

**ESTUDIO ANALÍTICO DE LAS RUTAS DE CONVERSIÓN PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE EXTRAÍDO DE PALMA
AFRICANA (*ELAEIS GUINEENSIS JACQ.*)**

MARIA CRISTINA QUIROS CELIS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, JUNIO 02 DE 2021

**ESTUDIO ANALÍTICO DE LAS RUTAS DE CONVERSIÓN PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE EXTRAÍDO
DE PALMA AFRICANA (*ELAEIS GUINEENSIS JACQ.*)**

MARIA CRISTINA QUIROS CELIS

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIER(A)O QUIMIC(A)O**

Director: ANA MARIA ROSSO CERON
Doctora en Ingeniería Química

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, junio 02 de 2021

Dedicatoria

Dedico este proyecto primeramente a Dios, por iluminarme y estar a mi lado en todo momento. A mis padres, y mi familia porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la capacidad para realizar y culminar este trabajo. Él me ha guiado en mi camino y ha sido un pilar fundamental en mi vida. Agradecimiento especial a mi directora de monografía, la doctora en ingeniería química Ana Maria Rosso, quien me brindo todo su apoyo y conocimiento para lograr concluir con éxito el desarrollo de este documento. A cada uno de mis profesores, que sin duda, cada uno de sus aportes fue indispensable para mi formación profesional. A mi madre por su apoyo y amor incondicional en cada uno de los momentos que se tornaron difíciles, Agradezco también a mi familia por brindarme apoyo incondicional para salir adelante y lograr culminar mis estudios universitarios.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	11
2. INTRODUCCIÓN.....	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. OBJETIVOS.....	14
4.1 Objetivo general.....	14
4.2 Objetivos específicos.....	14
5. METODOLOGÍA.....	15
6. BIOCOMBUSTIBLES.....	16
6.1 Clasificación de los biocombustibles.....	16
6.1.1 Primera generación.....	16
6.1.2 Segunda generación.....	16
6.1.3 Tercera generación.....	16
6.1.4 Cuarta generación.....	17
6.2 Biodiésel.....	18
7. CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA.....	19
7.1 Palma africana (<i>Elaeis Guineensis</i>).....	19
7.1.1 Tipos de palma africana (<i>Elaeis Guineensis</i>).....	21
7.1.2 Fruto de la palma de aceite.....	22
7.1.2.1 Propiedades físicas.....	22
7.1.2.2 Propiedades químicas.....	23
7.1.3 Generalidades del aceite de palma africana (<i>Elaeis Guineensis</i>).....	24
8. PROCESOS Y TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA.....	24
8.1 EXTRACCIÓN MECÁNICA.....	25

8.1.1 Recepción y Evaluación de la Calidad de los Frutos de Palma.....	25
8.1.2 Tratamiento Térmico de frutos de palma.....	26
8.1.2.1 Inactivación de la lipasa.....	26
8.1.2.2 Desprendimiento de los frutos, ablandando la unión entre ellos.....	26
8.1.2.3 Ablandamiento de los tejidos de la pulpa.....	26
8.1.2.4 Deshidratación parcial de las almendras contenidas en las nueces para facilitar su posterior recuperación.....	27
8.1.2.5 Coagular proteínas.....	27
8.1.2.6 Hidrolisis y descomposición del material mucilaginoso (gomas).....	27
8.1.3 Desfrutado.....	27
8.1.4 Digestión.....	27
8.1.5 Prensado.....	28
8.1.6 Clarificación.....	28
8.1.6.1 Clarificación estática.....	28
8.1.6.2 Clarificación dinámica.....	28
8.1.7 Extracción de aceite de palmiste.....	28
8.1.7.1 Desfibración de la torta y recuperación de la nuez.....	29
8.1.7.2 Secado de la nuez.....	29
8.1.7.3 Trituración de la nuez.....	29
8.1.8 Tecnologías existentes para el tratamiento térmico del fruto de la palma.....	30
8.1.8.1 Esterilización con microondas.....	30
8.1.8.2 Esterilización con dióxido de carbono súper crítico (SC-CO ₂).....	30
8.1.8.3 Esterilización continua.....	31
8.1.9 Tecnologías emergentes para la extracción de aceite de palma.....	31
8.1.10 Calidad del aceite de palma.....	32
9. PROCESO DE REFINADO DEL ACEITE CRUDO DE PALMA.....	33
9.1 Desgomado.....	33

9.2 Neutralización.....	34
9.3 Blanqueado.....	34
9.4 Desodorizado.....	35
10. PRINCIPALES RUTAS PARA LA PRODUCCION DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA.....	35
10.1 Transesterificación.....	36
10.1.1 Tipos de catálisis.....	37
10.2 Catalizadores Homogéneos.....	37
10.2.1 Transesterificación catalítica de base homogénea.....	37
10.2.2 Transesterificación catalítica de ácido homogéneo.....	38
10.3 Transesterificación catalítica heterogénea.....	40
10.3.1 Transesterificación catalítica heterogénea solido-base.....	41
10.3.2 Transesterificación catalítica heterogénea solido-acido.....	42
10.3.3 Transesterificación biocatalítica.....	42
10.3.4 transesterificación no catalítica: método del alcohol súper critico.....	43
10.4 Otras tecnologías de producción.....	44
10.4.1 Transesterificación asistida por ultrasonidos.....	44
10.4.2 Transesterificación asistida por microondas.....	45
10.5 Pirólisis.....	46
10.5.1 Clasificación de pirólisis.....	47
10.5.2 Elección del reactor de pirólisis.....	48
10.5.3 Efecto del catalizador en los procesos de pirólisis.....	48
10.6 Microemulsificación.....	49
11. ESPECIFICACIONES DE LA CALIDAD DEL BIODIÉSEL DE ACEITE DE PALMA.....	49
12. COMPARACIÓN DE LAS RUTAS DE CONVERSIÓN MEDIANTE ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD.....	51
13. CONCLUSIONES.....	57

14. RECOMENDACIONES.....	57
15. BIBLIOGRAFÍA.....	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los biocombustibles.....	17
Tabla 2. Plantas productoras de biodiésel en funcionamiento.....	19
Tabla 3. Composición ideal del racimo de fruto de palma.....	22
Tabla 4. Análisis elemental, proximal y calorífico de las propiedades químicas del fruto de la palma de aceite.....	23
Tabla 5. Perfil de ácidos grasos del aceite crudo de palma.....	24
Tabla 6. Requisitos para el aceite crudo de palma africana.....	33
Tabla 7. Tipos de catalizadores empleados en la producción de biodiesel.....	37
Tabla 8. Condiciones típicas de reacción para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma mediante transesterificación catalizada por bases.....	38
Tabla 9. Condiciones típicas de reacción para la producción de biodiesel por transesterificación ácida.....	38
Tabla 10. Ventajas y desventajas de los catalizadores homogéneos en medio ácido y básico usados en la transesterificación de aceites.....	39
Tabla 11. Estudios de literatura sobre la transesterificación catalizada por bases heterogéneas.....	41
Tabla 12. Condiciones de operación supercrítica de diferentes alcoholes.....	44
Tabla 13. Condiciones empleadas en los análisis del proceso de transesterificación por ultrasonido.....	45
Tabla 14. Parámetros de operación investigados en el estudio de transesterificación por microondas.....	46
Tabla 15. Parámetros de operación reportados en la investigación.....	46
Tabla 16. Clasificación, parámetros y productos obtenidos de los tipos de pirolisis.....	47
Tabla 17. Rendimientos por craqueo catalítico térmico de aceite de palma crudo a partir de diferentes tipos de catalizador y reactor.....	48
Tabla 18. Especificaciones de la norma de técnica colombiana NTC 5444 para mezclas con combustible diésel.....	50
Tabla 19. Comparación de las rutas de conversión.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principales zonas productoras de palma de aceite en Colombia, 2020.....	20
Figura 2. Tipos de palma aceitera <i>Elaeis Guineensis</i> ; Dura, Tenera y Pisifera, y porcentaje de cuesco (endocarpio), pulpa (mesocarpio) y almendra (endospermo).....	21
Figura 3. Racimo y fruta de palma de aceite.....	22
Figura 4. Etapas del proceso de extracción del aceite crudo de palma.....	25
Figura 5. Etapas para la extracción de aceite de palmiste.....	29
Figura 6. Etapas de la reacción de transesterificación.....	36

1. RESUMEN

En el presente trabajo de revisión bibliográfica se pretende dar a conocer la importancia de las principales rutas de conversión para la producción de biodiesel a partir de aceite extraído del fruto de palma africana (*Elaeis guineensis jacq*). Para este fin, la presente monografía se desarrolló con una metodología estructurada en 16 secciones, realizando una investigación bibliográfica tipo exploratoria de nivel básico. En la sección 5, se describe de una manera concisa los biocombustibles y su clasificación, al igual que el panorama actual del biodiesel. Luego se encuentra la sección 6 que abarca las características tanto físicas como químicas del cultivo de la palma de aceite al igual que del fruto de donde se obtiene el aceite. Seguidamente en la sección 7, se explican las etapas para llevar a cabo el proceso de extracción de aceite crudo de palma, asimismo, las tecnologías que actualmente se experimentan para sustituir los métodos de vaporización y prensado que actualmente se practican en los molinos de palma de aceite. Luego en la sección 8, se especifican los procesos a los cuales el aceite crudo de palma debe someterse para su posterior transformación a biocombustible. Finalmente, se encuentran las últimas 3 secciones, en las cuales se abarcan las principales rutas de conversión, condiciones de operación, características, especificaciones fisicoquímicas de los parámetros de calidad según la norma Icontec y ASTM, y por último, una discusión comparativa entre las rutas mencionadas en la sección 9 teniendo en cuenta algunos aspectos tecnológicos, ambientales y económicos.

