



**SISTEMA PARA ENRIQUECIMIENTO DE BIOGÁS  
MEDIANTE BIOMASA MICROALGAL**

**PAOLA MARIA RODRIGUEZ HERNANDEZ  
DORIS ALICIA TEQUIA VELEZ**

Programa de Ingeniería ambiental  
Facultad de ingeniería Ambiental y Civil  
Universidad Antonio Nariño  
Bogotá D.C.  
2023

SISTEMA PARA ENRIQUECIMIENTO DE BIOGÁS MEDIANTE  
BIOMASA MICROALGAL

PAOLA MARIA RODRIGUEZ HERNANDEZ Y DORIS ALICIA  
TEQUIA VELEZ

Documento presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero ambiental

Directores:  
PHD(C). ANDRES JULIAN MARTINEZ

Programa de Ingeniería ambiental  
Facultad de ingeniería Ambiental y Civil  
Universidad Antonio Nariño  
Bogotá D.C.  
2023

## SISTEMA PARA ENRIQUECIMIENTO DE BIOGÁS MEDIANTE BIOMASA MICROALGAL

### *SYSTEM FOR BIOGAS ENRICHMENT THROUGH MICROALGAL BIOMASS*

Rodriguez Hernandez, Paola Maria<sup>1</sup>; Tequia Velez, Doris Alicia<sup>2</sup>; Docente, Martinez Andres Julian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia, prodriguez54@uan.edu.co

<sup>2</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia, dtequia28@uan.edu.co

<sup>3</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia, Docente, anmartinez41@uan.edu.co

**Resumen:** Este proyecto de grado se centra en el desarrollo de un sistema novedoso que combina un biodigestor y un fotobiorreactor con el propósito de enriquecer la producción de metano y, al mismo tiempo, eliminar eficazmente el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). El metano es un gas valioso como fuente de energía, mientras que la reducción del  $CO_2$  ayuda significativamente a la mitigación del cambio climático.

El proyecto implica diseñar, la construir y operar un sistema que conecta un biodigestor y un fotobiorreactor. En primer lugar, se construyó y operó un biodigestor que descompone residuos orgánicos en condiciones anaeróbicas, generando biogás que contiene dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

Se diseñó y puso en funcionamiento un fotobiorreactor que utilizó microorganismos fotosintéticos para capturar el  $CO_2$ . El acoplamiento de estos sistemas permite la eliminación del  $CO_2$  contenido en el metano producido, enriqueciendo así el gas y ofreciendo una solución ambientalmente sostenible que combina la generación de energía y la disminución de las emisiones de  $CO_2$ .

**Palabras claves:** Biodigestor, fotobiorreactor, metano, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), biogás, microorganismos fotosintéticos.

**Abstract:** This degree project focuses on the development of an innovative system that combines a biodigester and a photobioreactor with the purpose of enhancing methane production while effectively removing carbon dioxide ( $CO_2$ ). Methane is a valuable gas as an energy source, and the elimination of  $CO_2$  significantly contributes to mitigating climate change.

The project encompasses the design, construction, and operation of a system that connects a biodigester and a photobioreactor. First, a biodigester was built and operated to decompose organic waste under anaerobic conditions, generating biogas containing carbon dioxide ( $CO_2$ ). Then, this gas was removed from the produced methane.

A photobioreactor that used photosynthetic microorganisms to capture  $CO_2$  was designed and put into operation. The coupling of these systems allows for the elimination of the  $CO_2$  contained in the methane produced, thus enriching the gas and providing an environmentally sustainable solution that combines energy production and the reduction of  $CO_2$  emissions.

**Key words:** Biodigester, photobioreactor, methane, carbon dioxide ( $CO_2$ ), biogas, photosynthetic microorganisms

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>6</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>8</b>
<b>MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>24</b>
• Normativa vigente en Colombia para la generación de energía renovable .....	24
• Uso y tipos de biodigestores .....	24
• Proceso de digestión anaerobia en los biodigestores .....	27
• Producción de biogás .....	29
• Bioenergía y biocombustibles .....	31
• Fotobiorreactor y tipos .....	33
Fotobiorreactores tubulares .....	33
Fotobiorreactores de columna .....	33
Fotobiorreactores de placa plana .....	33
Fotoheterótrofos .....	34
Mixotrófica .....	34
Heterótrofa .....	34
• Tipos de microalgas .....	35
<i>Chlorella</i> sp .....	36
<i>Scenedesmus</i> sp .....	37
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>39</b>
GENERAL .....	39
ESPECÍFICOS .....	39
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>40</b>
• Diseño y construcción del biodigestor .....	40
• Determinación de sólidos totales .....	45
• Diseño y construcción de Fotobiorreactor .....	47
• Inoculación .....	51
<b>RESULTADOS Y ANALISIS</b> .....	<b>52</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>59</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Metodología.....	12
Ilustración 2 Etapas del diseño del biodigestor.....	15
Ilustración 3 DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	28
Ilustración 4 Usos energéticos del biogás.....	31
Ilustración 5 Crecimiento de la demanda de biocombustibles por combustible y región, 2021-2022.....	32
Ilustración 6 Diferentes usos de las microalgas.....	35
Ilustración 7 Morfología Chlorella sp.....	37
Ilustración 8 Morfología Scenedesmus sp.....	38
Ilustración 9 Biodigestor con todas las conexiones.....	41
Ilustración 10 Partes biodigestor.....	42
Ilustración 11 Partes Fotobiorreactor.....	49
Ilustración 12 Ensamble de tubo de ventilación.....	50
Ilustración 13 Cierre hermético del sistema.....	50
Ilustración 14 Sistema listo para inocular.....	51
Ilustración 15 Gráfico del crecimiento de las microalgas.....	53
Ilustración 16 Gráfico del crecimiento de las microalgas.....	54
Ilustración 17 Gráfico datos de pH para el fotobiorreactor de 2L y 37L.....	55
Ilustración 18 Grafico del comportamiento de los nutrientes en los dos fotobiorreactores.....	57

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Grupos de biomasa y clasificación .....	26
Tabla 2 Composición del biogás.....	30
Tabla 3 Características Chlorella sp .....	36
Tabla 4 Características Scenedesmus sp.....	37
Tabla 5 Materiales para la construcción del biodigestor .....	40
Tabla 6 Parámetros Iniciales Biodigestor .....	43
Tabla 7 Relación estiércol: agua.....	45
Tabla 8 Determinación de sólidos totales en excremento y microalgas .....	46
Tabla 9 Parámetros fotobiorreactor .....	47
Tabla 10 materiales para la construcción del fotobiorreactor.....	48
Tabla 11 Parámetros de Inoculación.....	51
Tabla 12 Mediciones diarias Fotobiorreactor de 37 litros .....	52
Tabla 13 Mediciones diarias Fotobiorreactor de 2 litros .....	53
Tabla 14 Medición de nutrientes en el fotobiorreactor de 37 litros .....	56
Tabla 15 Medición de nutrientes en el fotobiorreactor de 2 litros .....	56

## INTRODUCCIÓN

El CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero predominante liberado a la atmósfera debido a las actividades humanas. Es cierto que este gas se encuentra de manera natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono, pero se está viendo afectado por las constantes emisiones causadas por las actividades humanas, lo que genera un desequilibrio en este ciclo. Tanto es así que los procesos naturales ya no tienen la capacidad de eliminar el CO<sub>2</sub> que se está emitiendo. Las principales acciones que provocan la emisión de este gas están relacionadas a la quema de combustibles fósiles, tales como gas, carbón y petróleo. Estos se utilizan principalmente para generar energía, en procesos industriales y en el transporte (US EPA, 2021).

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) circula constantemente entre la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre debido a la actividad de microorganismos, plantas y animales. Este ciclo natural de intercambio suele mantener un equilibrio en las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>, a menos que intervengan factores humanos (US EPA, 2021).

Desde el comienzo de la Revolución Industrial alrededor a 1750, la influencia humana ha sido significativa en el cambio climático. Esto se debe a que las actividades humanas han introducido grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera, creando un desequilibrio en el ciclo natural del CO<sub>2</sub> (US EPA, 2021).

Estos gases retienen el calor en la atmósfera, contribuyendo al fenómeno del calentamiento global y a una serie de impactos ambientales y climáticos, como el aumento de las temperaturas, el derretimiento de los glaciares y el aumento del nivel del mar (Ballesteros & Aristizabal, 2007). La principal preocupación se centra en que este cambio climático impulsado por la actividad humana, conlleva consecuencias significativas para la salud del planeta y la vida en la Tierra, por lo tanto,

es necesario tomar medidas para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mitigar los efectos adversos (Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Colombia, 2015).

Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero divulgado por el IDEAM, Colombia presenta varias fuentes de emisiones de estos gases. La gestión de tierras forestales se destaca como la actividad principal que contribuye a estas emisiones, alcanzando un total de 79,2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Mt CO<sub>2</sub> eq). De este total, 59 Mt CO<sub>2</sub> eq corresponden a emisiones causadas por la deforestación de bosques naturales (PIGCCME & OAAS, 2020).

En segundo lugar, se encuentran las actividades agrícolas y pecuarias, que generan 52,0 Mt CO<sub>2</sub> eq en emisiones. En tercer lugar, el sector de minas y energía contribuye con 32,3 Mt CO<sub>2</sub> eq, seguido por el sector del transporte con 29,0 Mt CO<sub>2</sub> eq (PIGCCME & OAAS, 2020).

Finalmente, en quinto lugar se ubican las actividades de manufactura y construcción, con 27,6 Mt CO<sub>2</sub> eq, seguidas por el sector residencial y saneamiento, con 14,8 Mt CO<sub>2</sub> eq, y las actividades comerciales, con 2,1 Mt CO<sub>2</sub> eq (PIGCCME & OAAS, 2020). Para mitigar estas emisiones, Colombia adoptó el Acuerdo de París con la Ley 1844 de 2017, estableciendo una meta ambiciosa para abordar los impactos que se han estado generando. Se comprometió a disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% para el año 2030. Para dar cumplimiento y seguimiento a esta meta, Colombia ha estado llevando a cabo el inventario de gases de efecto invernadero, con el objetivo de medir la reducción de sus emisiones (Arbeláez et al., 2016).

El incremento de los impactos ambientales ha generado una creciente conciencia ambiental, impulsando una mayor investigación en la búsqueda de fuentes de energía sostenible. La aplicación de tecnologías de biodigestión y fotobiorreactores ha adquirido relevancia como una prometedora vía para el enriquecimiento de metano. La generación de CO<sub>2</sub> en un biodigestor y su eliminación en un fotobiorreactor son dos procesos que pueden combinarse para lograr una gestión más eficiente de los residuos orgánicos y la captura de CO<sub>2</sub>, al mismo tiempo que se produce biomasa y biogás, un gas con un gran potencial energético, reduciendo así el impacto ambiental (Becerra, 2017). La producción de biogás representa una alternativa renovable a los combustibles fósiles que puede contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático y a la generación de energía limpia (Guillen & Rivas, 2011).

Este proyecto de grado se enfoca en el diseño y desarrollo de un sistema integrado que combina un biodigestor y un fotobiorreactor, con el propósito de enriquecer la producción de metano con captura de CO<sub>2</sub> presente en la composición del biogás, que se genera a partir de una variedad de sustratos orgánicos. La digestión anaerobia es un proceso microbiológico que descompone la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas, generando biogás compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (Ávila-Hernández et al., 2018). Las microalgas son organismos que se pueden cultivar en sistemas conocidos como fotobiorreactores de tipo airlift para capturar la energía solar y fijar el dióxido de carbono, lo que impulsa la producción de biomasa. En última instancia, esta biomasa puede ser degradada para producir metano (Ruiz-Reyes, 2015).

El acople de un biodigestor y un fotobiorreactor en un solo sistema tiene como objetivo aprovechar las sinergias entre el desarrollo anaeróbico de la materia orgánica y la fotosíntesis para la captura eficiente de dióxido de carbono. Esto se realiza con la finalidad de enriquecer el biogás generado en el biodigestor. El diseño de este sistema implica consideraciones fundamentales en cuanto a la selección de microorganismos, condiciones de operación, intercambio de gases y la maximización de la conversión de sustratos en metano (Sanz, 2015).

A lo largo de este proyecto, se exploraron tanto los aspectos teóricos como prácticos asociados con el diseño, la construcción y el funcionamiento de este sistema integrado. Se analizaron los principios bioquímicos y microbiológicos subyacentes en la producción de metano, se discutieron las ventajas y desafíos asociados con la combinación de biodigestores y fotobiorreactores, y se presentaron los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo y pruebas del sistema.

Por último, este trabajo de grado tiene como propósito contribuir al avance del conocimiento en el campo de la bioenergía y la gestión sostenible de residuos orgánicos, al mismo tiempo que se promueve el desarrollo de soluciones innovadoras para la producción eficiente de metano, una fuente valiosa de energía renovable.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es esencial considerar el papel fundamental que desempeña el medio ambiente como fuente primordial de materias primas y recursos energéticos para el avance humano en el planeta. A raíz de esto, ha surgido un interés creciente en lograr un equilibrio adecuado entre el crecimiento de la población y la preservación del entorno natural. Por lo tanto, se presta una atención especial a las diversas actividades humanas que pueden afectar los aspectos bióticos, abióticos y socioeconómicos del medio ambiente (Cárdenas & Cañate, 2018). En este contexto, se buscan constantemente iniciativas que fomenten el desarrollo con un impacto mínimo en el medio ambiente.

De acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía, en Colombia, los combustibles fósiles constituyen aproximadamente el 30% de la oferta energética nacional, siendo utilizados principalmente el carbón, el petróleo y el gas natural (Ministerio de Minas y Energía, 2020). El 70% restante es generado mediante hidroeléctricas, sin embargo, los combustibles fósiles representan una de las principales exportaciones del país ya que con el petróleo y sus derivados se generan ingresos significativos siendo el 50.6% del total de las exportaciones (DANE, 2023).

A pesar del futuro desabastecimiento de combustibles fósiles esta sigue siendo la alternativa mundial de la demanda energética y no solo eso, la extracción de petróleo y gas implica un daño ambiental que en muchas ocasiones es irremediable (Marin & Gonzalez, 2011).

La necesidad de migrar hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles se vuelve imperativa para mitigar el impacto negativo en el medio ambiente y asegurar un futuro energético más sostenible. Es crucial explorar alternativas que puedan abastecer la demanda energética, con el objetivo de disminuir el impacto generado por las explotaciones y exploraciones que se realizan constantemente en los diferentes territorios, por esto muchas entidades buscan impulsar el estudio y la ejecución de proyectos que permitan tener un panorama más amplio en cuanto al uso de estas

energías, también es necesario hacer la correcta gestión de residuos con el fin de que estos puedan ser utilizados como herramienta para la generación de energía (Cruz et al., 2013).

Numerosas actividades humanas requieren energía para operar y con frecuencia dependen de fuentes convencionales, tales como el petróleo y el carbón. Estas fuentes conllevan la emisión de contaminantes perjudiciales para la salud desde el momento de su extracción. Por esta razón, el empleo de gas natural como fuente de energía ha experimentado un crecimiento considerable. El gas natural no requiere transformaciones químicas significativas y su distribución es más eficiente (Universidad ESAN, 2019).

El gas natural posee una ventaja significativa sobre el carbón y el petróleo, ya que sus emisiones de diversos contaminantes son considerablemente más bajas. Específicamente, las emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) son un 40% - 45% menores que las del carbón y un 20% - 30% menores que las del petróleo (Marin & Gonzalez, 2011). Estos niveles reducidos de contaminación han permitido que el gas natural se utilice en diversas actividades, incluyendo la generación de energía, la industria, el transporte y el uso doméstico (Universidad ESAN, 2019). Se ha transformado en una alternativa más limpia y eficiente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual lo vuelve atractivo en comparación con otros combustibles fósiles.

En el contexto colombiano, según el informe de Naturgas presentado al Departamento Nacional de Planeación, el 66,8% de la población utilizaba gas natural como principal fuente de energía para cocinar en 2021 (DNP, 2023). Esto indica que una gran parte de los habitantes recurre a fuentes contaminantes para preparar sus alimentos. Por ende, es imperativo buscar fuentes de energía más sostenibles y convencionales con el fin de asegurar un acceso adecuado a la energía para toda la población. Los biodigestores son sistemas que aprovechan la descomposición anaeróbica de materia orgánica para producir biogás, que es una mezcla de gases, principalmente metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Becerra, 2017).

Una de las alternativas más viables es el enriquecimiento del biogás, obtenido mediante la digestión anaerobia en un biodigestor. La purificación del biogás de gases contaminantes como el dióxido de carbono no solo mejora su calidad para su uso como fuente de energía, sino que también contribuye significativamente a mitigar las emisiones constantes en la atmósfera, reduciendo así

el impacto ambiental y fomentando prácticas más sostenibles en la gestión de residuos orgánicos (Ministerio de Energía et al., 2011).

