



**Factibilidad técnica para producir biogás a partir de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la palma aceitera (POME).**

**Didier Harley Angarita Martínez**

21231712090

**Esteban Rivera Rivera**

21231715990

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Duitama, Colombia

2021

**Factibilidad técnica para producir biogás a partir de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la palma aceitera (POME).**

**Didier Harley Angarita Martínez**

**Esteban Rivera Rivera**

Proyecto de grado “monografía” presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Ambiental.**

Director (a):

Ingeniera, Jessica Lorena Cifuentes López

Línea de Investigación:

Ingeniería de Bioprocesos.

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Duitama, Colombia

2021

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

Duitama, 8 de Noviembre de 2021.

**Dedicatoria,**

*La realización de este proyecto está dedicada a Dios, a nuestros padres y a nuestra directora ya que fueron pilares importantes en nuestra vida, sin ellos no hubiera sido posible la ejecución del mismo.*

*Es para nosotros de gran satisfacción el poder dedicar a ellos uno de nuestros logros cumplidos con mucho amor, esfuerzo y con constancia día a día*

## **AGRADECIMIENTOS**

El agradecimiento de nuestro proyecto va dirigido a los docentes de la Universidad Antonio Nariño, que sin los conocimientos y metodologías de enseñanza no hubiera sido posible su desarrollo. Para nuestros padres que nos motivaron en cada una de las circunstancias que se presentaban a lo largo de la carrera, apoyándonos para que pudiéramos culminar de la mejor manera.

De antemano, a nuestra directora del proyecto la ingeniera Jessica Cifuentes que gracias a su constante apoyo, guía y conocimiento pudimos cumplir con éxito este trabajo.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>1</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>8</b>
3.1. Objetivo General .....	8
3.2. Objetivos Específicos.....	8
<b>4. Justificación</b> .....	<b>9</b>
<b>5. Marco Teórico</b> .....	<b>11</b>
5.1. Descripción de la Industria de la Palma Aceitera .....	11
5.2. Descripción del Proceso de Digestión Anaerobia (DA).....	12
5.3 Etapas del Proceso de Digestión Anaerobia (DA) .....	13
5.3.1. Hidrólisis. ....	13
5.3.2. Acidogénesis.....	14
5.3.3. Acetogénesis.....	14
5.3.4. Metanogénesis .....	15
5.4. Elementos Importantes de la Digestión Anaerobia (DA).....	16
5.4.1 Demanda Química De Oxígeno (DQO) .....	16

5.4.2 Temperatura.....	16
5.4.3. pH .....	17
5.4.4. Sólidos Totales (ST) .....	18
5.4.5. Sólidos Volátiles (SV).....	18
5.4.6. Nutrientes .....	18
5.4.7. Tiempo De Retención Hidráulico (TRH) .....	19
5.4.8. Relación Carbono Nitrógeno (C/N).....	19
5.5. Sistemas de Reactores Anaerobios.....	19
5.5.1. Sistema UASB.....	19
5.5.2. Biorreactor ASTBR.....	20
5.6. Software R “Biogás Package” .....	20
5.7. Biogás.....	21
5.7.1. Composición del Biogás .....	21
5.7.2. Usos del Biogás .....	21
<b>6. Estado del Arte.....</b>	<b>22</b>
<b>7. Diseño Metodológico.....</b>	<b>28</b>
7.1. Identificación de los Parámetros Físicoquímicos Característicos de las Aguas Residuales del POME, para la Producción de Biogás .....	28
7.2. Estimación de la Cantidad de Biogás Producido a Partir del POME, Mediante el Uso del Software R con Ayuda del Paquete de Programación de Biogás.....	29

7.3 Viabilidad Técnica del Proceso Para la Producción de Biogás, Utilizando la Digestión Anaerobia en el Tratamiento del POME.....	29
<b>8. Análisis y Resultados .....</b>	<b>31</b>
8.1. Identificación de Parámetros Fisicoquímicos de las Aguas Residuales, Para la Producción de Biogás. ....	31
8.1.1. Revisión Bibliográfica.....	31
8.1.2. Parámetros Fisicoquímicos del agua residual de las Industrias de la Palma Aceitera	31
8.1.3. Influencia de las Propiedades en el Proceso de Digestión Anaerobia.....	34
8.2. Estimación de la Cantidad de Biogás Producido por el POME, Mediante el Software R	35
8.2.1. Características del Software R con el Paquete de Programación “Biogás Package” ..	35
8.2.2. Estimación de la Cantidad de Biogás Producido.....	36
8.3. Factibilidad Técnica del Proceso de Producción de Biogás en el Tratamiento del POME Utilizando la Digestión Anaerobia.....	43
8.3.1. Balance de Masa del Proceso .....	43
8.3.2. Balance de Energía del Proceso .....	45
8.3.3. Viabilidad Técnica del Proceso de Producción de Biogás a Partir del POME.....	47
<b>9. Conclusiones .....</b>	<b>49</b>
<b>10. Recomendaciones .....</b>	<b>50</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>51</b>

## Índice de Ilustraciones

	<b>Pág.</b>
<b>Ilustración 1.</b> Esquema de la digestión anaerobia de materiales poliméricos.....	13
<b>Ilustración 2.</b> Conformación del biogás en referencia del pH del cruce de materias primas.....	17
<b>Ilustración 3.</b> Producción global de aceite de palma.....	22
<b>Ilustración 4.</b> Generación de energía y síntesis celular en el proceso oxidativo microbiano.....	37
<b>Ilustración 5.</b> Parámetros insertados en el programa respecto a la DQO.....	41
<b>Ilustración 6.</b> Resultados del cálculo de CH <sub>4</sub> respecto a la DQO.....	41
<b>Ilustración 7.</b> Parámetros insertados en el programa respecto al pH.....	42
<b>Ilustración 8.</b> Producción de biogás respecto al pH.....	42
<b>Ilustración 9.</b> Balance de masa del proceso en términos de DQO.....	43

## Índice de Tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Características fisicoquímicas del POME.....	31
<b>Tabla 2.</b> Promedio de las características fisicoquímicas del POME.....	34
<b>Tabla 3.</b> Funciones básicas en el paquete de biogás.....	36
<b>Tabla 4.</b> Balance energético del proceso.....	47
<b>Tabla 5.</b> Beneficios económicos de la producción de biogás a distintos volúmenes tratados.....	48

## Índice de Ecuaciones

	<b>Pág.</b>
<b>Ecuación 1.</b> Energía libre de Gibbs requerida para la síntesis celular.....	38
<b>Ecuación 2.</b> Grados de libertad para el balance de materia.....	43
<b>Ecuación 3.</b> Balance de masa en términos de DQO.....	44
<b>Ecuación 4.</b> Balance de energía global.....	45
<b>Ecuación 5.</b> Flujo energético del biogás producido.....	46
<b>Ecuación 6.</b> Potencial de generación eléctrica.....	46

## Lista de Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>C/N</i>	Relación carbono nitrógeno
<i>COT</i>	Carbono orgánico total
<i>DA</i>	Digestión anaerobia
<i>DBO</i>	Demanda bioquímica de oxígeno
<i>EFB</i>	Racimos de fruta vacíos
<i>DQO</i>	Demanda química de oxígeno
<i>Fe</i>	Producción de energía
<i>F<sub>s</sub></i>	Síntesis celular
<i>LHV</i>	Poder Calorífico inferior
<i>NT</i>	Nitrógeno total
<i>OLR</i>	Carga orgánica aplicada
<i>POME</i>	Agua residual de la extracción del aceite de palma (Palm Oil Mill Effluent)
<i>PT</i>	Fósforo total
<i>SF</i>	Sólido fijos
<i>ST</i>	Sólidos totales
<i>SST</i>	Sólidos suspendidos totales
<i>SSV</i>	Sólidos suspendidos Volátiles
<i>SV</i>	Sólidos volátiles
<i>TRH</i>	Tiempo de retención hidráulica

## Resumen

El presente estudio busca identificar la factibilidad técnica para producir biogás a partir de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria de la palma aceitera. A través, del análisis teórico de producción de biogás con el uso del software R, mediante la inserción de parámetros fisicoquímicos del POME extraídos de investigaciones realizadas y publicadas con anterioridad, consultadas en la base de datos de la Universidad Antonio Nariño.

Por medio de esta herramienta se lleva a cabo la estimación de Biogás con ayuda del paquete de programación “Biogás Package”. Partiendo de dos escenarios: primero teniendo en cuenta la DQO y segundo el pH en el afluente de trabajo; mediante el cual se muestra el comportamiento de la generación del biogás al cambiar dichas variables. Donde se demuestra que a partir del POME se puede obtener un biogás con una capacidad energética de 5,98 W, de los cuales 1,68 W, están disponible para la producción de electricidad (28,1%), con un beneficio económico de 87,86 pesos por cada litro de POME tratado con la digestión anaerobia, lo cual presenta un beneficio económico y mejoramiento del entorno de las industrias palmeras.

***Palabras clave:*** Biogás, Digestión Anaerobia, POME, DQO, Palma aceitera.

## **Abstract**

The present study seeks to identify the technical feasibility of producing biogas from an anaerobic digestion process in the treatment of wastewater from the oil palm industry. Through, the theoretical analysis of biogas production with the use of R software, through the insertion of physicochemical parameters of the POME extracted from previously conducted and published research, consulted in the database of the Antonio Nariño University.

By means of this tool, the estimation of biogas is carried out with the help of the programming package "Biogas Package". Starting from two scenarios: first taking into account the COD and second the pH in the working influent; through which the behavior of the biogas generation is shown by changing these variables. It is shown that from the POME it is possible to obtain biogas with an energy capacity of 5.98 W, of which 1.68 W are available for the production of electricity (28.1%), with an economic benefit of 87.86 pesos for each liter of POME treated with anaerobic digestion, which presents an economic benefit and improvement of the environment of the palm industries.

**Keywords:** Biogas, Anaerobic Digestion, POME, COD, Palm oil.

## 1. Introducción

La industria de la palma aceitera es una actividad económica importante debido a que en muchos países este sector ha proporcionado empleo a millones de personas contribuyendo enormemente a su producto interno bruto (PIB). Partiendo de los beneficios económicos de la producción de aceite de palma ha perseguido estratégicamente la expansión de la misma. A pesar de los aspectos positivos que presenta, existe una creciente preocupación por el efecto perjudicial del procesamiento del aceite de palma al medio ambiente, debido a los diferentes contaminantes que se generan (Tan et al., 2021).

El procesamiento en el aceite de palma involucra múltiples operaciones que producen una gran cantidad de desechos, incluyendo racimos de frutas vacíos (EFB), folíolos de palma aceitera (OPL), hojas de palma aceitera (OPF), tronco de palma aceitera (OPT), cáscara de palmiste (PKS) y **efluente de molino de aceite de palma (POME)**. La producción de estos residuos, en particular el POME, es perjudicial para el medio ambiente y amenaza la sostenibilidad de la industria del aceite de palma (Razali & Kamarulzaman, 2020).

El POME es una suspensión coloidal generada durante la extracción de aceite de palma crudo (CPO) de racimos de frutas frescas. Se ha estimado que para la producción de 1 tonelada de CPO, se necesitan aproximadamente de 5 a 7,5 toneladas de agua, de las cuales cerca de un 50% terminan como agua residual (Alkhatib et al., 2014).

Incluso es altamente contaminante debido a su alto contenido orgánico ( $DBO = 18,225\text{--}23,900 \text{ mg / L}$ ,  $DQO = 45,818\text{--}54,861 \text{ mg / L}$ ) y sólidos en suspensión ( $24,846\text{--}30,920 \text{ mg / L}$ ). Si se vierte directamente en fuentes de agua, este causará una contaminación ambiental severa (Mohammed & Chong, 2014). Aunque se ha demostrado que un tratamiento moderno de POME

puede convertir la alta cantidad orgánica en biogás, la cual es una mezcla de gases con un valor energético de  $6 \text{ kWh/m}^3$  (Navas Salas & Peña Amaya, 2020). Para ello deben realizarse diferentes estudios de tipo técnico, económico y social a través de los cuales se establezca la factibilidad de producir biogás.

Este proyecto será desarrollado en 3 fases: La primera fase consiste en la búsqueda de información, que permita obtener los diferentes datos que sirven para ejecutar el proyecto. La segunda fase está basada en la aplicación del software R, en el cual se obtendrá como resultado la estimación de producción de Biogás, utilizando datos de los parámetros del POME. Como tercera fase se tendrán en cuenta los resultados obtenidos en el programa y mediante la formulación de balances de materia y energía, se determinará la factibilidad técnica de la utilización de procesos de digestión anaerobia en el tratamiento del POME.