Palabras clave: agroindustria en Colombia, calidad de biocombustibles, extracción de aceite crudo, producción de la palma de aceite, refinamiento, reacciones catalíticas, rutas de conversión.

2. INTRODUCCIÓN

El petróleo, el carbón, y el gas natural representan aproximadamente el 80% del consumo de energía primaria en el mundo (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019). Sin embargo, en los últimos años se ha impulsado la búsqueda y desarrollo de fuentes de energía renovable, con el fin de sustituir el uso de estos recursos y reducir el impacto de contaminación atmosférica de las emisiones de gases de efecto invernadero, que se derivan principalmente de los combustibles fósiles (Franco Rodríguez & Torres Ortega, 2018). Es así, como se ha logrado que hoy día el uso de fuentes de energía renovable alcancen una participación del 20%, en el cual, el uso tradicional de la biomasa representa un 10% (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019). La biomasa puede obtenerse a partir de cultivos oleaginosos, desechos agrícolas, forestales e industriales, grasas y aceites vegetales usados, todos, utilizados como recurso para la generación de biocombustibles ya sea en estado líquido, sólido o gaseoso, a través de diferentes rutas de conversión. Los biocombustibles son tecnologías sostenibles capaces de reducir la contaminación del aire y asimismo abastecer las necesidades energéticas de todo un país (Jaramillo & Manrique, 2015).

Por consiguiente, como solución al problema que se deriva en la actualidad por el uso masivo de combustibles de origen fósil, se posiciona al biodiesel como tecnología sostenible y combustible alternativo para reducir la dependencia del petróleo mediante el uso de materias primas nacionales para su producción (Llanes Cedeño & Rocha Hoyos, 2017). El biodiesel es definido químicamente como ésteres metílicos de ácidos grasos sintetizado mediante una reacción química entre alcohol y aceite en presencia de un catalizador. Su producción a partir de material biológico y residual lo hace un combustible biodegradable, renovable, no tóxico, libre de azufre y con excelentes propiedades lubricantes para su uso en motores diésel, capaz de reducir las emisiones de partículas hasta en un 75%. Por otro lado el biodiesel puede ser usado directamente en forma pura denominada B100, o en mezclas con diésel a diferentes proporciones bajo ciertos criterios de calidad dados en normas nacionales e internacionales entre las cuales se encuentra la norma técnica ICONTEC y ASTM (*American Society For Testing and Materials*) (Abdallah S & Wagih A, 2021).

Hasta ahora, en Colombia, la producción de biocombustibles está constituida por materias primas de primera generación, principalmente por palma de aceite, ya que estos cultivos poseen una alta productividad por unidad de superficie y un elevado balance energético en comparación a otros cultivos oleaginosos (Jaramillo & Manrique, 2015).

3. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación ambiental y el calentamiento global de la tierra es uno de los principales retos que enfrenta el planeta, a consecuencia de las diversas actividades que el hombre emplea entre ellas principalmente el uso masivo de minerales fósiles; que además de su naturaleza no renovable estas fuentes de energía están disminuyendo y las emisiones mundiales de CO₂ provenientes de la combustión siguen en aumento (Höök & Xu, 2013). Se considera que la quema de carbón es responsable del 40% de las emisiones de combustibles fósiles seguidas del petróleo (34%) y del gas natural (20%) (Cerrillo, 2019).

Colombia es uno de los países que ha venido desarrollando normas y acciones que controlan e intensifican el desarrollo de energías renovables, con el fin de diversificar la producción agrícola, aumentar la seguridad energética, promover el empleo y la generación de tecnologías vehiculares menos contaminantes, que prometan una correlación armoniosa con el desarrollo sostenible, la conversión de energía, la potencia energética y la preservación del medio ambiente, es así como desde el 2001 se implementaron algunos decretos o leyes (*ley 693 de 2001* y *ley 939 de 2004*), las cuales tenían como fin ampliar la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal y animal para su uso en motores diésel (Espinoza & Bautista, 2017).

Colombia se posiciona como el principal productor de palma de aceite en Latinoamérica y el cuarto a nivel mundial; dicha oleaginosa se considera uno de los recursos con mejores posibilidades para la producción de biodiesel ya que presenta un gran desarrollo en este sector (Emyle Lucia & Vega-Jurado, 2017). Anualmente se obtienen cerca de 3.78 toneladas de aceite de palma por hectárea, lo que da como resultado una producción de aproximadamente 1, 630,000 toneladas de aceite (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

Por otra parte, el sector minero-energético, en conjunto con los Ministerios de Ambiente y de Agricultura motivan el desarrollo de tecnologías más limpias y una matriz energéticamente diversificada, con el propósito de mitigar los efectos del cambio climático y mejorar la calidad del aire, aportando al cumplimiento de los compromisos adquiridos en el acuerdo de París en el que se plantea una reducción del 20% en las emisiones de gas efecto invernadero (GEI) para el año 2030 (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

En función de lo anterior y al considerar la importancia actual del uso y aprovechamiento de fuentes de energía renovable la presente propuesta de monografía se centra en realizar un estudio bibliográfico que tiene como objetivo analizar las principales rutas de conversión para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis jacq.*).

4. OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar un estudio bibliográfico sobre las rutas de conversión para la producción de biodiesel a partir de aceite extraído del fruto de palma africana (*Elaeis Guineensis Jacq.*).

Objetivos Específicos

1. Establecer las principales características del fruto de palma africana (*Elaeis Guineensis Jacq.*), y su proceso de extracción hacia aceite crudo de palma.
2. Identificar el proceso de refinación del aceite crudo de palma para su posterior transformación a biodiésel.
3. Describir las principales rutas de conversión para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana y sus especificaciones de calidad según la norma ICONTEC Y ASTM (*American Society For Testing and Materials*).
4. Comparar las rutas de conversión, teniendo en cuenta criterios tecnológicos, ambientales y económicos.

5. METODOLOGÍA

Con el fin de lograr los objetivos propuestos para la realización del presente trabajo se realizó una investigación, la cual tuvo un desarrollo tipo exploratorio de manera teórica a nivel básico con el fin de llevar a efecto un estudio analítico sobre las rutas de conversión, procesos de extracción y pre tratamiento para la producción de biodiesel a partir de aceite extraído del fruto de palma africana (*Elaeis Guineensis Jacq*) teniendo en cuenta las especificaciones de las normas.

Para llevar a cabo la investigación se desarrollaron 5 actividades. Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica en las bases de datos virtuales, entre ellas principalmente science direct, google scholar, proporcionadas por la Universidad de Pamplona e igualmente de la red de internet, con el propósito de contar con la información necesaria para documentar la monografía. En este caso se revisan únicamente documentos en inglés y español. Para la segunda actividad, se delimita la información encontrada teniendo en cuenta los objetivos planteados al inicio de la investigación, tomando así la información de mayor relevancia.

La tercera actividad consiste en la organización de la bibliografía, para esto se empleó la herramienta de Word que permite gestionar y organizar las citas bibliográficas de los documentos tomados como referencia. Para las dos últimas actividades se estudió y analizó la información reunida y por último se redacta el documento, para lo cual se estructura la monografía en 7 secciones, estado actual de los biocombustibles, características de la palma de aceite, tecnologías y métodos para el tratamiento del fruto de palma y extracción de aceite, rutas para la producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma y finalmente la comparación entre estas tecnologías.

6. BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son alcoholes, éteres, esteres, y otros compuestos orgánicos producidos a partir de cultivos oleaginosos, biomasa, y microorganismos, que a través de rutas termoquímicas, físicas y biológicas se obtienen combustibles ya sea en forma sólida, gaseosa o líquida. Por lo anterior, los biocombustibles son alternativa altamente sostenible, ya que dentro de sus prioridades de producción está la renovabilidad y neutralidad de carbono, la seguridad energética, el desarrollo tecnológico, ambiental y social (Mohd Zulkifli & Zukiman, 2020). En la actualidad, existen dos importantes tipos de biocombustible líquido para el sistema de transporte, que podrían reemplazar la gasolina y el combustible diésel; estas prometedoras fuentes son el bioetanol y el biodiésel, asumiendo que este último se use en reemplazo del diésel fósil, que al tratarse de un recurso renovable las emisiones de gases y los altos índices de CO₂ en el aire disminuirían (Demirbas, A. 2017).

6.1 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles se clasifican según la materia prima y el tipo de tecnología empleada para su producción; de esta manera, se distinguen entre biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación (Alvarez Maciel, 2009).

6.1.1 Primera Generación

Denominados primera generación a los combustibles de procedencia agrícola; derivado de plantas con alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son el jugo de la caña de azúcar o remolacha, carbohidratos aceites de semillas y frutos de cultivos oleaginosos (Ramos & Díaz, 2016; Alalwan & Alminshid, 2019).

6.1.2 Segunda Generación

Combustibles producidos a partir de biomasa no comestible proveniente de cultivos energéticos, residuos agrícolas y forestales, compuestos principalmente por material lignocelulósico; en igual forma grasas de origen animal, y aceites vegetales usados. Existen diferentes vías para elaborar biocombustible de segunda generación, dentro de ellas la vía química o bioquímica en la que se emplean microorganismos los cuales realizan ruta catabólica que se basa en la degradación de compuestos orgánicos complejos para obtener sustancias monoméricas de menor peso molecular. Por otro lado, procesos termoquímicos en los que se usan condiciones elevadas de presión y temperatura (Ramos & Díaz, 2016; Alalwan & Alminshid, 2019).

6.1.3 Tercera Generación

La producción de biocombustibles de tercera generación se encuentra aún en fase de investigación, provienen de materia prima no comestible, particularmente son microorganismos de rápido crecimiento que cuentan con una alta densidad energética

almacenada en sus componentes químicos, capaces de producir su propio alimento a partir de energía solar y CO₂ (Ramos & Díaz, 2016; Alalwan & Alminshid, 2019).

6.1.4 Cuarta Generación

La producción de biocombustibles de cuarta generación se lleva a cabo utilizando como fuente microorganismos genéticamente modificados, los cuales emplean anhídrido carbónico (CO₂) o alguna otra fuente de carbono para obtener biocombustibles a través de la fotosíntesis (Ramos & Díaz, 2016; Alalwan & Alminshid, 2019).

En relación con lo anteriormente planteado, en la tabla 1 se clasifica la materia prima y los procesos tecnológicos utilizados en la producción de los diferentes tipos de biocombustible que actualmente existen.

TABLA 1. Clasificación de los biocombustibles

CLASIFICACIÓN	MATERIAS PRIMAS	PROCESO TECNOLÓGICO	BIOCOMBUSTIBLES OBTENIDOS
PRIMERA GENERACIÓN	Aceites obtenidos de semillas de girasol, colza, soya, maní, coco o aceite de frutos como la palma. Azúcares o almidones como la remolacha, caña de azúcar, papa, trigo, o maíz.	Fermentación de azúcares o carbohidratos; esterificación y transesterificación de aceites	Biodiesel, n-butanol, biometanol, bioetanol.
SEGUNDA GENERACIÓN	Jatropha, bagazo de caña de azúcar, rastrojo de maíz, residuos de madera, hojas y ramas secas de árboles. Aceites usados y grasas de origen animal (sebo, manteca de cerdo y grasa de pollo).	Pretratamiento fisicoquímico o biológico de la materia prima, sacarificación-fermentación, hidrólisis, digestión anaerobia, pirólisis.	Biodiesel, gas de síntesis, bioetanol, biobutanol.
TERCERA GENERACIÓN	Materia prima acuática como la biomasa de algas, pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido.	Cultivo de algas, extracción de aceite, procesos bioquímicos o termoquímicos.	Biodiésel, hidrógeno, bioetanol, gas de síntesis, metano.
CUARTA GENERACIÓN	Micro algas, levaduras, hongos y cianobacterias.	Captura de carbono, cultivo, recolección, fermentación o extracción del aceite, procesos termoquímicos.	Biodiesel, bioetanol, biohidrogeno, metano gas de síntesis.

6.2 Biodiésel

El biodiésel es un combustible alternativo al diésel derivado del petróleo; muestra ser estrategia clave para reducir substancialmente la emisión de la mayoría de gases y partículas contaminantes de la atmosfera, es definido por la norma ASTM D-6751 (*American Society for Testing and Materials*) como mezcla de esterres mono alquílicos de ácidos grasos, de cadena larga, obtenido a partir de lípidos renovables como aceites y grasas de origen vegetal o animal; utilizado en motores de encendido por compresión en cualquier proporción con diésel proveniente de combustibles fósiles (Lombana Coy & Vega Jurado, 2015). Se caracteriza por ser un combustible oxigenado y tener una combustión más completa que el diésel con mejores propiedades de lubricidad y largos tiempos de vida de los componentes del motor (LLanes Cedeño & Rocha Hoyos, 2017). Posee la capacidad de abastecer las necesidades del sector transporte, el cual presenta una tasa de participación del 40,06% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Por su parte el biodiesel puede ser usado directamente en forma pura (B100), o en mezclas con diésel a diferentes proporciones bajo ciertos criterios de calidad regulados por la norma colombiana de biodiesel (NTC5444) en base principalmente a la normas de Estados Unidos (ASTM D6751) (Abdallah S & Wagih A, 2021). Dentro del territorio nacional se utiliza el 10% de la mezcla en biocombustible denominada B10, de las cuales se emplean aproximadamente 551.000 toneladas de biodiesel. En efecto, es importante resaltar la capacidad productiva de aceite de palma en el país, ya que se cuenta con el aceite necesario para aumentar la proporción de mezcla hasta en un 20% (B20) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Evidentemente el biodiésel es tecnología clave para minimizar las emisiones de gases y la dependencia de las fuentes energéticas poco amigables con el medio ambiente.

En Colombia las primeras plantas productoras de biocombustible entraron en operación a inicios del año 2008. Actualmente se cuenta con la participación de 12 plantas, capaces de producir anualmente hasta 885.000 toneladas de biodiesel de primera generación, a partir de aceite de palma, ubicadas en los departamentos de Atlántico, Magdalena, Cundinamarca, Santander, Meta y Cesar (Colombia, FedeBiocombustibles, 2020). Dentro de esta perspectiva, y teniendo en cuenta datos de la federación nacional de biocombustibles en la tabla 2 se aprecia todo lo anteriormente mencionado considerando que la empresa biocombustibles sostenibles del caribe y BIOD son las más destacadas en cuanto a producción.

TABLA 2. Plantas productoras de biodiésel en funcionamiento

REGIÓN	PLANTAS EN FUNCIONAMIENTO	CAPACIDAD (TON/AÑO)	INICIO DE OPERACIÓN
Santa Marta, Magdalena	Biocombustibles Sostenibles del Caribe	140.000	2009/03/01
Codazzi, Cesar	Oleoflores	70.000	2008/01/01
Barranquilla, Atlántico	Romil de la Costa	-	-
Gálapa, Atlántico	Biodiesel de la Costa	-	-
Facatativá, Cundinamarca	BioD	216.000	2009/02/01
Barrancabermeja, Santander	Eco diésel Colombia	130.000	2008/06/01
San Carlos de Guaroa, Meta	Aceites Manuelita	115.200	2009/07/01
San Carlos de Guaroa, Meta	Inversiones la Paz	70.000	-
Barrancabermeja, Santander	ALPO	12.000	-
Santa Marta, Magdalena	Biocosta Green Energy	70.000	-
Santa Marta, Magdalena	Odín Energy	35.000	-
TOTAL		858.200	

Fuente: (*Federación nacional de Biocombustibles de Colombia, 2020*)

7. CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA

7.1 PALMA AFRICANA (*Elaeis Guineensis*)

Es una fuente vegetal de clase liliopsida, pertenece a la especie del genero *Elaeis*, presenta un alto contenido de triglicéridos y mayores ventajas competitivas para la producción de biodiesel a nivel nacional; es productiva después de 3 años de ser plantada, y produce 25 años consecutivos. Posee 16 o 3 pares de cromosomas, es una planta monocotiledónea y Monoica, es decir, que su semilla tiene un solo cotiledón o almendra y las flores femeninas y masculinas, se producen independientes, en una misma planta (Sierra Soto, 2019). Es productiva después de 3 años de ser plantada, y produce 25 años consecutivos. Posee 16 o 3 pares de cromosomas, es una planta monocotiledónea y Monoica, es decir, que su semilla tiene un solo cotiledón o almendra y las flores femeninas y masculinas, se producen independientes, en una misma planta (Sierra Soto, 2019). El cultivo requiere de ciertas condiciones climáticas y de terreno; particularmente, crece en climas tropicales a altas temperaturas (22°C - 24°C) y niveles adecuados de agua, por lo que la precipitación pluvial idónea es de 1800 mm durante todo el año. Es originaria de la costa del Golfo de Guinea en África Occidental (Lai, Tan, & Akoh, 2015). En Colombia el cultivo comercial de palma

inicio en 1945, cuando la *United Fruit Company* estableció por primera vez una plantación de palma en el área bananera de Magdalena (Sierra Márquez & Olivero Verbel, 2017). Actualmente, el cultivo de palma se encuentra distribuido en 161 municipios y 26 departamentos del país, con una área sembrada de aproximadamente 559 mil hectáreas (ver figura 1). La zona oriental cuenta con 5 departamentos palmeros, la zona norte con 9, la central posee 9, y en la zona sur-occidental 3 departamentos con cultivos de palma.