## ESTADO DEL ARTE

- **Mejora de la eliminación de nutrientes del digestato de aguas residuales porcinas junto con la purificación de biogás por microalgas *Scenedesmus spp.***

Proponen mejorar las aguas residuales porcinas mediante la eliminación de nutrientes y la purificación del biogás asociado, utilizando microalgas del género *Scenedesmus spp.* como una estrategia sostenible y renovable (Jean Prandini et al., 2016). La investigación se enfoca en la utilización de fotobiorreactores con microalgas *Scenedesmus spp.* en condiciones autótrofas y mixotróficas para maximizar la producción de biomasa.

Los fotobiorreactores con microalgas *Scenedesmus spp.* son como hogares especiales para el crecimiento de estas pequeñas plantas acuáticas. Están hechos para que las microalgas se desarrollen de la mejor manera posible. Los fotobiorreactores tienen un diseño que permite agrandarlos fácilmente y adaptarlos a diferentes lugares, también son cerrados lo que significa que se pueden controlar cosas como la luz, la temperatura y los nutrientes para que las microalgas estén en el medio adecuado y crezcan rápidamente (Jean Prandini et al., 2016). Para garantizar un funcionamiento óptimo, es necesario suministrar la cantidad adecuada de luz, mantener la temperatura correcta y asegurarse de que dispongan de suficientes nutrientes, como nitrógeno y fósforo.

Estos sistemas contribuyen eficientemente a la producción de biomasa de microalgas, utilizados en aplicaciones como biocombustibles, alimentos para peces o productos químicos. Este proceso se demuestra exponiendo el digestato no estéril de aguas residuales porcinas a diferentes

fotoperíodos, logrando un rendimiento prometedor de microalgas con una tasa de crecimiento de 145,3 mg en presencia de biogás (Jean Prandini et al., 2016).

La presencia de biogás también permitió una asimilación más rápida de nutrientes, especialmente de  $N^-NH_3$  y  $P^-PO_4^{3-}$ , con tasas de eliminación, además, el biogás filtrado mostró una alta capacidad de eliminación de  $H_2S$  hasta concentraciones de 3000 ppmv. El proyecto también evaluó la capacidad de las microalgas para eliminar  $CO_2$  del biogás y la pérdida de  $CH_4$  en el proceso. Se obtuvo una asimilación exitosa de  $CO_2$  de hasta el 94,5 % y una pérdida de  $CH_4$  de hasta el 18 % en el biogás filtrado (Jean Prandini et al., 2016).

La implementación de microalgas en el tratamiento de aguas residuales porcinas, junto con la purificación de biogás, ofrece una solución prometedora para acelerar la eliminación de nutrientes, mitigar la presencia de compuestos no deseados como el  $H_2S$  y producir biomasa valiosa y biometano (Jean Prandini et al., 2016)

- **Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago**

La presente investigación presentada aquí contribuye a esta área de enriquecimiento de metano al considerar factores cruciales que influyen en la composición del biogás producido. Al evaluar el impacto de variables como la temperatura, el pH, el tiempo de retención y las mezclas de materia orgánica, el estudio ofrece información valiosa sobre cómo mejorar la eficacia del proceso de biodigestión para lograr un mayor contenido de metano en el biogás (Ávila-Hernández et al., 2018).

Este estudio se centra en comprender cómo factores como la temperatura, el pH, el tiempo de retención de la materia orgánica en el biodigestor y los distintos tipos de residuos impactan en la producción de biogás. Por ejemplo, la temperatura y el tiempo de retención influyen en la actividad de microorganismos como bacterias y arqueas, que contribuyen a la descomposición de la materia orgánica, mientras que el pH afecta su modo de funcionamiento (Ávila-Hernández et al., 2018).

Además, se analiza cómo diferentes combinaciones de residuos pueden alterar la cantidad y calidad del biogás producido. En resumen, este estudio buscó descubrir cómo ajustar estos

parámetros para hacer el proceso de obtención de biogás más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Al explorar diferentes mezclas y condiciones de operación, se investigaron diversas combinaciones de residuos orgánicos, como desechos alimenticios y agrícolas, dentro de los biodigestores. Esto implicó probar diferentes mezclas y ajustar condiciones de operación como la temperatura, el pH y el tiempo de retención hidráulica (el tiempo que los materiales pasan en el biodigestor). La meta es encontrar la combinación ideal de materiales y condiciones que maximice la producción de biogás, especialmente en términos de contenido de metano (Ávila-Hernández et al., 2018).

Al entender cómo estas variables interactúan, se busca mejorar la eficiencia del biodigestor para aprovechar al máximo el potencial energético de los residuos orgánicos, contribuyendo así a una gestión más sostenible de los desechos y a la generación de energía renovable.

La investigación puede proporcionar una perspectiva sobre cómo optimizar el rendimiento de los biodigestores para lograr una generación de biogás más enriquecido en metano. Esto es particularmente relevante en el contexto de aprovechar al máximo el potencial energético de los residuos orgánicos (Ávila-Hernández et al., 2018) y reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales y no renovables.

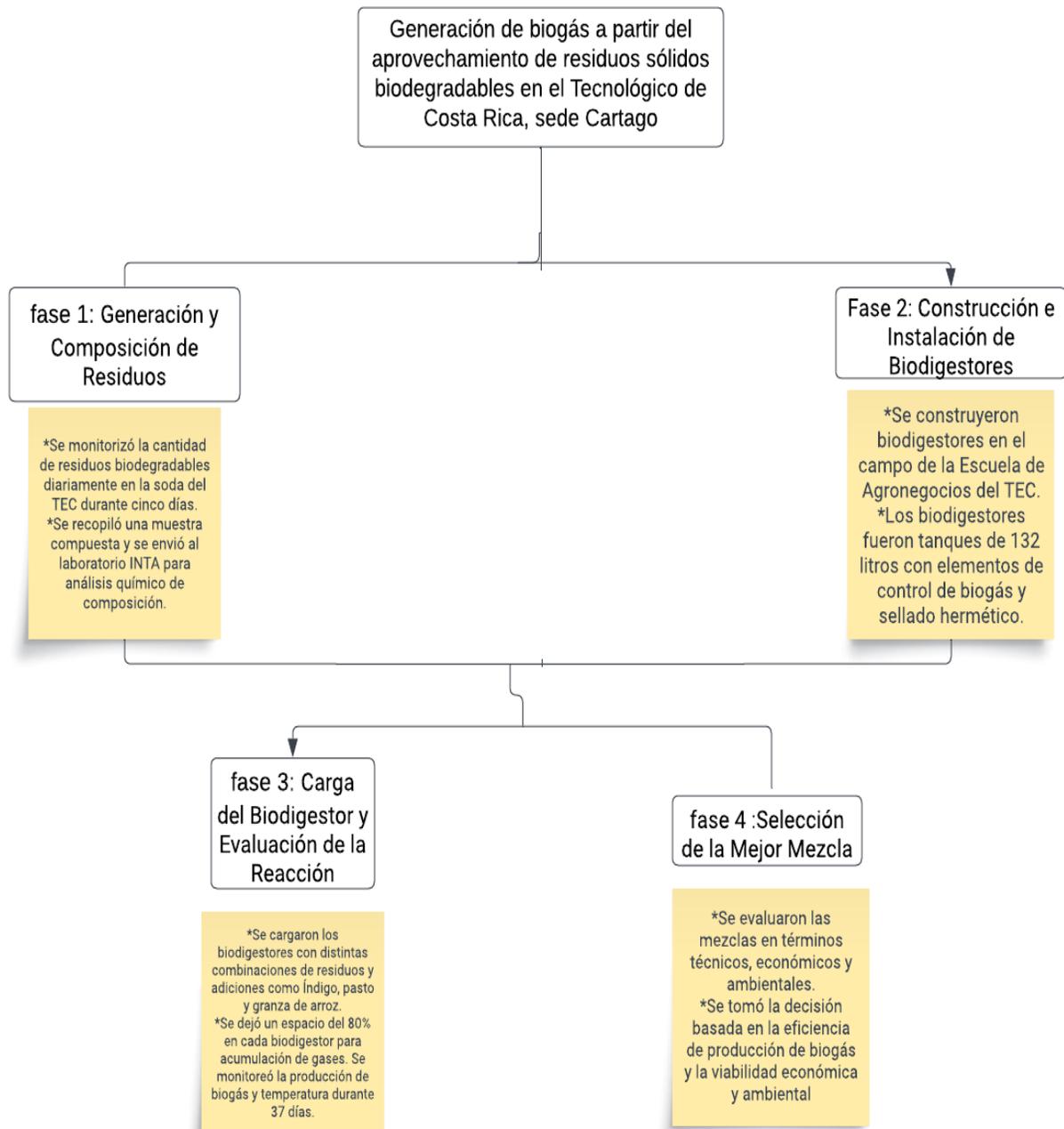
Este estudio presenta una serie de conclusiones relevantes en relación con la gestión sostenible de residuos y la producción de energía renovable. Se destaca que la implementación de la digestión anaeróbica a nivel local se revela como una estrategia efectiva para disminuir la acumulación de residuos en vertederos, reducir la contaminación de recursos acuíferos y disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. La capacidad de generar biogás a partir de residuos orgánicos, con un enfoque en el enriquecimiento de metano, confirma el potencial de esta tecnología como una fuente de energía limpia y sostenible. (Ávila-Hernández et al., 2018).

Este estudio realizado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) revela que generamos alrededor de 229 kg de residuos biodegradables diarios. Analizaron químicamente estos residuos y encontraron que tienen la combinación justa de carbono y nitrógeno, con más del 50% siendo materia orgánica (Ávila-Hernández et al., 2018).

La mejor mezcla para producir biogás resultó ser aquella que contenía Índigo, comenzando a generar biogás en el noveno día y manteniéndolo durante todo el experimento. Este enfoque no solo fue eficiente sino también económico, reduciendo costos de almacenamiento y transporte. Además, la temperatura durante el proceso se mantuvo en un rango adecuado (Ávila-Hernández et al., 2018).

Por lo tanto, los resultados de esta investigación establecen un vínculo directo con los esfuerzos en curso para mejorar la gestión de residuos y promover la producción de energía renovable. El estudio aporta una metodología detallada como se muestra en la Ilustración 1 y resultados concretos que enriquecen el estado del arte en esta área, ofreciendo perspectivas valiosas para la optimización de la digestión anaeróbica y la generación de biogás en el futuro.

## Ilustración 1 Metodología



Fuente: Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago (Ávila-Hernández et al., 2018)

- **Diseño de un biodigestor de gas producido por el estiércol de los cerdos en la vereda Juracambita del municipio de Zetaquirá**

Este proyecto surgió de la necesidad dominante de implementar una gestión eficaz de los residuos orgánicos producidos por los cerdos en las instalaciones agrícolas de la vereda Juracambita en el municipio de Zetaquirá (Boyacá). El objetivo principal es desarrollar un biodigestor que pueda realizar el procesamiento de los desechos de estiércol de cerdo. Este proceso implica un tratamiento completo que abarca etapas químicas, físicas y biológicas, culminando en la creación de una valiosa fuente de energía renovable (Barrera & Casallas, 2022).

El planteamiento del problema inicial conduce, en primera instancia, a la formulación de una hipótesis en la cual se propone que la aplicación de la biorremediación al estiércol porcino no solo contribuye a la preservación del entorno natural, sino que también conlleva beneficios ambientales sustanciales para la comunidad de Juracambita (Barrera & Casallas, 2022).

Estos beneficios se ven reflejados en el diseño meticuloso de un biodigestor de proceso continuo, el cual se ha concebido para la generación de gas de manera eficiente y sostenible. Durante el proceso de diseño, consideraron detalladamente la identificación de normativas aplicables y los componentes esenciales necesarios para su construcción y operación.

Emplearon datos y criterios específicos proporcionados por el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, así como las pautas ambientales específicas para el subsector porcino, asegurando así un enfoque integral y conforme a los estándares regulatorios vigentes. Una vez implementado, el biodigestor dota a la vereda Juracambita de la capacidad de producir biogás, recurso que se convierte en una fuente energética utilizable en los hogares locales (Barrera & Casallas, 2022).

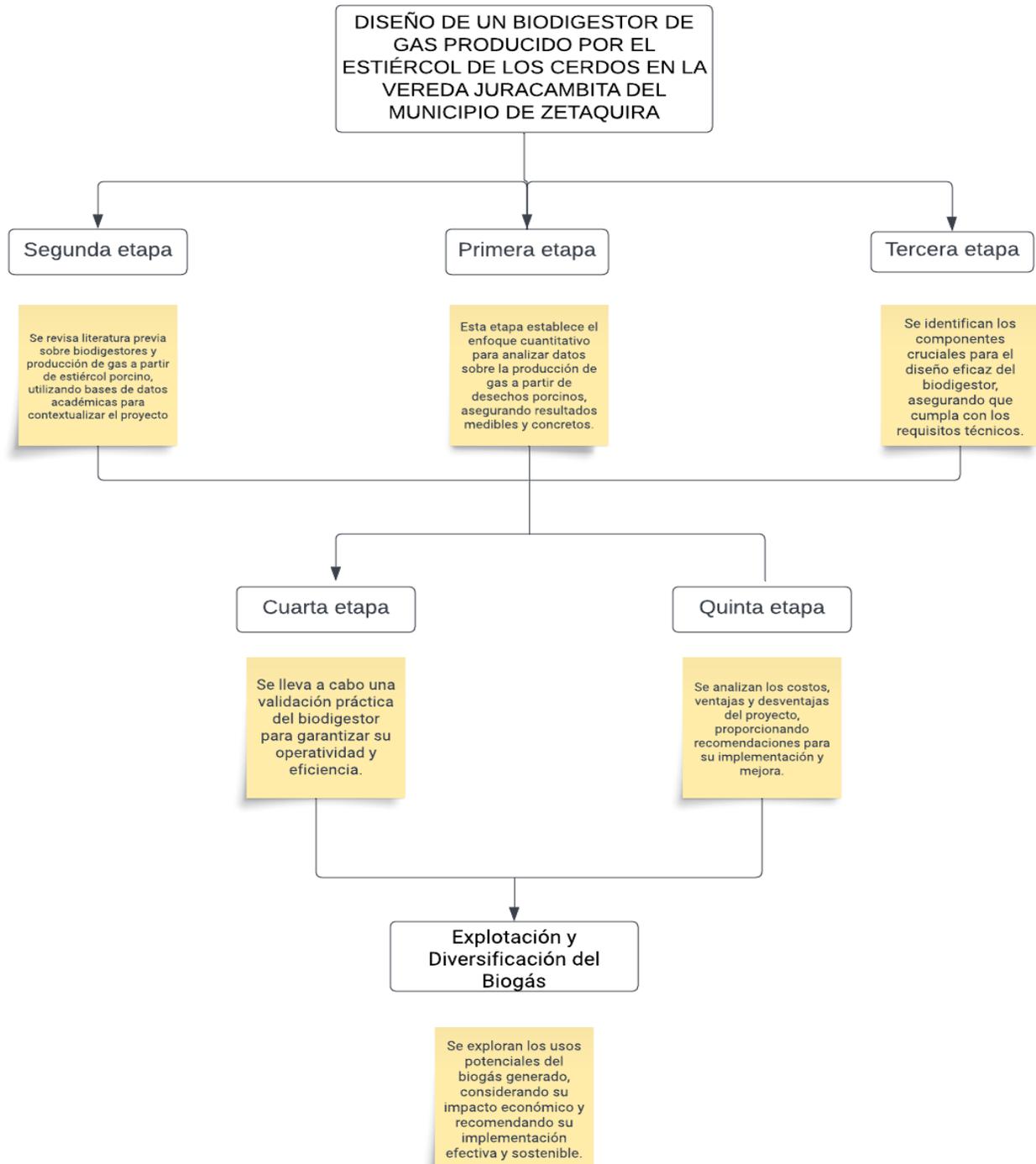
El biodigestor consta de varios elementos cruciales para su funcionamiento. En primer lugar, está el tanque digestor, el componente principal donde ocurre la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Este tanque, generalmente hermético, es llenado con material orgánico, como estiércol o residuos de alimentos, que actúa como sustrato para el proceso (Barrera & Casallas, 2022).

Dentro del tanque, los microorganismos, especialmente bacterias y arqueas metanogénicas, descomponen la materia orgánica, generando biogás, principalmente metano. Para optimizar este proceso, se implementa un sistema de control de condiciones, regulando la temperatura, el pH y el tiempo de retención hidráulica (Barrera & Casallas, 2022).