Es importante aclarar que todos los resultados obtenidos serán evaluados a escala teórica, por tal motivo para ser llevados a una escala de laboratorio o escala industrial se deberán realizar más estudios.

## 2. Planteamiento del Problema

En la actualidad la industria de aceite de palma se encuentra instaurada como primera a nivel internacional con relación a la producción de grasas y aceites, debido a la gran cantidad de usos y aplicaciones que dichos productos ofrecen (Pérez & Ríos, 2018). En América Latina la reciente expansión de la palma aceitera ha provocado acalorados debates sobre oportunidades y amenazas de la economía nacional, los medios de vida rurales y los paisajes forestales tropicales (Meijaard & Sheil, 2019). La producción de aceite de palma a lo largo de los años ha logrado un incremento general a partir del 2016, Colombia es el cuarto país a nivel mundial en la producción de aceite de palma con 1670 mil toneladas métricas en el año 2020, siendo este superada únicamente por Tailandia, Indonesia y Malasia (Saad et al., 2021). Se espera que para cumplir la demanda mundial de aceite de palma, la generación seguirá en aumento, igualmente que sus residuos (Yoshizaki et al. 2013).

Según las proyecciones de crecimiento poblacional realizadas por las Naciones Unidas, se tendrá un alcance de 9500 millones de habitantes antes del año 2050, esto provocará que la generación de alimentos aumente proporcionalmente al crecimiento de la población humana (Lokman et al. 2021). Los efluentes del molino de aceite de palma (POME) son aguas residuales producidas durante la esterilización del aceite de palma, contiene cantidades sustanciales de nutrientes y fósforo que son dañinos para los ecosistemas acuáticos y terrestres. Debido a que los niveles de DBO y DQO del POME son aproximadamente 100.000 mg/L, lo que genera un riesgo para el medio ambiente y sugiere un pre-tratamiento efectivo del POME antes de su eliminación (Low et al. 2021).

Los efluentes del molino de aceite de palma (POME) cuentan con características indeseables y eutrofizantes como son la apariencia marrón espesa, descargas con altas temperaturas entre 80 y 90 °C, grandes cantidades de demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) cuyos valores son alrededor de 25.000 mg/L y 54.000 mg/L respectivamente. El POME emite un mal olor debido al contenido de materia orgánica como fenólico, pectina y caroteno, sin embargo, presenta un contenido de grasa de aceite de 8000 mg/L y una lectura de sólidos suspendidos totales (SST) de 44.000 mg/L aproximadamente (Tan & Lim, 2019). Algunos de estos valores dificultan la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) a través del proceso de DA, debido a sus altas temperaturas presentadas en la obtención de este aceite, dado que es perjudicial para las bacterias mesófilas y generando un gasto innecesario de energía, incluso un incremento de los gastos. También se considera que en el proceso de enfriamiento hay una pérdida de MO mayor al 20%, reduciendo el rendimiento del biogás en el proceso (Wadchasi et al. 2021).

De acuerdo con lo anterior, la pregunta de investigación es:

**¿Cuál es la factibilidad técnica para producir biogás, a partir de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la palma aceitera (POME) mediante el uso del Software R?**

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Identificar la factibilidad técnica, para producir biogás, a partir de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la palma aceitera (POME) mediante el uso del Software R.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los parámetros fisicoquímicos característicos de las aguas residuales, para la producción de biogás.
- Estimar la cantidad de biogás producido a partir del POME, mediante el uso del software R con ayuda del paquete de programación de biogás.
- Establecer la viabilidad técnica del proceso de producción de biogás, utilizando la digestión anaerobia en el tratamiento del POME.

#### 4. Justificación

El constante aumento de las plantas de producción de aceite de palma ha traído consigo la generación y disposición inadecuada de agua residual sin un previo tratamiento (Min. de agricultura, 2020). A partir de datos de las Naciones Unidas, el aceite de palma sostiene una huella hídrica muy grande, aproximadamente de 5000 m<sup>3</sup> por tonelada, siendo esta mayor que la soja que tiene una huella hídrica de 4200 m<sup>3</sup>, sin embargo su obligación de agua es inferior que la del aceite de oliva la cual requiere 14500 m<sup>3</sup> de agua por tonelada (Combate. C, 2017). Las emisiones de CH<sub>4</sub> por las aguas residuales de aceite de palma significan más de 1/3 del calentamiento de la liberación de gases de efecto invernadero que conlleva a la devastación de pantanos y bosques lluviosos de países que producen grandes cantidades de aceite de palma como Colombia, Indonesia y Malasia (Triviño, 2018).

Esta problemática ha desencadenado la obligación de buscar diferentes alternativas en el tratamiento de las aguas residuales procedentes de las industrias del aceite de palma (POME). Por lo cual, se pretende realizar un análisis teórico que permita determinar la factibilidad técnica de producir biogás a partir de sistemas de tratamiento anaeróbicos de agua residual.

Cabe destacar que la utilización de las aguas residuales para la producción de biogás son tecnologías que fomenta la puesta en marcha de la economía circular (Conama, 2020). La generación y la utilización del biogás como materia prima para obtener energía renovable, es una alternativa muy rentable, porque no sólo soluciona un problema ambiental al tiempo de reutilizar materia orgánica sino que ayuda a las industrias aceiteras en un beneficio económico al convertirse autosustentable en energía eléctrica y calorífica. Es importante mencionar que el

ascendente incremento de los precios de las energías tradicionales se convierte como un firme justificativo para ejecutar la investigación.

Con el desarrollo de este estudio se obtendrán conocimientos relacionados con la disminución de las problemáticas ambientales asociados a los vertimientos inadecuados de las aguas residuales provenientes de la extracción de aceite de palma hacia los diferentes cuerpos hídricos (ríos, lagos, estanques, quebradas), con el fin de que estos procesos puedan ser llevados de una escala teórica, a una escala de laboratorio y llegado el caso a una escala industrial, donde sea posible realizar un tratamiento de esta agua por medio de un proceso de DA para la producción de biogás.

## 5. Marco Teórico

### 5.1. Descripción de la Industria de la Palma Aceitera

Los molinos de aceite de palma consumen una gran cantidad de agua para su funcionamiento, produciendo una porción considerable de aguas residuales conocidas como efluentes del molino de aceite de palma (POME). Por su alta acidez, temperatura, DQO y DBO del POME, la descarga de este en una fuente hídrica tendría un impacto ambiental sustancial. Dado que el tratamiento de POME antes de la descarga es crucial para disminuir la DBO de las aguas residuales (Liew et al. 2021).

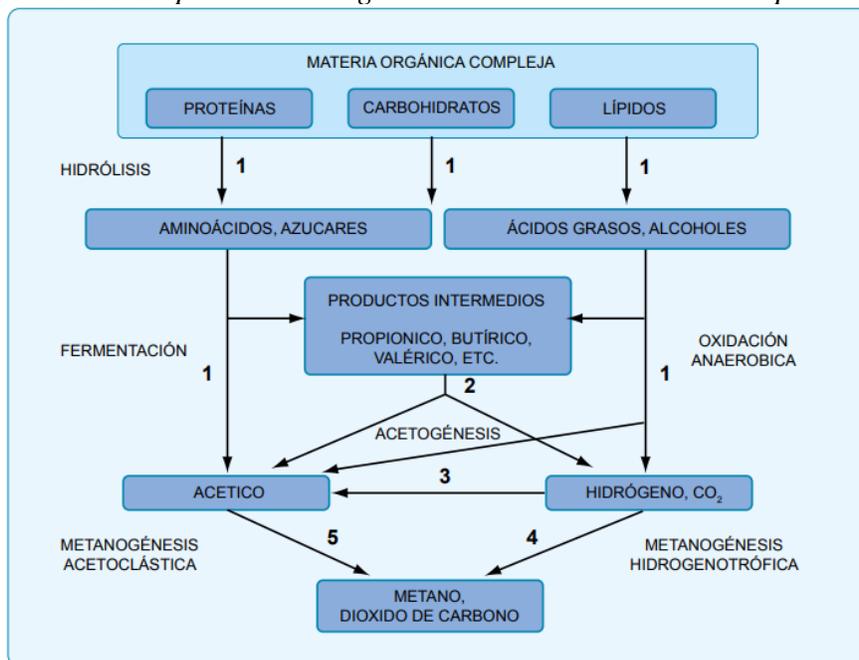
La biomasa de palma aceitera hace referencia a los subproductos agrícolas generados por estas industrias durante las actividades de plantación, poda y molienda, ya que en gran cantidad de los casos se deja descomponer en los campos. Mientras que una gran parte del árbol de palma aceitera (90%) se considera predominantemente, el aceite de palma solo representa el 10% del árbol. Los residuos de palma aceitera generada en la plantación incluyen tronco de palma aceitera (OPT) y hojas de palma aceitera (OPF); biomasa de racimo de fruta vacío (EFB), cáscara de palmiste (PKS), fibra de mesocarpio (MF) y efluente de molino de aceite de palma (POME). Es desalentador observar que una gran cantidad de los residuos de la palma aceitera se queman al aire y se deja en las plantaciones, lo que constituye un peligro ambiental. Con el propósito de sortear los desafíos planteados por la eliminación inadecuada POME de palma aceitera, se han llevado a cabo varias investigaciones para convertir este desecho renovable y fácilmente disponible en productos de valor agregado con diversas aplicaciones (Onoja et al., 2018).

## 5.2. Descripción del Proceso de Digestión Anaerobia (DA)

Partiendo de sus propiedades agresivas, el agua residual de las plantas de aceite de palma tiene una gran condición como medio; en el tratamiento del POME mediante la DA las bacterias arrojan una mezcla de gases aproximadamente el 60% metano y el 35 % dióxido de carbono, con un poder energético de 6 KWh/m<sup>3</sup> según lo descrito por Althausen, (2016). Es una tecnología muy prometedora y respetuosa con el medio ambiente para el procesamiento de residuos orgánicos y aguas residuales orgánicas. E incluso se ha convertido en el bioproceso más frecuente y económico utilizado para tratar diversas aguas residuales orgánicas y muchos tipos de desechos orgánicos debido no solo al valioso biogás producido por el proceso, sino también a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el reciclaje de nutrientes y disminución de la contaminación. El proceso de digestión anaeróbica es un proceso altamente complicado, no lineal y dinámico, y se ve fácilmente afectado por factores inciertos, lo que dificulta bastante la simulación e investigación del proceso mediante dinámicas tradicionales. (Hu et al., 2018).

La DA consta de cuatro pasos principales; hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada paso es responsable de reacciones puntuales de varios microorganismos específicos de los constituyentes particulares de la materia prima en el reactor de digestión anaeróbica. Se ha desarrollado e implementado tecnología para utilizar POME como componente principal para generar biogás como energía alternativa o vender electricidad a las redes (Prasert san et al. 2021). La ilustración 1 muestra las cuatro etapas descritas a continuación, en donde cada uno de los números hacen referencia al grupo de microorganismos involucrados, Bacterias: Fermentativas e hidrolíticas el 1, Acetogénicas el 2, Homoacetogénicas el 3, Metanógenos hidrogenotróficos el 4, Metanógenos Acetoclásticos el 5.

**Ilustración 1.** Esquema de la digestión anaerobia de materiales poliméricos.



**Fuente:** VARNERO MORENO, María Teresa. Manual de Biogás. Chile: FAO, 2011. p. 20.

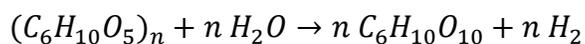
### 5.3 Etapas del Proceso de Digestión Anaerobia (DA)

#### 5.3.1. Hidrólisis.

Las macromoléculas orgánicas se descomponen en elementos más simples: Los desechos sólidos se licúan e hidrolizan en pequeñas moléculas solubles (por ejemplo, la celulosa se transforma en azúcares solubles como glucosa o celobiosa), (Marpaung et al., 2017).

En la reacción 1 se ilustra la hidrólisis de la celulosa por la suma de H<sub>2</sub>O, para crear glucosa como el beneficio primario y a su vez la generación de hidrógeno respectivamente (Navas Salas & Peña Amaya, 2020).

#### Reacción 1.



### 5.3.2. Acidogénesis.

Este proceso transforma las moléculas simples en ácidos de peso molecular débil como el ácido láctico y los ácidos grasos volátiles de 2 a 5 átomos de carbono, paralelamente se producen alcoholes moléculas de bajo peso, como bicarbonato, etanol e hidrógeno molecular (Marpaung et al., 2017).