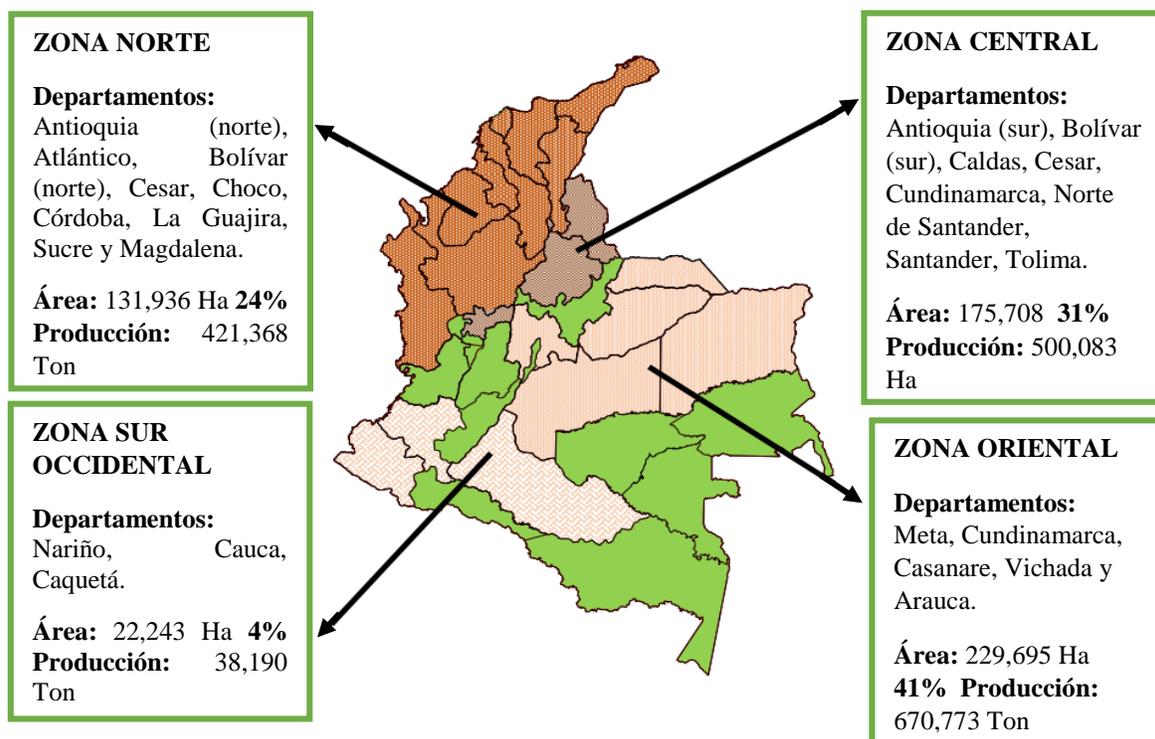


Figura 1. Principales zonas productoras de palma de aceite en Colombia, 2020

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Rural, 2020)

El país se caracteriza por ser el primer productor de aceite de palma en América y el cuarto a nivel mundial aportando más del 2% de la producción global de aceite de palma crudo, con aproximadamente 1.600.000 toneladas en 2020 según Cenipalma (Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite). A diferencia de otras oleaginosas, la palma de aceite produce una mayor cantidad de aceite por área sembrada, alcanza rendimientos de 3 a 5 Tm de aceite crudo de palma por hectárea y de 600 a 1000 kg de aceite de palmiste; se estima que una hectárea de palma produce 10 veces más que cualquier otro cultivo oleaginoso (Fontalvo Gómez & Barrios Sarmiento, 2014). En consideración a la estadística reflejada en la figura 1 se registra que la zona con mayor volumen de producción de aceite de palma es la región oriental, con una participación del 41% de la producción nacional, seguida de la región central (31%), la región norte (24%) y región sur occidental (4%).

7.1.1 Tipos de Palma Africana (*Elaeis Guineensis*)

Existen 3 variedades de fruta de palma aceitera, clasificadas de acuerdo con el grosor de la cascara de almendra: dura, pisifera y tenera; de ellas el tipo de fruto tenera es la que se utiliza comercialmente para la extracción de aceite. En la figura 2, se muestra la estructura y los porcentajes de cuesco, pulpa y almendra de los tres tipos de frutos de palma aceitera (Babu, Kumar, & Ravichandran, 2017).

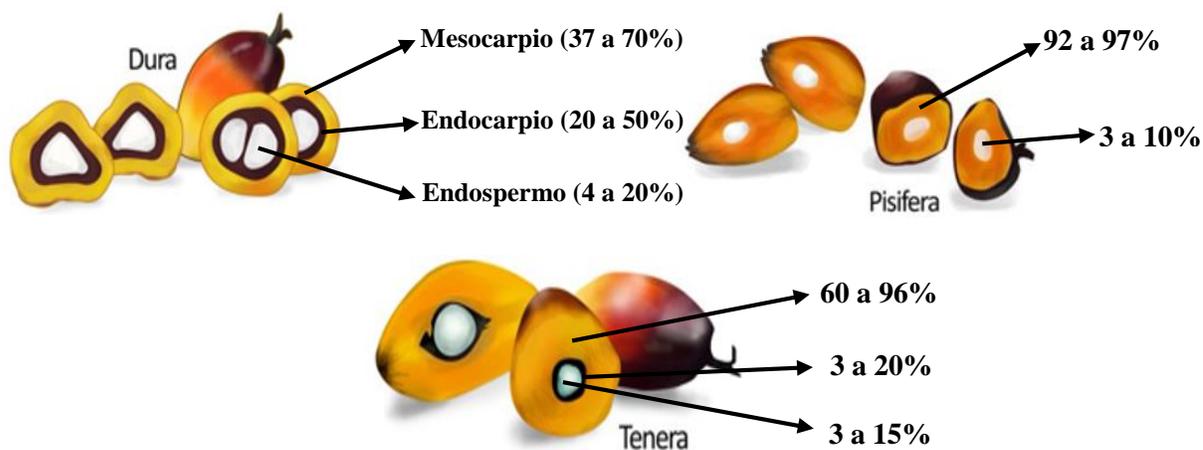


Figura 2. Tipos de palma aceitera *Elaeis Guineensis*; Dura, Tenera y Pisifera, y porcentaje de cuesco (endocarpio), pulpa (mesocarpio) y almendra (endospermo).

Fuente: (Balboa Acero, 2015)

- **Dura (DXD):** Utilizada como planta femenina; posee un mesocarpio delgado, por lo que no existen rendimientos altos de aceite en esta variedad, el endocarpio se caracteriza por tener un espesor de 2 a 8 milímetros; el contenido de mesocarpio es del 35 al 55%
- **Pisifera (PXP):** Planta masculina, posee un mesocarpio denso y ausencia de endocarpio. Esta variedad produce pocos frutos en el racimo, razón por la cual es empleada solo para mejorar la variedad dura, mediante el cruzamiento.
- **Tenera (DXP):** Es el híbrido del cruce entre dura y pisifera, posee un mesocarpio grueso, el endocarpio del fruto es delgado, por ende, de esta variedad de fruta se obtiene un mayor rendimiento de aceite del mesocarpio

7.1.2 FRUTO DE LA PALMA DE ACEITE

7.1.2.1 Propiedades físicas

el fruto de la palma en estado de madurez es de color rojizo, son frutos que se agrupan en racimos llamados corozo que puede llegar a pesar hasta 25 kg; la fruta es una drupa de forma esférica, ovoide o alongada, tiene una longitud mayor o igual a 5 cm y un peso de 3 a 30 g; está compuesto principalmente de una membrana exterior, lisa dura y brillante (Exocarpio), una pulpa o tejido fibroso en la que están contenidas las células con aceite (Mesocarpio), y un hueso lignificado (Endocarpio) que rodea la nuez en la que está contenida la almendra (Endospermo) como se logra evidenciar en la figura 3.