El siguiente paso implica la extracción del digestato, el residuo resultante de la descomposición, que puede utilizarse como fertilizante. Simultáneamente, el biogás producido, rico en metano, se captura y almacena para su uso como fuente de energía renovable, el biodigestor opera como un sistema cerrado, donde los residuos orgánicos se descomponen anaeróbicamente, generando biogás y produciendo un valioso subproducto en forma de fertilizante. Este proceso, cuidadosamente controlado, permite aprovechar de manera eficiente los residuos orgánicos y obtener beneficios tanto ambientales como energéticos (Barrera & Casallas, 2022)

La metodología empleada abarca tanto la investigación documental como la experimentación práctica, ambas orientadas a lograr la obtención de gas natural a partir del proceso de biodigestión como se muestra en la ilustración 2, esta iniciativa no solo resuelve una problemática inmediata de gestión de residuos, sino que también promueve la sostenibilidad a nivel local, contribuyendo de manera significativa a la protección del medio ambiente y al fomento de prácticas agrícolas más responsables y sostenibles en la vereda Juracambita (Barrera & Casallas, 2022)

**Ilustración 2 Etapas del diseño del biodigestor**



Fuente: Diseño de un biodigestor de gas producido por el estiércol de los cerdos en la vereda Juracambita del municipio de Zetaquirá (Barrera & Casallas, 2022)

- **Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado**

Su investigación se centra en dimensionar una instalación de biogás a escala doméstica para satisfacer la demanda energética diaria de una familia, incluyendo la cocción de alimentos e iluminación. El proyecto se divide en cuatro capítulos, cada uno de los cuales aborda el desarrollo del proyecto y sus principales desafíos:

En la actualidad, la investigación sobre biomasa y digestión anaeróbica para la producción de biogás se presenta en forma de fases metodológicas. En la Fase 1, se destaca la importancia de la digestión anaeróbica, un proceso biológico donde los microorganismos descomponen la materia orgánica sin oxígeno para generar biogás (Arrieta-Palacios, 2016).

La Fase 2 se centra en la evaluación de biodigestores domésticos, explorando sus ventajas y desventajas fundamentales para el proceso de digestión anaeróbica, en la fase 3 la producción de biogás y parámetros de funcionamiento de un biodigestor: Aquí, se presentan los conceptos necesarios para analizar el rendimiento de biogás a partir de materia orgánica específica. También se describen los parámetros de operación de un biodigestor, que son fundamentales para obtener resultados óptimos (Arrieta-Palacios, 2016).

En la Fase 4, enfocada en el diseño de la planta de biogás para la optimización de las excretas ganaderas, se elige meticulosamente el biodigestor taiwanés, respaldado por investigaciones previas que demostraron su eficacia en situaciones similares (Arrieta-Palacios, 2016).

Se llevó a cabo un análisis detallado de los rendimientos previamente obtenidos de biogás, considerando variables como la composición de los residuos, las condiciones ambientales y la temperatura. Posteriormente, se procedió a dimensionar la instalación, calculando las capacidades necesarias y planificando la infraestructura requerida. Por último, se estimó el costo aproximado de la instalación, evaluando los gastos asociados con materiales, construcción y operación. Esta fase proporciona una visión integral y precisa para asegurar el aprovechamiento eficiente y

sostenible de las excretas ganaderas mediante la implementación de la tecnología seleccionada (Arrieta-Palacios, 2016).

El objetivo principal de la investigación se centra en diseñar una instalación de biogás que aproveche eficientemente los desechos de ganado vacuno y/o porcino para cubrir las necesidades energéticas de una familia compuesta por cinco o seis miembros.

Este enfoque implica un minucioso proceso de dimensionamiento que incluye el biodigestor, la zanja, el gasómetro y las tuberías de transporte de gas, asegurando que cada componente esté diseñado para cumplir con los requisitos específicos del proyecto. Además, se resalta la importancia de considerar la viabilidad económica del proyecto mediante el análisis del Valor Actual Neto (VAN) y el período de recuperación de la inversión (*payback*).

Esta evaluación económica proporciona una perspectiva clave sobre la sostenibilidad financiera del proyecto a largo plazo, asegurando que no solo sea técnica, sino también económicamente eficiente. En una perspectiva prospectiva, se señala la posibilidad de emprender investigaciones futuras relacionadas con el rendimiento del fertilizante orgánico generado a partir del proceso de digestión anaeróbica. Además, se destaca la potencial reducción en la necesidad de adquirir fertilizantes químicos comerciales, lo cual puede ser parte integral de la evaluación económica global del proyecto. Este enfoque amplio y prospectivo refleja una consideración completa de los impactos y beneficios a largo plazo de la instalación de biogás propuesta (Arrieta-Palacios, 2016).

Esta investigación es relevante en el contexto de la sostenibilidad y la gestión de residuos, ya que el biogás puede ser una fuente de energía renovable y los subproductos de la digestión anaeróbica, como el fertilizante orgánico, tienen un valor agrícola significativo (Arrieta-Palacios, 2016).

- **Control robusto del pH en un fotobiorreactor *raceway***

En el estado actual de la investigación, la exploración de soluciones respetuosas con el medio ambiente ha conducido al desarrollo de fotobiorreactores industriales para el cultivo de microalgas. Este enfoque ofrece ventajas significativas, como un bajo consumo de agua y aplicaciones versátiles en diversas ubicaciones (Sánchez et al., 2022).

Las microalgas, debido a su elevado contenido de lípidos, se presentan como una fuente prometedora para la producción de biodiesel, una alternativa más ecológica a los combustibles convencionales, además de tener aplicaciones en cosméticos, alimentación animal y tratamiento de aguas residuales (Sánchez et al., 2022).

Dentro de los sistemas resaltados, los fotobiorreactores *raceway* destacan por su capacidad de escalabilidad y economía, convirtiéndolos en herramientas ideales para la producción industrial de microalgas (Sánchez et al., 2022).

Para comprender y controlar el complejo proceso de crecimiento de las microalgas, se han desarrollado modelos que consideran factores cruciales como la temperatura, la luz y la relación entre la respiración y la fotosíntesis, marcando así un avance significativo en esta área de investigación (Sánchez et al., 2022)

También se han propuesto formas de control, como el uso de controladores proporcionales integrales (PI) y controladores basados en eventos. Sin embargo, la complejidad del sistema y las incertidumbres requieren enfoques más robustos. Por eso, se ha propuesto un tipo de controlador PID basado en la Teoría de Funciones de Transferencia Cuantizada (QFT) para mantener el nivel de pH en un rango adecuado. Este enfoque ha mostrado ser efectivo tanto en simulaciones como en pruebas reales en un reactor de microalgas, el cultivo de microalgas en fotobiorreactores *raceway* es una solución prometedora para la sostenibilidad y las energías renovables (Sánchez et al., 2022).

La formulación de un controlador robusto, basada en la Teoría de Funciones de Transferencia Cuantizada (QFT: *Quantitative Feedback Theory*), para la regulación del pH ha demostrado ser eficiente, incluso en situaciones de operación variables. Esta investigación contribuye significativamente al avance en la producción sostenible de microalgas y su potencial aplicación en la obtención de biocombustibles (Sánchez et al., 2022)

- **Diseño conceptual de un fotobiorreactor para la producción de hidrógeno**

Este proyecto de investigación se enfoca en crear un sistema para producir hidrógeno de manera más amigable con el medio ambiente que los métodos convencionales, que emiten gases dañinos para la atmósfera. Eligieron trabajar con la microalga *Chlorella Vulgaris*, que ha demostrado ser efectiva en la producción de hidrógeno bajo ciertas condiciones, se estudia cómo la exposición a la luz solar influye en la capacidad de la *Chlorella Vulgaris* para producir hidrógeno (Rodríguez & Muñoz, 2022).

También se investigaron lugares en Colombia donde el equipo pueda operar de manera eficaz. Esto es crucial para asegurarse de que el sistema pueda funcionar bien y producir hidrógeno de manera eficiente.

En el análisis de distintos diseños de equipos, se llega a la conclusión de que un diseño con placas planas sería el más idóneo para la aplicación en cuestión. Se presenta un diseño detallado que especifica las condiciones operativas del equipo, abordando aspectos clave como materiales, dimensiones y características de las placas planas. Además, se propone un tamaño específico de 3 litros, considerando factores como la escala del proyecto y los requisitos particulares de la aplicación. Este enfoque detallado garantiza la alineación precisa entre el diseño del equipo y los objetivos específicos del proyecto, lo que debería resultar en una producción de hidrógeno de alrededor de 238 mililitros por hora por litro de agua. Este paso es muy importante, ya que proporciona un plan claro para construir y operar el equipo, permitiendo así evaluar si es una forma efectiva y sostenible de producir hidrógeno. En conjunto, este proyecto representa un paso importante hacia el uso de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente en el campo de la energía (Rodríguez & Muñoz, 2022).

- **Revisión de la eficiencia de biodigestores para la producción de biogás con excremento vacuno**

En las últimas décadas, el incremento en la utilización de combustibles fósiles ha generado problemas ambientales a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la gestión inadecuada de los desechos orgánicos de la agricultura también constituye una preocupación. Países como China e India han implementado tecnologías avanzadas, como la digestión anaerobia, para transformar de manera ecológica los desechos agrícolas en biogás. En Perú, el Ministerio de

Agricultura fomenta el uso de biodigestores para tratar excrementos animales y producir biogás, contribuyendo a la salud ambiental y al bienestar de los agricultores (Villegas, 2020).

En términos de avances tecnológicos, los diseños mejorados de biodigestores, como los tubulares, están haciendo que la producción de biogás sea más eficiente. Se están utilizando tecnologías más inteligentes, como sistemas de control automatizado y sensores, para monitorear y optimizar el proceso de producción. Además, la integración con fuentes de energía renovable, como paneles solares, está haciendo que la producción de biogás sea más sostenible y eficaz. Estos avances tecnológicos están mejorando la forma en que convertimos los desechos orgánicos en biogás, haciéndolo más amigable con el medio ambiente (Villegas, 2020).

- ***Dietary effects of cottonseed and vitamin E on greenhouse gas emissions from cattle feces analyzed in biodigesters***

Se ha explorado la manipulación de la fermentación ruminal en el ganado como una estrategia para reducir las emisiones de metano, mediante la adición de lípidos como la semilla de algodón a las dietas. Este subproducto de la industria del algodón se agrega a la dieta debido a sus altas concentraciones de ácidos grasos insaturados. Además, se ha utilizado vitamina E para mejorar la fermentación ruminal y la digestibilidad de los nutrientes. Aunque algunos estudios han investigado la adición de semillas de algodón y vitamina E en las dietas del ganado, aún no se ha explorado su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes del estiércol (Nogueira et al., 2023).

Este estudio se centra en evaluar cómo estas dietas afectan las emisiones de GEI en biodigestores. Aunque se observan cambios en la composición de las heces en función de la dieta, los resultados indican que las dietas con semillas de algodón no afectan significativamente la producción total de biogás y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los biodigestores. La inclusión de vitamina E tampoco mostró impactos notables en las emisiones de gases. En resumen, se sugiere que estas estrategias de alimentación no alteran de manera significativa las emisiones de GEI en el proceso de digestión anaeróbica (Nogueira et al., 2023).

- ***Optimization of domestic and industrial biodigestors based on machine learning techniques***

En la actualidad, la gestión de residuos biodegradables ha impulsado el crecimiento de la digestión anaeróbica en biodigestores como una solución tanto ambiental como económica. Se han realizado avances significativos en el desarrollo de herramientas para evaluar la viabilidad técnica y económica de estos sistemas. Una innovación clave radica en la combinación del modelo ADM1 con técnicas de Machine Learning, permitiendo la creación de metamodelos simplificados para simulaciones más rápidas. Este enfoque se implementa a través de un complemento de Excel, generado con el compilador MATLAB, facilitando el acceso y eliminando la necesidad de software especializado costoso. Los resultados demuestran la eficacia del metamodelo reducido y la herramienta desarrollada, proporcionando una plataforma para una gestión más eficiente y sostenible de residuos biodegradables (Leite et al., 2023).

La investigación no solo contribuye a mejorar la comprensión del proceso de biodigestión, sino que también resalta los beneficios económicos y ambientales. La originalidad y el valor de la investigación radican en el desarrollo de una herramienta accesible que simplifica la simulación y evaluación de los procesos de biodigestión, promoviendo así prácticas más sostenibles en la gestión de residuos biodegradables. Este enfoque prometedor abre nuevas perspectivas para la adopción generalizada de sistemas de biodigestión, marcando un hito significativo en la eficiencia y sostenibilidad de estas prácticas ambientales (Leite et al., 2023).

- *Use of swine waste in the production of electric energy from the efficient use of biodigestors: the brazilian case*

La incorporación de prácticas sostenibles en la gestión de granjas porcinas se ha vuelto un tema crucial, especialmente en el contexto ambientalmente consciente de Brasil. La preocupación por el manejo adecuado del estiércol porcino ha llevado a investigaciones orientadas a la viabilidad financiera de implementar biodigestores para generar energía limpia. En la actualidad se destacan avances en la aplicación de métodos financieros, como el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) y técnicas de simulación como la Simulación Monte Carlo para determinar el número óptimo de animales que una granja porcina rural debe criar para que la implementación de biodigestores sea económicamente viable (Catapan, 2023).

Este enfoque no solo aborda la eficiencia productiva y ambiental de las granjas porcinas, sino que también tiene implicaciones directas para los pequeños productores. Al proporcionar datos claros sobre el número mínimo de animales necesarios para hacer rentable la instalación de biodigestores, la investigación aporta de manera significativa a la toma de decisiones de los agricultores. En un entorno en el que las tarifas eléctricas están en aumento y la generación de energía limpia es crucial, este estudio se presenta como una guía valiosa para la implementación práctica y sostenible de biodigestores en granjas porcinas rurales. El incremento de las tarifas eléctricas, agravado por eventos como sequías y la pandemia de COVID-19, ha subrayado la importancia de la generación distribuida de energía limpia. La singularidad de este trabajo reside en su enfoque integral que conecta la cría de cerdos, la gestión de residuos y la generación de energía. La investigación sugiere un camino viable para que las granjas porcinas no sólo reduzcan su impacto ambiental sino también generen ingresos adicionales a través de la producción de energía limpia, marcando un avance significativo en la convergencia de la sostenibilidad y la rentabilidad en la agricultura porcina (Catapan, 2023).

- **Implementación de biodigestores tubulares anaeróbico, como herramienta de auto sustentabilidad para la producción de biogás y biol en el cantón Guaranda, provincia Bolívar, Ecuador**

En el contexto de la determinación de la humedad en muestras, la investigación adopta un enfoque riguroso mediante el uso de una estufa Nplus/sfplus-memmert y una balanza analítica DHAUS, siguiendo la norma UNE-EN ISO 18134-3 de 2016. La metodología detallada, que incluye la esterilización de crisoles y la manipulación precisa de la muestra, refleja la meticulosidad de la investigación. Aunque no se mencionan avances tecnológicos específicos, la elección de instrumentación de alta precisión sugiere una adhesión a estándares avanzados en la medición de humedad (Salto et al., 2023).

En la estimación de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), la investigación se apoya en ecuaciones y datos proporcionados por la FAO, estableciendo así una conexión con fuentes confiables y determinando una relación C/N para la materia prima de ganado bovino. Aunque no se destacan avances tecnológicos específicos en esta sección, la aplicación de ecuaciones estándar y tablas

reconocidas subraya la integración de metodologías consolidadas en el análisis de la relación C/N (Salto et al., 2023).

En cuanto al diseño y construcción del biodigestor tubular, la investigación presenta un enfoque práctico y económico, respaldado por cálculos detallados y dimensiones específicas adaptadas a la materia prima disponible. La elección de construir tres biodigestores para un manejo eficiente destaca la aplicación de soluciones prácticas. Aunque no se mencionan avances tecnológicos de vanguardia, la propuesta de diseño refleja una implementación estratégica de tecnologías accesibles para la producción continua de biogás y biol (Salto et al., 2023).

- ***Evaluation of the incidences of salinity and pH on the biomass, productivity and lipids accumulation in cultures of chlorella vulgaris in a flat plate photobioreactor***

El artículo ofrece una investigación sobre la producción de biomasa y lípidos en cultivos de *Chlorella Vulgaris*, una microalga, utilizando un fotobiorreactor de placa plana. El estudio analiza la influencia de la salinidad y el pH en el crecimiento, la productividad y la acumulación de lípidos. Se seleccionaron condiciones óptimas basadas en tres criterios: curvas de crecimiento, productividad volumétrica y análisis estadístico (Fernández & Hernández, 2016).

El sistema experimental incorporó un fotobiorreactor con control de temperatura y agitación, y se realizaron cultivos bajo diversas condiciones de salinidad y pH. Los resultados indicaron que las concentraciones salinas de 0.2 M y 0.3 M, junto con niveles de pH de 7 y 7.5, resultaron ser óptimos para el cultivo de *Chlorella Vulgaris* en el fotobiorreactor de placa plana (Fernández & Hernández, 2016).

Llevaron a cabo un análisis de ácidos grasos en la biomasa cultivada a pH 7, revelando un elevado contenido de ácidos grasos libres, especialmente ácido palmítico, esteárico y oleico. Estos resultados sugieren que esta microalga podría ser una fuente potencial de materia prima para biocombustibles debido a su composición lipídica. Se compararon los perfiles de ácidos grasos con otras cepas de microalgas y se destacó la idoneidad de la cepa *Chlorella Vulgaris* cultivada a pH 7 para la producción de biocombustibles en comparación con cepas más adecuadas para la industria alimentaria debido a su alto contenido de ácidos esenciales (Fernández & Hernández, 2016).

