



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA DE
CALIFORNIA**

**Facultad de Ciencias de la Ingeniería y
Tecnología**

**“Sistema biofotovoltaico con plantas nativas de
clima templado y cálido en Tecate, B.C.”**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presenta:

ANDREA CAROLINA PRIETO MANZANAREZ

Director de tesis:

RODRIGO VIVAR OCAMPO

Codirector:

OSCAR DIEGO ARMENDÁRIZ IBARRA

Tijuana, Baja California, 2025

FCITEC

Dedicatoria

A mi hija y a mi pareja, por ser mi mayor fuente de amor, inspiración y fortaleza. Su apoyo incondicional ha sido clave en cada paso de este camino. Esta meta es también para ustedes.

Agradecimientos:

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron posible la realización de esta tesis.

Asimismo, mi gratitud al programa de Ingeniería en Energías Renovables, que nos permitió el acceso al laboratorio para realizar las pruebas eléctricas necesarias. Su colaboración fue vital para el éxito de este proyecto.

Un reconocimiento especial al Biólogo Oscar Diego Armendáriz Ibarra, por su constante apoyo y comprensión durante todo el proceso de creación y manufactura del sistema biofotovoltaico. Sus conocimientos y su paciencia fueron invaluable.

Quiero también expresar mi agradecimiento al Dr. Eric Villanueva, cuyo asesoramiento y orientación académica fueron cruciales para el desarrollo de esta tesis. Sus enseñanzas y consejos han dejado una huella imborrable en mi formación profesional.

A mi familia, Isaac mi pareja y Brian mi cuñado, les estoy profundamente agradecido por su apoyo incondicional, sus valiosos consejos y por compartir conmigo sus conocimientos. Su amor y comprensión han sido mi mayor motivación durante todo este proceso.

Y, por último, pero no menos importante, al Dr. Vivar Ocampo, por su infinita paciencia, su inestimable asesoramiento y orientación a lo largo de todo este proceso. Su apoyo en todo momento ha sido esencial para la culminación exitosa de este trabajo.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Andrea Carolina Prieto Manzanarez

1 CONTENIDO

Índice de figuras.....	6
Índice de anexos.....	8
Índice de tablas	10
resumen	11
Abstract	13
1 Introducción.....	15
Objetivos	20
2 Antecedentes.....	21
3 Marco teórico.....	23
3.1 Celdas BPV y generación de energía.....	23
3.1.1 Fotosíntesis:	25
3.1.2 Celda de Daniell.....	32
3.1.3 Suelos.....	33
3.2 Diseño factorial	40
3.3 Diseño funcional	41
3.3.1 SolidWorks	41
3.3.2 Diagrama eléctrico	42
3.4 Investigación documental.....	42
4 Metodología.....	43
4.1 Diseño factorial	43
4.2 Caracterización de suelo.....	48
4.3 Diseño funcional e integración con el paisaje.....	54
4.3.1 Diseño en SolidWorks:	54
4.3.2 Planos:.....	55
4.3.3 Diagrama eléctrico	58
4.3.4 Ensamble (conexión en serie).....	59
4.4 Selección de especies vegetales	60
4.5 Caracterización del sitio de instalación	61
4.5.1 Hora solar pico (HSP).....	61
4.6 características de una celda.	63

5	Resultados:.....	64
5.1	Diseño factorial	64
5.2	Construcción de la celda biofotovoltaica	68
5.2.2	Segundo prototipo.....	75
	Diseño en SolidWorks.....	75
6	Análisis y resultados.....	79
7	Conclusiones.....	82
8	ANEXOS	84
8.1	Metodología de la construcción de la celda paso a paso:.....	84
8.2	Publicaciones por territorio.	92
9	Glosario:	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transformación de energía. Elaboración propia.	16
Figura 2. Esquema gráfico de una celda biofotovoltaica.	24
Figura 3. Fotosíntesis.	26
Figura 4. Transferencia de electrones.	28
Figura 5. Horizontes.	35
Figura 6. Triangulo textural.	37
Figura 7. Paso 1, Minitab.	43
Figura 8. Paso 2, Minitab.	44
Figura 9. Paso 3, Minitab.	44
Figura 10. Paso 4, Minitab.	45
Figura 11. Paso 5, Minitab.	46
Figura 12. Paso 6, Minitab.	47
Figura 13. Paso 7, Minitab.	47
Figura 14. Ubicación de extracción de suelo. (Google earth).	48
Figura 15. Extracción de suelo.	49
Figura 16. Extracción de suelo 2.	49
Figura 17. Muestras recolectadas.	50
Figura 18. Equipo de laboratorio.	52
Figura 19. Diseño en SolidWorks.	54
Figura 20. Maceta grande.	55
Figura 21. Maceta chica.	56
Figura 22. Diagrama eléctrico.	58
Figura 23. Conexión en serie del sistema.	59
Figura 24. Calculadora PVWatts®.	62
Figura 25. Resultados del diseño de Minitab.	64

Figura 26. Secuencia de experimentos.	65
Figura 27. Diagrama esquemático de la distribución de los niveles de las celdas biológicas.	66
Figura 28. Especie Graptosedm Francesco Baldi.	68
Figura 29. Suelo extraído.	68
Figura 30. Electrodo; a) Cobre y b) Zinc.	69
Figura 31. antes a) y después b) de tratamiento de ácido sulfúrico.	69
Figura 32. Prototipo, y su voltaje.	70
Figura 33. 6 bioceldas generando 4.43 V.	74
Figura 34. 6 macetas encendiendo LED rojo.	74
Figura 35. Nuevo diseño conectado en serie.	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Diseño frontal.....	84
Anexo 2. Diseño trasero.....	84
Anexo 3. Plano maceta grande.....	85
Anexo 4. Plano maceta pequeña.....	85
Anexo 5. Primer corte.....	86
Anexo 6. Inicia elaboración.....	86
Anexo 7. Todos los cortes.....	86
Anexo 8. Cortes.....	86
Anexo 9. Proceso de pegado.....	87
Anexo 10. Proceso de pegado.....	87
Anexo 11. Proceso de pegado.....	87
Anexo 12. Caras frontales.....	87
Anexo 13. Desagüe y cableado.....	88
Anexo 14. Corte circulas.....	88
Anexo 15. Proceso de pegado.....	88
Anexo 16. Proceso de pegado.....	88
Anexo 17. Proceso de pegado.....	88
Anexo 18. Proceso de pegado.....	88
Anexo 19. Pistola de clavos.....	89
Anexo 20. Angulo 2.....	89
Anexo 21. Angulo 3.....	89
Anexo 22. Angulo 1.....	89
Anexo 23. Con tinto 1.....	90
Anexo 24. Con tinto 2.....	90
Anexo 25. Tinto con base alcohol.....	90

Anexo 26. Tablero parte frontal..... 90
Anexo 27. Tablero parte trasera..... 90
Anexo 28. Finalizado..... 91
Anexo 29. Publicaciones por país..... 97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mediciones del primer prototipo.....	73
Tabla 2. Publicaciones por territorio.....	96

RESUMEN

La creciente demanda mundial de energía, alimentada en gran parte por combustibles fósiles, ha provocado una preocupante alteración climática y ambiental a nivel global. En respuesta a esta problemática, la energía biofotovoltaica ha surgido como una tecnología que aprovecha microorganismos fotosintéticos para convertir la energía lumínica en electricidad, durante la noche y sin depender del viento. (Pérez, 2015; Safla et al., 2023a; Tschörtner et al., 2019)

En este proyecto, se diseñaron y construyeron un total de 12 celdas biofotovoltaicas con el fin de integrarlas en el paisaje urbano, empleando dos factores con los cuales se definió la secuencia de experimentación utilizando el software Minitab. Una vez finalizada la construcción y seleccionados los componentes, como el ánodo, el cátodo, el suelo y las plantas, se llevaron a cabo mediciones de voltaje. Los datos recopilados de 22 de mayo al 22 de junio en temporada de primavera en este estudio serán fundamentales para evaluar la eficiencia de estas celdas biofotovoltaicas en función de los factores.

El experimento del proyecto se destaca por su eficiencia en la generación de potencia. Sin embargo, en cuanto al aspecto de integración al ecosistema o paisaje, el diseño general del sistema mostró un nivel medio de integración. Aunque funcional, se identifican oportunidades para mejoras en la integración paisajística del conjunto.

Finalmente, el proyecto de sistema biofotovoltaico, muestra un diseño moderadamente adaptable. Esto sugiere oportunidades prometedoras para su implementación en colonias rurales de Tijuana y zonas áridas, donde la combinación de generación de energía y vegetación puede ser beneficiosa.

Abstract

The growing global demand for energy, largely fueled by fossil fuels, has led to worrying climate and environmental disruption worldwide. In response to this problem, biophotovoltaics has emerged as a technology that harnesses photosynthetic microorganisms to convert light energy into electricity at night and without relying on wind. (Pérez, 2015; Safla et al., 2023a; Tschörtner et al., 2019)

In this project, a total of 12 biophotovoltaic cells were designed and built to integrate them into the urban landscape. Two factors were used to define the experimental sequence using Minitab software. Once construction was completed and components—such as the anode, cathode, soil, and plants—were selected, voltage measurements were taken. The data collected from May 22 to June 22 during the spring season in this study will be critical for evaluating the efficiency of these biophotovoltaic cells based on the factors.

The project experiment stands out for its efficiency in power generation. However, in terms of integration into the ecosystem or landscape, the overall system design showed a medium level of integration. Although functional, opportunities for improvements in the landscape integration of the system were identified.

Finally, the biophotovoltaic system project shows a moderately adaptable design. This suggests promising opportunities for its implementation in rural neighborhoods of Tijuana and arid areas, where the combination of power generation and vegetation can be beneficial.

1 INTRODUCCIÓN

La producción de energía a base de combustibles fósiles experimenta un declive alcanzando niveles alarmantes de contaminación y de gases de efecto invernadero (GEI), creando la necesidad de encontrar alternativas energéticas que contribuyan a mitigar el impacto de la actividad humana en el entorno ambiental, con el propósito de obtener un balance ecológico mundial y calidad de vida. (Busalmen, 2010). México no es la excepción y enfrenta una grave crisis de producción de energía, debido al uso de hidrocarburos de origen fósil por más de 4 décadas. Pasando por una etapa de producción abundante y barata, a otra de escasez y altos costos, sin dejar de lado sus altos niveles de contaminación. (Amylkar D. Acosta M, 2011) ; (Torres Flores, 2019) Ante esta situación el gobierno mexicano fundó el programa PRONACES, pretendiendo establecer la ruta hacia una Transición Energética Justa y Sustentable, con el fin de fomentar una mayor participación de las energías renovables en la matriz energética nacional. (“Energía”, s/f).

En el capítulo de antecedentes se presenta una justificación sustentable, que son los sistemas bio-electroquímicos (BES) como una forma alternativa que se constituye por una extensa variedad de tecnologías emergentes, donde se emplean organismos microscópicos para catalizar reacciones anódicas y/o catódicas dentro de un sistema de celda de combustible, la mayoría de estos sistemas depende de sustratos orgánicos como su principal fuente de energía, en este estudio nos centramos en sistemas que funcionan con energía lumínica, en esta instancia, ubicamos la producción de energía con sistemas biofotovoltaicos (BPV) que utiliza organismos

fotosintéticos para recolectar energía luminosa y generar electricidad.(J. McCormick et al., 2015a; Proyector FSE, 2018) En el capítulo 3 en el marco teórico, presentamos los conceptos necesarios en el campo de producción con energía biofotovoltaica, que aporta conocimiento que durante años de investigación se ha perfeccionado, teniendo una expansión masiva pero que actualmente ocasiona inquietud sobre sus efectos en el ecosistema, debido a la presencia de elementos tóxicos en su fabricación y la demanda de metales raros, así como su disposición final. La propuesta de producir energía por medio de sistemas biofotovoltaicos, se basa en un desarrollo similar, sumando que al mismo tiempo se reducirán los efectos contaminantes de la producción de paneles solares, debido a que utiliza organismos vivos que son capaces de auto-repararse, reproducirse y almacenar energía para la producción de energía durante la noche. En consecuencia, la tecnología BPV ha obtenido más atención en los últimos tiempos debido a estas ventajas.(J. McCormick et al., 2015a; Zhu et al., 2023a)



Figura 1. Transformación de energía. Elaboración propia.

La producción de energía a través de sistemas biofotovoltaicos es un campo de estudio reciente, su progreso está limitado dado que carece de estandarización y comparabilidad en la experimentación para lograr una eficiencia en la tecnología y el desafío clave es la dificultad de extraer los electrones de las cadenas de transporte de electrones fotosintéticos en un electrodo extracelular.(Tschörtner et al., 2019; Zhu et al., 2023a)

El presente trabajo tiene como propósito contribuir al conocimiento sobre la generación de energía limpia y renovable a través de sistemas biofotovoltaicos. Se compara la eficiencia en la generación de energía eléctrica utilizando dos factores ‘tres tipos de plantas y dos tamaños de maceta’. Para lograrlo, se definieron metas específicas que posibilitaron el diseño y la creación de un sistema biofotovoltaico que se integra al ecosistema. A partir del capítulo 4 se presenta la metodología donde se examinan estos factores que generan electricidad a través de sistemas biofotovoltaicos aporta datos adicionales que se traducen en futuras innovaciones.