Figura 3. Racimo y fruta de palma de aceite.

Fuente: (Abril Gelvez , 2015)

Es importante tener en cuenta algunos parámetros a la hora de la selección de los racimos, ya que estos influyen en las tasas de rendimiento del aceite; por tanto, en la tabla 3 se presenta la composición ideal del racimo y fruto de la palma.

Tabla 3. Composición ideal del racimo de fruto de palma

COMPONENTES	PARÁMETRO IDEAL
Peso del racimo	23 – 27 kg
Fruto/racimo	60 – 65%
Aceite/racimo	21 – 23%
Mesocarpio/fruto	71 – 76%
Almendra/fruto	21 – 22%
Cascara/fruto	10 – 11%

Fuente: (Idrogo & Moncada, 2014)

Por otra parte, del fruto de la palma se obtienen dos tipos de aceites con composiciones químicas diferentes: aceite de palma crudo a partir de la pulpa del fruto (mesocarpio) que es el que se convierte finalmente en la materia prima para la elaboración del biodiesel y aceite de nuez o de palmiste obtenido de la almendra del núcleo del fruto y corresponde a los denominados aceites láuricos. Además de eso, se derivan otros subproductos por distintos procesos fisicoquímicos como la oleína, estearina, glicerina y ácidos grasos (Silva, Caldeiras, & Souza, 2020).

7.1.2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

La naturaleza química de la materia prima se fundamenta en todos los componentes estructurales orgánicos e inorgánicos utilizados para analizar su rendimiento y contenido energético; las técnicas de caracterización clave para indagar las propiedades químicas incluyen análisis de la composición de óxidos metálicos, elementales, y caloríficos (Silva, Caldeiras, & Souza, 2020).

En la tabla 4, se muestra el análisis elemental o definitivo de los principales elementos que constituyen la composición química del fruto de palma en porcentaje en peso, en él se exponen los términos de C, H, N, S, y O los cuales representan los contenidos de carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, respectivamente; asimismo la composición medida en términos de su contenido de humedad, material volátil, cenizas, carbono fijo, y análisis calorífico (Silva, Caldeiras, & Souza, 2020).

Tabla 4. Análisis elemental, proximal y calorífico de las propiedades químicas del fruto de la palma de aceite.

FRUTO DE PALMA AFRICANA	
PROPIEDADES QUÍMICAS	
Análisis Elemental (% en peso)	
Carbono	49,82
Hidrógeno	6,70
Nitrógeno	1,44
Sulfuro	0,29
Oxígeno	37,94
Análisis Proximal (% en peso)	
Humedad	5,39
Materiales Volátiles	65,30
Carbono Fijo	12,13
Cenizas	8,54
Valores Caloríficos (MJ kg⁻¹)	
Poder calorífico bruto (HHV)	22,92
Poder calorífico neto (LHV)	21,17

Fuente: (Silva, Caldeiras, & Souza, 2020)

7.1.3 Generalidades del Aceite de Palma

El aceite crudo de palma, cuyo contenido varía entre el 46 y 70 % por fruto, es obtenido de la maceración o extracción de la parte carnosa del fruto (mesocarpio) mediante procesos físicos o químicos. El color del aceite viene determinado por los carotenoides, el cual puede variar de amarillo claro a rojo anaranjado; este se caracteriza por ser una fuente rica de betacaroteno y vitamina E (tocoferoles y tocotrienoles), sustancias que resultan de gran importancia para la estabilidad del aceite ya que previene la oxidación causada por el oxígeno del aire y acelerada por las altas temperaturas y los rayos UV de la luz solar (Owoyele & Gbenga, 2014).

El aceite crudo de palma está compuesto en un 50% por ácidos grasos saturados, ácidos grasos mono insaturados (40%) y ácidos grasos poli-insaturados (10%) (Balboa Acero, 2015). Por su parte, los principales ácidos grasos insaturados que constituyen los triglicéridos (TG) del aceite son el oleico (36,0-44,0%) y linoleico (8,0-12,0%), además de poseer también ácidos grasos saturados palmítico (41,0-47,0%) y esteárico (3,5-6,0%) (Fontalvo Gómez & Barrios Sarmiento, 2014). De esta manera en la tabla 5, se muestran los rangos del perfil de ácidos grasos por el que debe estar compuesto el aceite.

Tabla 5. Perfil de ácidos grasos del aceite crudo de palma

ÁCIDOS GRASOS		PORCENTAJE (%)
SATURADOS	Ácido Láurico	< 0,4
	Ácido Mirístico	0,5 – 2,0
	Ácido Palmítico	41,0 – 47,0
	Acido Esteárico	3,5 – 6,0
	Ácido Araquídico	< 1,0
MONOINSATURADOS	Ácido Palmitoleico	< 0,6
	Ácido Oleíco	36,0 – 44,0
POLI-INSATURADO	Ácido Linoléico	8,0 – 12,0
	Ácido Linolénico	< 0,5

Fuente: (Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion, 2017)

8. PROCESOS Y TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA EXTRACCIÓN DEL ACEITE CRUDO DE PALMA

Para la extracción del aceite de palma generalmente se emplean métodos como la extracción por solventes (sólido – líquido) y la compresión mecánica.

8.1 EXTRACCIÓN MECÁNICA

Su producción da inicio en 1930; actualmente, es la tecnología más empleada para la extracción del aceite de palma, el cual consiste en un proceso mecánico desarrollado por prensas, de modo que los rendimientos de extracción dependen de la cantidad de presión aplicada, el tiempo, y temperatura utilizada. Incluye una serie de operaciones unitarias que van desde la recepción y almacenamiento de los racimo de fruto fresco (RFF), tratamiento térmico, desprendimiento de fruta, extracción de aceite, clarificación, sistema de recuperación de aceite y de grano (Chew, Low, & Kang Liew, 2021).

En la figura 4, se muestran las principales etapas llevadas a cabo en el proceso de extracción del aceite de palma

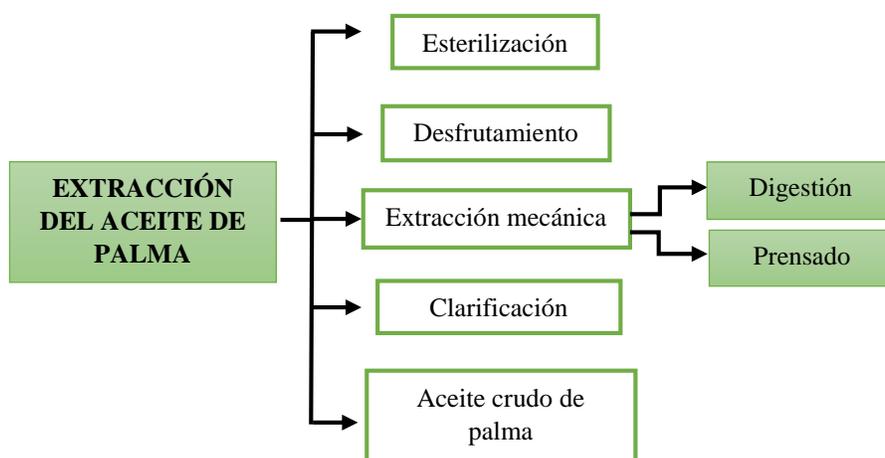


Figura 4. Etapas del proceso de extracción del aceite crudo de palma.

La clave para obtener un aceite crudo de palma de alta calidad, radica en las prácticas agrícolas, especialmente en los métodos de recolección y procesamiento de la fruta de la palma. Por lo tanto, la inspección de calidad de los RFF es un paso importante para mantener la calidad del aceite producido al final del prensado (Donough, Indrasuara, & Dolong , 2015).

8.1.1 Recepción y Evaluación de la Calidad de los Frutos de Palma

El proceso inicia con la recepción de la fruta; los racimos de fruto fresco (RFF) deben cortarse una vez finalizado el proceso de maduración, para evitar aumentar el contenido de ácidos grasos libres (AGL), establecidos en el rango de 2,3 – 6,7%, que determinan la calidad del aceite de palma. Luego, el fruto es transportado a la planta extractora por vehículos de carga, una vez ingresan son pesados en una balanza electrónica (60 ton de capacidad) y clasificados de acuerdo con las características físicas del racimo. Técnicamente, la madurez de los RFF está determinada por el número de frutos de palma desprendidos del racimo, clasificados como racimo verde, maduro, escobajo y pedúnculo largo. Posteriormente, el fruto ya

evaluado ingresa al área de recepción de fruta, donde se descarga y almacena en tolvas (cada una con una capacidad de 14,5 ton) operadas por un sistema hidráulico de dos bombas para pasar al área de esterilización (Muhammad & Soni, 2014).