## MARCO REFERENCIAL

- **Normativa vigente en Colombia para la generación de energía renovable**

Con la finalidad de aplicar los compromisos internacionales en el territorio nacional, el gobierno ha emitido una serie de leyes y decretos que supervisan la incorporación de alternativas para la utilización de energías renovables y la reducción de los efectos del cambio climático.

Con la Ley 1715 de 2014 el gobierno nacional promueve el uso energías sostenibles disponibles, fomentando especialmente el empleo de energías no convencionales. Esta legislación, "Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional", en su Capítulo II establece las "Disposiciones para la generación de electricidad con fuentes no convencionales de energía (FNCE) y la gestión eficiente de la energía" (Congreso de Colombia, 2014). De esta manera, la construcción y conexión de un biodigestor y un fotobiorreactor destinados al enriquecimiento de biogás desempeñan un papel crucial en la adopción de opciones energéticas novedosas.

Con la ley 2036 de 2020 el gobierno nacional fomenta la participación territorial en el desarrollo de energías limpias por parte de las entidades territoriales con proyectos de generación de energías alternativas renovables. (Congreso de Colombia, 2020)

Con el propósito de modernizar la legislación vigente en cuanto a las energías limpias como es el caso de la ley 1715 de 2014 antes mencionada, esta se modifica parcialmente con la ley 2099 de 2021. (Congreso de Colombia, 2021).

Con el decreto 1543 de 2017 el gobierno nacional creó el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, FENOGE (Congreso de Colombia, 2017). Según lo establecido en la Ley 1715 de 2014, con esto da prioridad a los proyectos relacionados con producción de energía limpia y los recursos para su implementación.

- **Uso y tipos de biodigestores**

Los biodigestores son dispositivos diseñados para convertir materia orgánica en biogás y fertilizante mediante un proceso conocido como digestión anaerobia. El biogás resultante es una combinación de gases, destacando un contenido significativo de metano, lo que lo convierte en un

combustible aprovechable y funcional como fuente de energía (Ministerio de Energía et al., 2011). Además, el digestato o biol generado durante el proceso contiene nutrientes esenciales para las plantas, lo que lo convierte en un fertilizante valioso para la agricultura (Marti Herrero, 2019). El uso de biodigestores contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a la vez que evita la contaminación del medio ambiente al manejar adecuadamente los residuos orgánicos (Corona Zuñiga, 2007).

El biodigestor es un sistema que facilita la digestión anaerobia de materia orgánica mediante la participación de diversas bacterias en un proceso secuencial. Estas bacterias transforman los residuos en biogás y fertilizante (Herrero, 2008). El estiércol de animales contiene el consorcio bacteriano necesario para el proceso, mientras que otros materiales orgánicos pueden requerir la adición de inóculos. La eficiencia de la digestión depende de la temperatura y el tiempo; se puede trabajar a 35 °C para acelerar el proceso o a temperatura ambiente para reducir costos (Rivas Solano et al., 2009). El biodigestor proporciona una solución sostenible para la generación de biogás y fertilizante a partir de desechos orgánicos.

Las tecnologías más comunes que se usan en los sistemas de producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de materia orgánica son las siguientes:

**Biodigestores de uso doméstico:** son dispositivos de tamaño pequeño a mediano destinados a viviendas o comunidades pequeñas, diseñados para el tratamiento de desechos orgánicos generados en la cocina y baños. Estos biodigestores suministran biogás para la cocción y, al mismo tiempo, producen fertilizante utilizable en la agricultura. (Marti Herrero, 2019).

**Biodigestores de domo fijo:** se trata de estructuras con forma de cúpula diseñadas para retener y acumular el biogás producido durante el proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos. Estos biodigestores operan con un flujo constante de materia orgánica, generando biogás compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (Herrero, 2008).

El biogás recolectado puede emplearse como fuente de energía, mientras que el efluente líquido resultante se utiliza como fertilizante. Esta tecnología es popular en entornos rurales y proporciona una solución sostenible para la valorización de desechos orgánicos y la producción de biogás renovable (Corona Zuñiga, 2007).

Biodigestores tubulares: Los biodigestores tubulares son estructuras cilíndricas que permiten el flujo continuo de residuos orgánicos para la digestión anaeróbica el proceso produce biogás, que está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. La forma alargada del biodigestor aumenta la eficiencia y control del proceso, acelerando la producción de biogás. Estos biodigestores son populares en entornos agrícolas y ganaderos, siendo una solución efectiva y sostenible para obtener biogás renovable y gestionar residuos orgánicos de manera eficiente (Beteta Herrera & González Sovalbarro, 2005).

La materia prima principal para los biodigestores es la biomasa, que puede ser de diversos tipos, como residuos agrícolas, estiércol animal, restos de cultivos, residuos orgánicos municipales, entre otros. Los biodigestores convierten esta biomasa en biogás mediante un proceso de fermentación anaeróbica (de-Lucas et al., 2012).

La biomasa hace referencia a la materia orgánica derivada de plantas y animales, que puede ser empleada como fuente de energía. Esto abarca materiales como madera, residuos agrícolas, desechos de alimentos y otros componentes orgánicos (de-Lucas et al., 2012). La biomasa se puede quemar para generar calor o electricidad, convertirse en biocombustibles como el biodiesel o el bioetanol, o utilizarse en procesos de fermentación para producir biogás, se considera una fuente de energía renovable, ya que la materia orgánica puede regenerarse mediante el crecimiento de plantas y cultivos (Arrieta-Palacios, 2016).

La biomasa se puede clasificar en dos amplias categorías según su origen, ya sea de actividades humanas o de fuentes animales, y según su estado, es decir, su forma física o química.

**Tabla 1 Grupos de biomasa y clasificación**

Biomasa virgen o natural	Biomasa terrestre	Biomasa forestal
		Pastos
		Cultivos energéticos
	Biomasa acuática	Cosechas cultivadas
		Algas
	Plantas acuáticas	
Biomasa de residuos	Desechos municipales	Desechos sólidos municipales

		Biosólidos, aguas residuales
		Gas de rellenos sanitarios (vertederos)
	Residuos agropecuarios	Ganadería y estiércoles
		Residuos de cultivos agrícolas
	Residuos forestales	Cortezas, hojas, residuos orgánicos del suelo
	Residuos industriales	Madera de demolición, aserrín,

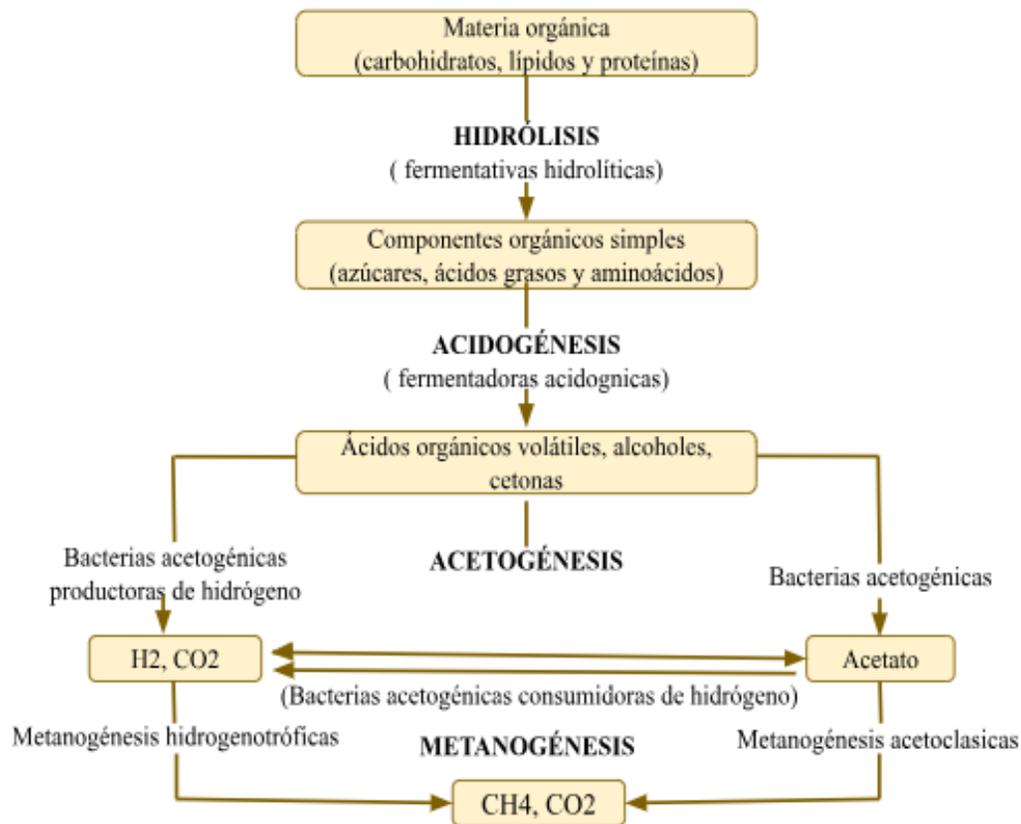
**Fuente:** (Mafu, 2018)

- **Proceso de digestión anaerobia en los biodigestores**

La digestión anaerobia es el proceso mediante el cual la bacterias y arqueas degradan la materia orgánica en condiciones anaerobias, este proceso está constituido por cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Rincon, 2020) como se muestra en la ilustración 3.

La digestión anaerobia es un mecanismo que se implementó inicialmente para tratar aguas residuales y residuos orgánicos además de lo anterior con este mecanismo es posible obtener energía renovable.

**Ilustración 3 DIGESTIÓN ANAEROBIA**



**Fuente:** Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria (Parra Huertas, 2015)

La digestión anaerobia es una tecnología que es conocida desde el siglo XVII, pero sus primeros usos fueron en el tratamiento de aguas residuales, lodos depurados y residuos municipales en el año 1980 (Lora Grando et al., 2017). Actualmente esta tecnología ha avanzado potencialmente ya que uno de sus principales usos es para la generación de energía.

La energía obtenida a partir de biomasa microalgal ha tenido un crecimiento significativo ya que está ha sido foco de investigación en países europeos, siendo Alemania promotor de esta tecnología ya que cuenta con 11.000 plantas de biogás funcionales. Por su parte, la Unión Europea incrementó en el año 2017 sus plantas de biogás de 6.227 a 17.432; esto representa cerca del 60% de la energía proveniente de alternativas limpias (Rincon, 2020). El aprovechamiento de esta energía en Colombia a tenido un crecimiento lento ya que al ser un país en desarrollo no se han hecho los

estudios suficientes para implementarla, sin embargo, existen biodigestores rurales que fueron creados con el fin de aprovechar aquellos residuos orgánicos que se generan y con estos obtener metano. También en la ciudad de Bogotá D.C. se viene implementando desde el año 2010 el aprovechamiento de los residuos orgánicos que llegan al relleno doña Juana, Según la empresa Biogás Doña Juana SAS ESP (Serrano, 2010) esta tiene el propósito de aprovechar dichos residuos y generar metano a partir del biogás, este se convierte en el primer gran proyecto en Colombia para el aprovechamiento de residuos y generación de energía.

Para evaluar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, es esencial llevar a cabo un seguimiento de los sólidos totales, ya que estos proporcionan información sobre si el biodigestor tiene la carga orgánica necesaria y si la actividad microbiana en el sistema es la adecuada.

La materia orgánica que se introduce en el biodigestor se denomina "sustrato". Este material orgánico puede caracterizarse mediante varios parámetros, siendo los tres más significativos el contenido de sólidos totales (TS), el contenido de sólidos volátiles (SV) y el pH (Marti Herrero, 2019).

Los sólidos totales se refieren a la parte "seca" del sustrato, donde los sólidos inertes representan entre un 25% y un 15%, mientras que los sólidos orgánicos constituyen el 75% al 85%. En el caso de los desechos animales, una parte de estos sólidos totales son inertes, mientras que la mayoría corresponde a los sólidos volátiles, que constituyen la fracción orgánica que será sometida a la digestión anaeróbica en el biodigestor. La medición de estos parámetros es esencial para comprender y controlar eficazmente los procesos de biodigestión. (Marti Herrero, 2019).

- **Producción de biogás**

La producción de biogás a través de la digestión anaerobia está directamente vinculada a la cantidad y naturaleza de los sólidos totales presentes en el sustrato introducido en el biodigestor (Ávila-Hernández et al., 2018).

El biogás es una mezcla de gases generada a través de la descomposición anaeróbica (sin presencia de oxígeno) de materia orgánica, que incluye residuos orgánicos, estiércol, aguas residuales y otros materiales biodegradables. Está compuesto principalmente por metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono

( $CO_2$ ), junto con pequeñas cantidades de otros gases como nitrógeno ( $N_2$ ), hidrógeno ( $H_2$ ) y trazas de compuestos orgánicos volátiles (ROSALES, 2014).

La formación del biogás ocurre en condiciones anaeróbicas, donde microorganismos descomponen la materia orgánica en etapas sucesivas. El metano es el componente más valioso del biogás debido a su alto potencial energético. Puede ser utilizado como una fuente de energía renovable y sostenible en diversas aplicaciones, como la generación de electricidad, calefacción y cocina (Ministerio de Energía et al., 2011).

Dado que el biogás se origina a través de procesos biológicos naturales, su composición varía según el tipo de materia prima empleada, el sistema de digestión anaerobia y factores como la temperatura (Calderón Gamboa, 2022). En la Tabla 2 se presenta la composición promedio del biogás, junto con el poder calorífico de sus componentes. Se observa que, con la excepción del metano, los demás componentes no aportan significativamente en términos de energía al biogás debido a que su presencia se sitúa por debajo del 1% y su poder calorífico es reducido.

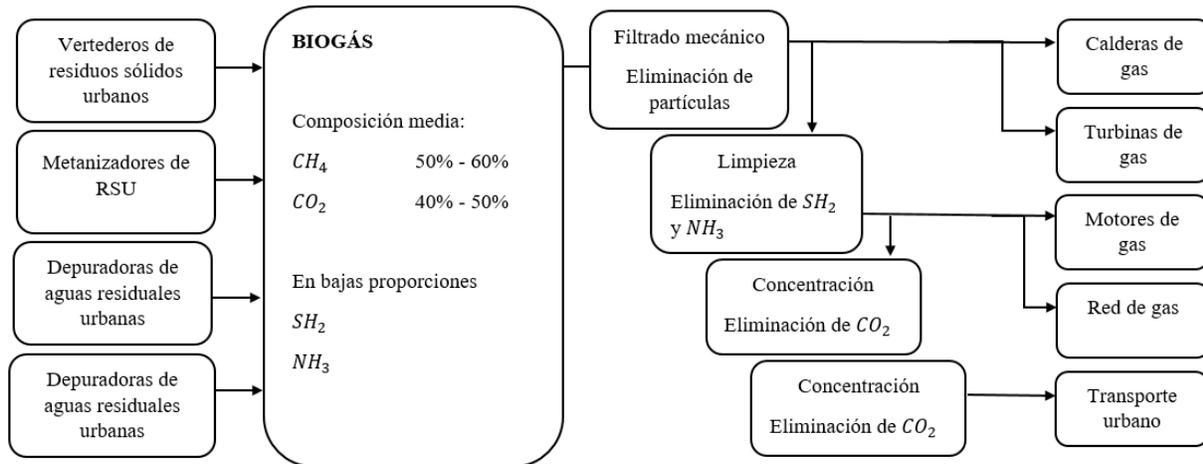
**Tabla 2 Composición del biogás**

Composición media del biogás y poder calorífico inferior de sus componentes (15.55 °C y 1 atm)		
Componente	Composición en el biogás	Poder calorífico
$CH_4$	60 – 80%	8 145 kcal/m <sup>3</sup>
$CO_2$	20 – 40%	-
$H_2$	1 – 3%	2 441 kcal/m <sup>3</sup>
$O_2$	0.1 – 1%	-
$CO$	0 – 0.1%	2 868 kcal/m <sup>3</sup>
$N_2$	0.5 – 3%	-
$SH_2 - NH_3$	0.5 – 1%	5 552 kcal/m <sup>3</sup>
$H_2O$	Variable	-

**Fuente:** (Nogues & Royo Herrer, 2002)

Además del metano, el biogás incluye otros gases que deben ser purificados según su uso previsto. La ilustración 4 presenta los usos principales del biogás y los tratamientos requeridos.