En el proceso de desarrollo del sistema biofotovoltaico, se llevó a cabo una etapa crucial denominada caracterización del suelo. En esta etapa del proyecto, consultamos Normas Oficiales Mexicanas, como la NOM-021-RECNAT-2000 que nos instruyó en cómo realizar distintos análisis para evaluar la calidad del suelo, tales como el pH, la conductividad eléctrica, así como obtener las muestras a través del estudio de perfiles de suelo. Estos análisis son esenciales para obtener un suelo adecuado para nuestro sistema biofotovoltaico. Se seleccionó la localidad de El Hongo, Tecate, B.C. como el lugar donde llevó a cabo los análisis, porque el terreno no ha tenido un impacto humano tan grave como en el centro del municipio, además que encontramos

encinos, la tierra con hojas de encino es un sustrato rico en nutrientes y es utilizado para mejorar suelos de jardines urbanos. (Elena Ramos Vásquez, 2008; Héctor Daniel Mantero-García, 2020)

Es relevante subrayar que el suelo es un reservorio de microorganismos cuya presencia es fundamental para mantener la calidad, evolución y conservación de este. Estos microorganismos desempeñan un papel esencial al interactuar de manera simbiótica con las raíces de las plantas, favoreciendo la nutrición y el crecimiento vegetal. En el contexto del sistema biofotovoltaico, estos microorganismos juegan un rol clave al interactuar con los electrodos, tanto el ánodo como el cátodo, contribuyendo a mejorar la transferencia de electrones. (Kenrick Vezina, 2015; Symborg, 2023; Symborg., 2023)

Para el diseño de los electrodos, el ánodo y el cátodo, se optó por utilizar una malla de zinc galvanizado siendo este nuestro polo negativo y una malla de cobre, que fue nuestro polo positivo. Estos materiales fueron seleccionados por su fácil disponibilidad y replicabilidad, basándonos en el principio de la celda galvánica de Daniell que funciona con cobre y zinc. Estos elementos resultan fundamentales para el desarrollo del diseño de las macetas, sirviendo como base para las medidas y estructura de ellas.

Para finalizar el proceso de diseño, se realizó una cuidadosa selección de las plantas que se podrían utilizar. Los criterios utilizados fueron, el tipo de hábitat donde crecen naturalmente, la adaptación al clima, al suelo, y la demanda local. Se priorizaron aquellas plantas que fueran

fáciles de conseguir en las zonas donde se pretende implementar el sistema, especialmente en aquellas comunidades que sufren de marginación. De esta manera, se busca que el proyecto tenga un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en la calidad de vida de las personas.

Como producto de este proyecto, hemos desarrollado un sistema biofotovoltaico que aprovecha la energía solar y la actividad microbiana para generar electricidad. Para comprobar la funcionalidad de cada una de las celdas biológicas que forman el sistema, utilizamos un multímetro digital DT-9205A que nos permitió medir el voltaje generado por cada celda durante un periodo de 30 días. Con estos datos, pudimos evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema biofotovoltaico bajo diferentes condiciones ambientales y operativas.

La metodología empleada en esta investigación se fundamentó en una revisión bibliográfica de estudios previos relacionados con sistemas biofotovoltaicos. Se presentan, los comparativos y el análisis de los resultados en la generación de energía eléctrica mediante la utilización de tres tipos diferentes de plantas.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Diseñar, construir y evaluar un sistema biofotovoltaico que aproveche organismos fotosintéticos para la generación de energía eléctrica de forma sostenible, analizando su eficiencia y viabilidad técnica.

Objetivos específicos:

- Diseñar y construir una celda electroquímica basada en un sistema biológico.
- Establecer un procedimiento para la evaluación de una celda biofotovoltaica.
- Evaluar generación de energía.

2 ANTECEDENTES

Ciertas plantas tienen la capacidad de producción de energía eléctrica, dicha capacidad se explica gracias a que algunos microorganismos utilizan su aparato fotosintético y la luz entrante para dividir la molécula de agua; generando protones y electrones que se recolectan mediante un sistema bioelectroquímico. De modo que la fotosíntesis puede ser utilizada para producir electricidad de manera sostenible y los recursos naturales pueden ser aprovechados para generar energía limpia y renovable. (Jawre, 2018; Tschörtner et al., 2019)

Ante esto surge la pregunta, si la generación de energía eléctrica a partir de fotosíntesis natural es una realidad escalable. Zapien explora esta aplicación, así como las posibilidades y limitaciones de esta tecnología para finalmente plantear líneas de investigación que ayuden a desarrollar sistemas biofotovoltaicos más eficientes y escalables. (Zapien Rodríguez, 2019) Para dar respuesta a esto actualmente se estudia la capacidad de generación de energía para diferentes tipos de especies de plantas, de manera grupal, en serie o en paralelo, utilizando como herramienta un multímetro. (Safra et al., 2023a) Acorde con lo anterior, Zamora Silva comparo la energía eléctrica generada por diferentes plantas, de aquí se desprende que las principales variables a tratar son el área foliar y la cantidad de radiación solar que reciben. (Zamora Silva Elisa Milagros, 2017)

Se han analizado otras fuentes de energía, y las han comparado con la energía biofotovoltaica dando como resultado que el sistema BPV, es eficiente para controlar los contaminantes ambientales y reducir el uso de combustibles fósiles.(Jawre, 2018) Entre las variables que tenemos que estudiar para este sistema está la transferencia de electrones que es un paso crucial para la producción de energía en el sistema biofotovoltaico, la estrategia de extracción de electrones y los consorcios microbianos sintéticos son formas innovadoras de mejorar la eficiencia de la biofotovoltaica. Otras variables que tenemos que explorar el potencial de los organismos fotosintéticos, que utilizan microbios para catalizar reacciones anódicas y/o catódicas dentro de una configuración de celda de combustible. (J. McCormick et al., 2015; Zhu et al., 2023)

Finalmente, la energía biofotovoltaica es una forma de aprovechar la energía solar mediante el uso de organismos vivos que realizan la fotosíntesis. Estos organismos liberan electrones al medio, que pueden ser capturados por electrodos y convertidos en electricidad. Esta tecnología ofrece una alternativa limpia, renovable y rentable a las fuentes de energía convencionales, especialmente para comunidades remotas o aisladas que carecen de acceso a la red eléctrica. Una de las aplicaciones de la energía biofotovoltaica es el proyecto Plantalámpara, desarrollado por la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) de Lima, Perú, que consiste en un dispositivo que utiliza tubérculos para iluminar una lámpara LED durante dos horas por la noche. (JUAN PEDRO CHUET-MISSÉ, 2017; Kenrick Vezina, 2015) En resumen del análisis técnico-económico podemos observar que solo se puede aplicar en pequeña escala, las Plantalámpara representan una alternativa viable.(I.P. Nadya Gretel Farias, 2016)

3 MARCO TEÓRICO

El estudio de un sistema biofotovoltaico (BPV) nace como un campo de estudio, el cual ha tenido un constante desarrollo en el área de la generación de energía limpia y relevante en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles. Esta tecnología se basa en la utilización estratégica de microorganismos fotosintéticos, teniendo como característica principal ser autorrenovable, aprovechando la energía solar para producir corriente eléctrica. (Zhu et al., 2023b)

3.1 CELDAS BPV Y GENERACIÓN DE ENERGÍA

Los sistemas biofotovoltaicos (BPV) son esencialmente paneles solares vivos capaces de producir energía limpia mediante la captura de electrones de la luz solar durante el día y utilizando el carbono almacenado en células microbianas durante la noche o en condiciones climáticas adversas, sin depender necesariamente del suministro de sustrato orgánico.(Anam et al., 2021)

Se componen de celdas biológicas que aprovechan la actividad fotosintética que generan los microorganismos vivos como lo son las algas y plantas, siendo estos microorganismos los

actores principales, por su magnífica capacidad de convertir la luz solar en energía química, de esta forma se genera energía de manera innovadora y sostenible. (Alex Driver, 2011)

La celda biofotovoltaica se basa en el proceso natural de la fotosíntesis para generar energía eléctrica. En este tipo de sistemas, las plantas utilizan su capacidad fotosintética para convertir la luz solar y el dióxido de carbono (CO_2) en materia orgánica, liberando electrones durante este proceso, que a la vez generan corriente eléctrica apta para usarla. (M.A María Catalina Salgado Gutiérrez et al., 2019)

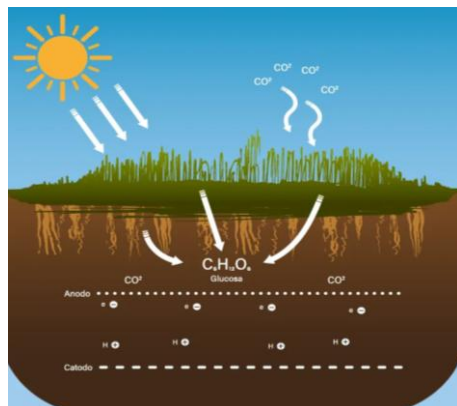


Figura 2. Esquema gráfico de una celda biofotovoltaica.

3.1.1 Fotosíntesis:

Para entender la fotosíntesis, tenemos que comprender la radiación solar, ya que es parte fundamental de este proceso, la radiación solar es la energía liberada por el Sol, la cual se propaga en todas direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esta energía influye en la dinámica de los fenómenos atmosféricos y climatológicos, y es directa o indirectamente responsable de las circunstancias cotidianas. La radiación solar es esencial para la vida en la Tierra, ya que posibilita la fotosíntesis de las plantas, mantiene una temperatura compatible con la vida y contribuye a la formación del viento. (CORPORATIVA, s/f; RADIACIÓN SOLAR - IDEAM, s/f)

3.1.1.1 El proceso de la fotosíntesis

El proceso de la fotosíntesis es vital para los seres vivos, ya que está directamente relacionado en el crecimiento y desarrollo de estos. Las plantas y otros organismos aprovechan este proceso para su nutrición, gracias a la clorofila, siendo ésta la principal fuente de captación de energía de la radiación solar, y la que permite que las plantas convierten las sustancias inorgánicas como el dióxido de carbono y el agua en sustancias orgánicas siendo estos los carbohidratos (como la glucosa, almidón) desprendiendo oxígeno. (Fundación Aquae, 2001)

Su fórmula química es:

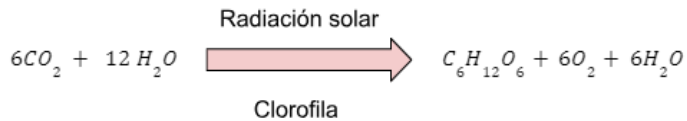


Figura 3. Fotosíntesis.

En este proceso, 6 moléculas de dióxido de carbono se combinan con 12 moléculas de agua, aprovechando la radiación solar y la clorofila como elementos clave, para crear una molécula de glucosa, 6 moléculas de oxígeno y 6 moléculas de agua.

Esta transformación es una reacción de óxido-reducción biológica, donde se produce una transferencia de electrones de un donante a un aceptor. En la mayoría de los seres fotoautotróficos, el dióxido de carbono actúa como el aceptor de electrones, mientras que el agua funciona como el donante. En este proceso, el agua (H_2O) se oxida, liberando electrones energizados que son transferidos al dióxido de carbono (CO_2), dando como resultado la producción de oxígeno (O_2) y carbohidratos (CH_2O). Este fenómeno es esencial para mantener el

equilibrio de oxígeno en la atmósfera y proporcionar la base de la cadena alimentaria en los ecosistemas terrestres.(Ana Zita Fernandes, 2022a)

El proceso de la fotosíntesis consiste en dos fases:

1) Fase lumínica

La fase lumínica o dependiente de la luz, tal cual su nombre lo dice utiliza la luz en forma de radiación electromagnética, apareciendo en pequeñas unidades llamados fotones o unidades de energía lumínica, la energía contenida en cada fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda, es decir, entre menor sea su longitud de onda de onda mayor será la energía que este tiene. La fase lumínica inicial cuando los fotones llegan al fotosistema II (PSII), que tiene dos moléculas de clorofila denominadas P680, esto quiere decir que absorbe la longitud de onda electromagnética de los 680 nm. Al ser captada la energía lumínica por el PSII genera la fotólisis del agua, que consiste en la hidrólisis del agua produciendo 2 electrones, 2 iones de hidrógeno (H⁺) y 1 átomo de oxígeno que es liberado al ambiente.

Al mismo tiempo provoca la excitación de los electrones la clorofila P680, esa excitación significa que eleva su energía de su estado base, por eso necesitan una molécula especial para ser transportados; esta molécula es el NADP⁺ (fosfato de dinucleótido de adenina y nicotinamida). La función de esta molécula es aceptar y retener los electrones de alta energía junto con catión H⁺, de esta forma, el NADP⁺ se transforma en NADPH, es decir, la energía lumínica se

transforma en energía química.(Ana Zita Fernandes, 2022b; Olazo, 2020; Universidad Nacional de Mar del Plata, s/f)

Ahora bien, tenemos H^+ . que no pueden moverse, estos necesitan una enzima para poder transportarse, llamada ATP sintetasa, cuando los H^+ pasan por esta enzima, esta gira como turbina y conecta a una molécula de ADP (Adenosina difosfato) agregando un grupo fosfato, generando la producción de ATP (Adenosina Trifosfato), a este proceso se le conoce como fosforilación. Por consiguiente, almacenamos la energía obtenida en la fase lumínica en moléculas de ATP y NADPH, que son energía química y posteriormente viajan al PSI (fotosistema I), para ser utilizados en la fase oscura.(Ana Zita Fernandes, 2022b; Olazo, 2020)

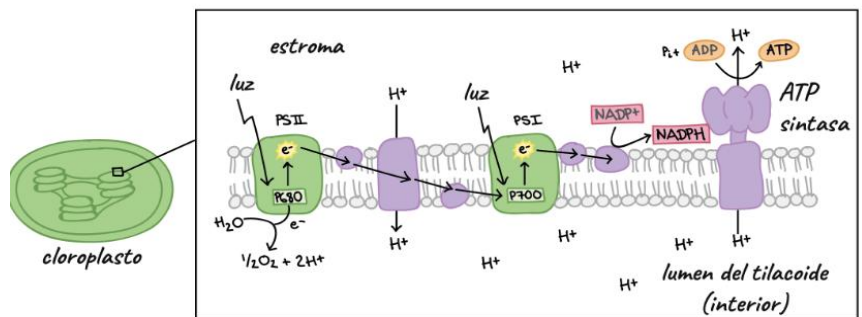


Figura 4. Transferencia de electrones.