8.1.2 Tratamiento Térmico de frutos de palma

El proceso de esterilización del fruto de palma es la etapa más importante del proceso, consiste en someter a un tratamiento térmico a base de vapor saturado los racimos de fruta fresca. Actualmente, el proceso involucra esterilización *batch* (lotes), a condiciones de temperatura elevada y hasta una presión máxima de 45 psi (libras por pulgada cuadrada) (3 bares) durante periodos de 75 a 90 minutos (Jamie Vincent & Shamsudin, 2014). Cuya finalidad, principalmente es desactivar la enzima lipasa en la capa del mesocarpio e impedir la formación de AGL; además de eso dar origen al rompimiento de las fibras que mantienen los frutos unidos a las espiguillas y degradar los materiales lignocelulósicos del mesocarpio que permiten la rotura de las células oleaginosas (Billote, Ngando, & Domonhého, 2013).

A partir de las afirmaciones anteriormente expuestas; la etapa de esterilización es llevada a cabo con las siguientes finalidades:

8.1.2.1 Inactivación de la lipasa

La lipasa es una enzima que ocasiona la descomposición de las moléculas de grasas formando ácidos grasos libre (AGL) y glicerol. Sin embargo, esta se inactiva utilizando temperaturas alrededor de los 60°C. Por ello, Se podría pensar que esta primera etapa puede ser tratada simplemente con agua caliente, pero se requieren de temperaturas más altas para cumplir con los demás objetivos, razón por la cual se utiliza vapor saturado (Muñoz Parreño, 2016).

8.1.2.2 Desprendimiento de los frutos, ablandando la unión entre ellos

Con la esterilización, el fruto es preparado para la fase de desfrutado, a través del ablandamiento de los tejidos del pedúnculo de unión entre el fruto y la tusa (raquis) mediante el calor húmedo que rodea la región de abscisión (Sylvester Chibueze & Elijah Ige, 2015). Para cumplir este objetivo es favorable utilizar temperaturas altas, y un mayor tiempo de contacto de los racimos con el vapor (Muñoz Parreño, 2016).

8.1.2.3 Ablandamiento de los tejidos de la pulpa

Durante el proceso de esterilización, el tejido de la pulpa se debilita, lo que promueve la ruptura de las células que contienen el aceite durante la etapa de digestión y prensado. Este objetivo, se logra con tiempos cortos de esterilización y a condiciones bajas de temperatura (Muñoz Parreño, 2016).

8.1.2.4 Deshidratación parcialmente las almendras contenidas en las nueces para facilitar su posterior recuperación

A través de la esterilización, se busca que la almendra contenida en la nuez sea deshidratada, con el fin de que su tamaño disminuya y se desprenda de la cascara que la envuelve, facilitando el rompimiento de la nuez y recuperación de la almendra en la fase de palmisteria (Muñoz Parreño, 2016).

8.1.2.5 Coagular proteínas

La esterilización, busca coagular las proteínas que se encuentran entre las celdas que contienen el aceite en el fruto de palma, como propósito para reducir la emulsificación del aceite en el agua y evitar inconvenientes durante el proceso de clarificación (Muñoz Parreño, 2016).

8.1.2.6 Hidrolisis y descomposición del material mucilaginoso (gomas)

Por lo general, la pulpa del fruto contiene gomas y almidones que ocasionan la formación de soluciones coloidales en el aceite crudo. Por tal razón se busca hidrolizar o coagular dichas sustancias gelatinosas, empleando mayores tiempos de esterilización y temperaturas superiores a 120°C (Muñoz Parreño, 2016).

8.1.3 Desfrutado

El desfrutado, es el proceso en el que se separan los frutos del racimo, mediante un procedimiento mecanizado (tambor rotatorio) que aprovecha la fuerza de rotación para potenciar el desprendimiento del fruto de la espiguilla dejando los racimos vacíos. Cabe señalar que para un buen efecto de separación inciden factores como el grado de maduración del fruto, la dosificación de racimos y las dimensiones del equipo (Jaimes, Rocha, & Vesga, 2012; Muñoz Parreño, 2016).

En esta parte, el proceso se divide en dos corrientes, una que son los frutos que trae el racimo, y otra que es el racimo sin pepa conocido como raquis, empleado en procesos de compostaje y abono orgánico (Jaimes, Rocha, & Vesga, 2012; Muñoz Parreño, 2016).

Una vez separados los frutos, se someten a técnicas de digestión y prensado, con el objetivo de extraer el aceite contenido en el mesocarpio del fruto de palma con una mínima rotura de las nueces.

8.1.4 Digestión

La digestión es considerada el corazón de la extracción, dado que influye de gran manera en la eficiencia de producción del aceite crudo de palma (CPO). El digestor tiene como fin separar el mesocarpio de la fruta y romper las células oleaginosas y facilitar la extracción del

aceite. Generalmente, el proceso se lleva a cabo en recipientes cilíndricos verticales con agitadores, que giran a 20 rpm para romper la capa del mesocarpio de las nueces. Opera a temperaturas entre 95 y 100°C durante periodos de 20 a 60 minutos, respectivamente, para reducir la viscosidad del aceite, destruir el exocarpio y completar la rotura de las células oleosas, por medio de la maceración por agitación circular (Jaimes, Rocha, & Vesga, 2012; Chew, Low, & Kang Liew, 2021).

8.1.5 Prensado

Operación unitaria en la que se obtiene el aceite mediante el proceso de extracción mecánica; se efectúa a través de fuertes presiones ejercidas por prensas mecánicas, con la finalidad de extraer el aceite contenido en el mesocarpio del fruto y separarlo de la fibra. La prensa mecánica es eficaz en la extracción de aceite; particularmente dos de las prensas que se aplican convencionalmente a los molinos de aceite es la prensa hidráulica y de tornillo, empleada en la extracción por lotes o semilotes y sistemas de extracción continua. Por lo general, del proceso de prensado se obtienen 2 salidas, una la parte líquida (mezcla de aceite, agua e impurezas solidas) conocida como licor de prensado y otra la parte sólida, que es la torta de prensado compuesta básicamente por la fibra (fibra de mesocarpio + fibra de raquis) y la nuez (almendras + cascaras) (Jaimes, Rocha, & Vesga, 2012; Chew, Low, & Kang Liew, 2021).

8.1.6 Clarificación

La clarificación del aceite de palma es un conjunto de operaciones unitarias que tienen como objetivo separar y purificar el aceite de la mezcla líquida extraída en la prensa compuesta generalmente por aceite, agua, lodos livianos (mezcla de pectinas y gomas) y lodos pesados (mezcla de tierra, arena y otras impurezas). Puede realizarse a través de una separación estática en tanques circulares con o sin agitación o también puede hacerse por una separación dinámica de fases por diferencia de densidades, tales como decantación o centrifugación (Dongo Valdivia, 2014).

8.1.6.1 Clarificación Estática

La clarificación estática es un procedimiento convencional para separar el aceite del agua y los sólidos en suspensión utilizando un tanque clarificador. La mezcla se calienta mediante la introducción de vapor que promueve la separación por gravedad. Para su proceso el clarificador deja un tiempo de residencia de 4-6 horas; sin embargo, la eficiencia de separación de este proceso es solo cercana al 50%.

8.1.6.2 Clarificación Dinámica

La clarificación dinámica es un proceso de separación mecánica cuya característica principal es la separación a través de sedimentación por gravedad. Este tipo de separación por centrifugas deslodadoras resulta ser un proceso más rápido y eficiente, su operación es continua y emplea menos tiempos de residencia sumado a los bajos costos de energía y

mantenimiento por lo que resulta ventajoso al compararse con el proceso de separación estático.

8.1.7 Extracción de aceite de palmiste

Por último, se lleva a cabo un proceso de palmisteria, en el que se busca recuperar la almendra que está dentro de la nuez a través de su ruptura. De allí se obtienen 2 productos diferentes, aceite crudo de palmiste y torta o harina de palmiste; en la figura 5, se evidencian las etapas necesarias para llevar a cabo su proceso de extracción:

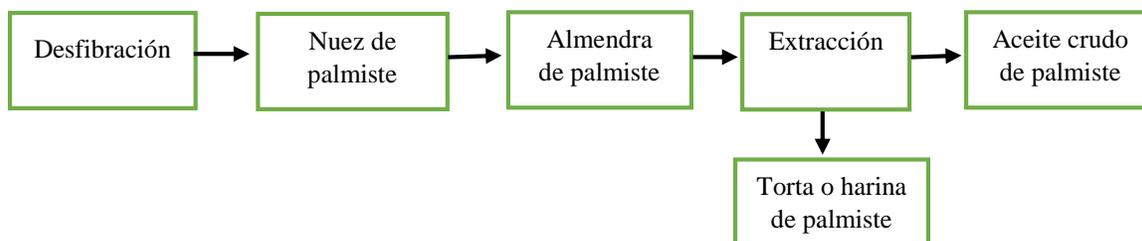


Figura 5. Etapas para la extracción de aceite de palmiste.