**Ilustración 4 Usos energéticos del biogás**



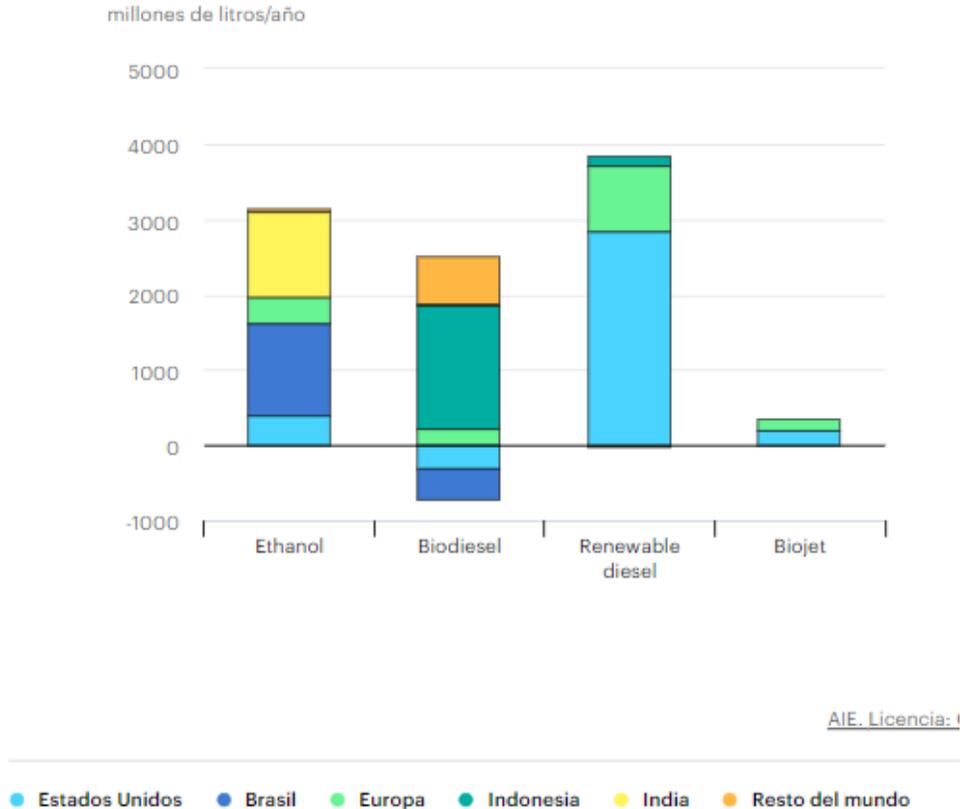
**Fuente:** (Arrieta-Palacios, 2016)

- **Bioenergía y biocombustibles**

La bioenergía es la energía que se obtiene a partir de materia orgánica, como biomasa, residuos agrícolas y forestales, y se ha utilizado durante siglos en diversas formas. Sus inicios se remontan a la antigüedad, cuando la humanidad comenzó a aprovechar la madera como fuente de calor y energía (Alvares et al., 2014). Con el tiempo, se desarrollaron tecnologías como la biomasa y la fermentación para producir biocombustibles y alimentos, marcando hitos en la historia de la bioenergía. En la actualidad, la bioenergía desempeña un papel importante en la producción de biocombustibles, como el etanol y el biodiesel, así como en la generación de energía a partir de biomasa y residuos orgánicos, la ilustración 5 muestra el gráfico del crecimiento en la demanda de biocombustibles y combustibles en las diferentes regiones demostrando la fuerza que a ganado la bioenergía en el mundo. (International Energy Agency, 2023)

**Ilustración 5 Crecimiento de la demanda de biocombustibles por combustible y región, 2021-2022**

Crecimiento de la demanda de biocombustibles por combustible y región, 2021-2022



**Fuente:** (International Energy Agency, 2023)

Dadas las circunstancias previamente mencionadas, se estima que para el año 2050, entre el 33% y el 50% del consumo de energía provendrá principalmente de biocombustibles (Arrieta-Palacios, 2016). Este cambio se debe a las diversas afectaciones al medio ambiente y al aumento en la demanda energética, lo cual requeriría grandes cantidades de petróleo. Los yacimientos disponibles no serían suficientes, lo que podría ocasionar escasez y cambios en los precios.

- **Fotobiorreactor y tipos**

Los fotobiorreactores son dispositivos utilizados para el cultivo masivo de microalgas. Están diseñados para proporcionar condiciones óptimas, como luz, temperatura, pH y nutrientes, que permiten un crecimiento eficiente de las microalgas (Ruiz-Reyes, 2015). Existen dos enfoques principales: los reactores abiertos, que priorizan la economía, pero ofrecen un control menos preciso del entorno, y los FBR cerrados, que logran condiciones más controladas, pero a un mayor costo. Estos sistemas tienen diversas aplicaciones en la producción de biomasa, biocombustibles, productos químicos y farmacéuticos, y en la biorremediación (S. M. P. González, 2018).

Existen varios tipos de fotobiorreactores utilizados para el cultivo de microorganismos fotosintéticos, como las microalgas. Los principales tipos son los siguientes:

#### **Fotobiorreactores tubulares**

Son dispositivos cilíndricos o tubulares en los cuales el medio de cultivo y las microalgas circulan a través de tubos transparentes expuestos a la luz. La agitación se logra mediante un flujo continuo o por bombeo (Fernandez Sevilla, 2014).

#### **Fotobiorreactores de columna**

Consisten en columnas verticales con una forma más simple que los tubulares. Las microalgas se cultivan en la parte superior y la mezcla del medio de cultivo y la luz incidente ocurre por gravedad (P. L. González, 2016).

#### **Fotobiorreactores de placa plana**

En estos reactores, las microalgas se cultivan en una capa delgada sobre una superficie plana y transparente, lo que permite una mayor exposición a la luz (S. M. P. González, 2018) .

Cada fotobiorreactor presenta sus ventajas y desventajas, y la selección del más apropiado dependerá de los objetivos particulares del cultivo, el tipo de microorganismo, la cantidad de producción buscada y los recursos disponibles.

Los fotobiorreactores son el medio de cultivo más eficaz y controlado para el cultivo de microalgas, garantizando su óptimo crecimiento.

Las microalgas representan una muy buena alternativa para el crecimiento de las energías limpias ya que estos organismos son fotosintéticos, crecen de manera autotrofa y heterotrofa lo cual permite que se adapten fácilmente y normalmente son muy eficientes en la fijación de dióxido de carbono, adicional a esto tienen la capacidad de producir biomasa haciendo uso de la energía solar, siendo más efectivas que las plantas (Gonzalez, 2015).

Gracias a su gran número de especies y a su versatilidad de crecimiento estas tienen muchos campos de acción en las industrias dando muy buenos resultados en los diferentes usos. Están presentes en la gran mayoría de ambientes como lagos, ríos y mares, como también es posible encontrarlas en el suelo ya que tienen la capacidad de adaptarse a muchos ambientes existentes (Brennan & Owende, 2010).

Las microalgas son compuestas por organismos fotoautótrofos, lo que implica que obtienen su energía de la luz solar y su crecimiento se produce a partir de materia inorgánica u orgánica, dependiendo de la especie, según la especie y su fuente de energía y carbono las microalgas se dividen en (Khan et al., 2009):

En este caso las microalgas obtienen la energía del sol y la fuente de carbono son los compuestos inorgánicos (Ruiz Domínguez, 2013).

### **Fotoheterótrofos**

En estos organismos la fuente de energía es el sol, pero la fuente de carbono son los compuestos orgánicos (Ruiz Domínguez, 2013).

### **Mixotrófica**

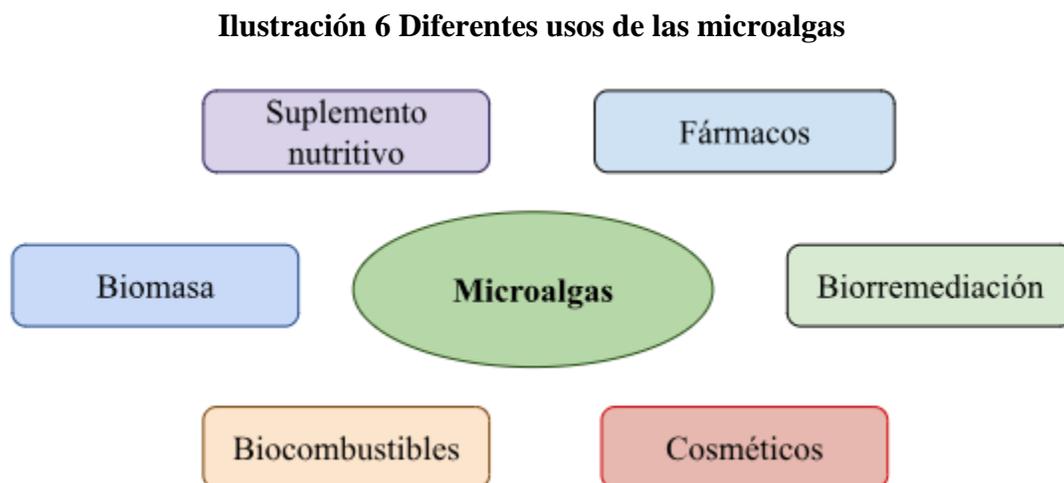
Las microalgas son capaces de crecer tanto en procesos heterótrofos como autótrofos, es decir que la fuente de energía es tanto luz solar como la materia orgánica y el carbono lo obtienen de compuestos orgánicos y de  $CO_2$  (Gonzalez, 2015).

### **Heterótrofa**

Los compuestos orgánicos sirven como fuente de energía y carbono, lo que permite que algunas microalgas se desarrollen incluso en la ausencia de luz, como es el caso de *Chlorella protothecoides*. (Gonzalez, 2015).

Las microalgas se dividen en dos categorías principales: procariotas y eucariotas. En la categoría de procariotas, se encuentran las Cianofíceas y las Proclorofitas. Por otro lado, en la categoría de eucariotas, se incluyen las Clorofíceas, Crisofíceas, Haptofíceas, Bacilarofíceas, Pirrofíceas, Criptofíceas y Euglenofíceas. (Ayala Montaña, 2015).

Así mismo, por la versatilidad de las microalgas éstas pueden ser usadas en diferentes campos de acción como se evidencia en la ilustración 6.



**Fuente:** Microalgas: aspectos tecnológicos y biotecnológicos (Luna, 2007)

- **Tipos de microalgas**

*Chlorella sp*

Es una microalga unicelular de gran interés en la investigación científica y en diversas aplicaciones debido a sus características nutricionales y su capacidad de fotosíntesis. La microalga fue identificada por el investigador holandés Martinus Willem Beijerinck en el año 1890. Fue la primera microalga en la que se identificó claramente un núcleo definido en su estructura (Krienitz et al., 2015).

**Tabla 3 Características *Chlorella* sp**

<i>Chlorella</i> sp	<b>Taxonomía</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reino protista</li> <li>• División: Chlorophyta</li> <li>• Clase: Trebouxiophyceae</li> <li>• Orden <i>Chlorella</i></li> <li>• Familia <i>Chlorella</i></li> <li>• Género <i>Chlorella</i></li> </ul>
	<b>Morfología</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microalga esférica</li> <li>• Diámetro: 2 a 10 micrómetros</li> </ul>

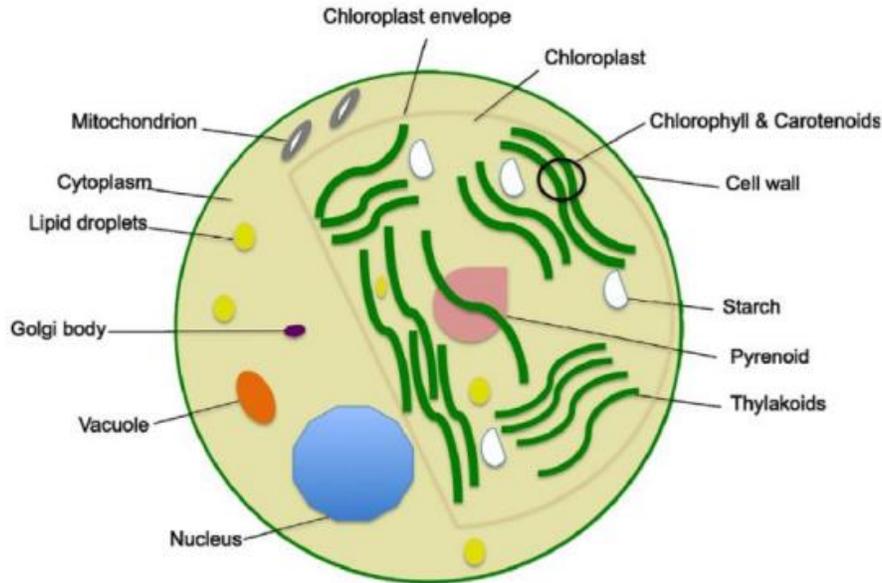
Fuente: (Céspedes Bernal, 2019)

*Chlorella* sp. es reconocido por su elevado contenido proteico, que puede oscilar entre el 42% y el 58% del peso seco de su biomasa. Además, en condiciones óptimas de crecimiento, tiene la capacidad de acumular lípidos, que pueden constituir entre el 5% y el 40% del peso seco de la biomasa. Estos lípidos son de particular interés en aplicaciones como la producción de biocombustibles. (Kim et al., 2016).

*Chlorella* sp. Tiene diversas aplicaciones en la investigación científica, la producción de alimentos y suplementos, así como en la industria de biocombustibles y la biorremediación. Su capacidad para acumular proteínas y lípidos la hace especialmente interesante en la producción de biomasa y compuestos específicos (Safi et al., 2014).

Como lo cita (Céspedes Bernal, 2019), *Chlorella* sp. es una microalga de rápido crecimiento y fácil manejo, lo que la hace adecuada para su cultivo en diversas fuentes bajo las condiciones apropiadas. Debido a estas características, se ha convertido en una de las microalgas más ampliamente utilizada en investigaciones biotecnológicas. La ilustración 7 muestra la morfología de esta microalga.

**Ilustración 7** Morfología *Chlorella* sp



Fuente: (Safi et al., 2014)

***Scenedesmus* sp.**

Es un género de microalgas verdes con características morfológicas particulares que les permiten flotar en la superficie del agua y realizar la fotosíntesis de manera efectiva. Sus pirenoides y cloroplastos desempeñan un papel fundamental en la síntesis de almidón y la captura de luz solar para la producción de energía (Anand , & Arumugam, 2015).

**Tabla 4** Características *Scenedesmus* sp.

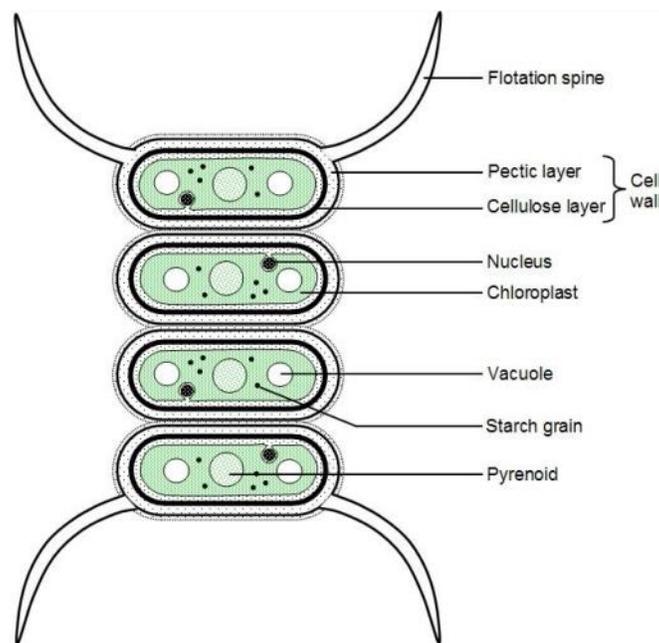
<i>Scenedesmus</i> sp	<p><b>Taxonomía</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reino plantae: eucariota fotosintética</li> <li>• División: Chlorophyta (Algas verdes)</li> <li>• Clase: Chlorophyceae (Clorofitas)</li> <li>• Orden: Sphaeropleales</li> <li>• Familia: Scenedesmaceae</li> <li>• Género: <i>Scenedesmus</i></li> </ul>
	<p><b>Morfología</b></p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microalga de 4 células con 4 prolongaciones como se ve en la ilustración 8.</li> <li>• Diámetro: 10 micrómetros</li> </ul>
--	---

Fuente: (Braidá et al., 2016)

Al igual que otras algas verdes, *Scenedesmus* realiza la fotosíntesis, convirtiendo el dióxido de carbono y la luz solar en compuestos orgánicos y oxígeno. Esto los convierte en importantes contribuyentes a la producción de oxígeno y la absorción de dióxido de carbono en ambientes acuáticos (Anand , & Arumugam, 2015).

**Ilustración 8 Morfología *Scenedesmus* sp.**



Fuente: (Braidá et al., 2016)

La versatilidad de *Scenedesmus* y su papel en diversos procesos ecológicos y biotecnológicos lo convierten en un organismo fascinante para los científicos e investigadores interesados en las algas, la ecología y las tecnologías sostenibles (Braidá et al., 2016).

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Evaluar la viabilidad de eliminar dióxido de carbono del biogás generado en el biodigestor, utilizando biomasa microalgal como biocatalizador.