2) Fase oscura

La fase independiente de la energía lumínica o fase oscura aprovecha la energía almacenada en las moléculas ATP y NADH, son los actores principales para la reducción de CO₂ mediante un proceso llamado ciclo de Calvin-Benson, que son una serie de reacciones que tiene como producto moléculas orgánicas. Este proceso utiliza tres ATP y dos NADPH por cada CO₂ que se incorpora, y este se divide en tres etapas:

- **Fijación del CO₂:** El dióxido de carbono del aire se une a una molécula de cinco carbonos llamada ribulosa difosfato (RuDP). Esto forma un compuesto inestable de seis carbonos, que rápidamente se divide en dos moléculas de fosfoglicerato, cada una con tres carbonos. Esta etapa la realiza una enzima llamada Rubisco.
- **Reducción del CO₂ fijado:** El fosfoglicerato se convierte en gliceraldehído fosfato (G3P), recibiendo electrones del NADPH que se produjo en la fase dependiente de luz. El G3P puede usarse para regenerar la RuDP o para sintetizar glúcidos, aminoácidos y lípidos.
- **Regeneración del RuDP:** Para completar el ciclo, es necesario regenerar la ribulosa difosfato (RuDP). Esto se logra usando cinco de las seis moléculas de gliceraldehído fosfato producidas en la fase anterior. (Ana Zita Fernandes, 2022b)

El oxígeno se libera como producto residual y lo usan la mayor parte de los organismos para la respiración celular y se producen sustancias químicas que sirven de alimento a los organismos, que es la glucosa.(Bióloga Natalia Ocampo Fernández, 2014)

3.1.1.2 Las rizobacterias

Las rizobacterias son bacterias que habitan la rizosfera, área del suelo que se encuentra unida a la raíz. Esta zona se caracteriza por la interacción única y dinámica de los procesos biogeoquímicos que ocurren entre las raíces de las plantas y microorganismos del suelo, además, alberga una gran cantidad de microorganismos que en general estimulan el crecimiento vegetal y reducen la incidencia de enfermedades.(Velasco-Jiménez et al., 2020)

El sistema biofotovoltaico (BFV) integra procesos biológicos como la fotosíntesis y la actividad de rizobacterias para generar energía eléctrica. Los organismos fotosintéticos capturan energía solar y liberan compuestos orgánicos, que a su vez sirven de alimento para rizobacterias ubicadas en la rizosfera. Estas bacterias metabolizan los compuestos y liberan electrones, los cuales son capturados por electrodos (ánodo y cátodo) que permiten generar una corriente eléctrica. Este proceso representa una estrategia innovadora y sostenible para transformar energía solar en electricidad, mediante una interacción simbiótica entre microorganismos y tecnología.

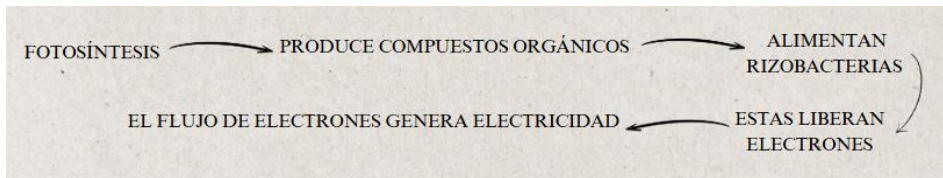


Figura 5. Generación de electricidad

3.1.2 Celda de Daniell

Para explicar la producción de energía en nuestro sistema electroquímico utilizamos el concepto de celda voltaica, donde se produce una reacción de oxidación en el ánodo y una reacción de reducción en el cátodo. Durante estas reacciones, los electrones se desplazan desde el ánodo al cátodo a través del circuito externo, generando corriente eléctrica. La diferencia de potencial entre los electrodos es lo que impulsa el flujo de electrones a través del circuito. Un ejemplo clásico de una celda voltaica es la celda de Daniell, que consiste en un ánodo de zinc sumergido en una solución de sulfato de zinc y un cátodo de cobre sumergido en una solución de sulfato de cobre. Esta celda genera electricidad a través de la reacción redox entre el zinc y el cobre. (William B. Jensen, 2015) La celda biofotovoltaica propuesta se construyó con base en estos dos elementos, combinando aspectos de la biología para lograr la conversión de energía solar en electricidad, lo que la clasifica como un dispositivo electroquímico dentro del campo de la energía renovable y la generación de electricidad.

3.1.3 Suelos

Conjunto de diversas entidades o cuerpos naturales que abarcan componentes sólidos, tales como minerales y materiales orgánicos, así como líquidos y gases, que se encuentran ubicadas sobre la superficie de la tierra. Este conjunto exhibe distintos niveles o estratos, los cuales son identificados como horizontes, se distinguen por sus diferencias con respecto al material original, debido a procesos que involucran adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones tanto de energía como de materia, y en un aspecto que radica en la capacidad de estas entidades para brindar sustento a las raíces de las plantas en su entorno natural. (DOF, 2002)

3.1.3.1 Génesis del suelo

La génesis del suelo constituye una faceta esencial en el campo de la ciencia del suelo, también denominada edafología cuando conjuga con la clasificación, esta disciplina se enfoca en abordar los factores y procesos que facilitan la formación del suelo, conocida como el estudio de la formación de suelos en la superficie de la corteza terrestre. En su alcance se encuentra la tarea de describir e interpretar los perfiles del suelo, así como los cuerpos y patrones de suelos que se presentan en la superficie terrestre. (Génesis y clasificación de suelos)

3.1.3.2 Perfil del suelo

Se considera un perfil de suelo completo a la representación vertical de una porción superficial de la corteza terrestre, en este perfil están contempladas todas las capas que han sido sometidas a alteraciones edafológicas a lo largo del proceso de formación del suelo, además de aquellas capas más profundas que ejercieron influencia en dicho proceso.

El perfil de un suelo puede observarse en un hueco recién cavado donde se distinguen distintas capas fácilmente por el color del suelo y el tamaño de partículas de este, identificadas como horizontes. (Génesis y clasificación de suelos)

El perfil del suelo ayuda a determinar la función que desempeña el suelo, analizándolo, beneficiando el proceso donde se obtienen varias muestras de suelo porque ayuda a diferenciar las muestras a simple vista con diversos factores como el color, la textura, estructura y el grosor de su partícula, y con análisis en laboratorio, como su composición química. (*Soil Profile - An Overview Of Layers and Content Of Soil*, s/f)

3.1.3.3 Horizontes

A partir del análisis previo, se observa que el perfil del suelo se estructura en una sucesión de horizontes o estratos de suelo dispuestos en capas superpuestas. Estos estratos o capas se identifican como:

Horizonte 0:

El horizonte 0 está constituido de materia vegetal en descomposición como las hojas de los árboles que se van integrando al suelo superficial, por ello se cataloga como un horizonte superficial. Este horizonte predomina en ecosistemas de bosques o selvas, donde se puede aglomerar en un volumen mayor la materia vegetal, por otro lado, en ecosistemas desérticos, el horizonte 0 puede ser muy delgado o tener nula existencia de este. (Germán Portillo., 2023)

Horizonte A:

El horizonte A se presenta en la capa superior del suelo, es aquí donde las raíces del pasto se arraigan de manera firme, en varias ocasiones esta capa tiene rastros del horizonte 0. Está formada una mezcla de partículas entre arcilla y arena, por lo regular es delgada, tiene un tono oscuro por disposición de humus.(Germán Portillo., 2023)



Figura 6. Horizontes.

3.1.3.4 Caracterización del suelo

El estudio de la caracterización de suelo aborda el componente físico del mismo, enfocándose en su estructura y textura mediante la aplicación del triángulo de la textura. Además, contempla el aspecto químico que tiene como objetivo identificar los minerales presentes en el suelo determinando también sus concentraciones, así como la presencia de sustancias que puedan obstaculizar el crecimiento de las plantas. Finalmente, se considera el componente biológico, que abarca la cantidad y el tipo de organismos presentes en el suelo.(EcuRed contributors, 2020)

En pos de asegurar la adecuada comprensión y tratamiento de los aspectos relevantes para esta investigación, hemos llevado a cabo una búsqueda exhaustiva y consultado la normativa correspondiente al suelo, específicamente la NOM-021-RECNAT-2000. Esta norma establece de manera detallada las especificaciones concernientes a la fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, ofreciendo pautas y directrices precisas para la realización de estudios, procesos de muestreo y análisis pertinentes a este campo de estudio.

3.1.3.4.1 Otros estudios relevantes

- **Triángulo Textural**

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) ha elaborado un método aceptado actualmente de forma generalizada para la clasificación de suelos, centrándose específicamente en las clases texturales. Al analizar minuciosamente las proporciones de arena, limo y arcilla, se emplea el triángulo textural como herramienta precisa para obtener una clasificación detallada del suelo. (CSR Laboratorio, 2023)

El suelo óptimo sería un sustrato con una textura arenosa o con perlita es ideal para la familia de las cactáceas, ya que ayuda a evitar el encharcamiento y favorece un buen desarrollo radicular.

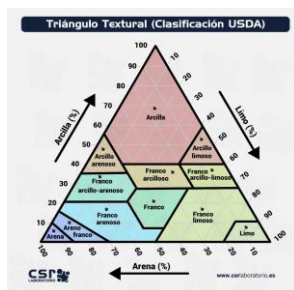


Figura 7. Triángulo textural.

- **Conductividad eléctrica del suelo**

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de la solución del suelo para transportar corriente eléctrica en función del contenido de sales disueltas o ionizadas en la solución (USDA,1999). Por lo tanto, a mayor CE, mayor es la concentración de sales.(Electrónica, 2020)

Por limitaciones del estudio no se llevaron a cabo, pero considero que es importante conocerlos ya que el suelo sedimentado inhibirá el crecimiento de las raíces y la prosperidad de las bacterias y la conductividad eléctrica nos ayuda al transporte de electrones.

3.1.3.4.2 pH del suelo

La acidez o alcalinidad del suelo se expresa a través de su pH, un factor determinante para que las plantas puedan acceder a los nutrientes necesarios. Esta medida se evalúa en una escala del 0 al 14, donde 7 se considera el punto neutral, por debajo de 7 indica acidez, mientras que aquellos por encima de 7 reflejan alcalinidad. (Oct 16 & Print, s/f)

El pH del suelo es crucial para el crecimiento óptimo de las plantas, variando según la especie. Por ejemplo, azaleas y rododendros adoran un pH de 5.0 a 5.5, mientras que otras plantas prefieren suelos ligeramente ácidos de 5.8 a 6.5 para prosperar. Si el pH se sale de estos rangos, el crecimiento puede debilitarse y causar deficiencias nutricionales. (Oct 16 & Print, s/f)

En estudios previos, se ha sugerido que para el cultivo de cactus y suculentas, un rango de pH entre 5.5 y 6.5 en el sustrato puede producir resultados ideales. (Ing. Agr. Oscar J. Herrera, 2019)

3.2 DISEÑO FACTORIAL

Un diseño factorial constituye un enfoque de experimentación diseñado para investigar los impactos ejercidos por diversos factores sobre una respuesta particular. Al llevar a cabo un experimento nos permite la manipulación simultánea de los niveles de todos los factores involucrados, a diferencia de modificarlos de manera individual y secuencial, este enfoque brinda la oportunidad de analizar en detalle las interacciones entre dichos factores.(Minitab, 2023)

Uno de los programas de computadora más empleados para esta finalidad es:

Minitab

Potente software de estadística que todos pueden usar para resolver los desafíos empresariales más difíciles. La mejor plataforma estadística a la que puede acceder en cualquier momento y en cualquier lugar, en la nube.(Minitab., 2023)

3.3 DISEÑO FUNCIONAL

El diseño y desarrollo de un nuevo producto se centra en satisfacer una demanda latente en el mercado. Esta labor implica cumplir con criterios específicos que aseguren su funcionamiento eficaz. El diseño funcional se encarga de definir las características y requisitos técnicos esenciales para el logro de los objetivos del producto. Este proceso abarca la selección de componentes, la estructura, el mecanismo de operación, pruebas de calidad, evaluación y validación con usuarios reales.

La integralidad del diseño funcional abarca desde aspectos estéticos hasta mecánicos, garantizando así que el producto atienda la necesidad latente para la cual fue concebido. La relevancia del diseño funcional radica en asegurar que el producto no solo cumpla su propósito, sino que también sea accesible y fácil de usar para los usuarios. Sin este enfoque en la funcionalidad y usabilidad, los esfuerzos invertidos en el desarrollo del producto carecerán de utilidad.(DALIA, 2023)

3.3.1 SolidWorks

SOLIDWORKS® es un software de diseño mecánico que posibilita a los creadores plasmar sus ideas con agilidad, explorar diversas operaciones y dimensiones, y crear modelos detallados y dibujos con precisión. (Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2011)

3.3.2 Diagrama eléctrico

Un diagrama eléctrico representa un circuito eléctrico de manera sencilla y gráfica, que sigue normas establecidas con el objetivo de que la persona que lo utilice entienda los componentes involucrados en el circuito eléctrico y sus conexiones, esto aumenta la facilidad de reproducir dicho circuito. (Reptil.mx, 2022)

3.4 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

Durante la revisión de información sobre sistemas biofotovoltaicos, se encontraron avances importantes en distintos países. India y Rusia lideran estas investigaciones, las cuales han despertado un gran interés a nivel global, como se muestra en la Anexo 29. Durante el estudio, se observó que los países analizados tienen una fuerte vinculación con la agricultura. Este tema es de relevancia mundial y abarca una extensa área geográfica.

4 METODOLOGÍA

4.1 DISEÑO FACTORIAL

Se utilizó el software Minitab, teniendo presente que este proporciona dos fases para la realización de diseños factoriales. En el contexto de la presente investigación, se optó por la primera fase, la cual se lleva a cabo al ejecutar el experimento por primera vez. En esta etapa, se asumió la responsabilidad de concebir y proponer las variables a considerar, marcando así el inicio del proceso experimental, siguiendo los siguientes pasos:

En la sección superior del software Minitab, se localiza la sección de "Estadísticas", la cual desplegará un menú:

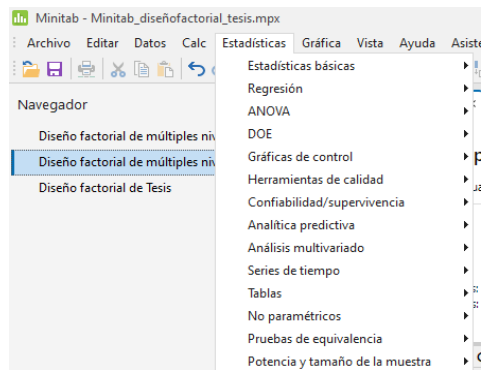


Figura 8. Paso 1, Minitab.