Lo contrario de otras etapas, habitualmente se piensa que la acidogénesis progresa a un ritmo más acelerado que todas las demás etapas de la digestión anaeróbica, y las bacterias acidógenas tienen un tiempo de regeneración de menos de 36 h (Meegoda et al., 2018). En la acidogénesis se expone la siguiente sucesión de reacciones (2, 3 y 4) que sintetizan esta etapa en la DA (Navas Salas & Peña Amaya, 2020).

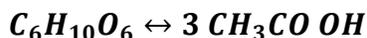
#### Reacción 2.



#### Reacción 3.



#### Reacción 4.



### 5.3.3. Acetogénesis.

Los productos resultantes de la fermentación requieren una transformación adicional antes de poder producir metano. Es aquí donde intervienen las bacterias reductoras de acetogénesis y las bacterias que reducen el sulfato, produciendo sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) (Marpaung et al., 2017).

Las reacciones 5, 6 y 7 que están relacionadas con la acetogenesis de la Digestión anaerobia se representan en serie (Navas Salas & Peña Amaya, 2020).

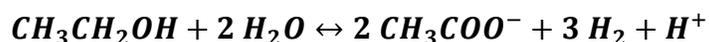
**Reacción 5.**



**Reacción 6.**



**Reacción 7.**

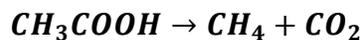


**5.3.4. Metanogénesis**

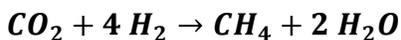
Corresponde a la última fase durante la cual toman el relevo dos tipos de bacterias metanogénicas: Las primeras (acetogénesis) reducen el acetato de metano, el CH<sub>4</sub> y el bicarbonato. Los segundos, reducen el bicarbonato de metano (Marpaung et al., 2017).

Esta etapa está representada por reacciones en la DA como lo son las ecuaciones 8, 9 y 10:

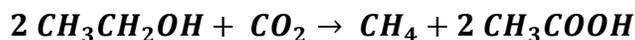
**Reacción 8.**



**Reacción 9.**



**Reacción 10.**



En los reactores discontinuos, el final de la metanogénesis se determina cuando se detiene la producción de biogás, lo que puede tardar unos 40 días. Las evaluaciones del grado de digestión de un lodo se pueden tomar a partir de su contenido de sólidos volátiles y su capacidad para deshidratar (Navas Salas & Peña Amaya, 2020).

#### **5.4. Elementos Importantes de la Digestión Anaerobia (DA)**

##### **5.4.1 Demanda Química De Oxígeno (DQO)**

La DQO proporciona una medida del oxígeno presente en una prueba de lodo que puede consumirse en una reacción de agentes oxidantes. En la digestión anaerobia, la DQO refleja la cantidad de compuestos que se encuentran presentes en un lodo. La eficiencia de la DA también se puede evaluar usando la DQO, la disminución de DQO se puede ver reflejada en la cantidad de degradación que tiene lugar dentro de un digester anaeróbico, ya que refleja el consumo de compuestos orgánicos (Meegoda et al., 2018).

##### **5.4.2 Temperatura**

La temperatura juega un papel primordial en la digestión anaeróbica, da forma a los ecosistemas microbianos, debido a que regula el rendimiento de estabilidad del transcurso de la DA. Se ha demostrado la sensibilidad de los microorganismos a los cambios de temperatura más allá de su rango preferido tiene un efecto importante sobre su actividad metabólica y su crecimiento, porque afecta significativamente las propiedades de las materias primas y el equilibrio termodinámico de las reacciones bioquímicas en la ejecución de la digestión anaerobio (Nie et al., 2021).

En general, el sistema de digestión anaerobio se opera a tres niveles óptimos de temperatura: psicrófilo (<20 °C), mesófilo (20 - 43 °C, aunque 35 - 37 °C generalmente se considera óptimo) y termófilo (50 - 60 °C, óptimo a 55 °C), las condiciones mesófilas y

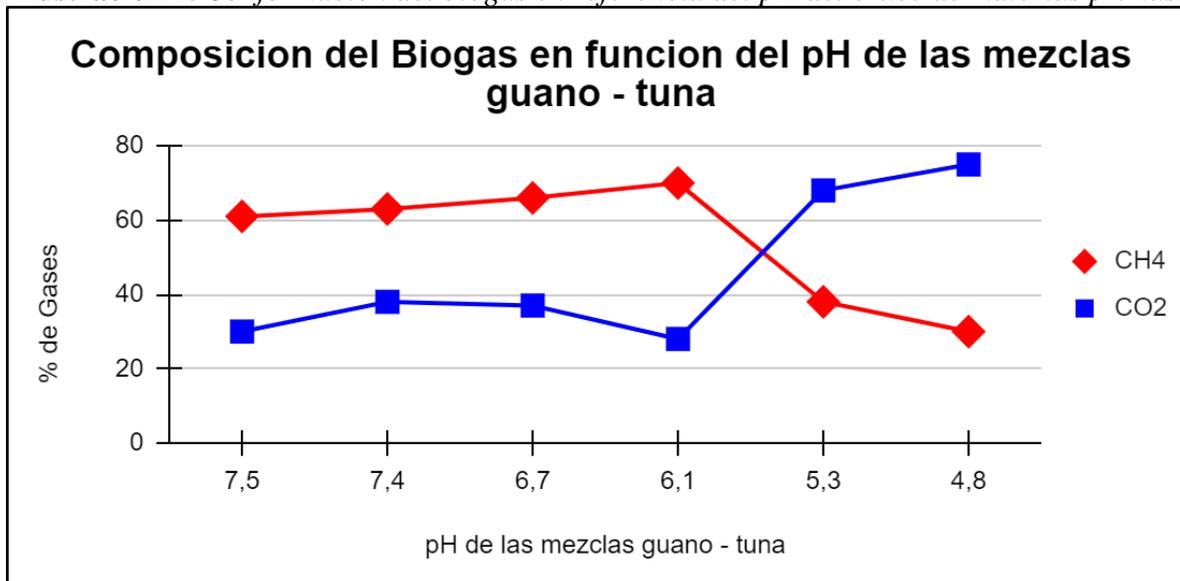
termófilas se utilizan ampliamente en gran parte de los sistemas de digestión anaeróbica (Nie et al., 2021).

### 5.4.3. pH

El valor de pH en el sistema de fermentación es una pieza fundamental para el modelo de fermentación y los rendimientos de los productos objetivo porque afecta la estructura de la comunidad microbiana, las vías metabólicas y las actividades enzimáticas, por lo que afecta la acumulación de AGV (Tang et al., 2017).

La composición de los productos de después de controlar diferentes condiciones de pH siempre ha sido un foco de investigación. En donde el pH óptimo para acidogénesis se encuentra comprendido entre 5.5 y 6.5 unidades, y para los metanogénicos entre 7.8 y 8.2 unidades. Cuando el pH es inferior al rango de pH óptimo (de 6,0 a 7,6) para el crecimiento de microorganismos anaeróbicos, aunque el peligro de inhibición del amoniacó puede disminuir, este pH bajo es desfavorable para el crecimiento microbiano, especialmente para arqueas. (Varnero Moreno, 2011).

**Ilustración 2.** *Conformación del biogás en referencia del pH del cruce de materias primas.*



**Fuente:** Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de biogás*. P. 43.

#### **5.4.4. Sólidos Totales (ST)**

Los sólidos totales (ST) son una dimensión de la sustancia seca en un lodo, independientemente de su naturaleza orgánica o inorgánica, a menudo se articula en la literatura como un porcentaje o una concentración. El contenido de ST se determina mediante el secado de una muestra de lodo a 103–105 °C sucesivamente hasta que no se observan más cambios de peso (Meegoda et al., 2018).

#### **5.4.5. Sólidos Volátiles (SV)**

Los sólidos volátiles (VS) se ajustan generalmente como una determinación de fracción orgánica de los sólidos totales, no obstante una especificación más precisa sería la proporción de materia en un lodo que se pierde por la ignición. La cantidad de SV se calcula mediante la ignición de los sólidos restantes producidos a partir de la medición de sólidos totales a 550 °C, aunque es posible que ya se haya producido cierta volatilización durante la medición de los sólidos totales (Meegoda et al., 2018).

#### **5.4.6. Nutrientes**

En la digestión anaerobia para el anabolismo de la generación de biomasa, se necesitan micronutrientes como los minerales traza y macronutrientes como lo son el nitrógeno y el fósforo (Baquero Cadena & Murillo Malpica, 2019).

Sin embargo, con la descomposición de la biomasa residual durante la EA, se liberan grandes cantidades de nitrógeno y fósforo a la fase líquida. Antes de que el efluente se descargue al medio acuático público, es necesario eliminar el nitrógeno y el fósforo para evitar problemas de eutrofización (Meegoda et al., 2018).

#### **5.4.7. Tiempo De Retención Hidráulico (TRH)**

El tiempo de retención hidráulica (HRT) se refiere al tiempo medio que los líquidos permanecen en un digestor. TRH, que a menudo aparece como  $\theta$  en la literatura, se puede determinar como la división del volumen del digestor,  $V$ , y el caudal de un digestor.

Como medida relacionada con la tasa de carga, una TRH más pequeña corresponde a una tasa de carga más grande. Como tal, están asociadas con la acidificación de los AGV, lo que podría producir efectos inhibidores (Meegoda et al., 2018).

#### **5.4.8. Relación Carbono Nitrógeno (C/N)**

La relación C/N es la caracterización de nutrientes de uso común. Considerando la composición de carbohidratos, lípidos y proteínas, es lógico pensar que la fuente más abundante de nitrógeno en un digestor anaeróbico sería la degradación de proteína. Así como el carbono es necesario a una cierta concentración para proporcionar un sustrato adecuado para la digestión, el nitrógeno a una cierta concentración también es necesario para que no se vea comprometida la formación de proteínas para los microorganismos (Meegoda et al., 2018).

### **5.5. Sistemas de Reactores Anaerobios**

#### **5.5.1. Sistema UASB**

La principal ventaja de utilizar el birreactor de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para el tratamiento de POME es su capacidad para generar  $H_2$ , sin embargo, las debilidades a superar son: El largo período de puesta en marcha (hasta 4 meses), la incertidumbre de las velocidades de flujo ascendente y el lavado de gránulos resultante de las tensiones hidráulicas (Lee et al., 2019).

El reactor UASB es uno de aquellos desarrollos más importantes en técnicas de tratamiento anaeróbico. Presenta características positivas, permitiendo cargas orgánicas elevadas,

tiempo de retención hidráulica (HRT) cortó y proporcionando una demanda de energía baja, especialmente para el tratamiento con POME. Los componentes suspendidos y coloidales de POME en forma de grasa, proteína y celulosa tienen un impacto adverso en el rendimiento del reactor UASB y pueden causar el deterioro de las actividades microbianas y la eliminación de la biomasa activa (Zinatizadeh et al., 2007).

### **5.5.2. Biorreactor ASTBR**

En cuanto a los sistemas de película fija, el reactor de lecho estructurado (ASTBR) es otra alternativa tecnológica a los APBR convencionales, combinando las ventajas del crecimiento de células inmovilizadas con mayores índices de vacíos, evitando así la acumulación de grandes cantidades de sólidos dentro del lecho. En esta novedosa configuración, el material de soporte está ordenado para permitir la adhesión de la biomasa, pero con una porosidad de lecho mucho mayor, lo que disminuye la acumulación excesiva de biomasa en los intersticios del lecho, reduciendo los problemas de obstrucción del lecho. Los reactores de lecho fijo son ventajosos porque permiten operaciones con tiempos de retención hidráulica más cortos que los reactores sin inmovilización, debido a una retención de biomasa más significativa dentro del reactor (Blanco et al., 2019).

### **5.6. Software R “Biogás Package”**

Este paquete de programación está pensado, para utilizarlo en el software “R” descrito por Sasha Hafner, el paquete es desarrollado con respecto de métodos estequiométricos utilizados en el libro de Rittmann denominado “Environmental Biotechnology: Principles and Applications”, estos están sustentados en la aplicación de semirreacciones, divididas en la reacción de oxidación del donante de electrones, la reacción de síntesis celular y la semirreacción de reducción del que acepta electrones (Rittmann et al., 2020).