### **ESPECÍFICOS**

- Diseñar un biodigestor de bajo costo para la degradación eficiente de biomasa microalgal y la producción de biogás.
- Diseñar un fotobiorreactor para maximizar la fotosíntesis y la eficiencia de fijación de dióxido de carbono de las microalgas.
- Acoplar el fotobiorreactor con el biodigestor de manera sinérgica, de tal forma que el dióxido de carbono generado en la digestión anaerobia puede ser canalizado hacia el fotobiorreactor.

## METODOLOGÍA

- **Diseño y construcción del biodigestor**

Para el desarrollo de este proyecto se construyó un fotobiorreactor y un biodigestor. Para lograrlo fue necesario utilizar una variedad de materiales que permitieron su correcto funcionamiento. En la Tabla 5 se detallan los materiales empleados específicamente en el biodigestor.

**Tabla 5 Materiales para la construcción del biodigestor**

Cantidad	Material
1	Tanque de polietileno de alta densidad de 220L
1	Reducción en PVC de 3'' a 1''
1	Codo de tubería sanitaria de 90° x 3''
4	Flanches de ½'' para tanque
3	Llaves de paso de ½''
1	Adaptador hembra en PVC de ½''
	Tubo ventilación 3''
	Tubo en PVC de ½''
1	Sellador Ft 101 marca Sista
<b>Estructura</b>	
2	Ángulos estructurales en acero de 1.50m
2	Soportes en acero
4	Ruedas giratorias industriales

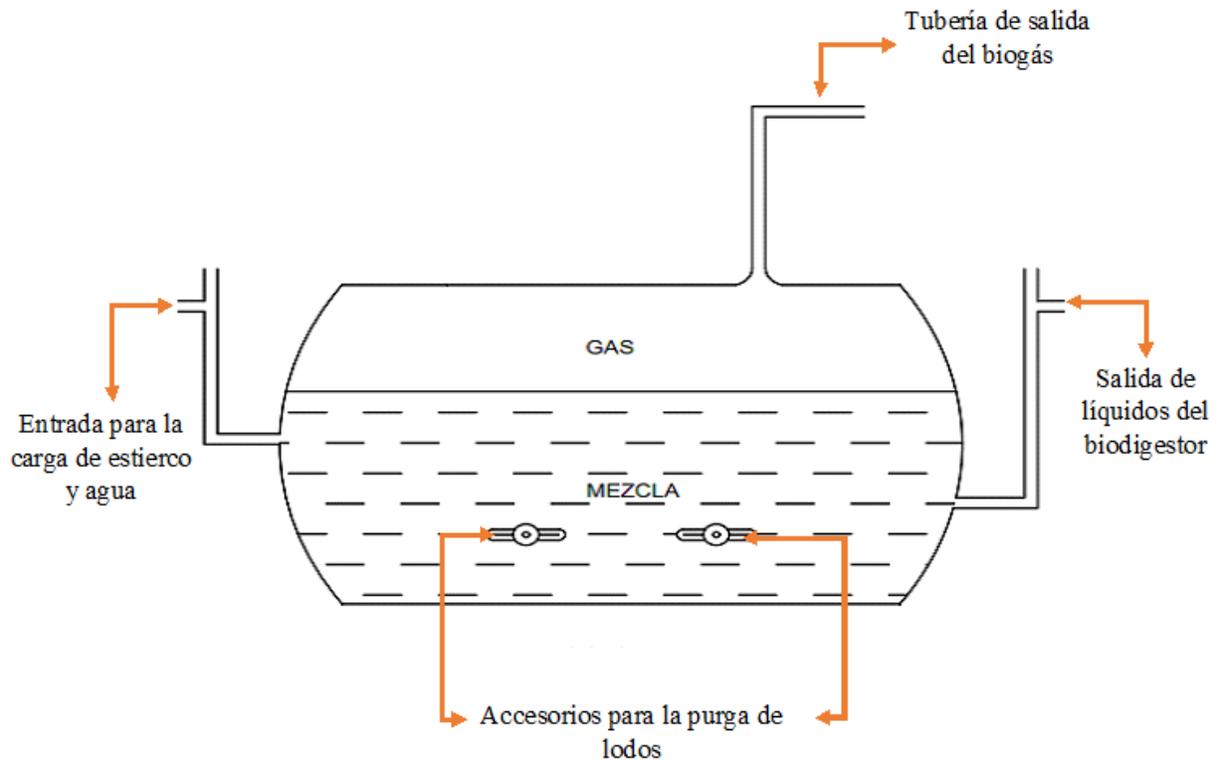
El biodigestor que se utilizó como referencia para la construcción es un modelo tubular de bajo costo que permite una instalación práctica para el desarrollo de este proyecto. Además, se adapta perfectamente al trabajo en laboratorio y a la conexión con el fotobiorreactor. Para la construcción del biodigestor, utilizamos un tanque de 220 litros al cual se le ajustaron los flanches, llaves de paso y tuberías necesarias para su alimentación, toma de muestras y la conexión con el fotobiorreactor. El biodigestor se instaló sobre una estructura metálica con ruedas industriales para poder moverlo sin complicaciones como se muestra en la ilustración 9.

**Ilustración 9 Biodigestor con todas las conexiones**



En la ilustración 10 se muestra el diseño y las partes del biodigestor

Ilustración 10 Partes biodigestor



El biodigestor se estableció como un sistema integral para la producción de biogás a partir de excremento vacuno. El excremento inicial utilizado se encontraba almacenado en el cuarto frío del laboratorio. Se introdujeron muestras en el biodigestor, asegurando una distribución uniforme dentro del tanque. Con las características iniciales listas, se procedió a sellar herméticamente el biodigestor para crear un ambiente anaeróbico propicio para la actividad de los microorganismos. Se proporcionó el equilibrio adecuado de nutrientes para favorecer la digestión anaeróbica.

Durante los primeros días, se monitoreó de cerca el proceso mediante la medición del pH y los sólidos totales. Sin embargo, los resultados obtenidos no mostraron signos de degradación en el medio, ya que el tiempo requerido para la activación del biodigestor es de 70 días. Por lo tanto, el periodo de observación no fue suficiente para que el biodigestor se active y se estabilice.

Dada esta limitación temporal, se destaca la importancia de extender el seguimiento del sistema para evaluar con mayor precisión su desempeño a medida que avanza en su ciclo de operación.

Esta prolongación permitirá obtener datos más representativos sobre la eficacia del biodigestor en términos de degradación del estiércol y generación de biogás.

El biodigestor cuenta con los siguientes parámetros:

**Tabla 6 Parámetros Iniciales Biodigestor**

Parámetro	Valor
Diámetro de la circunferencia	1.78m
Volumen del liquido	186 litros
Tiempo de retención	70 días
Longitud del biodigestor	0.85m

Con los parámetros mencionados previamente, calculamos el diámetro interno de la circunferencia y su radio utilizando la ecuación 1 y 2.

**Ecuación 1**  $r = \frac{C}{2 \times \pi}$

Donde: C= circunferencia del plástico (m)

$$\pi = 3.1416$$

r= radio de la circunferencia (m)

$$r = \frac{1.78m}{2 \times \pi} = 0.28m$$

**Ecuación 2**  $D = 2 \times r$

Donde: D= diámetro de la circunferencia (m)

r= Radio de la circunferencia (m)

$$D = 2 \times 0.28m = 0.57m$$

Calculamos la relación entre la longitud y el diámetro del tanque utilizado en la construcción del biodigestor con los datos previamente calculados mediante la ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3 } \frac{L}{D}$$

Donde: L= longitud del biodigestor (m)

D= diámetro de la circunferencia del plástico (m)

$$\frac{0.85m}{0.57m} = 1.49$$

La relación óptima entre longitud y diámetro es de 7.5, lo que asegura que la entrada y la salida estén adecuadamente separadas (Marti Herrero, 2019).

Siguiendo lo establecido por (Marti Herrero, 2019), cuando la relación longitud-diámetro es menor a 5, el biodigestor adquiere una forma muy compacta, lo que afecta el tiempo de retención previamente establecido. Esto ocurre debido a que el biodigestor se desarrolló en un tanque preexistente, lo que limitó la longitud necesaria para una relación óptima. No obstante, para mejorar la generación de biogás, se introdujeron 20 litros de lodo obtenidos previamente de un biodigestor en funcionamiento, con el objetivo de reducir el tiempo de activación.

Para garantizar el funcionamiento óptimo del biodigestor, es fundamental determinar la carga diaria, ya que está directamente vinculado al volumen del líquido y al tiempo de retención. Para esto es necesario despejar la ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4 } V_L = TR \times CD$$

Donde:  $V_L$ =Volumen del líquido

TR= tiempo de retención en días

CD= carga diaria

$$CD = \frac{V_L}{TR}$$

$$CD = \frac{186 \text{ ltrs}}{70 \text{ días}} = 2.65 \frac{\text{ltrs}}{\text{día}}$$

Para asegurar una carga diaria adecuada, es esencial considerar la relación entre el estiércol y el agua, tal como se detalla en la tabla 7.

**Tabla 7 Relación estiércol: agua**

Estiércol	Relación estiércol: agua
Vaca	1:3
Cerdo	1:4
Llama/oveja/cuy	1:8-9

Fuente: (Marti Herrero, 2019)

Conforme se detalla en la tabla 7, para el estiércol bovino, la relación es de 1:3. Por lo tanto, utilizando la ecuación 5, se determina la cantidad diaria óptima de estiércol y agua que debe contener el biodigestor

**Ecuación 5**  $\frac{CD}{3}$

Donde: CD = Carga diaria

3= relación 1:3 estiércol agua

$$\frac{CD}{3} = \frac{2.65 \frac{\text{ltrs}}{\text{día}}}{3} = 0.88 \frac{\text{ltrs}}{\text{día}}$$

Basándonos en el resultado de la ecuación 5, determinamos que la carga diaria para el biodigestor debe ser de 1.77 litros de agua y 0.88 litros de estiércol. Con la obtención de la carga diaria del biodigestor, se estableció el plan diario para su funcionamiento.

- **Determinación de sólidos totales**

Para llevar a cabo el análisis de sólidos, se realizaron muestras de microalgas ya incubadas, así como de la materia orgánica utilizada en el proceso del biodigestor. Estas muestras, tras un periodo de incubación de aproximadamente 4 semanas, se sometieron a un proceso de extracción y cuantificación parcial. Se tomó un gramo de cada muestra, procediendo luego al pesaje individual.

Posteriormente, se transfirieron a tubos de centrifugación, con la adición de una cantidad equivalente de agua destilada, garantizando así una adecuada dispersión de las muestras.

En esta fase, se prepararon tres conjuntos de muestras para la materia orgánica y otros tres para las microalgas. Estos tubos de centrifugación se introdujeron en el equipo de centrifugación, donde se aplicó una fuerza centrífuga de 4500 RPM por 20 minutos para lograr la separación de los componentes sólidos y líquidos presentes en las muestras. Esta técnica permitió acelerar la decantación de las partículas sólidas.

Tras la centrifugación, las muestras resultantes se trasladaron a crisoles, donde se colocaron cinco muestras de microalgas y tres muestras de materia orgánica. Los crisoles se sometieron a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 105°C durante una hora. En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 8 Determinación de sólidos totales en excremento y microalgas**

Determinación sólidos totales			
No. de capsula	Masa cápsula vacía (gr)	Masa cápsula después de evaporación a 105°C (gr)	Resultado (gr)
Excremento vacuno			
3	53.4979	53.5674	1.544
6	50.9280	51.0275	2.211
9	54.5711	54.6181	1.044
Microalgas			
4	30.8855	30.9323	1.04
7	32.5665	32.6137	1.048
10	29.9482	29.9962	1.066

- **Diseño y construcción de Fotobiorreactor**

El fotobiorreactor utilizado como referencia es el modelo *airlift*, cuyo diseño permitió la adaptación de una bolsa para almacenar el biogás generado en el biodigestor (*headspace*).

### Volumen total fotobiorreactor

Para el cálculo del volumen efectivo de fotobiorreactor usamos la ecuación 6 teniendo en cuenta los datos de la tabla 9.

**Tabla 9** Parámetros fotobiorreactor

Parámetro	Valor (cm)
Altura <i>airlift</i>	120
Diámetro	19.73
Radio	9.86

**Ecuación 6**  $V = \pi \times r^2 \times h$

Donde: V = Volumen

r = Radio

h = altura

$$V = \pi \times (9.86\text{cm})^2 \times 120\text{cm} = 36707\text{cm}^3 \approx 37L$$

El volumen del fotobiorreactor tipo *airlift* es de 37 litros.

Considerando que la altura total del sistema es de 2 metros y la altura del *airlift* es de 1.20 metros, podemos deducir que la altura del *headspace* es de 0.8 metros. Utilizando este dato y aplicando la ecuación 6, hemos obtenido el volumen efectivo del *headspace*, como se muestra a continuación:

$$V = \pi \times (9.86\text{cm})^2 \times 80\text{cm} = 24434\text{cm}^3 \approx 24L$$

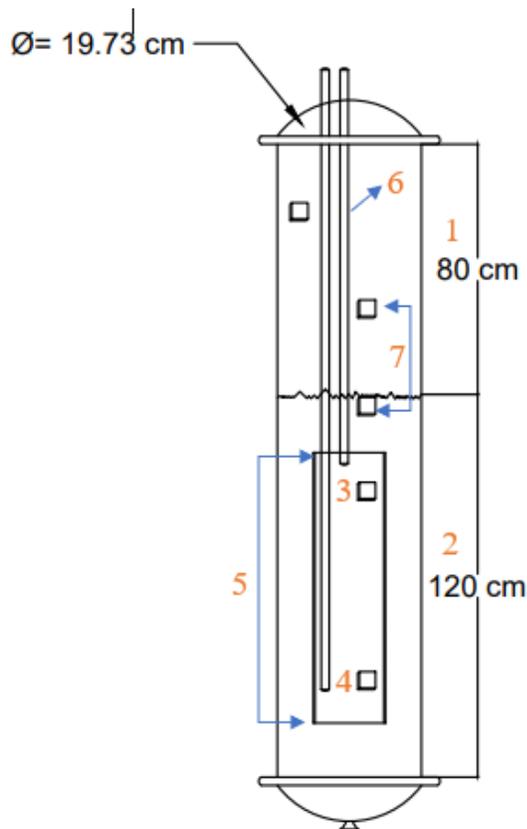
Con estos datos, determinamos que el sistema tiene un volumen efectivo de trabajo de 61 litros, distribuido en 37 litros para el *airlift* y 24 litros para el *headspace*. Con estos resultados, iniciamos la construcción del prototipo, empleando diversos materiales, los cuales se detallan en la tabla 10.

**Tabla 10 materiales para la construcción del fotobiorreactor**

Cantidad	Equipo	Descripción
1	Tanque crecimiento de microalgas	PVC transparente 1.20 m de alto 62 cm de diámetro
1	Tanque de almacenamiento de biogás	PVC negro 1 m de alto 62 cm de diámetro
2	Bomba de aire para acuario	Bomba con dos entradas
1	Piedra difusora	
1	Manguera para acuario	15 metros de largo 8 mm de diámetro
1	Malla electrosoldada	2 * 2 metros Diámetro 4mm
4	Flanches	PVC ½"
3	Adaptadores de doble rocas	PVC ½"
1	Adaptador	PVC ½"
1	Una llave de paso para gas	½"
3	Acople para manguera de presión	De ½" a 6mm
1	Tubo de manguera de aire	5 metros
1	Cable dúplex	10 metros
1	Tubo de ventilación	PVC de 2"
4	Lámparas fluorescentes	1.20 m Led transparente

La ilustración 11 presenta las partes y el diseño detallado del fotobiorreactor.

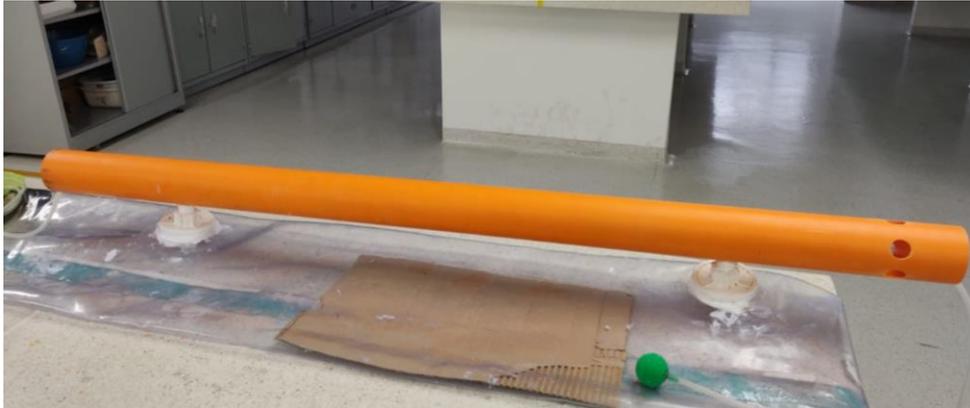
Ilustración 11 Partes Fotobiorreactor



Número	Descripción
1	Headspace
2	Airlift
3	Llave de paso para toma de muestras
4	Llave de paso para toma de muestras
5	Tubo de aspiración descendente
6	Manguera siliconada para oxigenación
7	Conexión del sistema de agitación

Para iniciar el proceso de ensamblaje del fotobiorreactor, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

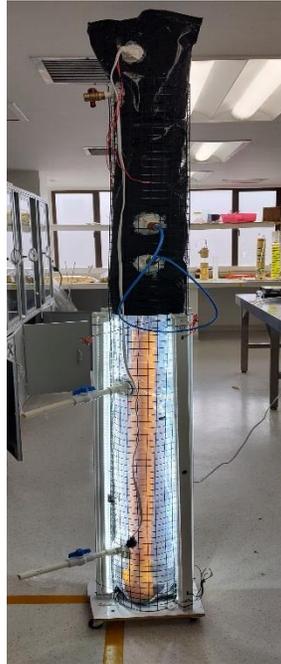
- Se unieron los flanches, las llaves de paso y el tubo de aireación. En la membrana de PVC negra, se crearon dos bolsillos diseñados para alojar y proteger las dos bombas necesarias.
- A continuación, se instaló el tubo de ventilación, con las mangueras de acuario conectadas adecuadamente a las bombas y a la piedra difusora, como se observa en la ilustración 12.

