander, Amazonas, e icnluso, San Andrés, islas y providencia; Otras especies solo se han registrado en una zona, como lo es *ceratophyllum demersum* en Córdoba; y en bogotá, *typha latifolia*. Aún así, entre otras especies vegetales se encuentran *ipomoea aquatica* (Amazonas, Magdalena, Cordoba, Atlantico, Bolivar), *cyperus papyrus* (Cundinamarca, Tolima, Boyacá, Quindio, Risaralda), *arundinella anomala* (Magdalena, Vichada, Valle del Cauca, Casanare, Santander, Meta), *arundo donax* (Bogotá, Cundinamarca, Boyacá, Huila), *lolium perenne* (Cundinamarca), *oryza sativa* (Huila, Magdalena, Tolima, Santander, Antioquia, Chocó, entre otros) y *eichhornia crassipes*, los cuales se han reportando a lo extenso de Colombia, desde el Amazonas hasta el Magdalena, incluso pasando por el Pacífico. No está demás reconocer la diversidad de la vegetación colombiana, lo que atribuye a una amplia investigaci3n de sus potenciales energéticos. Puesto que esta biotecnología en un país como Colombia representaría un gran avance, ya que principalmente existen zonas rurales completamente sumergidas en las montañas, completamente aisladas de la urbanizacion y con difíicil acceso a cuestiones básicas como la luz. Es una biotecnología con multiples aplicaciones, y que, en sinergia, mantiene una produccion de energía.

5.3 Factores Y Parámetros Escenciales Para El Óptimo Funcionamiento De Una CCM-P

Para conocer los factores y parámetros para tener en cuenta al momento de aplicar celdas de combustible microbianas a plantas, se dividió el sistema en sus partes y subpartes, como se presenta en la siguiente Tabla 3. En general, y principalmente, las condiciones ambientales afectan el funcionamiento de las CCM en plantas, puesto que estas están expuestas de forma directa a una suspensión inmediata del sistema si sus condiciones exteriores no son favorables para la configuración de las CCM-P. Cabe resaltar que es un sistema complejo y habrá factores o parámetros no descritos, puesto que se requiere investigaciones para profundizar en el análisis del comportamiento vegetal bajo las condiciones biotecnológicas de las celdas microbianas.

Tabla 3. Factores y parámetros para tener en cuenta respecto al funcionamiento de las CCM en plantas.

Partes De La Celda	Sub-Partes De La Celda	Factores		Parámetros
		CAUSAS	CONSECUENCIAS	
PLANTA	Brote	La malformación del brote	Ineficiencia en el almacenamiento de la energía lumínica	Vitalidad de la planta
		Fotoperiodo	Decrecimiento de la producción energética en periodos nocturnos.	Producción energética respecto a la radiación solar recibida.
		La malformación de las raíces	Interrupción del sistema	Profundidad de las raíces Distribución de las raíces
	Raíz	Exudados de la raíz	Actividad directa con las bacterias electroquímicamente activas.	Por medio de, microscopía de fluorescencia (Yoon et al., 2018).
		El bajo contenido de oxígeno en el sistema hace que la absorción de nutrientes a través	Induce a un crecimiento más rápido de las raíces para proporcionar a los brotes abundantes	Altura del brote.

Partes De La Celda	Sub-Partes De La Celda	Factores		Parámetros
		CAUSAS	CONSECUENCIAS	
SUELO	Raíz:brote	de las raíces esté limitada	cantidades de nutrientes	
		Los nutrientes limitados en el suelo.	La planta puede producir más raíces para poder suministrar a los brotes, o no.	Vitalidad de la planta. Caracterización del suelo.
		Nutrientes del suelo	Actividad microbiaba	Caracterización del suelo. Identificación de población microbiana.
	Tipo de suelo	Clasificación del suelo	Actividad en la rizosfera	El tipo de suelo depende de las condiciones ecosistemicas requeridas por la planta.
	Microorganismos	Temperatura	Decrecimiento en la actividad microbiana	Temperatura ambiente del ánodo
		Población microbiana	Producción de electrones	Identificación de población microbiana.
	Ánodo	Material	Variación en la resistencia interna del material y conductividad eléctrica	Potencial del ánodo
	Cátodo	Material	Variación en la resistencia interna del material y conductividad eléctrica	Potencial del cátodo
	Resistencia externa	Resistencia interna	Movilidad de los electrones	Curva de polarización
	Membrana	El transporte de iones atraves de la membrana	Dependen de la especie de planta puesto que se pueden presentar variaciones en la densidad de conrriente, indicando el coste de energía para transportar	Potencial de la membrana

Partes De La Celda	Sub-Partes De La Celda	Factores		Parámetros
		CAUSAS	CONSECUENCIAS	
			iones a traves de la membrana.	