Del siguiente menú seleccionamos el diseño de experimentos (DoE), desplegando otro menú, donde seleccionamos Factorial para posteriormente darle clic en Crear Diseño Factorial

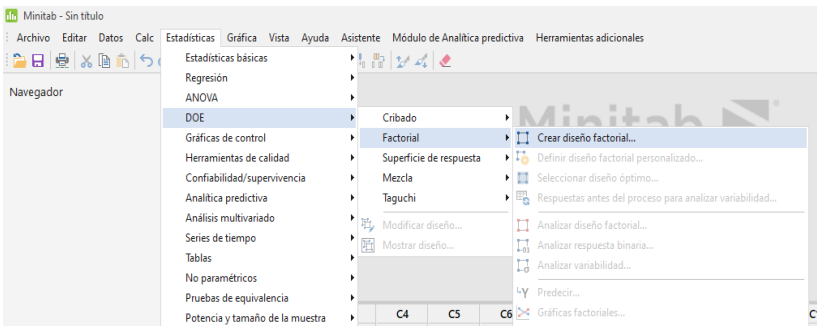


Figura 9. Paso 2, Minitab.

Arroja el siguiente cuadro

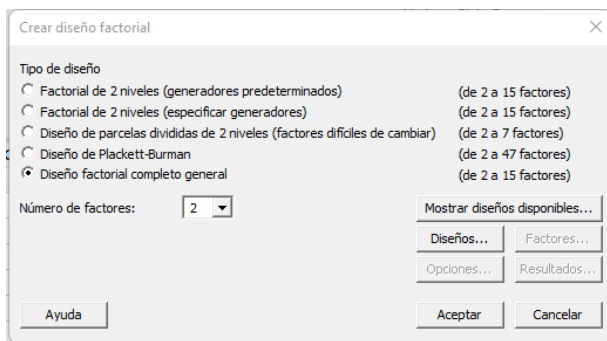


Figura 10. Paso 3, Minitab.

Donde seleccionamos ‘‘Diseño factorial completo general’’ y seleccionar el número de factores, que consideramos, en este caso son 2 los que vamos a tener, después daremos clic en ‘‘Diseños...’’

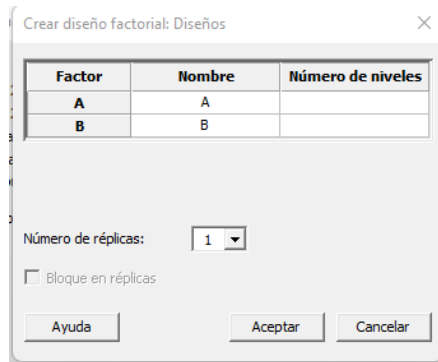


Figura 11. Paso 4, Minitab.

Considerando los factores del experimento que se está desarrollando tenemos que las variables son la especie de planta y el tamaño de maceta que se utilizará, es decir: A= Planta y B= Maceta.

En número de niveles quiere decir el número de plantas y/o el número de macetas que se utilizara, regresando al experimento, se propone 3 tipos de plantas, 1,2, y 3 y 2 diferentes tamaños de macetas, con las siguientes medidas:

Maceta grande= 12 x 12 cm

Maceta chica = 7 cm x 7 cm

Por lo tanto, hay 3 niveles en A (Planta) y 2 niveles en B (Maceta). En número de réplicas pondremos 2, ya que duplicaremos en mismo diseño.

Quedando de la siguiente manera:

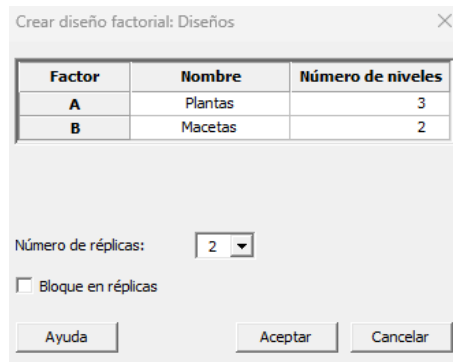


Figura 12. Paso 5, Minitab.

Damos Aceptar, nos regresamos al cuadro del inicio y damos clic en ‘Factores...’, teniendo en cuenta que tenemos en el Factor A (plantas **1,2 y 3**), y en el Factor B (Macetas, las medidas:

Maceta grande = 12 x 12 cm

Maceta chica = 7 x 7 cm



Figura 13. Paso 6, Minitab.

Regresamos al cuadro anterior dando clic en “opciones”, abriendo el siguiente cuadro:

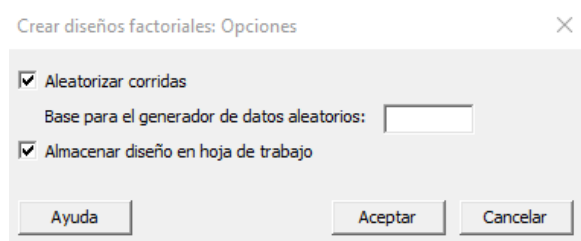


Figura 14. Paso 7, Minitab.

Confirmando que tenemos activada la opción de aleatorizar corridas, como lo haremos por primera vez, la dejamos activa, le damos aceptar y al primer cuadro aceptar y nos arrojará los resultados del diseño factorial.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELO

La elección de muestras representativas es fundamental para poder seleccionar el suelo óptimo para nuestro sistema biofotovoltaico.

Se seleccionó el municipio de Tecate B.C particularmente en un área cercana al Hongo, para la obtención del suelo, ya que ahí podemos encontrar encinos, y por lo tanto tierra de hojas de encino, que este es reconocido por tener un sustrato rico en nutrientes y con presencia de hongos micorrízicos que ayudan al buen desarrollo de las plantas de invernaderos y viveros, también utilizado por la comunidad y áreas cercanas para mejorar los suelos de los jardines. (Héctor Daniel Mantero-García, 2020)

Se realizaron dos perfiles en el área del Hongo B.C, exactamente en:

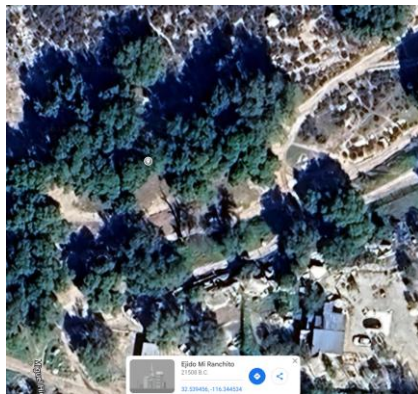


Figura 15. Ubicación de extracción de suelo.

(Google earth)

1. Observación del suelo a 14 pulgadas de profundidad.



Figura 16. Extracción de suelo.

2. Definición de los puntos de muestreo dependiendo de los horizontes vistos en los 36 cm de profundidad.



Figura 17. Extracción de suelo 2

Se apreciaron los horizontes 0 y el horizonte A, siendo el horizonte 0 la capa superficial con las hojas integradas en el suelo. Se recolectaron muestras de ambos horizontes.



Figura 18. Muestras recolectadas.

La bolsa grande es del horizonte 0, siendo ésta más ligera/porosa teniendo en su composición más hoja. La bolsa pequeña del horizonte A está siendo más pesada y con composición arenosa al tacto.

3. Muestreo

Reporte establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Nombre del interesado: Andrea Carolina Prieto Manzanarez

Ubicación de extracción de muestra: 32.539456, -116.344534	Fecha de muestreo y hora: 01/12/2024 y 9:40 a. m.
Propósito: análisis de pH	Profundidad: 5 cm
Número de perfil: 01	Color: café oscuro
Espesor: 2 cm	Horizonte: 0
Observaciones: Suelo húmedo con materia orgánica visible	ID de la muestra: 01

Nombre del interesado: Andrea Carolina Prieto Manzanarez	
Ubicación de extracción de muestra: 32.539456, -116.344534	Fecha de muestreo y hora: 01/12/2024 y 10:00 am
Propósito: análisis de pH	Profundidad: 36 cm
Número de perfil: 02	Color: Café claro
Espesor: 5 cm	Horizonte: A
Observaciones: Suelo seco con presencal de pequeñas raíces	ID de la muestra: 02

4. Análisis realizado.

-pH

5. Equipo de laboratorio.



Figura 19. Equipo de laboratorio

6. Interpretación de los análisis.



Muestras	pH
01	5.05
02	5.57

Los resultados obtenidos muestran que la muestra 01 tiene un pH de 5.05, mientras que la muestra 02 presenta un pH de 5.57. Considerando que el rango ideal de pH para el crecimiento óptimo de cactus y suculentas está entre 5.5 y 6.5, se puede concluir que:

- La muestra 02 se encuentra dentro del rango adecuado, aunque en el límite inferior, lo que sugiere que es un suelo ligeramente ácido pero apto para estas plantas.
- La muestra 01, con un pH de 5.05, está por debajo del rango ideal, indicando que el suelo es más ácido de lo recomendable. Esto podría afectar la absorción de nutrientes esenciales y requerir ajustes para mejorar sus condiciones.

Para optimizar el pH del suelo en la muestra 01, se podría considerar la adición de cal agrícola o carbonato de calcio para elevar ligeramente su pH y hacerlo más adecuado para el desarrollo de cactus y suculentas.

4.3 DISEÑO FUNCIONAL E INTEGRACIÓN CON EL PAISAJE

Se realizaron diferentes bocetos, con el fin de decidir cuál es el más adecuado para la propuesta de un sistema biofotovoltaico, cubriendo las necesidades de ser funcional y que se integre con el ecosistema, tomando en cuenta ambos factores se seleccionó y se recreó el siguiente modelo en SolidWorks:

4.3.1 Diseño en SolidWorks:



Figura 20. Diseño en SolidWorks.

4.3.2 Planos:

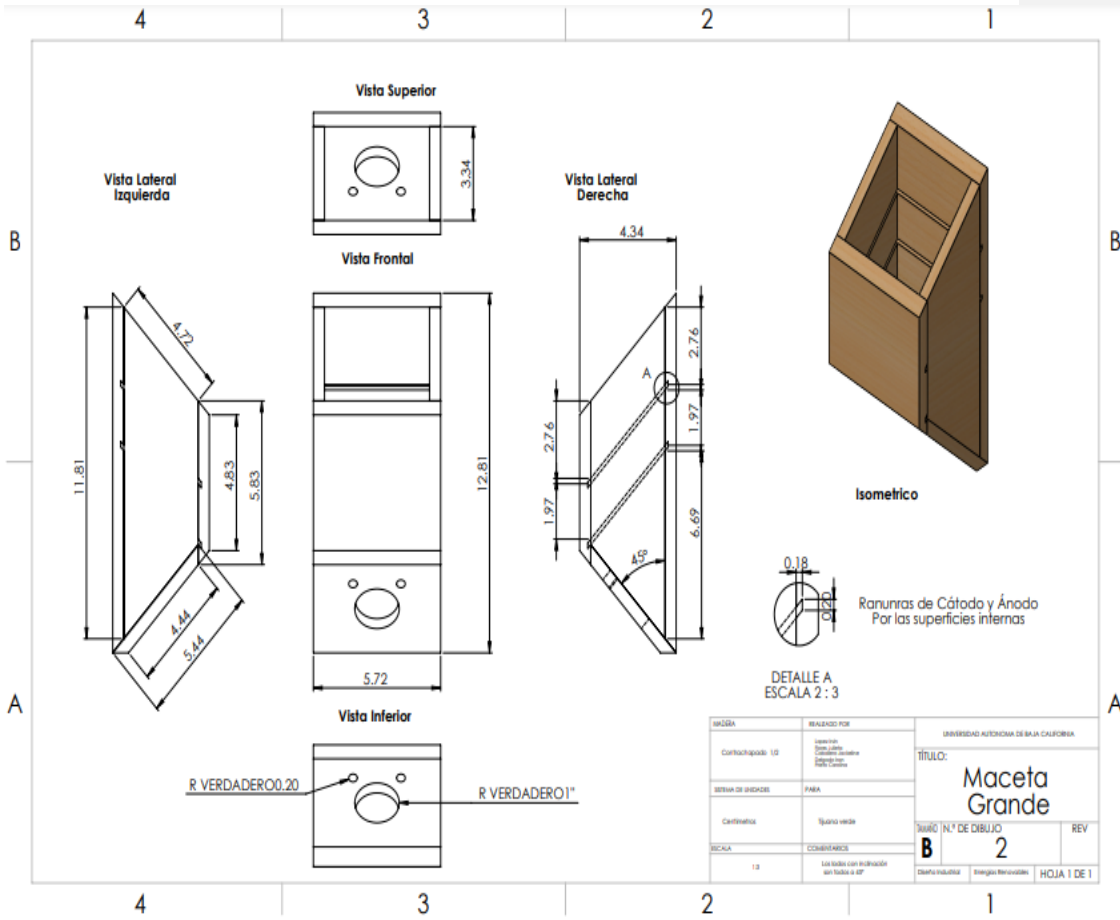


Figura 21. Maceta grande.