**Ilustración 12** Ensamble de tubo de ventilación

Se procedió a pegar herméticamente la membrana de PVC con calor, y se diseñó un sistema de cierre en los extremos para asegurar que el sistema fuera completamente hermético, tal como se muestra en la ilustración 13.

**Ilustración 13** Cierre hermético del sistema

Se realizó una revisión para detectar posibles fugas en el sistema y finalmente se instaló la malla electrosoldada para proteger el sistema como se muestra en la ilustración 14.

**Ilustración 14 Sistema listo para inocular**

- **Inoculación**

Para la inoculación del sistema, se tomó una muestra de microalgas de un fotobiorreactor del laboratorio. Se midió la densidad de estas microalgas y se inoculo con una Absorbancia de 0.108 y, con ese dato, se determinó la cantidad necesaria de agua, orina y microalgas para la inoculación del sistema. Los detalles específicos de las cantidades añadidas de cada componente se detallan en la tabla 11.

**Tabla 11 Parámetros de Inoculación**

Componente	Cantidad	Unidad de medida
Agua	36	Litros
Microalgas	1	Litro
Orina	128	ml

Para realizar un monitoreo preciso del desarrollo de las microalgas en el fotobiorreactor, se llevaron a cabo mediciones diarias de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), pH y conductividad utilizando el medidor de nutrientes del laboratorio. Esto se hizo con el propósito de supervisar las condiciones óptimas dentro del fotobiorreactor. Además, se efectuó un seguimiento comparativo del crecimiento y consumo de microalgas en dos entornos distintos del fotobiorreactor de laboratorio, los cuales se diferenciaban por su tamaño, nivel de agitación y temperatura.

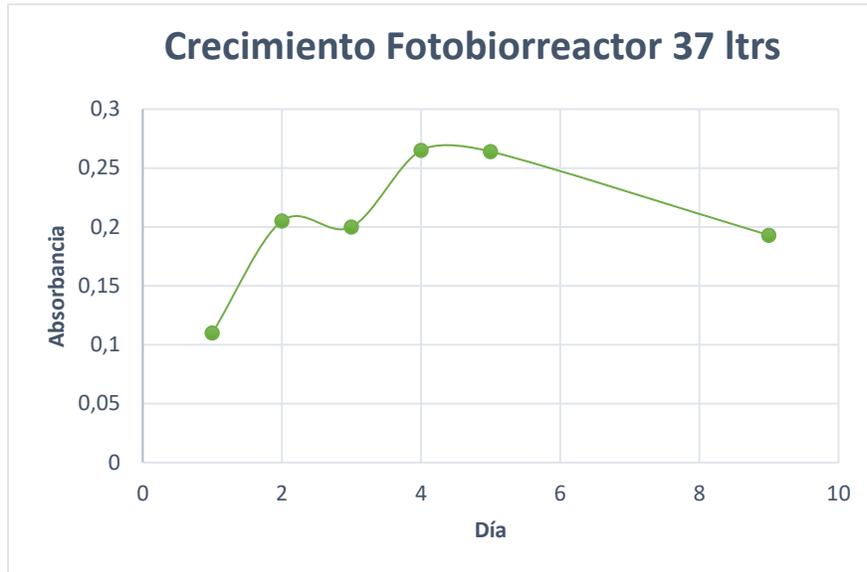
### RESULTADOS Y ANALISIS

En la Tabla 12 se presenta la evolución del crecimiento de las microalgas en el fotobiorreactor de 37 litros. Se obtuvo un crecimiento bajo pero constante. Al tercer día, se realizó una inoculación con 300 ml de orina para garantizar el suministro de nutrientes esenciales para las microalgas. A partir de las mediciones realizadas, pudimos concluir que el crecimiento no cumplía con las expectativas previas. La temperatura en el sistema no se encontraba dentro del rango adecuado para el óptimo desarrollo de las microalgas. Según (Hernández-Pérez & Labbé, 2014) la temperatura ideal debe oscilar entre  $28^\circ\text{C}$  y  $35^\circ\text{C}$ . Sin embargo, el fotobiorreactor mantenía una temperatura promedio de  $22.5^\circ\text{C}$ . A pesar de esto, sí se detectó un crecimiento, aunque no tan rápido como se esperaba. Es importante destacar que la temperatura juega un papel fundamental en la fotosíntesis y la actividad metabólica de las microalgas (Abalde et al., 1995).

**Tabla 12 Mediciones diarias Fotobiorreactor de 37 litros**

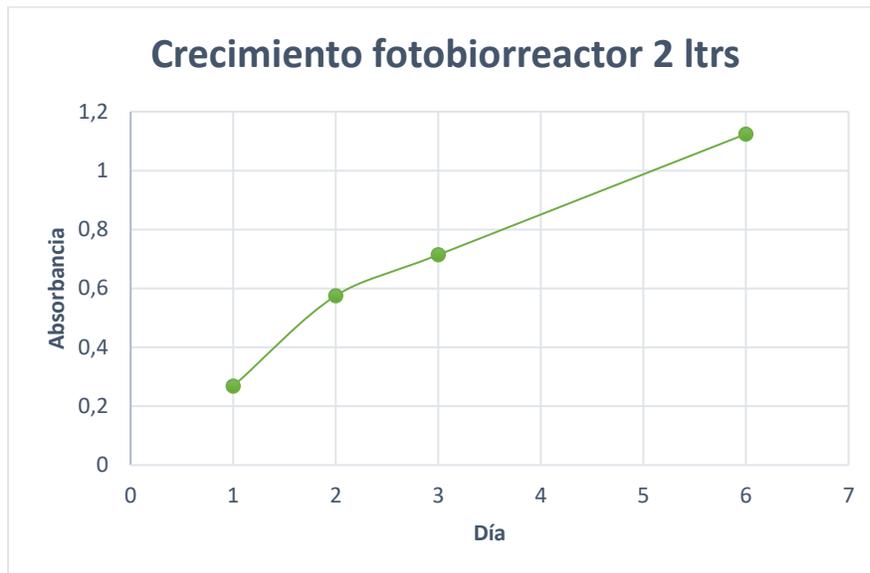
Absorbancia fotobiorreactor 37 litros				
Fecha	Día	Absorbancia	Temperatura $^\circ\text{C}$	Observaciones
20/10/2023	1	0,11	22,3	
24/10/2023	2	0,205	22,6	
25/10/2023	3	0,2	22,4	Se inoculo con 300ml de orina
26/10/2023	4	0,265	22,8	
27/10/2023	5	0,264	22,4	
30/10/2023	9	0,193	22,5	

**Ilustración 15 Gráfico del crecimiento de las microalgas**



**Tabla 13 Mediciones diarias Fotobiorreactor de 2 litros**

Absorbancia fotobiorreactor 2 litros				
Fecha	Día	Absorbancia	Temperatura °C	Observaciones
25/10/2023	1	0,268	27	Se inoculó con 15 ml de orina
26/10/2023	2	0,575	27,1	
27/10/2023	3	0,714	27,6	
30/10/2023	6	1,124	23,8	

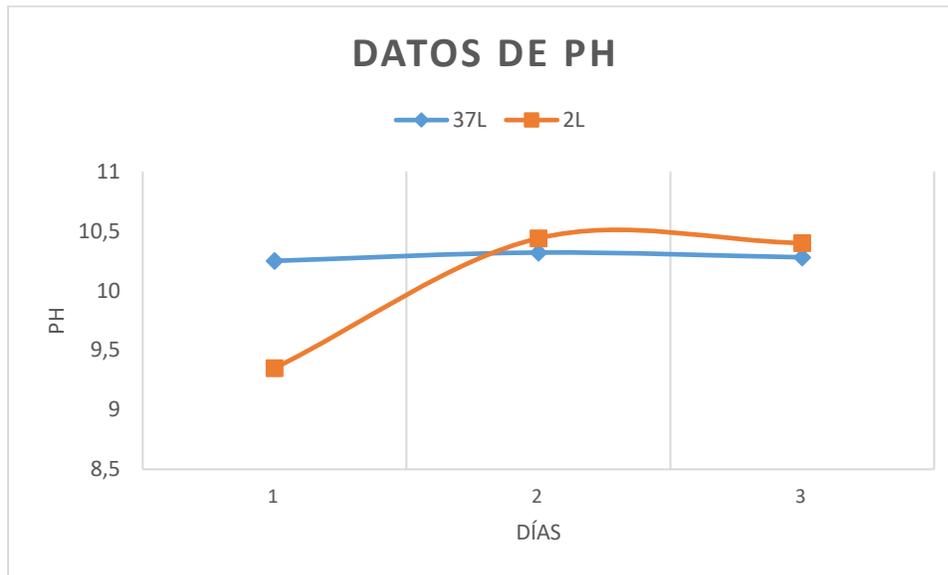
**Ilustración 16 Gráfico del crecimiento de las microalgas**

Al analizar los datos presentados en la Tabla 12, se observa el crecimiento de las microalgas en el fotobiorreactor de 2 litros, que fue inoculado bajo las mismas condiciones que el fotobiorreactor de 37 litros, el gráfico 15 y 16 muestra el comportamiento de los fotobiorreactores. En el caso del fotobiorreactor de 2L, se destaca un crecimiento mayor y constante. Esto se debe, en parte, a que las condiciones en un sistema de este tamaño son más fáciles de mantener. Por ejemplo, la temperatura se mantiene más alta que en el fotobiorreactor de 37 litros, con un promedio de 27°C, lo que asegura un crecimiento constante. Además, la agitación en este sistema es mucho más efectiva, ya que permite una distribución uniforme de los componentes del medio y previene la sedimentación de las microalgas (Núñez & Saboyá, 2020). Esta agitación garantiza que los nutrientes, el dióxido de carbono y otros componentes del medio de cultivo estén bien distribuidos en todo el volumen del reactor, lo que resulta fundamental para lograr un crecimiento uniforme de las microalgas (Arribas Jimeno, 2020).

Las Tablas 14 y 15 presentan el comportamiento de los nutrientes en los dos fotobiorreactores. El fotobiorreactor de 2 litros, al ser tratado con orina, introduce ácidos y bases naturales presentes en este líquido. Estos compuestos pueden influir en el equilibrio químico del agua y el pH. En el caso del fotobiorreactor de 2 litros, se observa un cambio significativo en el pH, que pasa de 9.35 a

10.44 después de la incubación con orina como se observa en la ilustración 17. Esto indica que la orina tuvo un impacto considerable en el equilibrio ácido-base del agua en este fotobiorreactor.

**Ilustración 17 Gráfico datos de pH para el fotobiorreactor de 2L y 37L.**



Cuando los organismos fotosintéticos, como las microalgas, consumen dióxido de carbono ( $CO_2$ ) durante la fotosíntesis, pueden contribuir a un aumento del pH en el sistema, esto sugiere la formación de carbonatos. La reacción de consumo de  $CO_2$  también contribuye a la generación de carbonatos, lo que a su vez provoca un aumento en el pH (Abalde et al., 1995). Este fenómeno es evidente en el fotobiorreactor 2, donde se observa claramente el impacto de estas condiciones en el comportamiento del sistema.

En lo que respecta a la temperatura, es fundamental considerar que las reacciones químicas ocurren a diferentes velocidades a diferentes temperaturas. Un aumento en la temperatura puede acelerar estas reacciones químicas, lo que podría influir en cómo la orina afecta el pH. Esto puede ser un factor adicional que contribuye a la variación observada.

En un fotobiorreactor, el aumento del pH puede estar relacionado con varias reacciones químicas asociadas con el metabolismo microalgal, especialmente durante la fotosíntesis ya que en este proceso se consume  $CO_2$  y se libera oxígeno. La absorción de  $CO_2$  reduce la concentración de iones hidrógeno en el medio, lo que puede aumentar el pH. En cuanto al equilibrio ácido-base

puede contribuir a la liberación de iones hidroxilo y carbonato, elevando así el pH. (Boffill-Rodríguez et al., 2012; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

**Tabla 14 Medición de nutrientes en el fotobiorreactor de 37 litros**

Nutrientes fotobiorreactor 37 litros						
Día	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$k^+$	$NO_3^-$	pH	COND
1	30	60	24	25		
2	30	59	23	22	10,25	609
3	31	63	24	20	10,32	599
6	30	63	26	17	10,28	596

**Tabla 15 Medición de nutrientes en el fotobiorreactor de 2 litros**

Nutrientes fotobiorreactor 2 litros						
Día	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$k^+$	$NO_3^-$	pH	COND
1	33	46	12	13		
2	34	46	10	11	9,35	400
3	31	43	11	11	10,44	399
6	36	45	10	11	9,72	401

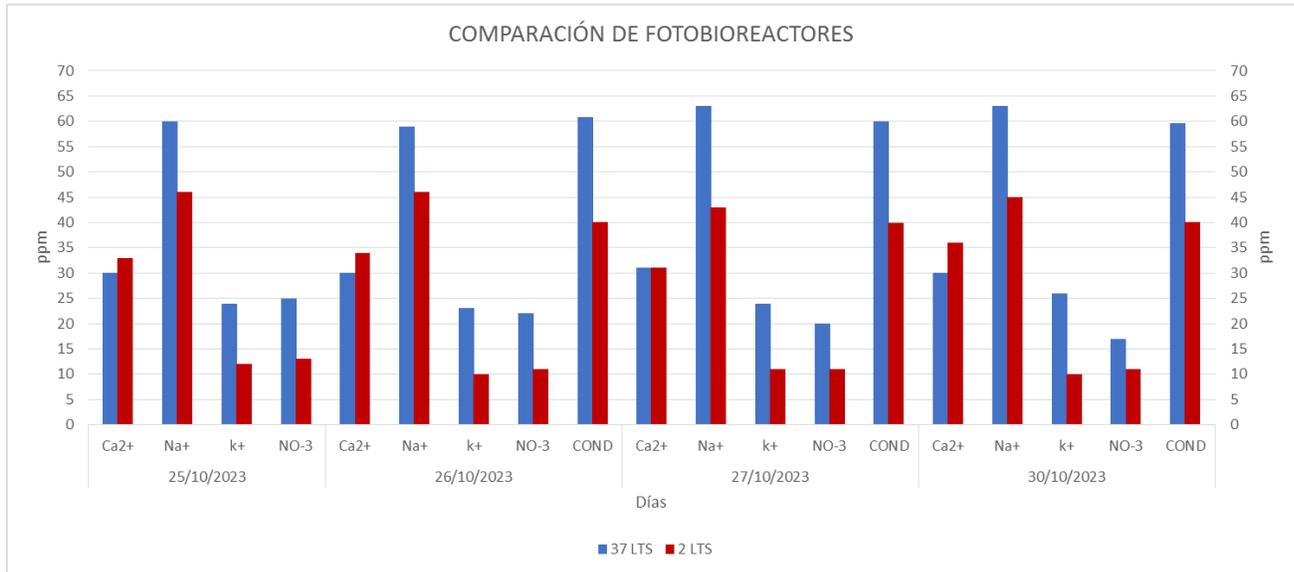
Al observar el comportamiento de los nutrientes en la ilustración 18, es evidente que los niveles de nutrientes en los dos fotobiorreactores experimentan cambios en proporciones similares. Esto sugiere que la composición del medio de cultivo y la forma en que los nutrientes son utilizados por las microalgas son consistentes en ambos sistemas. Sin embargo, es importante destacar que el crecimiento de las microalgas en el fotobiorreactor de 2 litros es notablemente superior al del fotobiorreactor de mayor capacidad.

Este aumento en el crecimiento se puede atribuir principalmente a la temperatura en el fotobiorreactor de 2 litros. La temperatura es un factor crítico en el cultivo de microorganismos fotosintéticos, ya que afecta directamente la tasa de fotosíntesis y el metabolismo de las microalgas (Park et al., 2011). En el caso del fotobiorreactor de 2 litros, la temperatura se mantiene a un nivel óptimo que favorece el proceso de crecimiento, lo que resulta en un mayor rendimiento.