8.1.7.1 Desfibración de la torta y recuperación de la nuez

La parte sólida (torta de prensado) obtenida del proceso mecánico con las prensas, se somete al proceso de desfibrado con el fin de separar la nuez y poder recuperar la almendra a través de una columna de separación neumática, por la cual pasa una corriente de aire, en la que se aprovecha la diferencia de densidades para separar la almendra del resto de los componentes involucrados en la mezcla (Chiquillo Moratto, 2019).

8.1.7.2 Secado de la nuez

La nuez pulida y separada completamente de la fibra es llevada a un silo secador de nuez, el cual cuenta con un sistema de inyección de aire que se calienta a 3 niveles diferentes de temperatura (60°C – 70°C – 75°C) mediante la acción de radiadores instalados en los conductos. El aire fluye a través de los ductos internos en contacto con el material a secar, de tal manera que la nuez se deshidrata, lo que permite que la cascara sea más frágil y facilite la trituration (Chiquillo Moratto, 2019).

8.1.7.3 Trituración de la nuez

La nuez seca es trasladada a un tambor clasificador de tamaños, allí se clasifica en 3 tamaños diferentes (pequeña, mediana y grande) para permitir un grado más preciso de rotura. La nuez se tritura a través de molinos *ripple mill*, con el fin de separar la almendra que está dentro de la nuez, rompiéndola de manera que la almendra no sufra ninguna transformación (Chiquillo Moratto, 2019).

Del proceso de palmisteria se generan 2 productos: el aceite de palmiste obtenido de la almendra, y la torta o harina de palmiste que es lo que finalmente queda de la almendra luego de extraerse todo el aceite.

8.1.8 Tecnologías existentes para el tratamiento térmico del fruto de la palma

Los investigadores han realizado una serie de estudios exploratorios con el fin de mejorar aún más la eficacia del proceso mediante la sustitución del método de vaporización que actualmente se practica en los molinos de palma de aceite como la invención de un esterilizador continuo, así como la esterilización mediante microondas y calentamiento en seco (horno) (Jamie Vincent & Shamsudin, 2014).

8.1.8.1 Esterilización con microondas

La esterilización asistida por microondas es otro de los métodos que ha llamado la atención en los últimos años para mejorar la eficiencia del proceso de esterilización en los molinos de palma de aceite (Law & Chang, 2016). Esta tecnología utiliza calentamiento volumétrico para calentar el RFF, donde el calor se disipa a través de la capa del fruto. El calentamiento volumétrico es atribuido como la característica más importante del calentamiento por microondas, el cual indica la capacidad de los materiales para absorber energía de microondas directa e internamente y luego convertirla en calor, lo que proporciona tasas de calentamiento más rápidas, mejor capacidad de control, ahorro de espacio y energía (Cheng, Mohd , & Chuah, 2011)

Las microondas son ondas electromagnéticas con una frecuencia entre 300 y 30,000 MHz, con longitudes de onda entre 1 y 1000 nm. La energía térmica requerida en este proceso es transformada a partir de energía electromagnética alterna proporcionada por microondas llamada calentamiento dieléctrico (Chew, Low, & Kang Liew, 2021)

Según Umudee y Tongurai la condición óptima para calentamiento por microondas es operar a una potencia de 90 y 360 W en el transcurso de un tiempo de 10 a 15 minutos (Umudee & Tongurai, 2013). En la molienda de aceite de palma, el calor se crea dentro de la fruta gracias a su sustancia dipolar, donde las moléculas de agua en la fruta de la palma absorben la energía electromagnética irradiada por microondas y alternadamente cambian sus moléculas polares, distribuyendo el calor a las fibras de la fruta (Nokkaew & Punsuvon, 2014).

8.1.8.2 Esterilización con Dióxido de Carbono Súper Crítico (SC-CO₂)

La esterilización de la fruta de palma con dióxido de carbono súper crítico (SC-CO₂) es una nueva técnica no térmica que opera bajo condiciones de temperatura y presión superiores a su punto crítico, se muestra como una tecnología prometedora, ecológica y eficiente para el procesamiento de las plantas de aceite. SC-CO₂ es un solvente que se ha usado ampliamente para la extracción y recientemente desarrollado como herramienta de esterilización (Fatehah Mohd , Hossain , & Mat Easa, 2018). Estudios recientes han demostrado que este tipo de esterilización es capaz de inactivar enzimas y microorganismos lipolíticos a temperaturas relativamente bajas ($\leq 80^{\circ}\text{C}$), presión moderada (8 - 40 MPa) y tiempos de esterilización de 60 minutos aproximadamente (A K & Md.Sohrab , 2017). Sin embargo, dicha tecnología es costosa ya que requiere instrumentos de control adicional, para operaciones a gran escala, y

por lo tanto los costos de mantenimiento aumentan (Fatehah Mohd , Hossain , & Mat Easa, 2018).

8.1.8.3 Esterilización Continua

La esterilización continua es una de las muchas opciones estudiadas para mejorar los procesos térmicos de la palma de aceite; opera a condiciones atmosféricas. Entre sus ventajas; bajos costos de inversión operación y mantenimiento, capacidad para manipular racimos de todo tipo, además de ser un diseño fácil de usar, ya que todo su sistema se caracteriza por ser un proceso de combinación completo de trituración de racimo y esterilización (Jamie Vincent & Shamsudin, 2014).

8.1.9 Tecnologías emergentes para la extracción de aceite de palma

La extracción de aceites vegetales con solventes es el método más eficaz y mayormente utilizado por industrias oleicas, para la obtención de cualquier producto. Dicha técnica hace referencia a la extracción de aceites contenidos en materiales sólidos, por medio de un solvente líquido; también conocida como lixiviación. Para ello, es conveniente tener en cuenta una serie de parámetros que influyen durante el proceso, tales como temperatura del solvente, tiempo de extracción, cantidad o tipo de solvente y tamaño de partícula. Por otra parte, el disolvente seleccionado debe caracterizarse por poseer límites altos de saturación y selectividad respecto al soluto por extraer, capacidad para producir el material extraído con una calidad no alterada por el disolvente, estabilidad química, baja viscosidad, presión de vapor, toxicidad e inflamabilidad, y facilidad en cuanto a la recuperación de la corriente de extracto.

Entre los disolventes más empleados, se encuentran el benceno, el etanol, el propano la acetona, el éter, y el hexano, siendo este último el más utilizado; capaz de disolver grandes cantidades de aceite sin extraer otros compuestos; además de poseer alta selectividad hacia los glicéridos, facilidad de recuperación, alta solubilidad y naturaleza no polar (Kumar & Prasad, 2017). Independientemente de su alta eficiencia de extracción, el uso de disolventes orgánicos acarrea problemas de salud y medio ambiente; por tal razón; grupos de investigación han evaluado el potencial de utilizar nuevas tecnologías alternativas, dando lugar a disolventes ecológicos como el agua, líquidos iónicos, dióxido de carbono (CO₂), que se derivan de residuos agrícolas entre otras fuentes de petróleo (Waboi Mwaurah, Kumar, & Panghal, 2019).

La extracción con fluidos supercríticos (SFE), es un método que ofrece algunas ventajas sobre los métodos convencionales, especialmente para la industria del aceite de palma. Entre las sustancias utilizadas como disolventes supercríticos se encuentra el hidrogeno, nitrógeno, óxido nitroso, oxígeno, dióxido de carbono; entre otros. De ellos el CO₂ es el disolvente fluido supercrítico más común y ampliamente utilizado debido a las bajas condiciones críticas de temperatura y presión, bajo costo, amplia disponibilidad, no inflamabilidad y respeto al medio ambiente (Morillo, Fernández, & Marquina, 2010).

El método SFE utilizando SC-CO₂ como disolvente, es rentable tanto a escala de laboratorio como industrial para la extracción de aceite de palma, y aceite de palmiste, se ha demostrado que es posible extraer casi el 100% del aceite en periodos más cortos de tiempo, obteniendo extractos con mayor calidad de pureza libre de metales traza y residuos de solventes orgánicos (Haque Akanda, Ferdosh, & Ab Kadir, 2012). Además, se informó en su estudio que la extracción de aceite de palma mediante SFE puede sustituir potencialmente a los procesos convencionales de extracción con prensa de tornillo, clarificación y secado al vacío. Sin embargo, se han presentado algunos obstáculos para su aplicación a nivel industrial debido a su instrumentación y altos costos de mantenimiento del equipo.