## **5.7. Biogás**

El biogás es el producto de la digestión anaeróbica (DA), compuesto principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Como energía renovable, el biogás tiene el potencial de reemplazar a los combustibles fósiles como una parte importante del sistema energético. Sin embargo, el  $\text{CO}_2$  del biogás reduce el bajo poder calorífico y aumenta los costes de transporte, además eliminar el  $\text{CO}_2$  para aumentar el  $\text{CH}_4$  es fundamental para la utilización eficiente del biogás (Zhang et al., 2021).

### ***5.7.1. Composición del Biogás***

El biogás es una mezcla de gas que contiene aproximadamente entre un 40 y un 60% de  $\text{CH}_4$ , entre un 30 y un 50% de  $\text{CO}_2$  y pequeñas cantidades de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NH}_3$ . Debido a que el componente funcional del biogás es el metano, en muchas regiones el biogás se ha convertido en biometano, en el que el contenido de metano es superior al 97%. El biogás emite cero gases de efecto invernadero netos, ya que el metano capturado se convierte finalmente en  $\text{CO}_2$  durante la combustión como combustible y termina con la liberación de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera donde el  $\text{CO}_2$  ya es un gas ineludible (Teng et al., 2014).

### ***5.7.2. Usos del Biogás***

El biogás se puede utilizar para la producción de electricidad en cogeneración o calor y energía combinados. El metano se puede concentrar con los mismos estándares que el gas natural de una forma inyectada en el sistema de tuberías del hogar o de una industria para su distribución. En condiciones criogénicas, este se convierte en biogás comprimido o líquido, en donde se puede transformar en combustibles más limpios como gas de síntesis e hidrógeno. Hay varios métodos disponibles para convertir biogás en combustible de hidrógeno (Kadam & Panwar, 2017).

## 6. Estado del Arte

La industria de los molinos de aceite de palma tiene una influencia dominante y reconocida como el aceite vegetal más utilizado a nivel mundial con un rendimiento total de hasta el 40% en comparación con los otros aceites vegetales (Louhasakul et al., 2021). La ilustración 3, muestra los datos de producción global de aceite de palma obtenidos del Departamento de Agricultura de los E.U. (USDA). Se contempla una tendencia creciente general en la generación mundial de aceite de palma. Siendo los dos principales países de suministro de aceite de palma al mundo, Indonesia y Malasia han contribuido con el 55,3% y el 33,7% respectivamente en la exportación general de aceite de palma en 2017/18 (Lee et al., 2019).

**Ilustración 3.** Producción global de aceite de palma.



**Fuente:** Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)

Numerosos estudios han debatido esta cuestión con respecto al sudeste asiático, donde se presenta la mayor parte de la producción, pero menos con respecto a América Latina. Esta región ocupa el segundo puesto después de Asia en la provisión mundial de aceite de palma y, dado que casi ha duplicado su área de palma aceitera en la última década, es la región productora de más rápido crecimiento en el mundo (Castellanos-Navarrete et al., 2021).

Colombia tiene una producción de 465 mil ha aproximadamente de aceite de palma, siendo el cuarto país productor de palma aceitera con un 2,3% participación del área de producción global (Fedepalma, 2018a). Además genera 3,24 Megatoneladas de racimos de fruta fresca (RFF), 672,597 kilo toneladas de aceite de palma crudo, 158,172 kilo toneladas de pepita y 63,726 kilo toneladas de aceite de palma. Tiene 51 molinos de aceite de palma en todo el país y la productividad promedio es de 4 ton/ha (Arrieta et al., 2007). Dado que, en la actualidad, la demanda de alimentos y productos biológicos ejerce presión sobre una mayor producción agrícola, el sector de la palma de aceite se convierte en un actor clave para ayudar a satisfacer algunas de estas demandas (Ramírez-Contreras et al., 2020).

En Colombia se han realizado una serie de estudios, donde utilizan el tratamiento del POME, para la obtención de productos, como lo es el “Proyecto Sombrilla” el cual reúne a 32 industrias distribuidas por las 4 zonas que producen aceite de palma del país, donde proponen la generación de metano por medio de biodigestores anaerobios en cada una de estas industrias (Ibañez, 2019).

Los efluentes del molino de aceite de palma (POME) son aguas residuales producidas durante el proceso de esterilización, que contienen cantidades sustanciales de nutrientes y fósforo. Ya que los niveles de DBO y DQO del POME son tan altas como 100.000 mg/L, lo que

proponen un peligro para el medio ambiente, sugiriendo un pre-tratamiento efectivo del POME antes de su eliminación (Low et al. 2021).

Se han observado tendencias alcistas globales en la industria del aceite de palma, mientras se descarga una gran cantidad de residuos, particularmente efluentes de molinos de aceite de palma (POME), es un tipo de agua residual que pueden causar una contaminación ambiental severa. El POME es una suspensión espesa y viscosa de color marrón, con un gran contenido de suspensión coloidal y un olor significativo. En el POME la mayor parte de los residuos, son el desecho líquido obtenido del tratamiento de productos relacionados con la palma, como la clarificación del aceite de palma crudo, la esterilización de racimos de frutas frescas y la separación de la mezcla de cáscara y almendra mediante el tipo de separación por hidrociclón. Esto ha provocado desafíos notables para que los molinos de aceite de palma obedezcan las regulaciones de los límites de descarga estándar, lo que ha resultado en el desarrollo de varios métodos de biorremediación y biorreactores (Chia et al., 2020).

El sector de la industria de los molinos de aceite de palma ha fomentado constantemente el crecimiento económico, sin embargo, se ha visto afectado por problemas ambientales. De hecho, el efluente liberado es de aproximadamente 26,7 millones de toneladas de biomasa de palma que contiene sustancias orgánicas e inorgánicas y proporciona residuos de alta resistencia con una DQO típica de 70.000 mg/L y una DBO de 30.000 mg/L, cuyos valores son muy altos. Estas aguas residuales generan impactos ambientales perjudiciales y, por lo tanto, requieren un proceso para ser tratadas antes de ser descargadas en receptores específicos (Louhasakul et al., 2021).

Los numerosos problemas relacionados con los efluentes de los molinos de aceite de palma (POME), como la liberación de un alto nivel de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y otros contaminantes en el medio ambiente, han generado una gran preocupación pública. Por lo tanto, el Departamento de Medio Ambiente (DOE) ha implementado leyes más estrictas sobre la descarga final de POME, por lo que la DBO debe ser inferior a  $20 \text{ mg L}^{-1}$ . La industria del aceite de palma ha combinado recientemente el tratamiento existente y la tecnología de captura de biogás para crear un sistema integrado para reducir la DBO de manera efectiva y, al mismo tiempo, aprovechar al máximo los valiosos subproductos, como el gas metano, como parte del esfuerzo para hacer realidad la idea de vertido cero de residuos (Lokman et al., 2021). En la actualidad, se están evaluando innumerables investigaciones para aliviar la molestia que surge del POME, al mismo tiempo que se explora su potencial no revelado para productos valorizados. En particular, la generación de energía renovable se considera el potencial más tratado entre la comunidad de científicos, incluidos los procesos biológicos fueron innovados para convertir POME en energía utilizable (Ng, 2021).

Dentro de los procesos existentes para el tratamiento del POME podemos encontrar de dos tipos, tratamientos biológicos y fisicoquímicos; el tratamiento anaeróbico, aeróbico y los estanques facultativos son ejemplos de tratamiento biológico. Estos procesos de tratamiento respetuosos con el medio ambiente son los medios preferidos para tratar el POME. Donde un grupo de microorganismos consume POME debido a su alto contenido orgánico. Por lo tanto, la digestión anaeróbica que produce gas metano tiene un potencial significativo. Al aplicar el análisis y el control ambiental adecuados, el tratamiento biológico puede tratar fácilmente la mayor parte de los efluentes que contienen componentes biodegradables con una proporción de DBO y DQO de 0,5 y superior (Lokman et al., 2021). En el escenario actual del tratamiento con

POME, la digestión anaeróbica fue seguida por la oxidación aeróbica en los estanques. Se han utilizado procesos de fangos activados como post tratamiento posterior al proceso de digestión anaeróbica con el fin de reducir la gran superficie de tierra que requiere el estanque aeróbico. La eficiencia del proceso de lodos activados se evalúa mediante el tratamiento del POME cruda digerida y diluida anaeróbicamente (Vijayaraghavan et al., 2007).

Aunque existen diferentes tipos de tratamiento biológico, es posible que ciertos procesos no entreguen los resultados requeridos con respecto a los requisitos mínimos establecidos por la autoridad (Ahmed et al., 2015). Aparte de los procesos de tratamiento biológico, los procesos de tratamiento fisicoquímico o también conocidos como técnicas de pulido son medios alternativos para tratar POME. Básicamente, los procesos de tratamiento fisicoquímico separan las partículas coloidales que transforman las propiedades físicas de las sustancias (Lokman et al., 2021). El POME consta de una gran cantidad de aceite y grasa. Por consiguiente, es un desafío importante eliminar las gotitas aceitosas en POME durante el proceso de tratamiento. En consecuencia, se han implementado numerosos procesos de tratamiento terciario para abordar este tipo de problemas. Entre estos procesos de tratamiento, la adsorción es uno de los medios más respetuosos con el medio ambiente para tratar las aguas residuales (Florence et al., 2009).

La digestión anaeróbica es la degradación de materias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno. Este proceso lleva mucho tiempo, ya que los consorcios bacterianos responsables del proceso de degradación requieren tiempo para adaptarse al nuevo entorno antes de comenzar a consumir materias orgánicas para crecer (Poh & Chong, 2009). En el proceso de degradación de POME en metano,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , hay una secuencia de reacciones involucradas; hidrólisis, acidogénesis (incluida la acetogénesis) y metanogénesis (Gerardi, 2003). La digestión anaeróbica también es el paso restrictivo en el proceso de tratamiento de POME, pues la hidrólisis es el

transito limitado de la digestión anaerobia, lo último da como resultado que la materia orgánica se pudra sólo parcialmente. La DA es un proceso tedioso e inestable, ya que depende de varios tipos de parámetros operativos, que son el pH del sistema, la temperatura, los inhibidores de la DA y el tiempo de retención. Por lo tanto, para que la DA sea eficaz, debe controlarse y monitorear adecuadamente, ya que puede producir una cantidad considerable de biogás. Y mejorar fundamentalmente la calidad del tratamiento del efluente (Khadaroo et al., 2019).

El biogás crudo se produce en condiciones anaeróbicas mediante la descomposición de la fracción orgánica de los desechos con la ayuda de microbios y enzimas, que generalmente es una mezcla de  $\text{CH}_4$  (40 - 65% v/v),  $\text{CO}_2$  (35 - 5% v/v) y una pequeña cantidad de  $\text{H}_2\text{S}$  (0,1 a 3% v/v), humedad y compuestos orgánicos volátiles adicionales (Angelidaki et al., 2018). Tiene un valor energético de  $37,3 \text{ MJ} / \text{m}^3$  y un poder calorífico de aproximadamente  $4740 - 7500 \text{ kcal} / \text{m}^3$ . La producción de biogás incluye una secuencia de fases bioquímicas complejas como lo son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, que dependen de diversas variables físicas, químicas y biológicas, como materias primas, tecnologías de pretratamiento, pH, temperatura de la DA y diversidad microbiana (Mishra et al., 2021). El efluente del molino (POME) es una fuente de generación de biogás que puede ser un sustituto de los combustibles fósiles. El alto contenido de DBO y DQO de POME tiene la ventaja de producir una gran cantidad de biogás a través de la digestión anaeróbica, como se puede evidenciar en diferentes estudios realizados (Shiun Lim et al., 2021).

## 7. Diseño Metodológico

Para llevar a cabo el desarrollo del presente estudio se determinó la factibilidad técnica de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la palma aceitera (POME), para la producción de biogás, en la cual se plantea la siguiente metodología con las respectivas actividades para cada uno de los objetivos específicos:

### **7.1. Identificación de los Parámetros Físicoquímicos Característicos de las Aguas Residuales del POME, para la Producción de Biogás**

- A.** Búsqueda de información bibliográfica sobre las propiedades físicoquímicos de las aguas residuales de las industrias de la palma aceitera:

Se buscará información por medio de artículos, revistas y tesis, donde se presentan los distintos estudios, que se han realizado permitiendo determinar los parámetros físicoquímicos de dicho tipo de agua residual y la influencia de estas propiedades sobre el proceso de DA. Se realizará la búsqueda en las diferentes plataformas que permitirán obtener datos confiables y verídicos, como lo son de las bases de datos referenciales de la Universidad Antonio Nariño, SCOPUS y web of Science.