Aunque los niveles de nutrientes cambian en proporciones similares en ambos fotobiorreactores, el crecimiento más significativo en el fotobiorreactor de 2 litros se atribuye principalmente a la

temperatura más favorable que promueve un proceso de crecimiento más eficiente para las microalgas en ese entorno (Arribas Jimeno, 2020).

**Ilustración 18 Grafico del comportamiento de los nutrientes en los dos fotobiorreactores.**



**CONCLUSIONES**

Este proyecto abarcó la construcción y operación de un biodigestor y un fotobiorreactor con el objetivo de generar biogás y biomasa a partir de fuentes renovables, tales como el estiércol bovino y las microalgas. El biodigestor se diseñó como un sistema integral destinado a la producción de biogás mediante el aprovechamiento del estiércol de vaca.

A pesar de esto, pudimos observar un crecimiento en el fotobiorreactor. Esto nos permitió prepararlo para la conexión y funcionamiento en sinergia con el biodigestor, con el objetivo de que las microalgas capturen el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) presente el proceso del biodigestor.

Aunque experimentamos retrasos en la producción de biogás, logramos avanzar de manera significativa en la activación del fotobiorreactor, lo que nos posiciona favorablemente para futuros avances en la integración de ambos sistemas. El fotobiorreactor, de menor volumen, demostró un crecimiento significativamente mayor y constante de las microalgas en comparación con el fotobiorreactor de mayor capacidad. Esto se debió en parte a las condiciones más fáciles de mantener en un sistema más pequeño, con una temperatura óptima y una agitación más efectiva.

El análisis de los nutrientes en ambos fotobiorreactores reveló cambios proporcionales en los niveles de nutrientes, lo que sugiere una consistencia en la composición del medio de cultivo y la forma en que los nutrientes son utilizados por las microalgas en ambos sistemas.

Este estudio demostró la importancia de considerar factores como la temperatura y la agitación en el diseño y operación de sistemas biotecnológicos para la producción de biogás y biomasa a partir de recursos renovables.

**REFERENCIAS**

Abalde, J., Cid, Á., Fidalgo Paredes, P., Torres, E., & Herrero, C. (1995). *Microalgas: Cultivo y aplicaciones*.

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/25013>

Alvares, J. R., Martinez, M. A., & Martinez, A. (2014). *VOLVER AL FUTURO: BIOENERGÍA,*

*BIOCOMBUSTIBLES Y BIOTECNOLOGÍA*. 15.

[https://www.ru.tic.unam.mx/bitstream/handle/123456789/2242/art60\\_2014.pdf?sequence=1](https://www.ru.tic.unam.mx/bitstream/handle/123456789/2242/art60_2014.pdf?sequence=1)

&isAllowed=y

Anand, J., & Arumugam, M. (2015). *Enhanced lipid accumulation and biomass yield of Scenedesmus*

*quadricauda under nitrogen starved condition. Bioresource Technology*.

[https://cronodon.com/BioTech/Algal\\_Bodies.html](https://cronodon.com/BioTech/Algal_Bodies.html)

Arbeláez, C. G., Cabal, L. F. L., Carrasco, J. N., López, G. V., Higgins, M. L., Escobar, E. M., Castaño, R. S.,

Gómez, R. L., Rey, X. B., & Arjona, P. G. (2016). *EL ACUERDO DE PARÍS ASÍ ACTUARÁ COLOMBIA*

*FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO*.

[https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia\\_hacia\\_la\\_COP21/el](https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el)

[\\_acuerdo\\_de\\_paris\\_frente\\_a\\_cambio\\_climatico.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf)

Arribas Jimeno, A. (2020). *Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de*

*biocombustibles de origen microalgal*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/44886>

Arrieta-Palacios, W. (2016). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DOMÉSTICO PARA EL APROVECHAMIENTO*

*ENERGÉTICO DEL ESTIÉRCOL DE GANADO* [Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica,

Universidad de Piura].

[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME\\_200.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME_200.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

d=y

Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2018).

Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el

Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 159.

<https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>

Ayala Montaña, S. (2015). *Clasificación taxonómica de microalgas presentes en un consorcio*

*microbiológico que biorremedia el efluente de una planta de sacrificio de bovinos y porcinos.*

[https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/04f0783a-d22c-44a0-b247-](https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/04f0783a-d22c-44a0-b247-032666d10079)

[032666d10079](https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/04f0783a-d22c-44a0-b247-032666d10079)

Ballesteros, H. O. B., & Aristizabal, G. E. L. (2007). *Gases de efecto invernadero y el cambio climático.*

Barrera, J. E. C., & Casallas, E. F. V. (2022). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DE GAS PRODUCIDO POR EL*

*ESTIÉRCOL DE LOS CERDOS EN LA VEREDA JURACAMBITA DEL MUNICIPIO DE ZETAQUIRA.*

Becerra, C. A. R. (2017). *LOS BIODIGESTORES: FUENTE DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y CALIDAD DE VIDA*

*EN COMUNIDADES RURALES DE COLOMBIA.*

[https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/787/PROYECTO%20DE%20GRADO%20](https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/787/PROYECTO%20DE%20GRADO%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/787/PROYECTO%20DE%20GRADO%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Beteta Herrera, T. del C., & González Sovalbarro, J. A. (2005). *Construcción y uso de biodigestores*

*tubulares plásticos.* Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/2412/>

Boffill-Rodríguez, Y., García-Rodríguez, A., & Castellanos-Estupiñán, J. (2012). Estimación cuantitativa

preliminar de índices de producción de biomasa microalgal a partir de la reacción de

fotosíntesis. *Tecnología Química*, 32(1), 31-41.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2224-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

[61852012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852012000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Braida, V., Campot, M. P., & Tartaglia, C. (2016). *Diseño de procesos para la obtención de*

*biocombustibles a partir de microalgas.* 103.

<https://dspace.ort.edu.uy/bitstream/handle/20.500.11968/3728/Material%20completo.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>

Calderón Gamboa, J. A. (2022). *Propuesta para implementar estrategias de obtención de energía a partir de residuos sólidos en Colombia* [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8950>

Cárdenas, A. E. A., & Cañate, K. M. Y. (2018). *Fracking: Extracción de gas y petróleo no convencional, y su impacto ambiental*. [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/Fracking-Extracci%C3%B3n-gas\\_Arnedo\\_2015.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/Fracking-Extracci%C3%B3n-gas_Arnedo_2015.pdf)

Catapan, C., Anderson. (2023). *USE OF SWINE WASTE IN THE PRODUCTION OF ELECTRIC ENERGY FROM THE EFFICIENT USE OF BIODIGESTORS: THE BRAZILIAN CASE*. Scopus. <https://www-scopus-com.ezproxy.uan.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85152737794&origin=inward&txGid=83a31b79003d3dc7227b04467b989fc7>

Céspedes Bernal, D. N. (2019). *TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS EMPLEANDO A *Chlorella sp.* Y CONVERSIÓN DE LA BIOMASA MICROBIANA POR PIRÓLISIS LENTA* [Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/43200/Tesis%20repositorio.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014—Gestor Normativo—Función Pública*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Congreso de Colombia. (2017). *Decreto 1543 de 2017—Gestor Normativo—Función Pública*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=83537>

Congreso de Colombia. (2020). *Ley 2036 de 2020—Gestor Normativo—Función Pública*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=137050>

Congreso de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021—Gestor Normativo—Función Pública*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

Corona Zuñiga, I. (2007). *Biodigestores* [Monografía, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].

<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/362/1/Biodigestores.pdf>

Cruz, J. C., Cardona, J. C., & Hernández, D. (2013). *Aplicación electrónica para el ahorro de energía eléctrica utilizando una energía alternativa*.

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1900-38032013000200017](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032013000200017)

DANE. (2023). *DANE - Exportaciones*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/exportaciones>

de-Lucas, A., Taranco, C., Rodríguez-García, E., & Paniagua, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*.

DNP. (2023, marzo 31). *DNP recibe estudio de Naturgas sobre acceso a gas natural en los hogares del país*. Departamento nacional de Planeación - DNP.

[https://www.dnp.gov.co:443/Prensa\\_/Noticias/Paginas/dnp-recibe-estudio-de-naturgas-sobre-acceso-a-gas-natural-en-los-hogares-del-pais.aspx](https://www.dnp.gov.co:443/Prensa_/Noticias/Paginas/dnp-recibe-estudio-de-naturgas-sobre-acceso-a-gas-natural-en-los-hogares-del-pais.aspx)

Fernández, D., & Hernández, G. (2016). *Evaluation of the incidences of salinity and pH on the biomass, productivity and lipids accumulation in cultures of chlorella vulgaris in a flat plate*

*photobioreactor*. <http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/view/1381>

Fernandez Sevilla, J. M. (2014). *Fotobiorreactores para el cultivo masivo de microalgas*.

<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-7-fotobiorreactores.html>

Gonzalez, A. (2015). ¿Qué Son Las Microalgas? *Fundación Cajamar*.

<https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>

González, P. L. (2016). *Diseño de un fotobiorreactor tubular para la producción de Chlorella vulgaris*

[Trabajo de grado Master en ingeniería química, UPC Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB)].

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/96547/PaulaLopez\\_TFM\\_FBR\\_CHORELLA.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/96547/PaulaLopez_TFM_FBR_CHORELLA.pdf)

González, S. M. P. (2018). *DISEÑO DE FOTOBIORREACTOR PARA CULTIVO MICROALGAL BASADO EN LÓGICAS MATEMÁTICAS Y PRINCIPIOS DE MOVIMIENTO Y FORMA*.

Guillen, R., & Rivas, O. (2011). *Producción de metano a partir de desechos orgánicos generados en el Tecnológico de Costa Rica*.

Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>

Herrero, J. M. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Jaime Marti Herrero.

International Energy Agency. (2023, julio 11). *IEA, Global biofuel demand in transport in the Net Zero Scenario, 2016-2030*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-biofuel-demand-in-transport-in-the-net-zero-scenario-2016-2030-2>

*Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Colombia*. (2015).

<https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/>

Jean Prandini, Busi, M., Mezzari, M., Pirolli, M., Michelon, W., & Soares, H. (2016). Enhancement of nutrient removal from swine wastewater digestate coupled to biogas purification by microalgae *Scenedesmus* spp. *Bioresource Technology*, 202, 67-75.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.082>

- Khan, S. A., Rashmi, Hussain, M. Z., Prasad, S., & Banerjee, U. C. (2009). Prospects of biodiesel production from microalgae in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2361-2372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.04.005>
- Kim, D.-Y., Vijayan, D., Praveenkumar, R., Han, J.-I., Lee, K., Park, J.-Y., Chang, W.-S., Lee, J.-S., & Oh, Y.-K. (2016). Cell-wall disruption and lipid/astaxanthin extraction from microalgae: *Chlorella* and *Haematococcus*. *Bioresource Technology*, 199, 300-310. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.107>
- Krienitz, L., Huss, V. A. R., & Bock, C. (2015). *Chlorella*: 125 years of the green survivalist. *Trends in Plant Science*, 20(2), 67-69. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.11.005>
- Leite, M. S., Lima Silva, S. L. D., Lucas Fernandes, T. C. R., Silva, S. K. D., & Araújo, A. C. B. D. (2023). OPTIMIZATION OF DOMESTIC AND INDUSTRIAL BIODIGESTORS BASED ON MACHINE LEARNING TECHNIQUES. *Revista de Gestao Social e Ambiental*, 17(10). Scopus. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n10-041>
- Lora Grando, R., de Souza Antune, A. M., da Fonseca, F. V., Sánchez, A., Barrena, R., & Font, X. (2017). Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.079>
- Mafu, L. D. (2018). *Chemical and structural changes of biomass during pyrolysis and the influence on gasification reactivity in coal-biomass blends* [Thesis, North-West University]. <https://repository.nwu.ac.za/handle/10394/31596>
- Marin, J., & Gonzalez, E. (2011). *El futuro de los combustibles fósiles*. 14. <https://canal.uned.es/uploads/materials/resources/pdf/4/1/1319025174814.pdf>

Marti Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. (Redbiolac.).

<https://drive.google.com/file/d/1kzOJex0KutKevrYoJh1XitavGm->

[FGDLt/view?usp=embed\\_facebook](FGDLt/view?usp=embed_facebook)

Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones

Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Global Environment Facility. (2011). *Manual de*

*Biogás* (M. T. Varnero Moreno, Ed.). <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (2020). *PEN 2020-2050*. Looker Studio.

<http://lookerstudio.google.com/reporting/94e583ab-703c-4b48-853c->

<daad13312473/page/iX4iB?feature=opengraph>

Nogueira, R. G. S., Perna, F., Jr, Tseu, R. J., & Rodrigues, P. H. M. (2023). Dietary effects of cottonseed

and vitamin E on greenhouse gas emissions from cattle feces analyzed in biodigesters. *Pesquisa*

*Agropecuaria Brasileira*, 58. Scopus. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03037>

Nogues, F. S., & Royo Herrer, J. (2002). *CICLO ENERGÍAS RENOVABLES JORNADAS DE BIOMASA*

*GENERALIDADES*. - PDF Free Download. <https://docplayer.es/12647124-Ciclo-energias->

<renovables-jornadas-de-biomasa-generalidades.html>

Núñez, J. L. D., & Saboyá, H. L. M. (2020). Evaluación de la influencia de la agitación para la producción

de biomasa microalgal en un fotobiorreactor panel plano a escala laboratorio. *Revista Mutis*,

10(1), 46-56. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/193/1932199004/html/>

Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for

biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35-42.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>

Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: Mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de

aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5746937>

PIGCCME & OAAS. (2020). *Plan integral de gestión del cambio climático—Conceptos básicos sobre el cambio climático.*

[https://www.minenergia.gov.co/documents/5960/ABC\\_PLAN\\_DE\\_CAMBIO\\_CLIMATICO\\_SECTOR\\_MINERO\\_ENERGETICO\\_2.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/5960/ABC_PLAN_DE_CAMBIO_CLIMATICO_SECTOR_MINERO_ENERGETICO_2.pdf)

Rincon, J. A. (2020). *Estrategias para optimizar la producción de hidrógeno y metano a partir de biomasa microalgal* [INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.].

<https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/5444/TEST-DCARinconPerezEstrategiasParaOptimizar.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Rivas Solano, O., Faith Vargas, M., & Guillén Watson, R. (2009). *Biodigestores: Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad | Revista Tecnología en Marcha.*

[https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/132](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/132)

Rodriguez, Y. F. C., & Muñoz, N. C. (2022). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UN FOTOBIOREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.*

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9046/1/6162982-2022-2-IQ.pdf>

ROSALES, C. E. P. (2014). *Estudio de codigestión de residuos orgánicos agroindustriales para la producción y uso de biogas.* [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica].

<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/331/1/Estudio%20de%20codigesti%C3%B3n%20de%20residuos%20org%C3%A1nicos%20agroindustriales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20y%20uso%20de%20bi%C3%B3gas.pdf>

Ruiz Domínguez, M. del C. (2013). *Evaluación del enriquecimiento en lípidos de valor energético en microalgas.* <https://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/8091>

Ruiz-Reyes, J. (2015). *ESTUDIO DE FOTOBIOREACTOR DE MICROALGA: SISTEMA DE MONITOREO Y SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL.*

[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2733/IME\\_190.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Un%20fotobiorreactor%20es%20una%20unidad,13%5D%2C%20%5B14%5D](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2733/IME_190.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Un%20fotobiorreactor%20es%20una%20unidad,13%5D%2C%20%5B14%5D).

Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.-Y., & Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>

Salto, L. V. del, Mendoza, F. V., Rea, A. N., & Cepeda, E. R. (2023). Implementación de biodigestores tubulares anaeróbico, como herramienta de auto sustentabilidad para la producción de biogás y biol en el cantón Guaranda, provincia Bolívar, Ecuador. *Tesla Revista Científica*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i1.e98>

Sánchez, Á. H., Sánchez, J. L. G., Úbeda, J. C. M., & Torrico, A. B. (2022). Control robusto del pH en un fotobiorreactor raceway. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 19(3), Article 3. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16731>

Sanz, Á. G. (2015). TFG. LIMPIEZA DE BIOGÁS EN FOTOBIORREACTORES DE MICROALGAS Y BACTERIAS.

Serrano, S. J. A. (2010). *Panel Tratamiento de Desechos*.

Universidad ESAN. (2019). *El gas natural y su impacto ambiental en la actualidad | Conexión ESAN*. <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/el-gas-natural-y-su-impacto-ambiental-en-la-actualidad>

US EPA, O. (2021, marzo 26). *Emisiones de dióxido de carbono* [Data and Tools].

<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

Villegas, C. A. (2020). *Revisión de la eficiencia de biodigestores para la producción de biogás con excremento vacuno*. 20.

[https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3283/Ruth\\_Trabajo\\_Bachillerato\\_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3283/Ruth_Trabajo_Bachillerato_2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y)