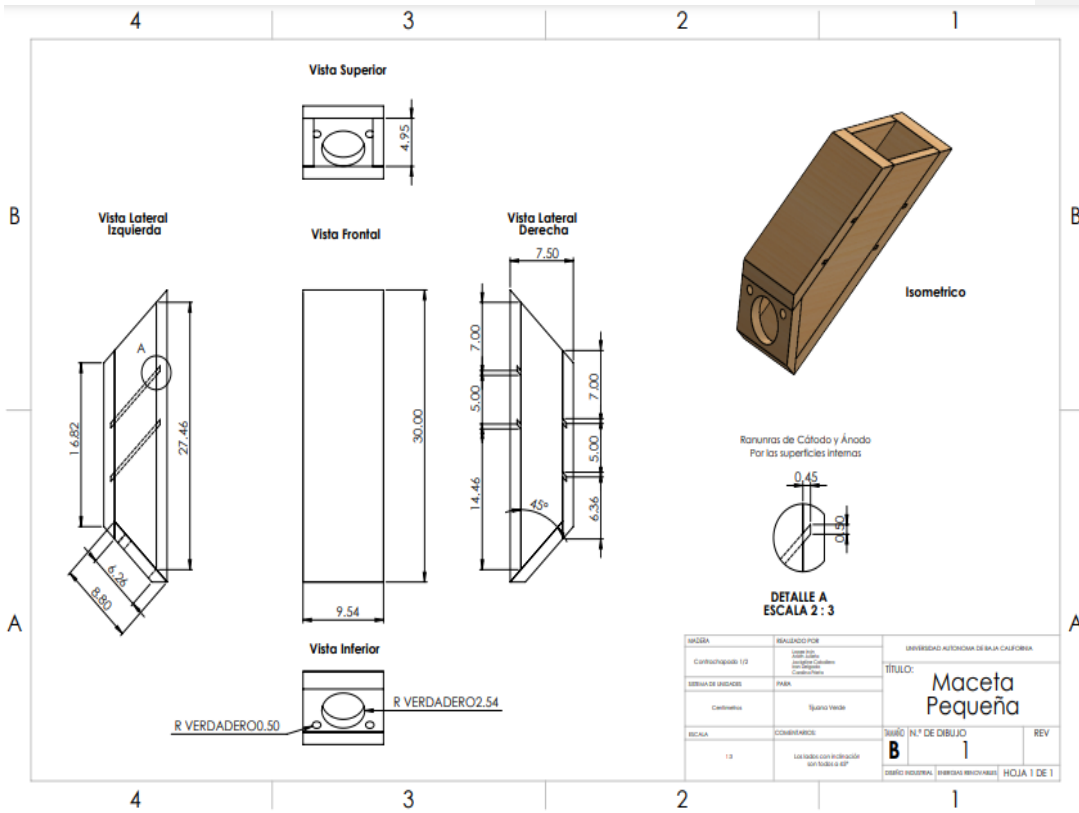


Figura 22. Maceta chica.

4.3.2.1 Fabricación semi-industrial

Una vez determinado el diseño y finalizados los planos, se dio inicio a la implementación del sistema biofotovoltaico. Este proceso se caracteriza por una metodología de fabricación semi-industrial, que combina el uso de maquinaria de gran escala en las instalaciones dentro de UABC unidad Valle de las Palmas, con fases manuales ejecutadas según las necesidades particulares de cada etapa del proceso. Esta estrategia permite una adaptabilidad dinámica a medida que avanza la construcción, asegurando la eficiencia y precisión requeridas en cada paso del proyecto.

Para la fase inicial del proyecto, se llevó a cabo un proceso detallado de fabricación que implicó el corte preciso de las macetas y la estructura utilizando una sierra de mesa JET modelo MS1-09D. Estos componentes fueron cuidadosamente unidos con adhesivo Resistol 5000 y reforzados con una pistola de clavos que empleaba clavos de 1 ¼ pulgadas. Posteriormente, se realizaron perforaciones estratégicas con el fin de permitir el paso del cableado necesario y proporcionar un sistema de drenaje efectivo para las plantas.

Como paso final en esta fase de construcción, se aplicó una capa protectora compuesta por una tinta base alcohol y aceite de linaza sobre la madera. Esta combinación de elementos se seleccionó específicamente por su capacidad para salvaguardar la estructura contra los efectos del agua y garantizar una mayor durabilidad en el tiempo.

4.3.3 Diagrama eléctrico

En el presente diagrama se puede observar el circuito utilizado que involucra, la conexión entre una fuente de voltaje y un diodo led junto con una resistencia. La fuente de voltaje es la representación de la celda biológica, a través del cátodo y ánodo, y a partir de estos tenemos una fuente que nos genera un voltaje que nos permite alimentar un led y se conecta de la manera en que se muestra en la imagen.

El led es un diodo que es necesario conectar como se muestra en el diagrama que permite que se cierre el circuito.

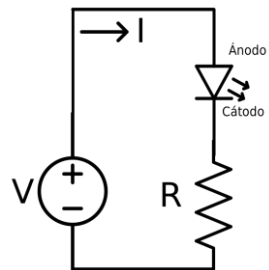


Figura 23. Diagrama eléctrico.

4.3.4 Ensamble (conexión en serie)

Por las cuestiones técnicas, se tuvo que hacer un nuevo diseño, que se presenta a continuación. El nuevo ensamblaje de este sistema fue en serie, con el objetivo de incrementar el voltaje, lo cual es una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia del sistema biofotovoltaico.

En la siguiente figura se puede observar la conexión en serie: positivo con negativo, y así sucesivamente hasta completar la conexión de todas las macetas. Se puede notar que los primeros y últimos cables quedan sueltos; estos actúan como las terminales del sistema, permitiendo la medición del voltaje o corriente.

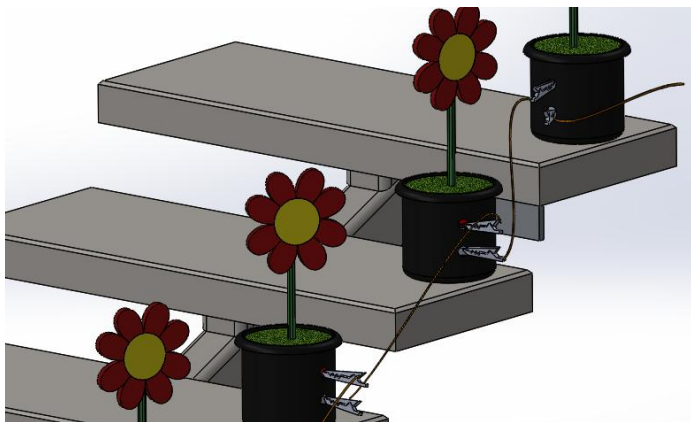


Figura 24. Conexión en serie del sistema

4.4 SELECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES

La elección de estas especies se basa en criterios específicos que aseguran su idoneidad para el proyecto, considerando factores como facilidad de reproducción, accesibilidad y abundancia en la región.

Además, se ha tomado en cuenta el conocimiento empírico y la experiencia práctica de la zona, asegurando así una elección adecuada y sostenible.

4.5 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE INSTALACIÓN

4.5.1 Hora solar pico (HSP)

El sistema biofotovoltaico será instalado en una vivienda de uso habitacional ubicada en un desarrollo urbano. Este tipo de sistema aprovecha la energía solar mediante procesos bioquímicos, combinando organismos fotosintéticos o materiales biológicos con componentes electrónicos para la conversión de energía solar en electricidad.

Según los datos del sitio, la radiación solar promedio anual es de 6.47 kWh/m²/día, lo cual representa un recurso solar considerablemente alto y favorable para la operación de sistemas biofotovoltaicos. Esta medida, conocida como Hora Solar Pico (HSP), es clave para estimar el potencial de generación del sistema, ya que indica cuánta energía solar útil incide en un metro cuadrado por día, en promedio, a lo largo del año.

La alta radiación solar del sitio indica que las condiciones climáticas y de ubicación son adecuadas para la instalación de un sistema biofotovoltaico, lo que podría traducirse en un buen desempeño técnico y ambiental.

Mes	Radiación solar / (kWh/m2 día)
Enero	5.02
Febrero	5.23
Marzo	6.45
Abril	6.95
Mayo	7.45
Junio	8.07
Julio	7.59
Agosto	7.66
Septiembre	6.80
Octubre	6.27
Noviembre	5.41
Diciembre	4.68
Anual	6.47

Figura 25. Calculadora PVWatts®

4.6 CARACTERÍSTICAS DE UNA CELDA.

Maceta:

1. Las celdas están diseñadas para ser ensambladas dentro de macetas dispuestas de forma vertical, lo que permite una mejor optimización del espacio disponible.
Este diseño vertical no solo facilita su instalación en áreas reducidas o en estructuras urbanas, sino que también abre la posibilidad de aprovechar espacios donde otros métodos de generación de energía no serían viables.
2. Además, se busca que el diseño de la maceta esté integrado visualmente con el entorno, respetando y complementando el paisaje urbano o natural. Esto convierte a las celdas no solo en un sistema funcional, sino también en un elemento estético que puede ser incorporado en jardines, fachadas o incluso interiores.
3. Cada maceta incluye orificios estratégicamente ubicados en la parte trasera, que permiten el paso y conexión de los terminales del ánodo y del cátodo. Esta disposición facilita el mantenimiento, la conexión en serie o paralelo de múltiples celdas, y la eficiencia del sistema en general.

5 RESULTADOS:

5.1 DISEÑO FACTORIAL

Empezamos este proyecto realizando el diseño factorial en el software Minitab, donde se obtuvieron dos resultados que fueron la guía de este. Obteniendo como primer resultado el resumen del diseño, con los valores que insertamos previamente el proceso, tenemos dos factores, cada uno con 3 y 2 niveles respectivamente, que como vimos son 3 especies diferentes de plantas y 2 tamaños de macetas, al multiplicar 3×2 , tenemos 6 por el número de réplicas que son 2 en total nos da 12 experimentos, es decir, el diseño del experimento consta de 12 celdas BPV.

En otras palabras, tenemos un diseño factorial de 3^2 , teniendo en cuenta que aumentamos el número de experimentos o duplicamos el diseño con el fin de obtener más datos sobre el rendimiento del sistema biofotovoltaico.

Resumen del diseño

Factores:	2	Réplicas:	2
Corridas base:	6	Total de corridas:	12
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Figura 26. Resultados del diseño de Minitab.

El segundo resultado que el software Minitab nos da es una hoja, tipo Excel, la cual se interpreta de la siguiente manera:

El experimento número 7, primera fila, dice que le tocaría la primera planta con la maceta grande, un diferente ejemplo es al experimento 12, le tocaría la planta número 3 y la maceta chica.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6-T
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Plantas	Macetas
1	7	1	1	1	1	Grande
2	12	2	1	1	3	Chica
3	11	3	1	1	3	Grande
4	3	4	1	1	2	Grande
5	4	5	1	1	2	Chica
6	8	6	1	1	1	Chica
7	1	7	1	1	1	Grande
8	10	8	1	1	2	Chica
9	9	9	1	1	2	Grande
10	2	10	1	1	1	Chica
11	5	11	1	1	3	Grande
12	6	12	1	1	3	Chica

Figura 27. Secuencia de experimentos.

Podemos ver que la secuencia de experimentos está en forma aleatoria, esto con el fin de evitar sesgo en los resultados, es decir, tendremos de forma más clara que factores influyen más en la generación de energía.

Distribución de las celdas biológicas.

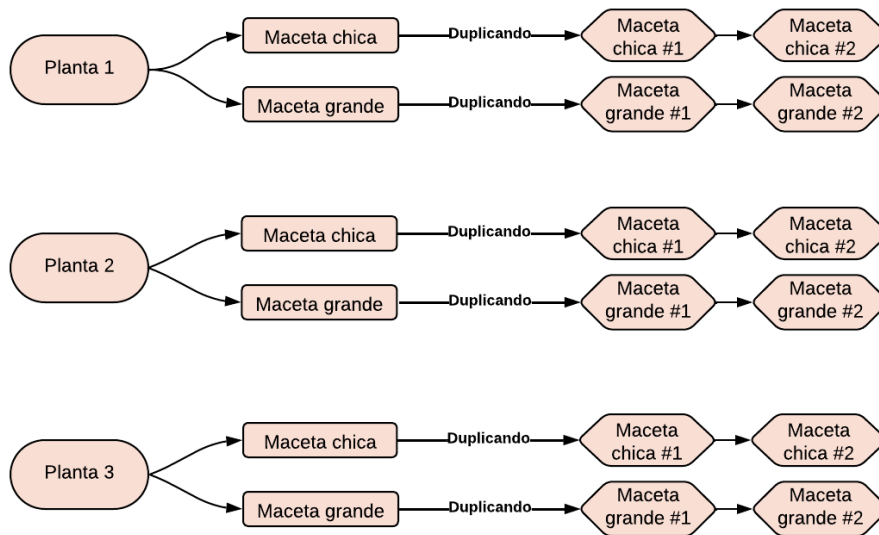


Figura 28. Diagrama esquemático de la distribución de los niveles de las celdas biológicas.

Al tener un esquema de la distribución de niveles de las celdas biológicas, podemos observar de otra manera los resultados del software Minitab, es decir, de manera gráfica, el proceso que seguimos en el experimento, teniendo la planta 1 con dos macetas de cada tamaño y así sucesivamente con las plantas 1 y 2.

Durante este proyecto, surgieron diversos factores que contribuyeron a la falta de resultados exitosos. En las primeras pruebas, se identificó que los materiales seleccionados no fueron adecuados. La madera utilizada, expuesta a las condiciones ambientales, sufrió un proceso de deterioro significativo, aunque inicialmente se propuso aplicar aceite de linaza para proteger la madera, este método resultó ineficaz, ya que la madera finalmente se dañó.

Otro factor determinante fue el diseño del proyecto en donde no se consideraron adecuadamente el uso y la utilidad de este. Al tratarse de un proyecto que incluye componentes como tierra y plantas, el peso involucrado no fue correctamente estimado. Como resultado, el diseño presentó fallas estructurales, inclinándose hacia adelante, lo que provocó la caída del proyecto. Esta inclinación causó que las macetas se despegaran de la estructura, resultando en la ruptura de plantas y cables.

Los caimanes utilizados en el circuito eléctrico, al igual que la madera, no están diseñados para uso a la intemperie. Adicionalmente, se les retiró el recubrimiento original, ya que este impedía su correcta instalación según los requerimientos específicos. Cabe destacar que los caimanes en contacto directo con el cobre provocan una reacción que acelera la oxidación del metal, comprometiendo así la durabilidad y el desempeño del sistema eléctrico.