- B.** Selección de los parámetros físicoquímicos más pertinentes para la estimación de la producción de biogás a partir del POME:

Después de observados y analizados los artículos más relevantes sobre las aguas residuales provenientes de las industrias del aceite de palma, se extraerán aquellos parámetros físico químicos que se encuentran con mayor frecuencia en esta agua residual, como lo son la DQO, el pH, la temperatura y los sólidos totales.

## **7.2. Estimación de la Cantidad de Biogás Producido a Partir del POME, Mediante el Uso del Software R con Ayuda del Paquete de Programación de Biogás.**

### **A.** Caracterización exhaustiva del software R en la producción de biogás.

Se definirán cada una de las herramientas, datos a ingresar y resultados que ofrece este programa, para entender y hacer un uso adecuado de las diferentes funciones que permite realizar. Se ejecutará mediante Google Colab, el cual permite programar y ejecutar el software en el navegador sin necesidad de instalación de programas, configuraciones y con acceso gratuito a GPUs.

### **B.** Aplicación del software R para determinar el comportamiento de la generación de biogás.

Teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos seleccionados en la actividad 7.1 sección B. Se insertarán en el programa de la forma más conveniente para obtener un resultado adecuado. Con esta actividad se tendrá como resultado los diferentes valores estimados de concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ) y la producción del Biogás, con la digestión anaerobia de esta agua residual.

## **7.3 Viabilidad Técnica del Proceso Para la Producción de Biogás, Utilizando la Digestión Anaerobia en el Tratamiento del POME.**

### **A.** Formulación del balance de masa en el proceso realizado para la producción de biogás a partir del POME.

Para este balance de masa se tendrán en cuenta los parámetros encontrados en las actividades 7.1 sección A y 7.2 sección B (se deberá tener en cuenta que se utilizarán los valores

obtenidos de la producción de biogás sin utilizar un pretratamiento antes de la DA), estableciendo estos como las condiciones del proceso a la entrada, durante y a la salida del digestor respectivamente. Se obtendrá como resultado los datos necesarios para evaluar la eficiencia y el mejoramiento de la corriente de biogás al finalizar el tratamiento.

**B.** Formulación del balance de energía en el proceso realizado para la producción de biogás a partir del POME.

Se utilizarán los diferentes valores encontrados en la actividad 7.2 sección B (Correspondiente a la producción de biogás sin utilizar un pretratamiento antes del proceso de la DA) y 7.3 sección A, dirigiéndolo principalmente a la capacidad calorífica del biogás estimado al finalizar el proceso.

**C.** Determinación de la viabilidad técnica del proceso para la producción de biogás a partir del POME.

Se tendrán en cuenta los resultados alcanzados de las actividades 7.3 secciones A y B, a partir de esto, se procederá a hacer una evaluación de la viabilidad del proceso de generación de biogás, determinando la posible generación de electricidad o energía térmica que se puede obtener.

## 8. Análisis y Resultados

### 8.1. Identificación de Parámetros Físicoquímicos de las Aguas Residuales, Para la Producción de Biogás.

#### 8.1.1. Revisión Bibliográfica

Para la búsqueda de las propiedades físicoquímicos del agua residual proveniente de la industria de palma aceitera, se realizó una revisión bibliográfica, mediante la cual se identificaron y seleccionaron los diferentes datos oportunos del POME, basados la utilización de bases de datos de la Universidad Antonio Nariño y de otras herramientas electrónicas como Scopus. Obteniendo el resultado de los factores físicoquímicos del agua residual en cada uno de los estudios que se han realizado, esto debido a que cada industria puede tener procesos relativamente distintos en la obtención de sus productos como en este caso la producción de aceite.

#### 8.1.2. Parámetros Físicoquímicos de las Aguas Residuales de las Industrias de la Palma Aceitera

Se encontraron diversos estudios en los cuales daban a conocer los diferentes parámetros del POME, se eligieron aquellos estudios en los que permitieron hacer una comparación entre los valores que allí se presentaban, los artículos estudiados son los siguientes:

En cuanto a la mejora de la generación de biogás mediante la utilización de la digestión de racimos de frutas vacíos (EFB) con el POME. Se obtuvo que la proporción óptima de EFB: POME es de 0,6:1 respectivamente. En este estudio el POME utilizado muestra alta DQO Y DBO ya que el POME fue recolectada durante la temporada alta de cosecha, incluso muestra una relación entre DBO y DQO de 0,63 (Liew et al. 2021). Esto indica que estas aguas residuales son aptas para ser tratadas biológicamente en condiciones anaeróbicas ya que la relación entre DBO

y DQO es mayor a 0,5. Los valores encontrados sobre los parámetros fisicoquímicos en esta agua residual se pueden ver en la tabla 1.

En un efluente procedente de los molinos de aceite de palma se utilizó un proceso de DA termofílica de racimos de fruta de palma de aceite vacío, cuyo método sirve para obtener una producción más eficiente de biogás. El POME se almacenó a una temperatura de 4 °C, con un color marrón, viscoso, ácido y con alto contenido de aceite y grasa, estas características principales del POME, se pueden evidenciar en la tabla 1. Esto demuestra que este POME era un sustrato concentrado de lípidos que potencialmente podrían inhibir el proceso (O-Thong et al., 2012). Según el estudio, para que sea más económico aplicar la digestión termofílica es preferible que cuando el POME sea liberado del proceso, tenga una temperatura de 80 a 90°C, debido a que esta temperatura es menor que el requerimiento de enfriamiento y la tasa de crecimiento bacteriano es más rápido.

En la generación de biogás de los efluentes de molinos de aceite de palma (POME) y racimos de fruta vacíos (EFB), a partir del desarrollo de la DA de líquido acoplado y de estado sólido. Las características básicas del efluente de la almazara de aceite de palma (POME) y los racimos de fruta vacía se muestran en la tabla 1. Se recolectaron efluentes de molino de aceite de palma, EFB, y lodos digeridos anaeróbicamente de la fábrica de extracción de aceite de palma sin ningún proceso. Los racimos de frutas vacíos se presionaron con tornillos para eliminar el aceite y la humedad, los EFB se cortaron a un tamaño >0.5 cm. El POME y el EFB se almacenaron a 4°C antes de su uso. Para la concentración, los inóculos de lodos digeridos anaeróbicamente se sedimentaron por gravitación y el sobrenadante se descartó para concentrar los lodos (Suksong et al., 2020).

**Tabla 1.***Características fisicoquímicas del POME.*

Características	Unidad	Liew et al.	O-Thong et al.	Suksong et al.
DQO	ppm	91650	97100	63925
DBO	ppm	58103	-	-
pH		4,1	4,3	4,42
ST	%	5,39	6,70	4,98
SV	%	4,51	5,70	4,26
SST	%	3,11	4,06	-
SSV	%	2,86	-	-
Concentración del sustrato	g*Kg H <sub>2</sub> O	50	50	50
Temperatura	°C	35	35	35
COT	ppm	19680	-	-
NT	ppm	1850	3200	
PT	ppm	1183	-	-
C/N	-	12,64	-	27,0

**Nota:** Elaboración propia, con base en: Liew, Z. K., Chan, Y. J., Ho, Z. T., Yip, Y. H., Teng, M. C., Ameer Abbas bin, A. I. T., Chong, S., Show, P. L., & Chew, C. L. (2021). Biogas production enhancement by co-digestion of empty fruit bunch (EFB) with palm oil mill effluent (POME): Performance and kinetic evaluation. *Renewable Energy*, 179, 766–777. Y Suksong, W., Tukanhan, W., Promnuan, K., Kongjan, P., Reungsang, A., Insam, H., & O-Thong, S. (2020). Biogas production from palm oil mill effluent and empty fruit bunches by coupled liquid and solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 296, 122304.

Por medio de los parámetros fisicoquímicos de los 3 artículos revisados se hizo un promedio de los valores se tenían conocimiento de cada una de las características como se puede evidenciar en la tabla 2. Estos valores fueron los que permitieron estimar la producción de biogás a partir del software R.

**Tabla 2***Promedio de las características fisicoquímicas del POME.*

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Promedio</b>
DQO	ppm	82225
DBO	ppm	58103
pH		4,27
ST	%	5,39
SV	%	4,82
SST	%	3,59
SSV	%	2,86
Concentración del sustrato	g*Kg H <sub>2</sub> O	50
Temperatura	°C	35
COT	ppm	19680
NT	ppm	2525
PT	ppm	1183
C/N	-	19,82

**Nota:** Elaboración propia.**8.1.3. Influencia de las Propiedades en el Proceso de Digestión Anaerobia.**

En el estudio de las propiedades de la tabla 2, se logró evidenciar que para el desarrollo de digestión anaerobia se cuenta con un alto contenido de la DQO, el cual es de vital importancia para la producción de biogás. En la DA la temperatura es fundamental, ya que en el POME se tiene una temperatura de 35°C lo que es un poco menor al rango de la etapa termofílica que se encuentra comprendida entre 45 y 60°C lo que puede requerir un proceso adicional para poder

estabilizar la temperatura y que tengan un rendimiento eficiente en la DA para la generación de biogás.

Además, el pH típico del POME se encuentra entre un rango de 4 y 4,5 unidades, el cual es un valor pequeño respecto al pH óptimo con el cual trabaja la DA siendo de 7 unidades, de acuerdo a esto es factible que se requieran ciertos estudios para analizar si este pH servirá para la digestión anaerobia o por lo contrario se debe hacer algún proceso de estabilización de pH con forme al rango óptimo.

## **8.2. Estimación de la Cantidad de Biogás Producido a Partir del POME, Mediante el Software R**

### ***8.2.1. Características Importantes del Software R con el Paquete de Programación “Biogás Package”***

El software R contiene 7 funciones que ayudan con el procesamiento de datos en el diseño experimental, y son utilizadas por las funciones al momento de tratar dichas cifras. En la tabla número 3 serán nombradas las funciones básicas en el paquete de biogás. El paquete de biogás y la OBA pueden ayudar a mejorar la eficiencia de la investigación del biogás y la precisión de los resultados.

El software se puede utilizar para calcular con precisión el potencial bioquímico de metano (BMP) a partir de una gran cantidad de tipos de medición de biogás. Además, el potencial del metano se puede predecir a partir de la composición del sustrato, lo que facilita el formato experimental y el estudio de los resultados. Al brindar acceso a algoritmos flexibles, eficientes, estandarizados y transparentes, este software puede hacer que la investigación del biogás sea más precisa y eficiente (Hafner et al., 2018).

**Tabla 3***Funciones básicas en el paquete de biogás.*

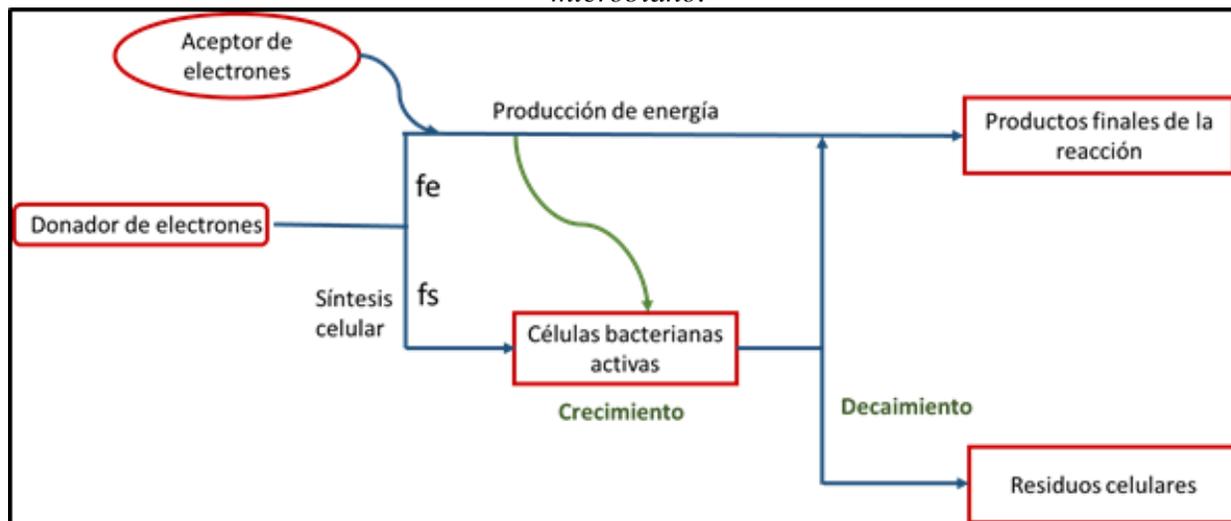
<b>Operación</b>	<b>Función</b>
Calcular la demanda química de oxígeno de un compuesto	calcCOD
Interpolar la composición, etc.	interp
Calcular el volumen de biogás a partir de la pérdida de masa	mass2vol ()
Calcular la masa molar de un compuesto	molMass ()
Estandarizar el volumen de gas	stdVol ()
Calcular la pérdida de masa a partir del volumen de biogás	vol2mass ()
Convertir el volumen de gas en moles	vol2mol ()

**Nota:** Funciones básicas del paquete “*Biogás Package*” tomadas de Hafner, S. D., Koch, K., Carrere, H., Astals, S., Weinrich, S., & Rennuit, C. (2018). Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production. *SoftwareX*, 7, 205–210.