5.4 Diseño Del Prototipo

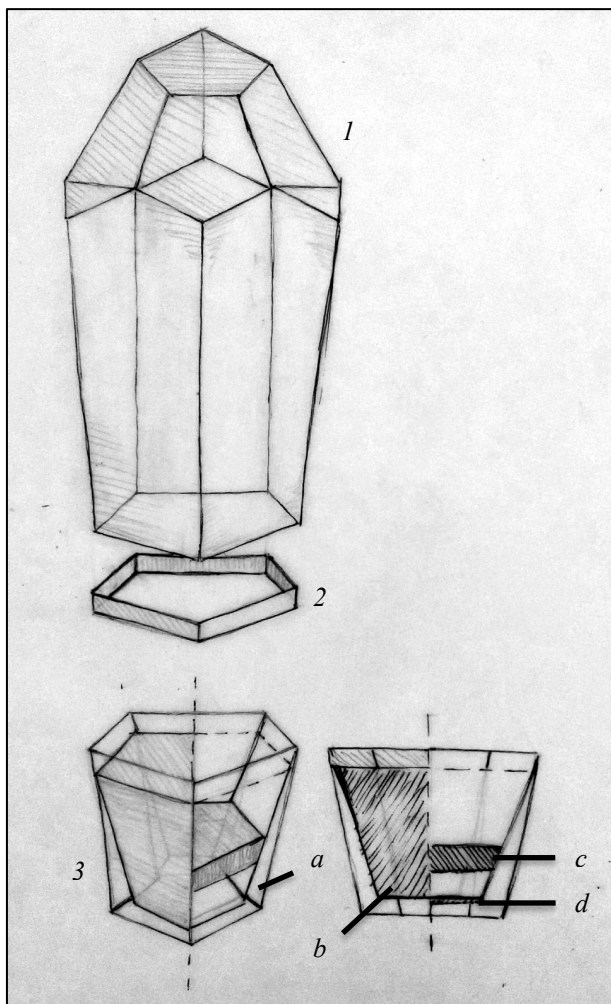
El diseño del prototipo se ha construido teóricamente a partir del estudio investigativo de las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas, lo que posibilita su implementación en ecosistemas cerrados.

Un boceto del prototipo se encuentra en la Figura 13, en donde se representa un esquema sencillo y ampliado del diseño, el cual cuenta con las siguientes partes:

1. Cúpula (A, *Figura 6*), esta parte cuenta con una tapa superior en forma de pirámide inversa, buscando que, en el momento de la condensación del agua, se genere un riego constante por goteo en la mitad de la plantación. El diseño está inspirado en los primeros terrarios (Bagshaw Ward, 1899), además de buscar sencillez y elegancia en el prototipo. La forma de la cúpula varia dependiendo de la planta que se desee usar para la aplicación experimental, en el Apéndice de este documento se encuentra una cartilla que muestra un inventario de plantas que han producido energía a partir de celdas de combustible microbianas.
2. Soporte (B, *Figura 6*), esta seccion está diseñada con la finalidad de ser el soporte de los cables, los electrónicos, y donde se dispondrán los leds de bajo consumo.
3. Maceta y reserva de agua (C, *Figura 6*), esta sección se complementa de esta forma puesto que, al ser un sistema cerrado y una simulación viva de un ecosistema, la reserva de agua ayuda a

mantener la temperatura del ambiente y a abastecer la planta de agua en un día caluroso, aspirando mantener un ciclo interno estable y una constante producción energética.

Figura 13. *Diseño del prototipo. -1. Cúpula. -2. Segmento destinado para soporte y distribución de los electrónicos. -3. Maceta. a. Agua. b. Soporte del suelo. c. ánodo. d. cátodo. Diseño: Autora.*



Además, en esta sección también se dispone la celda de combustible microbiana la cual presenta muchas variedades de configuración, puesto que se han hecho estudios con electrodos ubicados de forma horizontal, vertical, y entre otras formas (Jung & Pandit, 2018). En la Figura 6, se presentan tres de los modelos más usados y representativos para el uso en plantas.

La primera configuración dispone del cátodo en la parte superior, mientras que el ánodo se ubicará en la parte inferior, a una distancia prudente de las raíces, puesto que estas suelen liberar

oxígeno y el ánodo requiere condiciones anaeróbicas para su óptimo funcionamiento (Kumar et al., 2019).

La segunda configuración se basa en disponer, debajo del ánodo, un separador o una membrana que clasifique los subproductos de las bacterias electroquímicamente activas, y así también ubicar, debajo de la membrana, el cátodo, puesto que estaría en contacto con la reserva de agua, y a su vez un tubo que comunica la superficie con el cátodo le otorgaría oxígeno, siendo este un aceptador de electrones natural y eficiente (Jung & Pandit, 2018).

Finalmente, la tercera configuración partió de Helder et al., ya que diseñaron un modelo tubular de celda de combustible microbiana, en donde la capa externa es el ánodo, la capa intermedia se basa en una membrana de intercambio, y la capa final es el cátodo, el cual tendrá un tubo que le suministra oxígeno (K. Wetser et al., 2017) (C-3, *Figura 6*).