Comentado [am1]: Que reacción?

5.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA BIOFOTOVOLTAICA

5.2.1 Primer prototipo

Se llevó a cabo la confección de una celda biológica mediante la utilización de materiales de fácil adquisición en entornos domésticos, siguiendo un enfoque empírico. El componente primordial fue una planta, identificada taxonómicamente como *Graptosedm Francesco Baldi*, perteneciente a la familia de cactáceas suculentas (Figura 25). El suelo utilizado fue extraído de la región del hongo en Tecate, B.C. (Figura 26)



*Figura 29. Especie
Graptosedm Francesco
Baldi.*



Figura 30. Suelo extraído.

Se fabricaron los electrodos, empleando malla de zinc galvanizado para el cátodo y malla de cobre para el ánodo. Para el tratamiento de la malla de zinc, se procedió a eliminar la capa protectora de PVC a través de un proceso químico utilizando ácido sulfúrico de concentración 0.2 molar.



Figura 31. Electrodo; a) Cobre y b) Zinc

Malla de zinc en microscopio:

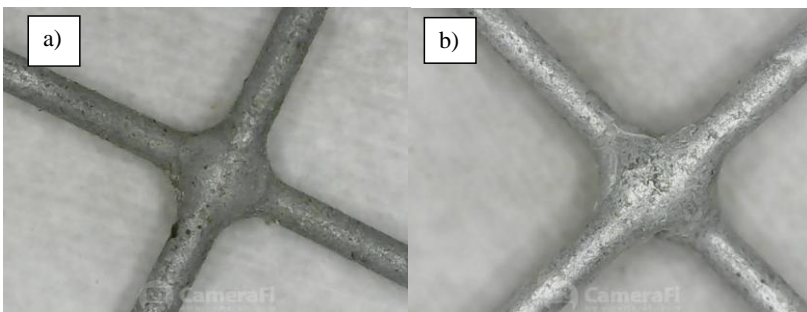


Figura 32. antes a) y después b) de tratamiento de ácido sulfúrico.

En este prototipo, se registró el voltaje, arrojando un valor de 0.76 Volts.

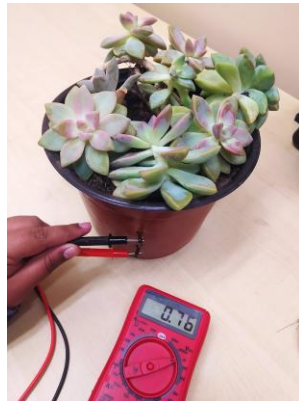


Figura 33. Prototipo, y su voltaje.

Con esta prueba, pudimos concluir que una sola celda biológica, no proporciona el suficiente voltaje y corriente para encender un led.

Se llevó a cabo mediciones de voltaje durante el lapso de 30 días:

Fecha y ahora	Voltaje (V)	Observaciones
01/10/2023 8:00 a. m.	0.88	Hubo riego.
01/10/2023 10:00 p. m.	0.85	Ninguna.
02/10/2023 8:00 a. m.	0.86	
02/10/2023 10:00 p. m.	0.82	
03/10/2023 8:00 a. m.	0.85	
03/10/2023 10:00 p. m.	.0.82	
04/10/2023 8:00 a. m.	0.85	Último riego 01/10/2023
04/10/2023 10:00 p. m.	0.81	
05/10/2023 8:00 a. m.	0.85	
05/10/2023 10:00 p. m.	0.81	
06/10/2023 8:00 a. m.	0.85	Se nota un suelo un poco húmedo.
06/10/2023 10:00 p. m.	0.81	

07/10/2023	0.83	
8:00 a. m.		
07/10/2023	0.80	
10:00 p. m.		
08/10/2023	0.70	
8:00 a. m.		
08/10/2023	0.68	
10:00 p. m.		
09/10/2023	0.65	Suelo totalmente seco
8:00 a. m.		
09/10/2023	0.67	Suelo totalmente seco
10:00 p. m.		
09/10/2023	0.80	Riego.
10:10 p. m.		
10/10/2023	0.78	Un día después del riego.
8:00 a. m.		
10/10/2023	0.76	
10:00 p. m.		
11/10/2023	0.77	
8:00 a. m.		
11/10/2023	0.76	
10:00 p. m.		
12/10/2023	0.77	
8:00 a. m.		
12/10/2023	0.75	
10:00 p. m.		
13/10/2023	0.76	
8:00 a. m.		

13/10/2023 10:00 p. m.	0.75
14/10/2023 8:00 a. m.	0.75
14/10/2023 10:00 p. m.	0.74
15/10/2023 8:00 a. m.	0.70
15/10/2023 10:00 p. m.	0.65
16/10/2023 8:00 a. m.	0.69
16/10/2023 10:00 p. m.	0.65
17/10/2023 8:00 a. m.	0.68
17/10/2023 10:00 p. m.	0.66

Tabla 1. Mediciones del primer prototipo.

Con los datos obtenidos y al trabajar con la estructura de nuestro sistema, se logró la operación de seis macetas, las cuales participaron en el evento Tijuana Verde. Durante este evento, las macetas mantuvieron encendido un LED rojo de 2.1 V, el cual operó de manera continua durante 50 horas consecutivas. Este experimento permitió verificar que las macetas tienen el potencial de suministrar energía de manera eficiente, al mantener el LED encendido sin interrupciones durante el tiempo establecido.

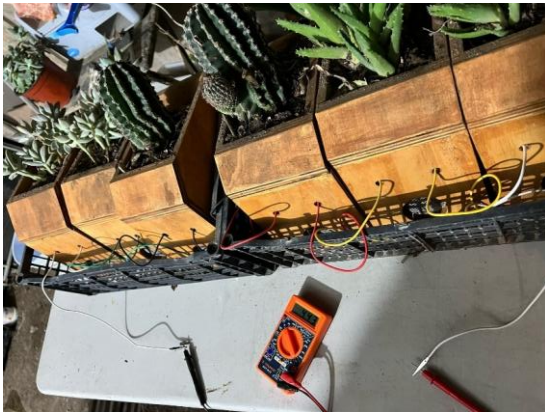


Figura 34. 6 bioceldas generando 4.43 V.



Figura 35. 6 macetas encendiendo LED rojo.

5.2.2 Segundo prototipo

Después de la experiencia inicial, se propuso y se desarrolló un diseño más sencillo y accesible, utilizando materiales disponibles en el hogar y algunos componentes del prototipo inicial. Al combinar ambos, se obtuvo un producto final, que se puede observar en la siguiente figura, elaborada en SolidWorks.

DISEÑO EN SOLIDWORKS

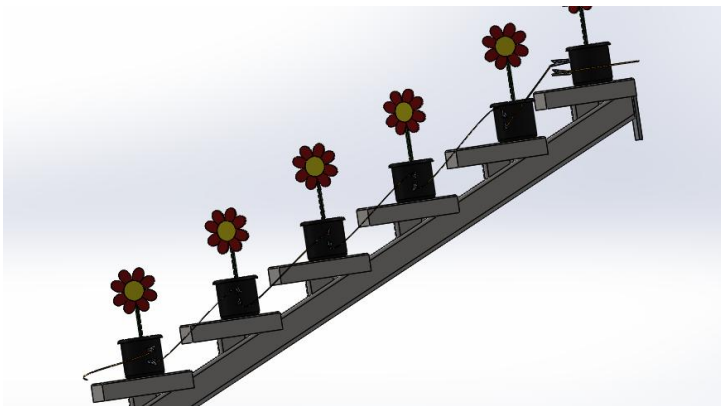


Figura 36. Nuevo diseño conectado en serie.

Registro de Voltaje del Sistema Biofotovoltaico (22 mayo - 20 junio 2024)

Fecha	Hora	Voltaje (V)	Observaciones
22 de mayo del 2024	10:00 p.m.	2.12	Día de riego.
23 de mayo del 2024	10:00 a. m.	2.16	
	10:00 p.m.	1.98	
24 de mayo del 2024	10:00 a.m.	1.85	
	10:00 p.m.	1.83	
25 de mayo del 2024	10:00 a. m.	1.76	
	10:00 p.m.	2.03	
26 de mayo del 2024	10:00 a.m.	1.75	
	10:00 p.m.	1.95	
27 de mayo del 2024	10:00 a. m.	1.9	
	10:00 p.m.	1.92	
28 de mayo del 2024	10:00 a.m.	1.85	
	10:00 p.m.	1.93	
29 de mayo del 2024	10:00 a. m.	2.07	
	10:00 p.m.	2.18	
30 de mayo del 2024	10:00 a.m.	2.05	
	10:00 p.m.	2.19	
31 de mayo del 2024	10:00 a. m.	2.37	
	10:00 p.m.	2.08	
01 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.06	
	10:00 p.m.	2.2	
02 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.1	
	10:00 p.m.	2.19	
03 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.05	

	10:00 p.m.	2.17	
04 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.06	
	10:00 p.m.	2.18	
05 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.04	
	10:00 p.m.	2.16	Día de riego.
06 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.21	
	10:00 p.m.	2.36	
07 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.2	
	10:00 p.m.	2.33	
08 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.19	
	10:00 p.m.	2.3	
09 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.17	
	10:00 p.m.	2.32	
10 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.18	
	10:00 p.m.	2.32	
11 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.19	
	10:00 p.m.	2.31	
12 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.17	
	10:00 p.m.	2.33	
13 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.16	
	10:00 p.m.	2.34	
14 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.15	
	10:00 p.m.	2.32	
15 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.15	
	10:00 p.m.	2.3	
16 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.13	
	10:00 p.m.	2.29	
17 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.1	
	10:00 p.m.	2.26	

18 de junio del 2024	10:00 a. m.	2.12	
	10:00 p.m.	2.28	
19 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.08	
	10:00 p.m.	2.25	
20 de junio del 2024	10:00 a.m.	2.05	
	10:00 p.m.	2.2	

En el futuro, se prevé la implementación de diversas mejoras en el nuevo diseño. Dado que este presenta una inclinación, se planea instalar un sistema de riego por goteo, optimizando así las horas de riego y aumentando la capacidad de generación de energía. Esto, a su vez, abre la posibilidad de instalar una batería que alimente luces en la escalera, incrementando la seguridad en el hogar.

Otra mejora en el sistema de generación de energía que se puede explorar en este tipo de proyectos es el uso continuo de electrolitos que contribuyan a mejorar la corriente eléctrica.

A partir de los datos obtenidos durante el periodo del 22 de mayo al 20 de junio de 2024, se analizó la variación del voltaje generado por el sistema biofotovoltaico, observando su comportamiento en función del posible riego aplicado, como se puede observar en la Figura 37.

1. Comportamiento inicial (22 al 25 de mayo):

Durante los primeros días del monitoreo, se registró una tendencia descendente en los valores de voltaje, iniciando en 2.12 V y disminuyendo progresivamente hasta alcanzar valores mínimos de aproximadamente 1.75 V. Esta caída sostenida sugiere estrés hídrico o condiciones de baja humedad, lo cual afecta negativamente la generación de voltaje.

2. Recuperación del voltaje (a partir del 26 de mayo):

Posteriormente, a partir del 26 de mayo, se observa una recuperación paulatina en los valores de voltaje, alcanzando valores superiores a los 2.3 V. Si bien no se registró la aplicación de riego en esa fecha, es posible atribuir este cambio a condiciones climáticas externas, como un incremento en la humedad relativa del ambiente, la presencia de rocío matutino o precipitaciones

ligeras. Estos factores pueden haber favorecido un aumento en la humedad del medio, lo cual mejora la conductividad eléctrica y, en consecuencia, el rendimiento del sistema.

Este tipo de comportamiento resalta la sensibilidad del sistema a variaciones ambientales y su capacidad de respuesta ante cambios incluso sutiles en la disponibilidad de humedad, sin intervención directa.

3. Periodo de estabilización (1 al 20 de junio):

Entre el 1 y el 20 de junio, el sistema presenta un comportamiento oscilatorio regular con diferencias entre las lecturas de la mañana y la noche. Las fluctuaciones, que se mantienen entre aproximadamente 2.15 V y 2.34 V, indican una etapa de estabilización del sistema.

Además del posible establecimiento de un patrón de riego y condiciones ambientales más constantes, esta etapa puede atribuirse a la maduración del sistema bioelectroquímico. Es decir, a medida que transcurre el tiempo, los componentes como el ánodo, el cátodo y el suelo junto con la comunidad microbiana presente comienzan a interactuar de forma más eficiente, mejorando la transferencia de electrones y estabilizando las reacciones electroquímicas.

Por lo tanto, la estabilización observada en esta etapa no solo refleja una mayor constancia en las condiciones externas, sino también una integración funcional más efectiva del sistema interno.

Con base en el análisis realizado, se concluye que el riego tiene una influencia directa y significativa en la generación de voltaje del sistema. La falta de humedad reduce drásticamente el voltaje generado, mientras que la aplicación de riego directa o indirecta permite su recuperación y estabilización.