### **8.2.2. Estimación de la Cantidad de Biogás Producido**

Para ello se uso el Software “R” con ayuda del paquete de programación “biogás package” diseñado por Sasha Hafner, está caracterizado por las simulaciones estequiometrias planteadas en el libro de Rittmann (Rittmann et al, 2020), particularmente se orientan en la aplicación de semirreacciones, que se separan en la reacción de oxidación del donante, del receptor de electrones y de síntesis celular, la ilustración 4 demuestra el proceso de división del rendimiento de la reacción general para el desarrollo bacteriano, distinguida como estequiometria determinada en las bacterias.

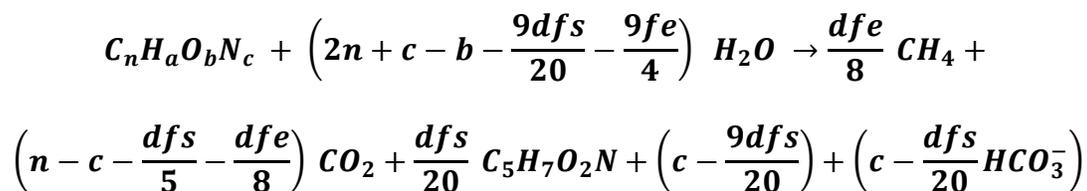
**Ilustración 4.** Generación de energía y síntesis celular en el desarrollo oxidativo microbiano.



**Fuente:** BENETTI, Antônio D. y AQUINO, Sérgio F. (2010)

Debido a que el paquete “biogás package” considera las secciones proporcionadas del donador de  $e^-$  hacia la generación de energía (fe) y la síntesis celular (fs), donde la producción de energía se relaciona con la proporción de biogás generado por el rendimiento en la DA, durante el tiempo que el segmento fs es determinante para la formación de biomasa. Por lo cual el software necesita las siguientes vinculaciones estequiometrias hacia los pronósticos de la proporción de metano producido. La reacción 11 es la suma de las semirreacciones, en consecuencia es posible el pronóstico de la generación de metano y en la cual se fundamentó en determinar la fe y la fs.

### Reacción 11



Donde:

- $f_s$  = Proporción para la síntesis celular.
- $f_e$  = Proporción para la obtención de energía.
- $d = 4n + a - 2b - 3c$

### 8.2.2.1. Cálculo de la Fracción de Síntesis Celular y Energía Final.

La estequiometría de reacciones es un poco diferente de los sistemas biológicos a la química, ya que las reacciones microbianas habitualmente involucran la reducción y oxidación de muchas especies, incluso porque los organismos microscópicos son sincrónicamente los productos y los catalizadores de las reacciones, igualmente estos microorganismos ponen en funcionamiento semirreacciones bioquímicas, con el objeto de conseguir la potencia necesaria para dividir el anabolismo celular y para poder mantener las células. Conforme a lo anterior dado el procedimiento biológico de estas aguas residuales se debe considerar el gasto de reactivos, la configuración de productos, y la obtención de biomasa (Benetti et al. 2010).

En la ecuación 1 se evidencia la manera de determinar la energía necesaria para transformar aquellas fuentes de carbono y nitrógeno en células a partir de Navas Salas y Peña Amaya (2020):

**Ecuación 1.** *Energía libre de Gibbs requerida para la síntesis celular*

$$\Delta G_s = \frac{\Delta G_p}{k * m} + \Delta G_c + \frac{\Delta G_n}{k}$$

Donde:

- $\Delta G_s$  = Energía libre de Gibbs [kJ/e-eq]
- $\Delta G_p$  = Energía libre de Gibbs necesaria o libre en la transformación.
- $k$  = Parte de la energía capturada a través de la transmisión, es un valor permanente (0,6)

- $\Delta G_c$  = Energía libre de Gibbs con el objeto de transformar 1,0 e-eq de piruvato en celular bacterianas, este un valor permanente (31,41 kJ/e-eq).
- $\Delta G_n$  = Energía libre de Gibbs necesaria para generar una proporción oxidada de nitrógeno en amonio.

En el siguiente método se describe la manera de determinar el  $f_s$  y  $f_e$ , es fundamental resaltar que los datos necesarios para calcular las energías libres de Gibbs enunciadas, donde el libro de Rittman denominado “Environmental Biotechnology: Principles and Applications” fue utilizado.

- A. El primer paso para identificar la fuente de nitrógeno, el donador de electrones y aceptor de electrones en este estudio, se usó el agua residual ( $C_{10}H_{19}O_3N$ ), amonio ( $NH_4^+$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).
- B. Después se determina el  $\Delta G_p$ , la cual es una aproximación mediante la energía libre de Gibbs, donde las reacciones lo utilizan para transformar la porción de carbono en el intercesor piruvato; se determina disminuyendo la potencia energética de la mezcla reducida y el donador de electrones, el dato de la energía libre de Gibbs de esta agua residual (31,8 kJ/ (e - eq células)) se utilizó del libro de Metcalf & Eddy.

$$\Delta G_p = (-31,80 + 35,09) \left[ \frac{Kj}{e - eq \text{ células}} \right] = 3,29 \frac{Kj}{e - eq \text{ células}}$$

- C. Calcular ( $\Delta G_s$ ), ya conociendo todas las variables.

$$k = 0,6; \Delta G_c = 31,41 \text{ kJ/e - eq células}; \Delta G_n = 0 \text{ kJ/e - eq células}; m = 1 \Delta G_s =$$

$$\frac{3,29 \frac{Kj}{e - eq \text{ células}}}{(0,6)(1)} + 31,41 \left[ \frac{Kj}{e - eq \text{ células}} \right] + \frac{0}{0,6} = 36,89 \frac{Kj}{e - eq \text{ células}}$$

- D. Calcular ( $\Delta G_r$ ), esta es la energía libre de Gibbs distribuida a partir de las semirreacciones de óxido-reducción, donde se determina disminuyendo la energía del aceptor de electrones y el donador.

$$\Delta G_r = (-31,80 + 23,53) \left[ \frac{Kj}{e - eq \text{ células}} \right] = -8,27 \frac{Kj}{e - eq \text{ células}}$$

- E. A partir de la siguiente formula se determina la conexión de  $f_e/f_s$ .

$$\frac{f_e}{f_s} = - \frac{\Delta G_s}{k * \Delta G_r}$$

$$\frac{f_e}{f_s} = \frac{-36,89 \frac{Kj}{e - eq \text{ células}}}{(0,6) \left( -8,27 \frac{Kj}{e - eq \text{ células}} \right)} = 7,43$$

- F. Para obtener la relación se despeja  $f_s$ .

$$f_s = \frac{1}{1 + \frac{f_e}{f_s}} = \frac{1}{1 + 7,43} = 0,11$$

- G. Finalmente, sabiendo que  $f_s + f_e = 1$ , entonces.

$$f_e = 1 - f_s = 1 - 0,11 = 0,89$$

### 8.2.2.2. Aplicación del Software R con el Paquete de Programación “Biogás Package”.

Para obtener los resultados requeridos se realizaron dos cálculos, el primero en relación a la DQO y el segundo respecto al pH. Para obtener los primeros resultados, en el software R se

insertaron ciertos valores de los parámetros fisicoquímicos del POME, los datos agregados fueron: la DQO, concentración de sustrato, degradabilidad (fd), producción de energía (fe), síntesis celular (fs) y la temperatura. Como se evidencia en la siguiente ilustración.

**Ilustración 5.** *Parámetros insertados en el programa respecto a la DQO.*

```
predBg(mcomp = c(C10H19O3N=1), mass = 1, COD = 82.225,
conc.sub = 50, fd = 1, fs = 0.11, temp = 35, value="all")
```

**Fuente:** Autoría propia, a partir de: el paquete “biogás package”.

Cabe resaltar que los resultados extraídos son respecto a 1 gramo de biomasa de esta agua residual y un flujo de desechos con una DQO de 82225 ppm, igual a 82,225 g O<sub>2</sub>/L. Por este motivo se obtienen los siguientes resultados:

**Ilustración 6** *Resultados del cálculo de CH<sub>4</sub> respecto a la DQO.*

A data.frame: 1 × 5				
COD	fd	fs	fe	vCH4
<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
82.225	1	0.11	0.89	25568.02

**Fuente:** Autoría propia, a partir de: el paquete “biogás package”.

Según los resultados de la ilustración 6, no se debe esperar más de 25568,02 ml de CH<sub>4</sub> y probablemente mucho menos, todo depende de cómo se comporte la DQO y el sustrato dentro del proceso.

Para obtener los segundos resultados, se insertaron en el software R, los siguientes datos del POME: pH, concentración de sustrato, degradabilidad (fd), producción de energía (fe), síntesis celular (fs) y la temperatura, como se muestra a continuación:

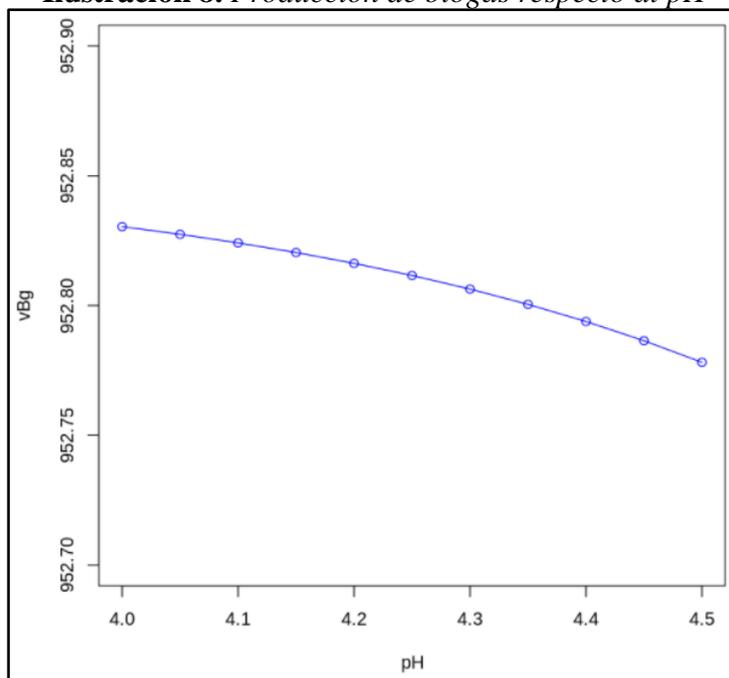
**Ilustración 7.** *Parámetros insertados en el programa respecto al pH.*

```
predBg(mcomp = c(C10H19O3N=1), mass = 1, conc.sub = 50,
pH = c(4,4.05,4.1,4.15,4.2,4.25,4.3,4.35,4.4,4.45,4.5),
fd = 1, fs = 0.11, temp = 35, value = "all")
```

**Fuente:** Autoría propia, a partir de: el paquete “biogás package”.

Para el segundo caso se insertó un pH dentro de un rango de 4 y 4,5 unidades, obteniendo la obtención de biogás respecto a ese pH, como se logra evidenciar en la ilustración 8.

**Ilustración 8.** *Producción de biogás respecto al pH*



**Fuente:** Autoría propia, a partir de: el paquete “biogás package”.

En la ilustración 8 es posible evidenciar, que cuando el POME tiene un pH más alto la productividad de biogás va a ser menor, ya que el pH promedio de esta agua residual es de 4,27 unidades, se estima una producción de biogás de 952,8095 mL por gramo de DQO degradado, en cual está compuesto por un flujo de 618,0135 mL de CH<sub>4</sub> y 334,7961 mL de CO<sub>2</sub>. Pero hay que tener en consideración que la DQO va a ser de 1,99 g O<sub>2</sub>/L en el efluente a la salida del reactor, lo que es un valor muy distinto al presentado en el afluente (POME).