5.4.1. Materiales de ánodo

El material ideal para el ánodo se escoge a partir de una serie de atributos como lo son la alta conductividad, la biocompatibilidad, la estabilidad química, y la resistencia a la corrosión (Jung & Pandit, 2018). Además, debe tener una superficie que favorezca la adhesión bacteriana. Los ánodos a base de carbón son los predominantes puesto que a parte de mantener una capa de bacterias electroquímicamente activas, su costo es bajo, es de fácil disponibilidad, y es anticorrosivo por naturaleza (Cabezas et al., 2015). Los materiales más usados de ánodo son las barras de grafito, filtros y fibras de carbón, carbono vítreo reticulado, y entre otros derivados del carbón. Respecto a los materiales con base no carbonatada, es decir, metales, tales como cobre, hierro también han sido estudiados por su tendencia corrosiva, sin embargo requieren de altos costos y algunos de ellos no son adaptables a las CCM como lo es el titanio (Jung & Pandit, 2018). A parte de esto, algunos investigadores han realizado algunas modificaciones de electrodos,

motivados a cambiar las propiedades físicas y químicas, para así obtener un mayor acomplaje microbiano y una eficiente óptima en la transferencia de electrones. Sin embargo, algunas estrategias de modificaciones demandan más complicaciones (Jung & Pandit, 2018).

5.4.2. *Materiales del cátodo*

Teniendo presente que el cátodo se sitúa donde se encuentra el aceptador final de electrones, puesto que en su superficie se llevará a cabo la reducción al capturar los electrones generados en el ánodo y también los protones percolados por el ánodo a través de una separador entre estas dos cámaras, la anódica y catódica (Yasri, Roberts, & Gunasekaran, 2019). El oxígeno es la opción unánime para ser el aceptador final de electrones, puesto que tiene una disponibilidad inexhaustible con un alto estándar de potencial redox; esta reducción del oxígeno tiene dos posibles vías dependiendo del pH del catolito y el oxígeno en la interfaz del cátodo, producir agua o formar peróxido de hidrógeno en una reducción incompleta. Respecto a los materiales usados, también son de preferencia los derivados del carbón o grafito en todas sus configuraciones, ya sea cátodo de aire, sumergido o biocátodos (Jung & Pandit, 2018).

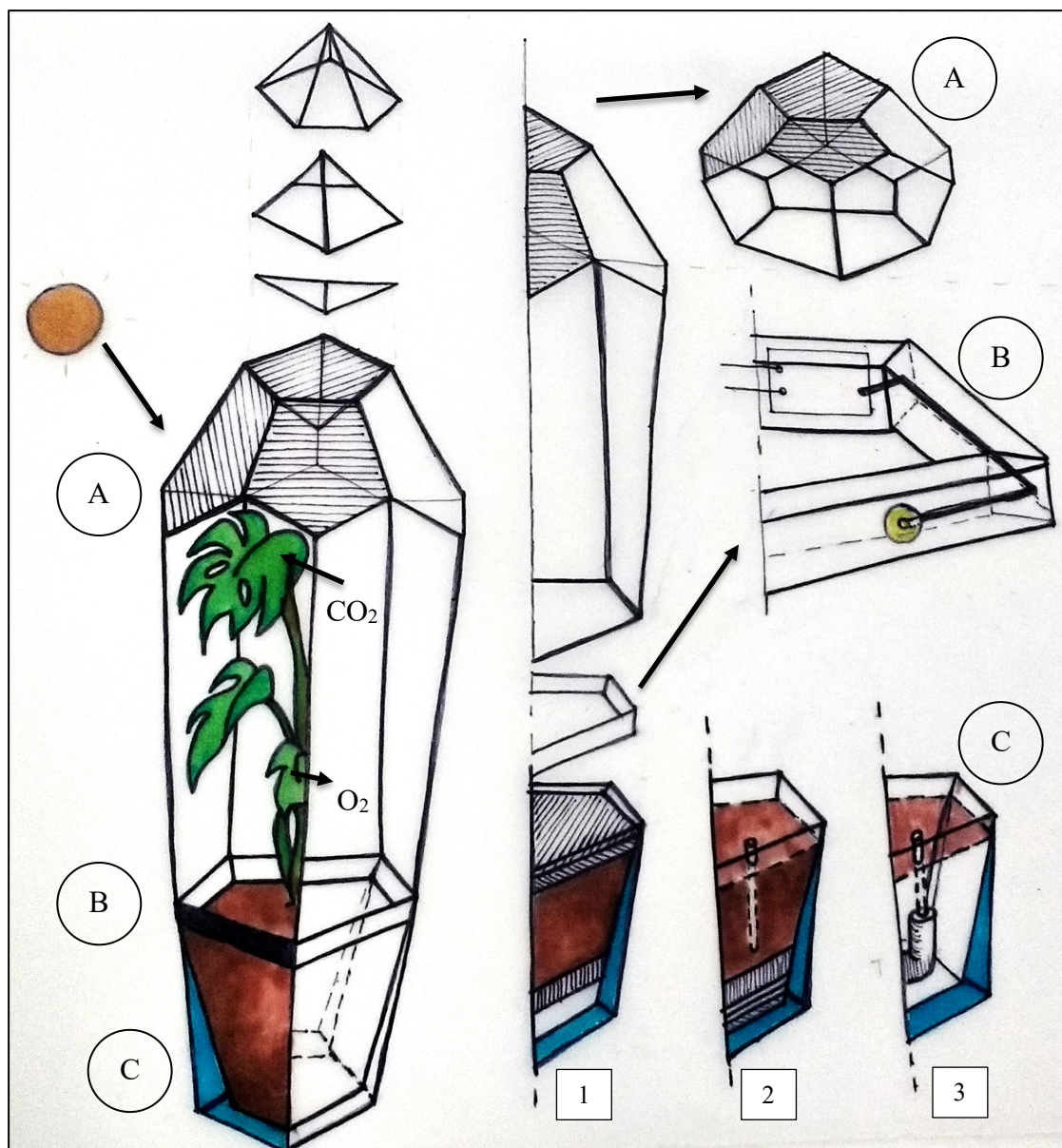
5.4.3. *Membrana o separadores en CCM-P*