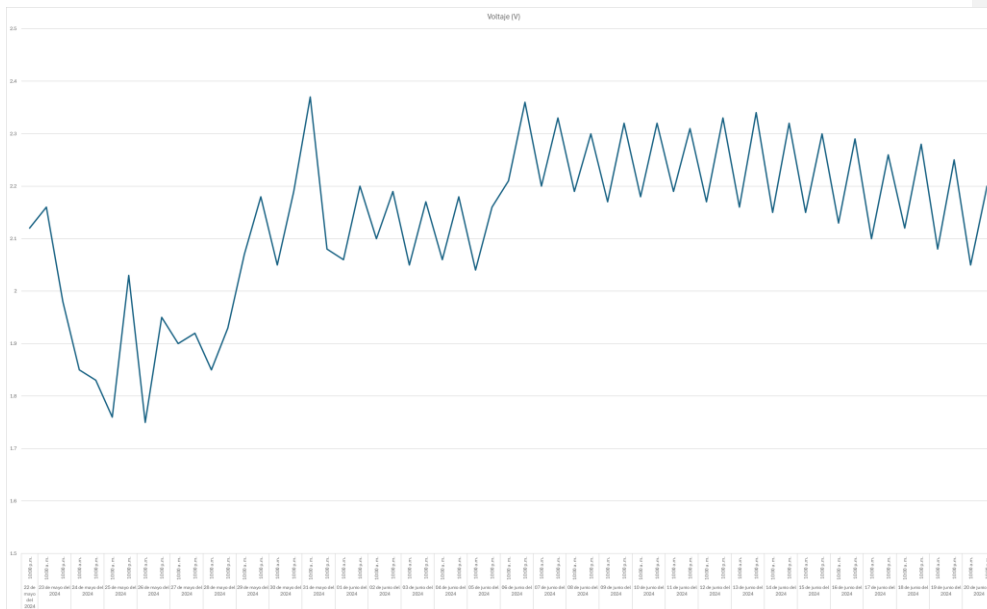


Figura 37. Registro de Voltaje del Sistema Biofotovoltaico (22 mayo - 20 junio 2024)

7 CONCLUSIONES

Se diseñó y se construyó el modelo de una celda biológica o biocelda, utilizando los conocimientos de diseño, desarrollo e implementación de tecnologías, obtenidos durante la carrera, teniendo como resultado un sistema de generación de energía.

Se estableció un procedimiento para evaluación de una celda biofotovoltaica, a través del análisis de diferentes metodologías de artículos consultados, de manera que tenemos horarios y un rango de tiempo establecido para obtener datos, con un instrumento de comprobación utilizado para medir principalmente tensión(V).

Se evaluó el sistema biofotovoltaico utilizando un multímetro durante 30 días, tomando mediciones en horarios determinados, 10:00 a.m. y 10:00 p.m., es decir, 2 veces por día, esto significa 60 diferentes mediciones, lo que ayudó a tener una media de generación de energía.

A partir del desarrollo de este proyecto, se logró cumplir satisfactoriamente con el objetivo general de construir y evaluar un sistema biofotovoltaico. La investigación inició con una revisión bibliográfica detallada, lo que permitió conocer y seleccionar las metodologías más adecuadas para llevar a cabo el diseño, construcción y evaluación del sistema. Es importante destacar que durante todo el proceso de evaluación no se observó ningún signo de degradación

en la planta utilizada, lo cual respalda la viabilidad del sistema biofotovoltaico como una opción sostenible y no invasiva.

8 ANEXOS

8.1 METODOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA PASO A PASO:

Se realizaron diferentes bocetos, con el fin de decidir cuál es el más adecuado para la propuesta de un sistema biofotovoltaico, cubriendo las necesidades de ser funcional y que se integre con el ecosistema, tomando en cuenta ambos factores se seleccionó y se recreó el siguiente modelo en SolidWorks:



Anexo 1. Diseño frontal



Anexo 2. Diseño trasero

Para la primera etapa, se realizaron cortes de la maceta pequeña con una sierra de mesa JET modelo MS1-09D, cortando a 45°.



Anexo 6. Inicia elaboración



Anexo 5. Primer corte

Después cortamos las caras de la maceta grande:



Anexo 7. Todos los cortes



Anexo 8. Cortes

Posteriormente se procede a la unión de estas, utilizando pegamento de contacto RESISTOL 5000 de la siguiente manera:



Anexo 10. Proceso de pegado



Anexo 9. Proceso de pegado



Anexo 11. Proceso de pegado

Se procede a cortar y pegar las caras frontales de cada una de las macetas



Anexo 12. Caras frontales

Posteriormente se realizan los cortes tanto para el cableado como para lo que será el desagüe de las plantas, con el fin de recolectar el agua para más de un riego.



Anexo 14. Corte circulas



Anexo 13. Desagüe y cableado



Anexo 15. Proceso de pegado



Anexo 17. Proceso de pegado



Anexo 18. Proceso de pegado



Anexo 16. Proceso de pegado

Con una pistola de clavos, se refuerza la estructura de la maceta:



Anexo 19. Pistola de clavos

Primer maceta pegada y reforzada:



Anexo 22. Angulo 1



Anexo 20. Angulo 2



Anexo 21. Angulo 3

Después de armar las macetas, le colocamos tinto con base alcohol



Anexo 25. Tinto con base alcohol



Anexo 23. Con tinto 1



Anexo 24. Con tinto 2.

Trabajando en el tablero;



Anexo 26. Tablero parte frontal



Anexo 27. Tablero parte trasera

Armado, montado y generando:



Anexo 28. Finalizado.

8.2 PUBLICACIONES POR TERRITORIO.

País/ territorio	Numero de publicaciones
Estados Unidos	214
India	209
Porcelana	143
Reino Unido	101
Alemania	97
Malasia	69
Italia	62
Corea del sur	59
Polonia	46
Arabia Saudita	38
Irán	36
Japón	36
Pavo	35
Singapur	34
Brasil	28
Canadá	26
Países Bajos	25
Australia	24

Francia	24
Israel	23
Suecia	23
México	21
Suiza	21
Indonesia	20
Federación Rusa	20
España	20
Portugal	17
Tailandia	15
Chile	14
Egipto	14
Irak	14
Sudáfrica	14
República Checa	13
Taiwán	13
Irlanda	12
Colombia	11
Dinamarca	11
Bélgica	9
Pakistán	9

Emiratos Árabes	8
Unidos	
Brunei Darussalam	7
Finlandia	7
Hungría	7
Nueva Zelanda	7
Noruega	6
Austria	5
Sri Lanka	5
Argentina	4
Bangladesh	4
Grecia	4
Marruecos	4
Nigeria	4
Tanzania	4
Azerbaiyán	3
Estonia	3
Etiopía	3
Hong Kong	3
Perú	3
Katar	3
Rumania	3

Ucrania	3
Venezuela	3
Vietnam	3
Bulgaria	2
Costa Rica	2
Ghana	2
Kazajstán	2
Eslovaquia	2
Túnez	2
Uruguay	2
Uzbekistán	2
Belice	1
Jordán	1
Kenia	1
Kuwait	1
Letonia	1
Líbano	1
Lituania	1
Namibia	1
Nepal	1
Macedonia del Norte	1

Omán	1
Puerto Rico	1
Serbia	1
Yemen	1

Tabla 2. Publicaciones por territorio.

9 GLOSARIO:

Ánodo: Es el electrodo donde tiene lugar la oxidación, liberando electrones que fluyen a través de un material conductor, hacia el cátodo. La oxidación del material provoca la liberación de electrones y por tanto los átomos del material del ánodo quedan cargados positivamente (Safla et al., 2023b)

Cátodo: Es el electrodo en el que ocurre la reducción, aceptando electrones provenientes del ánodo. Los electrones cargan negativamente el cátodo, que atrae los cationes del material del cátodo que hay en la disolución que baña el electrodo (Safla et al., 2023b)

10 BIBLIOGRAFÍA:

Administrator. (2013, diciembre 9). *Paolo Bombelli (Postdoctoral Researcher)*.

<https://www.bioc.cam.ac.uk/howe/members/paolo-bombello-postdoctoral-researcher-1>

Alvarado, M. (2022, noviembre 19). *¿En qué consiste el proceso de fotosíntesis?*

Plataforma Educativa Luca: Curso en línea y Aprendizaje Esperado.

<https://www.lucaedu.com/fotosintesis/>

Alves, B. / O. / O.-M. (s/f). *DeCS*. Recuperado el 2 de septiembre de 2023, de

<https://decs.bvsalud.org/es/ths/resource/?id=52486>

Amylkar D. Acosta M. (2011). *LA CRISIS ENERGÉTICA Y LAS ENERGÍAS*

ALTERNATIVAS. [https://www.uexternado.edu.co/wp-](https://www.uexternado.edu.co/wp-content/uploads/2017/01/crisisEnergeticaEnergiasAlternativas.pdf)

[content/uploads/2017/01/crisisEnergeticaEnergiasAlternativas.pdf](https://www.uexternado.edu.co/wp-content/uploads/2017/01/crisisEnergeticaEnergiasAlternativas.pdf)

Anam, M., I. Gomes, H., Rivers, G., L. Gomes, R., & Wildman, R. (2021). Evaluation of photoanode materials used in biophotovoltaic systems for renewable energy generation.

Sustainable Energy & Fuels, 5(17), 4209–4232. <https://doi.org/10.1039/D1SE00396H>

Ana Zita Fernandes. (2022). *¿Qué es la fotosíntesis? Proceso y fases*. Toda Materia.

<https://www.todamateria.com/fotosintesis/>

Argentina.gob.ar. (2020, noviembre 17). *Sistemas bioelectroquímicos para la*

remediación de efluentes. [https://www.argentina.gob.ar/cnea/ieds/proyectos-en-bioenergia-y-](https://www.argentina.gob.ar/cnea/ieds/proyectos-en-bioenergia-y-biorremediacion/sistemas-bioelectroquimicos-para-la-remediacion)

[biorremediacion/sistemas-bioelectroquimicos-para-la-remediacion](https://www.argentina.gob.ar/cnea/ieds/proyectos-en-bioenergia-y-biorremediacion/sistemas-bioelectroquimicos-para-la-remediacion)

Arenal Mena, I. P., Guevara-Flores, A., & Martínez-González, J. de J. (2020).

Homeostasis redox. <http://biosensor.facmed.unam.mx/tab/wp-content/uploads/2020/06/11-del-Arenal.pdf>

Bateson, P., Fleet, J. E. H., Riseley, A. S., Janeva, E., Marcella, A. S., Farinea, C.,

Kuptsova, M., Conde Pueyo, N., Howe, C. J., Bombelli, P., & Parker, B. M. (2018).

Electrochemical Characterisation of Bio-Bottle-Voltaic (BBV) Systems Operated with Algae and Built with Recycled Materials. *Biology*, 7(2), 26. <https://doi.org/10.3390/biology7020026>

Bernardo, A. (2014, junio 16). *Fotosíntesis artificial: imitar a las plantas para producir energía limpia*. Blogthinkbig.com. <https://blogthinkbig.com/fotosintesis-artificial-energia>

Bióloga Natalia Ocampo Fernández. (2014, enero). *FOTOSÍNTESIS*.

https://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Lectura/bachillerato/documentos/2014/LECT110.pdf

Bombelli, P., Iyer, D. M. R., Covshoff, S., McCormick, A. J., Yunus, K., Hibberd, J. M.,

Fisher, A. C., & Howe, C. J. (2013). Comparison of power output by rice (*Oryza sativa*) and an associated weed (*Echinochloa glabrescens*) in vascular plant bio-photovoltaic (VP-BPV) systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(1), 429–438.

<https://doi.org/10.1007/s00253-012-4473-6>

Busalmen, J. P. (2010). *Bacterias electrogénicas: de los sedimentos a las celdas de*

combustible microbianas. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/12626>

César Enrique Martínez Maldonado. (2017, noviembre 28). *Diseño factorial en minitab*

[Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=hpOdjgZn4zo>

Clima Tecate: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Tecate. (s/f).
Recuperado el 12 de agosto de 2023, de <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/baja-california/tecate-1005197/>

contecno. (2019). *Diferentes Clasificaciones De Suelos*.
<https://www.cotecno.cl/diferentes-clasificaciones-de-suelos/>

CORDIS. (2014, abril). *Aclarar la estructura y función del fotosistema 2*. CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/article/id/92907-photosystem-2-elucidating-structure-and-function/es>

CORPORATIVA, I. (s/f). *Radiación solar: ¿cuál es su impacto sobre el planeta y el ser humano?* Iberdrola. Recuperado el 5 de noviembre de 2023, de <https://www.iberdrola.com/compromiso-social/radiacion-solar>

CSR Laboratorio. (2019, marzo 19). *La Textura en los Suelos Agrícolas*. CSR Laboratorio. <https://csrlaboratorio.es/laboratorio/agricultura/suelos-agricolas/la-textura-en-los-suelos-agricolas/>

CSR Laboratorio. (2023). *La Estructura del Suelo y su Clasificación*. CSR Laboratorio. <https://csrlaboratorio.es/suelos/horizontes-estructura-clasificacion/>

DALIA. (2023). *Cómo conseguir un diseño funcional en un nuevo producto*. 3DALIA. <https://3dalia.com/como-conseguir-un-diseno-funcional/>

Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (2011). *INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS*.
https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf

DOF. (1981, marzo 7). *DOF - Diario Oficial de la Federación*.

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4667621&fecha=03/07/1981#gsc.tab=0

DOF. (2002). *DOF - Diario Oficial de la Federación*.

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0

Driver, A., & B, P. (2011, abril). *Biophotovoltaics*.

https://www.stem.org.uk/system/files/elibrary-resources/legacy_files_migrated/9579-catalyst_21_4_487.pdf

EcoHabitar. (2016, diciembre 21). *Módulo de fachada verde productor de energía biofotovoltaica*. <https://ecohabitar.org/modulo-de-fachada-verde-productor-de-energia-biofotovoltaica/>

EcuRed contributors. (2020). *Caracterización de los suelos - EcuRed*.

https://www.ecured.cu/Caracterizaci%C3%B3n_de_los_suelos

Elena Ramos Vásquez, D. Z. D. (2008). EFECTO DE LA HUMEDAD, TEMPERATURA Y PH DEL SUELO EN LA ACTIVIDAD MICROBIANA A NIVEL DE LABORATORIO. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 169–175. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v7n1-2/a15v7n1-2.pdf>

Electrónica, M. (2020, julio 22). *Conductividad Eléctrica del Suelo y su Influencia en la Agricultura*. Maher Electrónica. <https://www.maherelectronica.com/conductividad-electrica-agricultura/>

Energía. (s/f). Conahcyt. Recuperado el 18 de septiembre de 2023, de

<https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/energia/>

Energía biofotovoltaica. (2022, marzo 26). *Ciencia en cómic*.