### 8.3. Factibilidad Técnica del Proceso de Producción de Biogás en el Tratamiento del POME Utilizando la Digestión Anaerobia.

#### 8.3.1. Balance de Masa del Proceso

El balance de masa se determinó en límites de demanda química de oxígeno dentro del proceso, con ayuda de la metodología de grados de libertad formulada por Reklaitis, identificándose a partir de la ecuación 2 (Reklaitis & Schneider, 1983).

**Ecuación 2.** *Grados de libertad para el balance de materia*

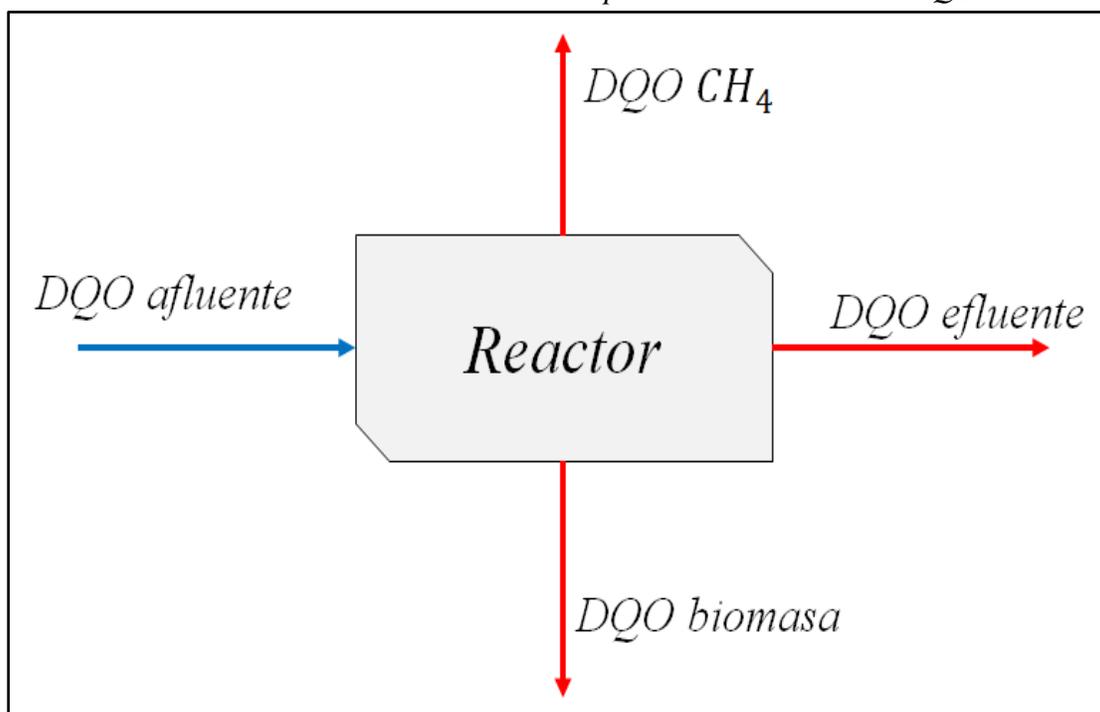
$$GL = \# \text{ de variables desconocidas independientes}$$

$$- \# \text{ ecuaciones de balance independientes}$$

$$- \# \text{ ecuaciones independientes especificadas} - \# \text{ configuracion adicional}$$

Debido a que la DA satisface con el balance de masa, es oportuno desarrollar el esquema que se evidencia en la ilustración 9.

**Ilustración 9.** *Balance de masa del proceso en términos de DQO*



**Fuente:** Autoría propia

Donde la DQO se encuentra caracterizada por 3 salidas y 1 entrada, de las cuales las variables que son distinguidas son la demanda química de oxígeno del agua que ingresa, la DQO del biogás que se encuentra representada en cuanto al metano y la DQO del efluente, en consecuencia la única variable que no se conoce es la proporción de DQO que se localiza en el reactor para el anabolismo de la biomasa, debido a esto se ubican con 0 grados de libertad conforme al balance global, lo que determina de manera correcta el problema.

Para calcular la DQO de la biomasa se utilizó la ecuación 3, en la cual se despeja esta DQO a partir de lo utilizado por Navas Salas y Peña Amaya (2020), según a lo evidenciado seguidamente:

**Ecuación 3.** *Balance de masa en términos de DQO*

$$DQO_{in} - DQO_{Bm} - DQO_{out} - DQO_{CH_4} = 0$$

$$Entradas - Salidas = Acumulacion$$

$$DQO_{Bm} = DQO_{in} - DQO_{out} - DQO_{CH_4}$$

Donde:

- $DQO_{Bm}$  = DQO biomasa (g O<sub>2</sub>/L)
- $DQO_{out}$  = DQO agua que sale (g O<sub>2</sub>/L) = 1,99 g O<sub>2</sub>/L
- $DQO_{in}$  = DQO del agua que ingresa (g O<sub>2</sub>/L) = 82,225 g O<sub>2</sub>/L
- $DQO_{CH_4}$  = DQO metano que se encuentra en el biogás (g O<sub>2</sub>/L)

Entonces como la DQO de la biomasa es aquel dato que no se conoce, la que se determina después de se obtiene la DQO del metano generado en el reactor en virtud del sistema de programación del software R, obteniendo un resultado de 71,405 mg DQO/L, la DO de la biomas es de 8,83 mg O<sub>2</sub>/L. El cálculo para el balance de materia se observa continuación.

$$DQO_{Bm} = 82,225 \frac{g O_2}{L} - 1,99 \frac{g O_2}{L} - 71,405 \frac{g O_2}{L}$$

$$DQO_{Bm} = 8,83 \frac{g O_2}{L}$$

$$82,225 \frac{g O_2}{L} - 8,83 \frac{g O_2}{L} - 1,99 \frac{g O_2}{L} - 71,405 \frac{g O_2}{L} = 0$$

### 8.3.2. Balance de Energía del Proceso

Una de las principales características en la evaluación de un proceso bioquímico, está dado por el balance de energía global, por la cual se considera tener en mente el criterio de no generación, ni destrucción de energía, con este fundamento se desarrolla el balance en un reactor típico se utilizó la ecuación 4 (Navas Salas & Peña Amaya, 2020).

#### **Ecuación 4.** Balance de energía global

$$E_e - W_b - W_v - W_m = E_d$$

Donde:

- $E_d$  = La potencia disponible (W)
- $W_m$  = Potencia requerida para el motor del mezclador (W)
- $W_v$  = Potencia requerida para la válvula de control (W)
- $W_b$  = Potencia requerida para la bomba de diafragma (W)
- $E_e$  = Potencial de energía eléctrica (W)

Por otra parte, para determinar la capacidad energética del biogás generado en un reactor se debe de utilizar el poder calorífico inferior (LHV), del cual se utilizó la ecuación 5.

#### **Ecuación 5.** Flujo energético del biogás producido.

$$E_p = LHV * Q_{BgRE}$$

$$E_p = 6270 \frac{W}{m^3} * \left( 952,8095 \text{ ml Bg} * \frac{1 \text{ L Bg}}{1000 \text{ ml Bg}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ Bg}}{1000 \text{ L Bg}} \right) = 5,98 \text{ W}$$

Con ayuda de la ecuación 6 se puede realizar el cálculo del potencial que se puede obtener para la producción de electricidad a partir del biogás generado, aclarando que no se tendrá en cuenta que no se utiliza ningún tipo de depuración, en la cual el dato correspondiente a 0,33 es el factor de conversión debido a que es un método actual de energía y calor combinado y 0,85 es la eficacia habitual de un mecanismo de inyección (combustión).

**Ecuación 6.** *Potencial de generación eléctrica.*

$$E_e = E_p * 0,33 * 0,85$$

$$E_e = 5,98 W * 0,33 * 0,85 = 1,68 W$$

Para el LHV, se tomó una constante de 6270 W/m<sup>3</sup>, la cual puede variar según el contenido de gas metano en el biogás, lo que posteriormente sirvió para determinar la generación energética que tiene el biogás. En cuanto a la energía necesaria de los aparatos habituales que consumen electricidad (bomba de diafragma, válvula de control y motor mezclador) se despreciaron, dado que la evaluación energética se realizó respecto al biogás producido.

De acuerdo a lo anterior el para el cálculo del balance de energía, se realizó de la siguiente manera:

$$E_e - W_b - W_v - W_m = E_d ;$$

$$E_d = 1,68 W - 0 W - 0 W - 0 W = 1,68 W$$

En la tabla 4, se identifican los resultados que se obtuvieron de la energía con que se dispone del biogás generado.

**Tabla 4.***Balance energético del proceso*

<b>Características del biogás</b>	<b>Reactor Típico</b>
Flujo de gas (ml*g DQO)	952,8095
% CH <sub>4</sub>	64.87
% CO <sub>2</sub>	35.13
LHV (W/m <sup>3</sup> )	6270
<b>Energía disponible</b>	
Flujo energético del biogás (W)	5,98
Potencia energía eléctrica (W)	1,68
Potencia de la bomba (W)	0
Potencia del mezclador (W)	0
Potencia de la válvula (W)	0
Flujo energético con que se dispone (W)	1,68

**Nota:** Autoría propia

De acuerdo a la tabla 4, se puede determinar que la energía con que se dispone es de 1,68 W, igual que al potencial de generación eléctrica del biogás debido a que se desprecian las potencias de los equipos asociados, además se puede concluir que se puede aprovechar un 28,1% de esta energía generada del biogás, para la producción de electricidad.

### **8.3.3. Viabilidad Técnica del Proceso de Producción de Biogás a Partir del POME.**

A partir de los resultados obtenidos se pudo identificar que la factibilidad técnica para la generación de biogás es eficaz ya que la demanda química de oxígeno es alta lo cual es viable para la producción de biogás.

Durante un tiempo atrás uno de los trabajos más complicados que existen es identificar, qué subproducto se puede generar a partir del agua residual en este caso toda aquella que es

proveniente de la industria de la palma aceitera, por esto se planteó verificar qué tan importante y significativo sería tratar estas aguas residuales y aprovechar los subproductos derivados de las mismas.

Se obtuvo un flujo de biogás de 952,8095 ml por gramo de DQO degradado, del cual se espera que se tenga un potencial de generación eléctrica de 1,68 W, lo que quiere decir que se puede utilizar un 28,1% de la energía generada del biogás, para la producción de electricidad, De acuerdo a estos resultados se tendría una generación de electricidad de 1,68 Wh por cada gramo de DQO que se esté degradando en el reactor.

Entonces como en un litro de POME se tiene 82,225 g de DQO, se tiene 138,138 Wh en un litro de POME, lo que quiere decir que por cada litro tratado en la digestión anaerobia se tendría un beneficio económico de 87,86 pesos, pero a una escala más real se tienen mayores beneficios como se muestra en la tabla 5, lo que demuestra que la producción biogás es viable y tiene un mejoramiento del entorno de donde se encuentran estas industrias.

**Tabla 5**

*Beneficios económicos de la producción de biogás a distintos volúmenes de POME tratados.*

<b>Volumen de POME tratado (L)</b>	<b>Beneficio económico (\$)</b>
300	26358
600	53716
1000	87860
6000	527160
12000	1054320

**Nota:** Elaboración propia

## 9. Conclusiones

Dentro del análisis se identificaron las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales provenientes de la industria de la palma aceitera, logrando nuevos conocimientos como la composición y de la eficiencia del tratamiento de esta agua residual mediante la digestión anaerobia.

Se observó que en el proceso de producción de biogás hay una alta demanda química de oxígeno con un promedio 82,225 g de  $O_2/L$ , la cual es viable para la producción de biogás como se evidenció en los resultados obtenidos por medio del software R.

Se obtuvo como resultado mediante el uso del software R la cantidad de biogás que se podía producir por medio de los efluentes residuales provenientes de la industria de palma aceitera, la cual es de 952,8095 ml por gramo de DQO degradado, en cual está compuesto por un flujo de 618,0135 mL de  $CH_4$  y 334,7961 mL de  $CO_2$ . Pero se debe tener en cuenta que la DQO va a ser de 1,99 g  $O_2/L$  en el efluente a la salida del reactor.

Finalmente se determinó que la factibilidad técnica del proceso de producción de biogás es viable ya que se obtienen beneficios económicos donde por cada litro de POME tratado con la digestión anaerobia se tendrá un beneficio económico de 86,87 pesos. Además de mitigar la contaminación al medio ambiente evitando el vertimiento de aguas residuales a fuentes hídricas.