Una membrana o separador es requerido en las celdas de combustible microbianas, puesto que ayuda a reducir el espacio entre el ánodo y el cátodo (Yasri et al., 2019), otorgando la inhibición de la difusión de oxígeno en la cama del ánodo y también previniendo un cortocircuito a través del aislamiento de los electrodos (Jung & Pandit, 2018). Así mismo para mejorar la producción de energía de las CCM, las membranas deben poseer una alta propiedad de transferencia de cationes. Durante la última década se han aplicado separadores como puentes de sal, membranas de intercambio catiónico, membranas de intercambio aniónico, membranas de

ultrafiltración, membrana bipolar, membranas de microfiltración, además de, fibras de vidrio, telas porosas, y otros materiales con porosidad (Jung & Pandit, 2018).

Se tiene estimado que el poder de una planta en $0,03 \text{ m}^2$ puede producir aproximadamente $0,1 \text{ mW}$ (M. Helder et al., 2010), lo que equivaldría a una bombilla led, o sensores de bajo consumo, entre otros artefactos.

Figura 14. Configuraciones de las celdas de combustible microbianas en terrarios. A. Cúpula. B. Soporte. C. Maceta y reserva de agua.

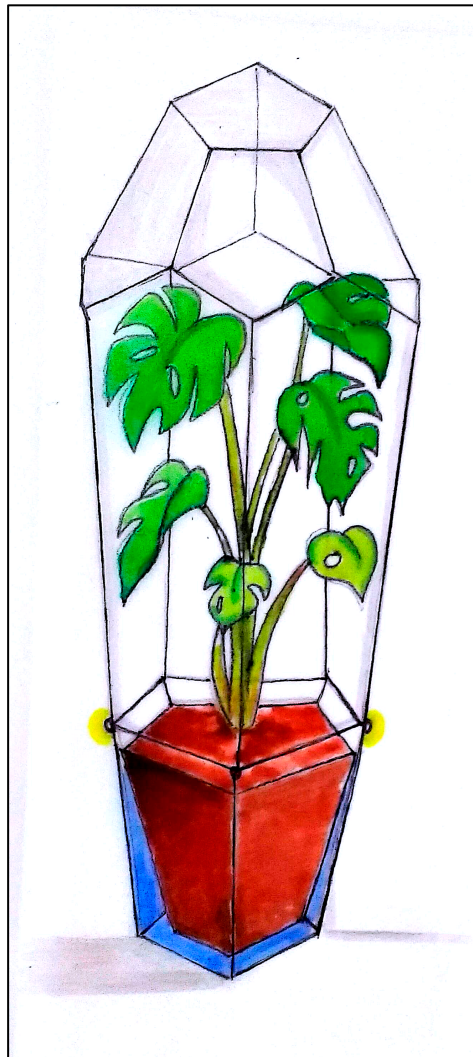


5.4.4. Principio del prototipo

Los ecosistemas en terrarios funcionan puesto que cuentan con un espacio sellado el cual crea un ecosistema completamente autosuficiente en el que las plantas pueden sobrevivir mediante el uso de la fotosíntesis para reciclar nutrientes (Brinker, 2012)(Nurture Nature Center, s/f). Cabe aclarar que el único insumo externo necesario para mantener la planta con vida es la luz; esta le proporciona la energía que necesita para generar su propio alimento (autótrofas) y seguir creciendo (Nitisoravut & Regmi, 2017).

Figura 15. Boceto representativo del prototipo de celdas de combustible microbianas en plantas de terrario.

Diseño: Autora.



La luz que brilla en las hojas de la planta es absorbida por proteínas que contienen clorofilas. Parte de esa energía luminosa se almacena en forma de trifosfato de adenosina (ATP), una molécula que almacena energía (Clark et al., 2018); mientras que el resto se utiliza para eliminar los electrones del agua que se absorbe del suelo a través de las raíces de la planta. Estos electrones se vuelven “libres” y se utilizan en reacciones químicas que convierten el dióxido de carbono en carbohidratos, liberando oxígeno (Azri, Tou, Sadi, & Benhabyles, 2018).

Este proceso de fotosíntesis es lo opuesto a la respiración celular que ocurre en otros organismos, incluidos los humanos, donde los carbohidratos que contienen energía reaccionan con el oxígeno para producir dióxido de carbono, agua y liberar energía química (Clark et al., 2018).