<http://www.cienciaencomic.com/2022/03/14-microconceptos-energia-biofotovoltaica/>

En esta práctica se muestra cómo la energía electroquímica producida en una reacción espontánea redox puede encender un LED. (s/f). Recuperado el 18 de septiembre de 2023, de

https://www.ucm.es/data/cont/docs/76-2013-07-11-17_Copper-Zinc_batteries.pdf

Esquema o Diagrama Eléctrico - Qué Es?, Tipos e Interpretación | PDF | Ingeniería Informática | Ciencias de la Computación. (s/f). Recuperado el 17 de noviembre de 2023, de

<https://es.scribd.com/document/518194609/Esquema-o-Diagrama-Elctrico-Que-es-Tipos-e-Interpretacion>

ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS BIOELECTROQUÍMICOS: FACTIBILIDAD DE SU USO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN RUMINAL DE PROPIONATO. (2016).

Agrociencia, 50(2), 149–165. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n2/1405-3195-agro-50-02-00149.pdf>

Fertilab. (2019). *La-salinidad-del-suelo-y-su-fertilidad.pdf*.

<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-025-La-salinidad-del-suelo-y-su-fertilidad.pdf>

Fotoperíodo: una visión general | Temas ScienceDirect. (s/f). Recuperado el 26 de agosto de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/photoperiod>

Fundación Aqueae. (2001). *Fotosíntesis de las plantas: ¿cómo funciona?* Fundación Aqueae. <https://www.fundacionaqueae.org/wiki/fotosintesis-plantas/>

Fundamentos de los sistemas fotovoltaicos. (s/f). Recuperado el 2 de septiembre de 2023, de <http://repositorio.upsin.edu.mx/Fragmentos/Capitulo2CapituloII55.pdf>

GEOTECNIA I. (s/f). Recuperado el 19 de julio de 2023, de https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_II.pdf

Germán Portillo. (2023). *Horizontes del suelo: estructura y factores - Resumen*. ecologiaverde.com. <https://www.ecologiaverde.com/horizontes-del-suelo-estructura-y-factores-4453.html>

gob.mx. (s/f). *gob.mx*. Recuperado el 15 de agosto de 2023, de <http://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93>

Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico. (2009). http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20R001_Gu%C3%ADa%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20m%C3%A9todo%20organol%C3%A9ptico.pdf

GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf. (s/f). Recuperado el 18 de julio de 2023, de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

Héctor Daniel Mantero-García. (2020). ¿Es sustentable el aprovechamiento de tierra de hoja en bosques de encino? *Madera y Bosques*, 25(3). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712019000300206

ICCE. (s/f). *CLASIFICACIÓN DEL SUELO*. Recuperado el 19 de agosto de 2023, de <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/31/31448/suelos.pdf>

ING. MARÍA CATALINA VEGA REYES. (2021). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE SOLAR MICROBIANA PARA LA GENERACIÓN DE*

ENERGÍA ELÉCTRICA Y EL TRATAMIENTO DE AGUA.

<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1225/1/18023.pdf>

Ing. Agr. Oscar J. Herrera. (2019). *Cultivo de cactus: influencia del calcio y el pH*.

https://www.economiayviveros.com.ar/marzo2019/plantas_ornamentales_y_flores_de_corte-cultivos_viveros-paisajismo-jardineria-arte_floral-3.html

INTERPRETACION DE ANALISIS DE SUELOS. (s/f). Recuperado el 5 de agosto de 2023, de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf

Introducción a la fotosíntesis (artículo) | Khan Academy. (s/f). Recuperado el 2 de septiembre de 2023, de https://es.khanacademy.org/_render

Jawre, A. (2018). Bio-Photovoltaic: The Future of Electricity with Natural Resources.

<https://doi.org/10.1729/Journal.23507>

Jensen, W. B. (2015). *CLASSIC VOLTAIC CELLS*.

<https://homepages.uc.edu/~jensenwb/museum-booklets/08.%20Voltaic%20Cells.pdf>

José Luis Fuentes Yagüe. (2021). *LA FIJACION BIOLOGICA NITROGENO*.

https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_REA%20FREA_1983_04_117_120.pdf

J. McCormick, A., Bombelli, P., W. Bradley, R., Thorne, R., Wenzel, T., & J. Howe, C.

(2015). Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science*, 8(4), 1092–1109.

<https://doi.org/10.1039/C4EE03875D>

JUAN PEDRO CHUET-MISSÉ. (2017). *Las plantas también pueden ser fuente de electricidad*. <https://www.lavanguardia.com/natural/20170118/413415278331/planta-electricidad.html>

JULIETE NATALIA SOTO CONDE. (2016). *ESTIMACION OBJETIVA DE LA DISPERSIVIDAD EN SUELOS ARCILLOSOS EN EL ENSAYO DE PINHOLE BASADA EN UNA CARTA DE COLORES Y VALORES CUANTITATIVOS DE TURBIDEZ*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/abb5ebd4-2c4d-449a-8908-36880a545c2e/content>

Kenrick Vezina. (2015, noviembre 25). *Unos microbios convierten las plantas y la tierra en lámparas*. MIT Technology Review. <http://www.technologyreview.es/s/7462/unos-microbios-convierten-las-plantas-y-la-tierra-en-lamparas>

La comunicación entre bacterias y plantas. (s/f). Recuperado el 14 de marzo de 2023, de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/59_2/PDF/10-516-72-.pdf

Ma Cruz Rey de las Moras. (2008, diciembre). *Factores que influyen en el desarrollo: el fotoperiodo*. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agri%2FAgri_2008_913_920_922.pdf

M.A María Catalina Salgado Gutiérrez, M.C José Ángel Zepeda Hernández, M.C.A Miguel Cid del Prado Martínez, M.A Jacinta Luna Villalobos, & Dra. Rosa Isela Cruz Rodríguez. (2019). *Puerta de la investigación*.

https://www.researchgate.net/publication/342014987_Celda_biofotovoltaica_para_la_generacion_de_energia_electrica_a_traves_de_plantas_vivas/link/5edecb9845851516e6619448/download

Minitab. (2023). *Diseños factoriales y factoriales fraccionados* [Mtbconcept].

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/>

Minitab. (2023). *Herramientas estadísticas, de análisis de datos y de mejora de procesos* / Minitab. <https://www.minitab.com/es-mx/>

Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. (s/f). Recuperado el 14 de agosto de 2023, de <https://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm>

Nuria Ortega Font, E. P. H. (2020, junio). Eficiencia energética: Revista del fidecomiso para el ahorro de energía eléctrica. Pobreza y marginación energética: Evaluación de conceptos, metodologías e indicadores en México. *Eficiencia Energética*, 26, 46.

Olazo, A. (2020, diciembre 27). *La fotosíntesis explicada (paso a paso)*. Robotitus. <https://www.robotitus.com/la-fotosintesis-explicada-paso-a-paso>

OSCAR GUADARRAMA PÉREZ. (2017). *TESIS, CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO- CELDA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD.*

http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1676/T_072.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pennsylvania State University. (2023). *Introducción a los Suelos: La Calidad de los Suelos*. <https://extension.psu.edu/introduccion-a-los-suelos-la-calidad-de-los-suelos>

Perez, M. A. (2015, junio 9). *Científicos consiguen generar electricidad a partir de plantas*. Blogthinkbig.com. <https://blogthinkbig.com/generar-electricidad-partir-plantas>

PhD Thesis Writing Process: A Systematic Approach—How to Write Your Introduction. (s/f). Recuperado el 14 de marzo de 2023, de <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED590321.pdf>

Proyector FSE. (2018, mayo 25). *Laboratorio de bioelectroquímica para generar energías alternativas*. Proyecto FSE. <http://www.proyectorfse.mx/2018/05/25/laboratorio-de-bioelectroquimica-para-generar-energias-alternativas/>

RADIACIÓN SOLAR - IDEAM. (s/f). Recuperado el 5 de noviembre de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>

Reacciones Redox. (s/f). Recuperado el 21 de agosto de 2023, de <https://ibero.mx/campus/publicaciones/quimanal/pdf/7reaccionesredox.pdf>

Reptil.mx. (2022, marzo 10). *Diagrama de circuito eléctrico*. Industrias GSL. <https://industriagsl.com/blogs/automatizacion/diagrama-electrico>

Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (CCMS): UN RETO PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. *Información tecnológica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Rigoberto Garcia Ocho. (2020, junio). Eficiencia Energética: Revista del fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica. Pobreza energética, tecnología y calidad de vida en México. *Eficiencia Energética*, 26, 46.

Roberto Álvaro Hermana, J. F. G. (2019). *OPORTUNIDADES DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LA ECONOMÍA*.

<https://www.orquestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orquestra/oportunidades-transicion-energetica-capv.pdf>

rdu, E. (2022, marzo 6). *Los superpoderes de las plantas: los metabolitos secundarios en su adaptación y defensa*. RDU UNAM.

https://www.revista.unam.mx/2022v23n2/los_superpoderes_de_las_plantas_los_metabolitos_secundarios_en_su_adaptacion_y_defensa/

Safla, L. O. B., Arteaga, G. G. A., Játiva, M. M. V., & Giler, J. E. S. (2023). Energía Biofotovoltaica: Las Plantas como Fuente Alternativa de Energía Renovable en Portoviejo, Provincia de Manabí. *Revista Científica Sinapsis*, 1(22). <https://doi.org/10.37117/s.v.1i22.723>

Soil Profile - An Overview Of Layers and Content Of Soil. (s/f). BYJUS. Recuperado el 14 de agosto de 2023, de <https://byjus.com/biology/soil-profile/>

SÓLIDOS TOTALES SECADOS A 103 – 105oC. (s/f). Recuperado el 5 de agosto de 2023, de

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+-+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>

Springer Nature. (2023). *Título, Resumen y Palabras Clave* | Springer — International Publisher. <https://www.springer.com/la/authors-editors/tutoriales-de-autores-y-revisores/writing-a-journal-manuscript/title-abstract-and-keywords/12022898>

Symborg. (2023). *¿Para qué sirven los microorganismos del suelo?* Symborg. <https://symborg.com/mx/proteccion-de-suelos/para-que-sirven-los-microorganismos-del-suelo/>

Symborg. (2023). *Microorganismos, qué son y cómo funcionan.* Symborg. <https://symborg.com/mx/proteccion-de-suelos/microorganismos-que-son-y-como-funcionan/>

Tatiana Petcheneshsky. (2015). *CIANOBACTERIAS COMO DETERMINANTES AMBIENTALES DE LA SALUD.* https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2015-cianobacterias-preguntas-y-respuestas_nuevo.pdf

Telwesa. (2022, mayo 4). *¿Qué es un lixiviado?* Telwesa. <https://telwesa.com/que-es-un-lixiviado/>

TEXTURA DEL SUELO. (s/f). Recuperado el 19 de agosto de 2023, de https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

textos en formato apa en google docs - Buscar con Google. (s/f). Recuperado el 17 de agosto de 2023, de https://www.google.com/search?sca_esv=557502889&rlz=1C1CHBF_esMX992MX992&q=textos+en+formato+apa+en+google+docs&tbm=vid&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKewjcl8-8ieKAAxWKHUQIHYNdnAu8Q0pQJegQICBAB&biw=1366&bih=611&dpr=1#fpstate=ive&vld=cid:0c27dcd8,vid:H2TF-qX_wN8

Torres Flores, R. C. (2019). Política energética: problemas y posibles soluciones. *Economía UNAM*, 16(46), 109–117. <https://doi.org/10.22201/fe.24488143e.2019.46.436>

Tortosa, G. (2021, diciembre 9). *Primera sesión del proyecto CAOS II: Las plantas como fuente de energía eléctrica*. Compostando Ciencia. <http://www.compostandociencia.com/2021/12/primera-sesion-del-proyecto-caos-ii-las-plantas-como-fuente-de-energia-electrica/>

Tschörtner, J., Lai, B., & Krömer, J. O. (2019). Biophotovoltaics: Green Power Generation From Sunlight and Water. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.00866>

Unidad X: Electroquímica. (s/f). Recuperado el 23 de diciembre de 2023, de https://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica2007.pdf

UNIGAL. (2022, abril 4). *Diferencia entre ánodo y cátodo* | UNIGAL. <https://unigal.mx/diferencia-entre-anodo-y-catodo-2/>

Universidad Nacional de Mar del Plata. (s/f). *Fotosíntesis, luz y vida*. Recuperado el 7 de noviembre de 2023, de https://agrarias.campus.mdp.edu.ar/pluginfile.php/15201/mod_page/content/4/Fotosintesis.pdf

Upch, I. T. A. (s/f). *Diseño y análisis de experimentos Douglas C. Montgomery*. Recuperado el 11 de agosto de 2023, de https://www.academia.edu/9101936/Dise%C3%B1o_y_an%C3%A1lisis_de_experimentos_Douglas_C_Montgomery

Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333–345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>

Vilela, J. (s/f). *Fototrófico* - Knoow. Recuperado el 2 de septiembre de 2023, de <https://knoow.net/es/ciencias-tierra-vida/biologia-es/fototrofico/>

Wey, L. T., Bombelli, P., Chen, X., Lawrence, J. M., Rabideau, C. M., Rowden, S. J. L., Zhang, J. Z., & Howe, C. J. (2019). The Development of Biophotovoltaic Systems for Power Generation and Biological Analysis. *ChemElectroChem*, 6(21), 5375–5386. <https://doi.org/10.1002/celec.201900997>

William B. Jensen. (2015). *CLASSIC VOLTAIC CELLS*. <https://homepages.uc.edu/~jensenwb/museum-booklets/08.%20Voltaic%20Cells.pdf>

Works, E. (febrero). *Sistemas bioelectroquímicos, herramienta de la Economía Circular en depuradoras*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/sistemas-bioelectroquimicos-herramienta-de-la-econ-92yoF>

Zamora Silva Elisa Milagros. (2017). *TESIS - COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA MEDIANTE LA FOTOSÍNTESIS DE LAS ESPECIES *Ipomea purpurea* y *Palma areca**. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/24788/Zamora_SEM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zhu, H., Wang, H., Zhang, Y., & Li, Y. (2023). Biophotovoltaics: Recent advances and perspectives. *Biotechnology Advances*, 64, 108101.

<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108101>