## 10. Recomendaciones

Se recomienda continuar con la revisión de este tipo de tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de producir biogás y si es posible realizar algún proyecto de investigación que abarque el diseño e implementación de la digestión anaerobia del POME proveniente de las industrias palmeras, para la producción de biogás a una escala de laboratorio o a una industrial.

En el caso de hacer uso del POME para llevar a cabo la producción de biogás, es de vital importancia realizar el análisis y caracterización de todos los componentes que contiene el efluente que ingresa al sistema de tratamiento de agua residual y así poder diferenciar claramente la eficiencia generada por la digestión anaerobia en la remoción de contaminantes.

Es viable seguir profundizando sobre la digestión anaerobia para la producción de biogás por medio de la industria de la palma aceitera ya que resultará beneficioso para el medio ambiente y para la población.

Orientando esta investigación en el ámbito económico resultará beneficioso ya que por medio de este biogás se podrán disminuir los costos en la producción de energía y así mismo obtener nuevos ingresos por medio de dicho proceso.

### Referencias Bibliográficas

- Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1260–1278. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.10.073>
- Alkhatib, M. F., Mamun, A. A., & Akbar, I. (2014). Application of response surface methodology (RSM) for optimization of color removal from POME by granular activated carbon. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2014 12:4, 12(4), 1295–1302. <https://doi.org/10.1007/S13762-014-0504-4>
- Althausen, M. (2016). Palm Oil Mill Effluent Treatment-Converting a Residue into a Resource. *Revista Palmas*, 37, 31–37.
- Arrieta, F. R. P., Teixeira, F. N., Yáñez, E., Lora, E., & Castillo, E. (2007). Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 503–511. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2007.01.016>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2018.01.011>
- Baquero Cadena, L. R., & Murillo Malpica, C. M. (2019). *Evaluación de la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de lodos residuales de la PTAR Villas del Nuevo Siglo, en la Mesa-Cundinamarca*. 34–35.  
<https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7613>

Blanco, V. M. C., Oliveira, G. H. D., & Zaiat, M. (2019). Dark fermentative biohydrogen production from synthetic cheese whey in an anaerobic structured-bed reactor: Performance evaluation and kinetic modeling. *Renewable Energy*, *139*, 1310–1319.

<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.03.029>

R. Scott Frazier, & Pius Ndegwa. (n.d.). *Biogas Utilization and Cleanup – Farm Energy*.

Retrieved November 18, 2021, from <https://farm-energy.extension.org/biogas-utilization-and-cleanup/>

Teng, Z., Hua, J., Wang, C., & Lu, X. (2014). Design and optimization principles of biogas reactors in large scale applications. *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology*, 99–134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59566-9.00004-1>

BENETTI, Antônio D. y AQUINO, Sérgio F. Aplicação de princípios de bioenergética no cálculo da estequiometria de reações biológicas em processos de tratamento de águas residuárias Application of bioenergetic principles to the stoichiometry of biological reactions in wastewater treatment processes. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*. 2010, vol. 15, nro. 3. pp. 245-250

Castellanos-Navarrete, A., de Castro, F., & Pacheco, P. (2021). The impact of oil palm on rural livelihoods and tropical forest landscapes in Latin America. *Journal of Rural Studies*, *81*, 294–304. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2020.10.047>

Carro de Combate. (2017, April 20). *El aceite de palma provoca sed: impactos en el agua del monocultivo – Carro de combate*. <https://www.carrodecombate.com/2017/04/20/el-aceite-de-palma-provoca-sed-impactos-en-el-agua-del-monocultivo/>

- Chia, W. Y., Chong, Y. Y., Chew, K. W., Vimali, E., Jayaram, M., Selvarajoo, A., Muthuvelu, K. S., Varalakshmi, P., Show, P. L., & Arumugasamy, S. K. (2020). Outlook on biorefinery potential of palm oil mill effluent for resource recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104519. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104519>
- Conama, F. (2020). Agua y Economía Circular. *Fundación Conama*, 88.
- Fedepalma, 2019 Fedepalma, Sispa: Sistema de información estadística del sector palmero de Colombia (2019). <http://sispa.fedepalma.org/login.aspx>
- Florence, P. S., Nandong, J., & Samyudia, Y. (2009). Optimised treatment of palm oil mill effluent. *International Journal of Environment and Waste Management*, 3(3–4), 265–277. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2009.026343>
- Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters* (Vol. 1) 57 - 58.
- Kadam, R., & Panwar, N. L. (2017). Recent advancement in biogas enrichment and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 892–903. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.167>
- Khadaroo, S. N. B. A., Poh, P. E., Gouwanda, D., & Grassia, P. (2019). Applicability of various pretreatment techniques to enhance the anaerobic digestion of Palm oil Mill effluent (POME): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103310. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2019.103310>
- Hafner, S. D., Koch, K., Carrere, H., Astals, S., Weinrich, S., & Rennuit, C. (2018). Software for biogas research: Tools for measurement and prediction of methane production. *SoftwareX*,

7, 205–210. <https://doi.org/10.1016/J.SOFTX.2018.06.005>

Hu, C., Yan, B., Wang, K. J., & Xiao, X. M. (2018). Modeling the performance of anaerobic digestion reactor by the anaerobic digestion system model (ADSM). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2095–2104.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.018>

Ibañez, E. (2019). *Estudio de la generación y composición de biogás en tratamiento de efluentes con biodigestores carpados en la industria de extracción de aceite de palma mediante simulación*.

[https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7108/2019\\_Tesis\\_Eduard\\_Ibañez\\_Reyes.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7108/2019_Tesis_Eduard_Ibañez_Reyes.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Lee, Z. S., Chin, S. Y., Lim, J. W., Witoon, T., & Cheng, C. K. (2019). Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 15, 100377.

<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2019.100377>

Liew, Z. K., Chan, Y. J., Ho, Z. T., Yip, Y. H., Teng, M. C., Ameer Abbas bin, A. I. T., Chong, S., Show, P. L., & Chew, C. L. (2021). Biogas production enhancement by co-digestion of empty fruit bunch (EFB) with palm oil mill effluent (POME): Performance and kinetic evaluation. *Renewable Energy*, 179, 766–777.

<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.07.073>

Lokman, N. A., Ithnin, A. M., Yahya, W. J., & Yuzir, M. A. (2021). A brief review on biochemical oxygen demand (BOD) treatment methods for palm oil mill effluents (POME).

*Environmental Technology & Innovation*, 21, 101258.

<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101258>

Louhasakul, Y., Treu, L., Kougias, P. G., Campanaro, S., Cheirsilp, B., & Angelidaki, I. (2021).

Valorization of palm oil mill wastewater for integrated production of microbial oil and biogas in a biorefinery approach. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126606.

<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126606>

Low, S. S., Bong, K. X., Mubashir, M., Cheng, C. K., Lam, M. K., Lim, J. W., Ho, Y. C., Lee,

K. T., Munawaroh, H. S. H., & Show, P. L. (2021). Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (Pome) treatment and biofuel production. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6).

<https://doi.org/10.3390/su13063247>

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10).

<https://doi.org/10.3390/IJERPH15102224>

Meijaard, E., & Sheil, D. (2019). The Moral Minefield of Ethical Oil Palm and Sustainable Development. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 22.

<https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00022>

Min. de agricultura. (2020). *CADENA DE PALMA DE ACEITE Indicadores e Instrumentos*.

Mishra, A., Kumar, M., Bolan, N. S., Kapley, A., Kumar, R., & Singh, L. (2021).

Multidimensional approaches of biogas production and up-gradation: Opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, 338, 125514.

<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125514>

Mohammed, R. R., & Chong, M. F. (2014). Treatment and decolorization of biologically treated Palm Oil Mill Effluent (POME) using banana peel as novel biosorbent. *Journal of Environmental Management*, *132*, 237–249.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2013.11.031>

Navas Salas, J. E., & Peña Amaya, J. F. (2020). *Desarrollo de una propuesta para la producción de biogás en un reactor anaerobio de lecho estructurado (ASTBR) para la vereda Calderón, Puerto Boyacá*. 28–30.

<https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8125>

Ng, K. H. (2021). Adoption of TiO<sub>2</sub>-photocatalysis for palm oil mill effluent (POME) treatment: Strengths, weaknesses, opportunities, threats (SWOT) and its practicality against traditional treatment in Malaysia. *Chemosphere*, *270*, 129378.

<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.129378>

Nie, E., He, P., Zhang, H., Hao, L., Shao, L., & Lü, F. (2021). How does temperature regulate anaerobic digestion? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *150*, 111453.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111453>

O-Thong, S., Boe, K., & Angelidaki, I. (2012). Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas production. *Applied Energy*, *93*, 648–654. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.12.092>

Onoja, E., Chandren, S., Abdul Razak, F. I., Mahat, N. A., & Wahab, R. A. (2018). Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Biomass in Malaysia: The Present and Future Prospects. *Waste and Biomass Valorization* *2018 10:8*, *10(8)*, 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/S12649-018->

[0258-1](#)

Perez, A., & Ríos, M. (2018). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA DE LA EMPRESA CI SIGRA S.A.* [FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA].

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6730/1/6131008-2018-1-IQ.pdf>

Poh, P. E., & Chong, M. F. (2009). Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresource Technology*, *100*(1), 1–9.

Razali, N., & Kamarulzaman, N. Z. (2020). Chemical characterizations of biochar from palm oil trunk for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Materials Today: Proceedings*, *31*, 191–197. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.219>

Reklaitis, G., & Schneider, R. (1983). *Introduction to material and energy balances*. Wiley.

RITTMANN, Bruce E., Ph. D. y MCCARTY, Perry L., Sc. D. *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, Second Edition. Second edition. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020. ISBN 9781260441604

Saad, M. S., Wirzal, M. D. H., & Putra, Z. A. (2021, May 15). Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system. *Journal of Environmental Management*, *286*, 112209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112209>.

Shiun Lim, J., Alafiza Yunus, N., Jaromír Klemeš, J., Mohtar, A., Ravi, A., Shin Ho, W., Wan Choy, C., Hashim, H., Ab Muis, Z., Haryani Hassim, M., & Xin Yee Mah, A. (2021). Mathematical Optimisation of Biogas Production and Utilisation. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, *83*, 2021. <https://doi.org/10.3303/CET2183075>

- Suksong, W., Tukanghan, W., Promnuan, K., Kongjan, P., Reungsang, A., Insam, H., & O-Thong, S. (2020). Biogas production from palm oil mill effluent and empty fruit bunches by coupled liquid and solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 296, 122304. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122304>
- Tan, Y. Y., Bello, M. M., & Abdul Raman, A. A. (2021). Towards cleaner production in the palm oil industry: Advanced treatment of biologically-treated POME using palm kernel shell-based adsorbent. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100079. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100079>
- Tan, Y. D., & Lim, J. S. (2019). Feasibility of palm oil mill effluent elimination towards sustainable Malaysian palm oil industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 507–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.043>.
- Teng, Z., Hua, J., Wang, C., & Lu, X. (2014). Design and optimization principles of biogas reactors in large scale applications. *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology*, 99–134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59566-9.00004-1>
- Triviño, S. (2018, Julio). *Realidades socio ambientales del aceite de palma y los bio-combustibles en Colombia - Crudo Transparente*. <https://crudotransparente.com/2018/06/19/realidades-socioambientales-del-aceite-de-palma-y-los-agrocombustibles-en-colombia/>
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de biogás*. P. 43.
- Wadchasit, P., Suksong, W., O-Thong, S., & Nuithitikul, K. (2021). Development of a novel reactor for simultaneous production of biogas from oil-palm empty fruit bunches (EFB) and

palm oil mill effluents (POME). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105209. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105209>

Yoshizaki, Y. Shirai, M.A. Hassan, A.S. Baharuddin, N.M. Raja Abdullah, A. Sulaiman, Z. Busu  
Improved economic viability of integrated biogas energy and compost production for sustainable palm oil mill management *J. Clean. Prod.*, 44 (2013), pp. 1-7

Zhang, J., Li, Y., Wu, B., Huang, X., Hou, Z., & Chen, R. (2021). Performance and mechanism of in-situ biogas upgrading using anaerobic membrane bioreactor effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102323. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2021.102323>

Zinatizadeh, A. A. L., Mohamed, A. R., Mashitah, M. D., Abdullah, A. Z., & Isa, M. H. (2007). Optimization of pre-treated palm oil mill effluent digestion in an up-flow anaerobic sludge fixed film bioreactor: A comparative study. *Biochemical Engineering Journal*, 35(2), 226–237. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2007.01.018>