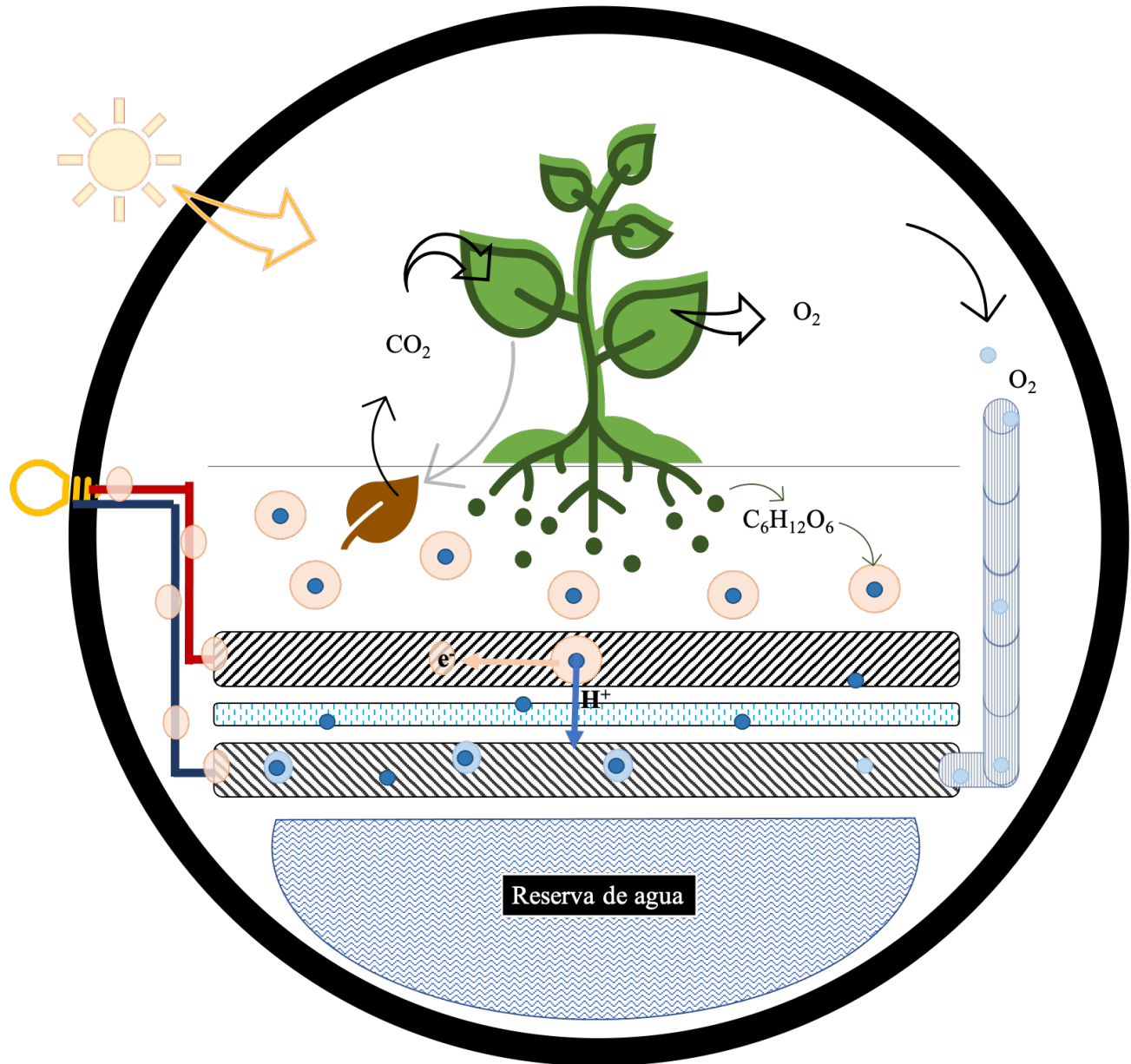
Aun así, el ecosistema también utiliza la respiración celular para descomponer el material desprendido por la planta (Clark et al., 2018). En esta parte del proceso, los microorganismos presentes en el suelo absorben el oxígeno residual de la planta y liberan dióxido de carbono que la planta en crecimiento puede reutilizar. Y, por supuesto, durante la noche, cuando no hay luz solar para impulsar la fotosíntesis, la planta también utilizará la respiración celular para mantenerse viva al descomponer los nutrientes almacenados (Clark et al., 2018).

Debido a que el terrario es un entorno cerrado, significa que su ciclo del agua también es un proceso autónomo (Brinker, 2012). El agua es absorbida por las raíces de las plantas, la cual se libera al aire durante la evapotranspiración (Clark et al., 2018), abriendo paso a la condensación y finalmente regresa al suelo de la planta, donde el ciclo empieza nuevamente.

A este proceso natural, se le adiciona una celda de combustible microbiana con la finalidad de producir energía a partir del proceso previamente explicado (M. Helder et al., 2010); esto se lleva a cabo por la toma de esos electrones “libres” y el transporte al compartimiento en donde se

realizará la reducción en conjunto con el oxígeno, regresando así, al mismo ecosistema los nutrientes, manteniendo cerrado el proceso (*Figura 8*).

Figura 16. *Proceso de obtención de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas aplicadas en terrarios.*



5.5. Recomendaciones

Las celdas de combustible microbianas en terrarios, a parte de mantener las recomendaciones previas de diversos autores hacia la fabricación y diseño de esta biotecnología, requiere,

principalmente, datos respecto al radio raíz/brote de la planta, pues esta demarca una altura promedio para la configuración de la celda y el terrario.

Por otro lado, se recomienda hacer investigaciones con diversas poblaciones vegetales en una misma celda, puesto que la dinámica entre plantas fortalece la zona y revitaliza el ecosistema, entre más diverso, más fuerte será un ecosistema; lo que, hipotéticamente, podría causar una mayor actividad en la rizósfera, y por ende, un incremento en la producción energética.

5.6. Expectativas

Las celdas de combustible microbianas en terrarios representan una multiplicidad de aplicaciones, puesto que de ante mano, las CCM aplicadas en plantas lo han demostrado. La tecnología de las celdas en terrarios otorgaría la posibilidad de implementarse en zonas, que por motivos de geografía u otras razones, están aisladas, y también zonas áridas; ya que es un sistema completamente autosostenible. La posibilidad de esta tecnología remarca en poder realizarse en cualquier lugar, así como la libertad de cualquier diseño que se adapte a una configuración de la celda y los requerimientos ecosistémicos de la planta.

Por otro lado, al tratarse de plantas vivas, otorga un valor agregado a la protección de la naturaleza, puesto que esto expone, de una forma más directa, el uso sostenible y posible para producción de energía sin afectaciones negativas o nocivas a la vida en general. Incluso, el factor de trabajar con plantas abarca la posibilidad de estudiar su diversidad para analizar el comportamiento de estas en sinergia con la producción de electricidad. Además, la configuración del terrario otorga la oportunidad de estudiar diferentes ecosistemas capaces de producir las funciones electroquímicas requeridas para el funcionamiento de las celdas de combustible microbianas.

6. Conclusiones

En conclusión, las celdas de combustible microbianas en plantas han demostrado ser una forma viable de generar electricidad, sin embargo las investigaciones han expuesto valores energéticos bajos a comparación de las aplicaciones industriales actuales; en donde aproximadamente 0,03 m² de tierra cultivada puede generar alrededor de 0,1 mW, abasteciendo electrónicos de bajo consumo; no obstante, más investigaciones al respecto es requerida, ya que estos estudios representan la posibilidad de aplicación en muchos ámbitos.

La investigación sobre las celdas de combustible en terrarios es necesaria, puesto que busca la longevidad en su producción energética, además de la autosuficiencia al no necesitar mantenimientos específicos más que otorgarle luz solar. Es una tecnología que provee un importante valor agregado a la protección del medio ambiente, además de protegerla en si, puesto que otra de sus versatilidades se basa en la aplicación en sinergia con sensores para el análisis de ecosistemas remotos e inaccesibles.

Es importante impulsar el estudio respecto a esta temática en Colombia y Latinoamérica, puesto que las investigaciones se han producido en su mayoría en el continente europeo y asiático, lo que limita la obtención de información en el idioma hispano. Colombia cuenta con una importante diversidad que puede ser indagada para esta finalidad; incluso por su necesidad de iluminar zonas que se encuentran realmente apartadas, imposibilitando la distribución energética.

Las CCM son un sistema independiente, autosuficiente, y sobra decir que eco-amigable; tiene las diversas capacidades de ser aplicado, llevando a la posibilidad de bioelectricidad por largos periodos de tiempo.

El prototipo planteado de CCM en terrario, es hasta el momento una idea teórica que busca optimizar la producción energética simplificando el sistema a partir del estudio de la misma planta

y su comportamiento frente a las configuraciones de CCM; este prototipo librería de varios factores influyentes al momento de trabajar con la planta, reduciría el estrés vegetal la cual se puede dar por sobresaturación e implementación de compuestos para la obtención de mejores resultados de potencia; No se vería directamente afectada por cambios climáticos bruscos; Conservaría su temperatura; El ciclo del agua interno se mantendría, a su vez que se daría su producción en el compartimiento catódico; Abre la posibilidad de estudiar la implementación de las CCM no solo en una planta, si no en un ecosistema, lo que podría teóricamente aumentar la producción de luz; entre otras cosas a investigar. El sistema tendría la capacidad de mantenerse en funcionalidad por lo que dure vivo su ecosistema interno, y si se logra adaptar la tecnología, se podría estimar una producción energética autosostenible por más de 30 años.

7. Bibliografía

- Arends, J. B. A., Blondeel, E., Tennison, S. R., Boon, N., & Verstraete, W. (2012). Suitability of granular carbon as an anode material for sediment microbial fuel cells. *Journal of Soils and Sediments*, 12(7), 1197–1206. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0537-6>
- Arends, J. B. A., Speeckaert, J., Blondeel, E., De Vrieze, J., Boeckx, P., Verstraete, W., ... Boon, N. (2014). Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(7), 3205–3217. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5328-5>
- Azri, Y. M., Tou, I., Sadi, M., & Benhabyles, L. (2018). Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*, 15(4), 254–263. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1432487>
- Bagshaw Ward, N. (1899). *Library of The New York Botanical Garden* (Second). London.
- Brinker, A. (2012). Morphogenesis of the Terrarium. *The American Biology Teacher*, 74(7), 521–524. <https://doi.org/10.1525/abt.2012.74.7.17>
- Cabezas, A. (2010). Diversity and Function of the Microbial Community on Anodes of Sediment Microbial Fuel Cells fueled by Root Exudates Doctoral. *Microbiology, PhD*, 184.
- Cabezas, A., Pommerenke, B., Boon, N., & Friedrich, M. W. (2015). *Geobacter*, *Anaeromyxobacter* and *Anaerolineae* populations are enriched on anodes of root exudate-driven microbial fuel cells in rice field soil. *Environmental Microbiology Reports*, 7(3), 489–497. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12277>
- Chicas, S. D., Sivasankar, V., Omine, K., Valladarez, J., & Mylsamy, P. (2018). Plant microbial fuel cell technology: Developments and limitations. En *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity* (pp. 49–65). https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_3
- China, F. of. (2000). CANNA Linnaeus. *Smithsonian*, 510650–510650.
- Clark, M. A., Choi, J., & Douglas, M. (2018). *Biology 2e*. Houston, Texas.
- Damen, T. H. J., van der Burg, W. J., Wiland-Szymańska, J., & Sosef, M. S. M. (2018). Taxonomic novelties in African *Dracaena* (Dracaenaceae). *Blumea: Journal of Plant Taxonomy and*

- Plant Geography*, 63(1), 31–53. <https://doi.org/10.3767/blumea.2018.63.01.05>
- Daniels, F. (1972). Photochemical Effects of Sunlight. *Biophysical Journal*, 12(7), 723–727. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(72\)86116-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(72)86116-2)
- French, C. S. (1952). Photosynthesis and related processes. *Physics Today*, 5(3), 20–21. <https://doi.org/10.1063/1.3067511>
- Gilani, S. R., Yaseen, A., Zaidi, S. R. A., Zahra, M., & Mahmood, Z. (2016). Photocurrent generation through plant microbial fuel cell by varying electrode materials. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 38(1), 17–27.
- Gómora-Hernández, J. C., Serment-Guerrero, J. H., Carreño-De-león, M. C., & Flores-Alamo, N. (2020). Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus* | Producción de voltaje en una celda de combustible microbiana vegetal utilizando *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 19(1), 227–237. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA542>
- Gul, M. M., & Ahmad, K. S. (2019). *Biosensors and Bioelectronics Bioelectrochemical systems : Sustainable bio-energy powerhouses*. (August).
- Gulamhussein, M., & Randall, D. G. (2020). Design and operation of plant microbial fuel cells using municipal sludge. *Journal of Water Process Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101653>
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., & Sheng, G. P. (2016). Bioelectrochemical Chromium(VI) Removal in Plant-Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3882–3889. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06376>
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10), 3541–3547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.124>
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., & Buisman, C. J. N. (2012). New plant-growth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 104, 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.005>

- Helder, Marjolein. (2012). *Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell Electricity generation with living plants – from lab to application*. Recuperado de <https://www.plant-e.com/en/informatie/>
- Helder, Marjolein, Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 51(0), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.011>
- Hublikar, L., Ganachari, S. V., & Yaradoddi, J. S. (2019). Green Energy Generation from Microbial Fuel Cells. En L. M. T. Martínez, O. V. Kharissova, & B. I. Kharisov (Eds.), *Handbook of Ecomaterials* (Vol. 1, pp. 1207–1220). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_195
- Jung, S. P., & Pandit, S. (2018). Important factors influencing microbial fuel cell performance. En *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Microbial Electrochemical Technology: Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00015-7>
- 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(September 2018), 402–414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>
- Klaisongkram, N., & Holasut, K. (2015). *Electricity generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using Cyperus Involucratus R.* 42(1), 117–124. <https://doi.org/10.14456/kkuenj.2015.2>
- Kothapalli, A. (2013). Sediment Microbial Fuel Cell as Sustainable Power Resource. *UM Digital Commons*, (December), 1–50.
- Kumar, S. S., Kumar, V., Kumar, R., Malyan, S. K., & Pugazhendhi, A. (2019). Microbial fuel cells as a sustainable platform technology for bioenergy, biosensing, environmental monitoring, and other low power device applications. *Fuel*, 255(February), 115682.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115682>

- Kwak, J. Il, & An, Y. J. (2016). The current state of the art in research on engineered nanomaterials and terrestrial environments: Different-scale approaches. *Environmental Research*, 151, 368–382. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.005>
- Liu, B., Ji, M., & Zhai, H. (2018). Anodic potentials, electricity generation and bacterial community as affected by plant roots in sediment microbial fuel cell: Effects of anode locations. *Chemosphere*, 209, 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.122>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Long, S. P. (1999). Environmental Responses. *C4 Plant Biology*, 215–249. <https://doi.org/10.1016/b978-012614440-6/50008-2>
- Lu, L., Xing, D., & Ren, Z. J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 195, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.098>
- Md Khudzari, J., Kurian, J., Gariépy, Y., Tartakovsky, B., & Raghavan, G. S. V. (2018). Effects of salinity, growing media, and photoperiod on bioelectricity production in plant microbial fuel cells with weeping alkaligrass. *Biomass and Bioenergy*, 109(December 2017), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.013>
- Moqsud, M. A., Gazali, T. A., Omine, K., & Nakata, Y. (2017). Green electricity by water plants in organic soil and marine sediment through microbial fuel cell. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39(2), 160–165. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1159263>
- Nitisoravut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(March), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Nurture Nature Center. *Terrarium Habitats*.
- Pamintuan, K. R. S., Calma, M. A. L., Feliciano, K. A. D., & Lariba, K. J. P. D. (2020). Potential

- of Bioelectricity Generation in Plant-Microbial Fuel Cells Growing House Plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 505(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012043>
- Pamintuan, K. R. S., Clomera, J. A. A., Garcia, K. V., Ravara, G. R., & Salamat, E. J. G. (2018). Stacking of aquatic plant-microbial fuel cells growing water spinach (*Ipomoea aquatica*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 191(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/191/1/012054>
- Regmi, R., Nitisoravut, R., Charoenroongtavee, S., Yimkhaophong, W., & Phanthurat, O. (2018). Earthen Pot-Plant Microbial Fuel Cell Powered by Vetiver for Bioelectricity Production and Wastewater Treatment. *江苏高教*, 2(April 2017), 6–11.
- Salinas, L. F. C., Ochoa, G. V., & Cardenas, Y. E. (2018). A scientometric analysis of the investigation of biomass gasification environmental impacts from 2001 to 2017. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(5), 223–229.
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2018). *Epipremnum aureum* and *Dracaena braunii* as indoor plants for enhanced bio-electricity generation in a plant microbial fuel cell with electrochemically modified carbon fiber brush anode. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.009>
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2019). An Insight into Plant Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemical Interface Engineering*, 137–148. <https://doi.org/10.1002/9781119611103.ch8>
- Sivasankar, V., Mylsamy, P., & Omine, K. (2018). Microbial fuel cell technology for bioelectricity. *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*, 1–311. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0>
- Sophia, A. C., & Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>
- 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>
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J. J., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.10.001>
- Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 74(6), 1271–1273. <https://doi.org/10.1271/bbb.90852>
- Tamura, M. N., Smith, W. W., Hooker, J. D., & Smith, W. W. (2000). 38. *CHLOROPHYTUM* Ker Gawler, *Bot. Mag.* 27: t. 1071. 1807. 3–5.
- Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2017). Evaluation of Sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 108(November 2016), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.017>
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Arampatzoglou, C., Buisman, C. J. N., & Hamelers, H. V. M. (2012). Rhizosphere anode model explains high oxygen levels during operation of a *Glyceria maxima* PMFC. *Bioresource Technology*, 108, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.088>
- Timmers, Ruud A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schlöter, M., ... Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 537–548. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3894-6>
- Timmers, Ruud A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3), 973–981. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2440-7>
- Timmers, Ruud A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass and Bioenergy*, 51, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.002>
- Tou, I., Azri, Y. M., Sadi, M., Lounici, H., & Kebbouche-Gana, S. (2019). Chlorophytum microbial fuel cell characterization. *International Journal of Green Energy*, 16(12), 947–959.

<https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1650049>

- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., & Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102(14), 7036–7042. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.033>
- Wang, H., & Ren, Z. J. (2013). A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1796–1807. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.10.001>
- Wang, Y., Wang, J., Song, X., Abayneh, B., Ding, Y., Yan, D., & Bai, J. (2016). Microbial community structure of different electrode materials in constructed wetland incorporating microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 221, 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.116>
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D. (2017). Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*, 185, 642–649. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.122>
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C., & Strik, D. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass and Bioenergy*, 83, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.006>
- Wetser, Koen. (2016). *Electricity from wetlands Technology - Technology assessment of the tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode*.
- Wetser, Koen, Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.006>
- Widharyanti, I. D., Hendrawan, M. A., & Christwardana, M. (2020). Membraneless Plant Microbial Fuel Cell using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for Green Energy Generation and Biomass Production. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1), 71–78. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.32403>
- Yasri, N., Roberts, E. P. L., & Gunasekaran, S. (2019). The electrochemical perspective of

- bioelectrocatalytic activities in microbial electrolysis and microbial fuel cells. *Energy Reports*, 5, 1116–1136. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.007>
- Yoon, T. H., Song, H. J., Jung, W. Y., Kim, J. E., Kim, K. J., Kim, H. H., ... Kim, H. J. (2018). Monitoring Plant Health Using a Plant Microbial Fuel Cell. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 39(10), 1193–1197. <https://doi.org/10.1002/bkcs.11575>
- Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., & Hu, Y. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: Batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal*, 229, 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.023>