Por su parte, la extracción mediante procesos enzimáticos acuosos es otra de las nuevas técnicas que actualmente se experimentan para la extracción de aceite de palma, se trata de una técnica verde, simple de llevar a cabo, que emplea agua y enzimas como la celulosa, pectinasa y proteasa para desintegrar la red de la pared celular de los materiales que contienen el aceite. Estudios investigativos como el de Teixeira B & Macedo A, (2013) demostraron que el fruto de palma tratado con enzimas como la celulosa y la pectinasa podían alcanzar rendimientos de aceite superiores al 90%.

8.1.10 Calidad del aceite de palma

El aceite crudo de palma se ve afectado por factores externos que comprometen su calidad. El aumento del nivel de oxidación es una de las principales causas que influye en la calidad del aceite. La autooxidación es la reacción que se da entre los enlaces dobles de las grasas insaturadas y el oxígeno del medio, en el que se forman compuestos oxidados que se descomponen rápidamente en aldehídos, cetonas y ácidos grasos libres de cadena corta que conllevan a la alteración de las propiedades organolépticas del producto y la formación de la rancidez en el aceite (Melo Costa & Teixeira, 2018).

Las temperaturas elevadas, el alto porcentaje de humedad, la presencia de metales catalíticos como el hierro o el cobre y la exposición prolongada a la luz o al medio ambiente son algunos de los factores que hacen que la reacción se acelere y por tanto afecte la calidad del aceite (Melo Costa & Teixeira, 2018).

Según el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, (2017) la norma técnica colombiana (NTC 431) tiene por objetivo establecer los requisitos que debe cumplir y los métodos de ensayo a los cuales debe someterse el aceite crudo de palma africana para su comercialización a nivel nacional; entre ellas la determinación de la densidad (NTC 336), índice de yodo (NTC 283), índice de saponificación (NTC 335), materia insaponificable (NTC 235), humedad y material volátil (NTC 287), impurezas insolubles (NTC 240), Punto de fusión (NTC 213), índice de refracción (NTC 289) y determinación del índice de acidez (NTC 218) (Rincón & Martínez, 2009). En la tabla 6 se especifican los límites permitidos por la norma técnica colombiana (NTC 431) para la comercialización del aceite crudo de palma.

Tabla 6. Requisitos para el aceite crudo de palma africana.

REQUISITOS	NIVELES ÓPTIMOS	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Densidad 60/25 °C	0,868	0,876
Índice de yodo	50	58
Índice de saponificación	195	205
Índice de refracción a 50 °C	1,4590	1,4550
Materia insaponificable, en %	-	1,5
Humedad y material volátil, en %	-	0,5
Punto de fusión	34	40
Ácidos grasos libres, %	-	5
Impurezas insolubles, en %	-	0,1

Fuente: (*Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2017*)

9. PROCESO DE REFINADO DEL ACEITE CRUDO DE PALMA

El aceite crudo de palma utilizado para producir biodiesel debe purificarse de la misma manera que debe procesarse cuando se usa como alimento, sin embargo, sus exigencias de pureza son menores. El refinado se debe llevar a cabo con el objetivo de suprimir o eliminar impurezas indeseables, como ácidos grasos libres, fosfatidos, pigmentos, componentes volátiles y otros materiales (Avellaneda Vargas, 2010).

El proceso de refinación, puede efectuarse a través de dos rutas principales: refinación química y refinación física. En la operación química las gomas y ácidos grasos libres son eliminados durante la etapa de neutralización mediante una disolución alcalina donde hay una gran formación de jabones de sodio los cuales se eliminan por decantación. Por su parte, la refinación física se caracteriza por la ausencia de dicha etapa, por lo que los ácidos grasos libres se eliminan mediante un procedimiento de destilación al vapor (Parra Escorza, 2016; Ashaari & Ahmad, 2021)

La elección final entre un modo de refinación u otro depende principalmente de dos factores: la calidad y acidez del aceite a refinar. Se ha considerado que al tratarse de un aceite con un grado superior de productos indeseables es aconsejable efectuar la refinación química, ya que dicha eliminación es mucho más fácil y rápida con un tratamiento alcalino (neutralización) que con un proceso basado simplemente en operaciones físicas (Parra Escorza, 2016). A continuación se describen los procesos de refinado más usados para acondicionar el aceite:

9.1 Desgomado

Este proceso se basa en la floculación o la coagulación de las sustancias mucilaginosas disueltas o suspendidas en el aceite. En los estudios realizados se ha previsto que el desgomado con agua es la forma más simple para reducir la cantidad de fosfatidos o fosfolípidos en los aceites, calentando aproximadamente a 90°C y agregando pequeñas

cantidades de agua (2-5%) con el fin de hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite, para luego eliminarlas mediante filtración o centrifugación (Avellaneda Vargas, 2010; Sulihatimarsyila & Harrison L.N., 2019).

Es importante aclarar que el método de hidratación en el desgomado solamente permite la eliminación de las gomas hidratables, por lo que se recomienda usar ácido cítrico o ácido fosfórico (2-5% p/p del aceite) para mejorar la velocidad y la eficacia del proceso de manera que se dé la separación de las gomas no hidratables, presentes en forma de sales de calcio y magnesio de ácido fosfórico (Avellaneda Vargas, 2010; Sulihatimarsyila & Harrison L.N., 2019).

9.2 Neutralización

La neutralización es la etapa principal de la refinación química; el método consiste en hacer reaccionar el aceite con una sustancia alcalina, para eliminar ácidos grasos libres, y otros compuestos como iones metálicos, carbohidratos, pigmentos y fosfatidos que se han formado durante la extracción. El reactivo más utilizado en este método es el hidróxido de sodio, ya que, al ser una base muy fuerte, neutraliza fácilmente a los ácidos grasos. Sin embargo, la sosa caustica no solamente reacciona con los ácidos grasos libres, sino que también saponifica una parte de aceite neutro, lo cual implica pérdidas de la corriente de interés; es este el caso de la palma, en el que se han reportado pérdidas por neutralización del 20-30% o incluso mayores al 50% (Carrero & Girón, 2011; Avellaneda Vargas, 2010).

Alcoholes polihídricos como el glicerol, propilenglicol y etilenglicol en agua han demostrado ser medios de neutralización eficaz para la reducción de las pérdidas de aceite crudo de palma asociadas a la refinación alcalina; así lo reporta Yooritphun & Lilitchan, (2017).

La neutralización implica una etapa de lavado, para eliminar los jabones y otros residuos (trazas de catalizador) que se forman y luego separarlos por centrifugación. Por otra parte, se realiza un secado ya que el aceite proveniente de los lavados contiene normalmente alrededor del 0,3 – 0,5%, cantidad que es necesario reducir por debajo del 0,1%; y así tener como resultado un aceite más limpio que no afecte el rendimiento de las etapas futuras (Carrero & Girón, 2011; Avellaneda Vargas, 2010).

9.3 Blanqueado

El objetivo principal de este proceso es decolorar el aceite, descomponer los peróxidos, eliminar los compuestos oxidantes y cualquier rastro de gomas y jabones. Estas trazas de impurezas afectan directamente las propiedades organolépticas y la estabilidad oxidativa del aceite, influyendo en la calidad de este y reduciendo su durabilidad (Avellaneda Vargas, 2010).

La operación de blanqueado se logra mediante un proceso de adsorción. La adsorción es una operación física en la que ciertos componentes o materiales polares, que están disueltos o suspendidos en una fase fluida (aceite) se transfieren hacia la superficie de las partículas

sólidas de un material adsorbente. Para el proceso de blanqueo, se tienen en cuenta algunos factores como la temperatura, la humedad, la estructura, y distribución de tamaño de partícula del tipo de material empleado. En un inicio, se utilizaban tierras naturales como materiales adsorbentes; estas tierras o arcillas son silicatos de aluminio (bentonita, atapulguita, montmorillonita), las cuales contienen grandes cantidades de calcio, magnesio o hierro que limitan su capacidad adsorptiva por el alto contenido de metales. Por ello, actualmente, la mayoría de las tierras naturales decolorantes son ácido-activadas con ácido sulfúrico o ácido clorhídrico para su uso (Parra Escorza, 2016).

Otros adsorbentes utilizados son la tierra no activada, sílices sintéticas, tierras tonsil y carbón activado, siendo este último, menos utilizado debido a su alto coste y elevado porcentaje de aceite neutro en su superficie (Márquez, Brochero, & Moreno, 2012).

9.4 Desodorización

La desodorización es la fase final de los procesos de refinado. Consiste en una destilación a alto vacío con inyección de vapor y alta temperatura con el objetivo de eliminar ácidos grasos libres y compuestos volátiles odorantes (aldehídos, cetonas e hidratos de carbono saturado), subproductos de la oxidación y residuos de pesticidas e hidrocarburos policíclicos aromáticos para obtener un aceite suave y libre de compuestos orgánicos (Avellaneda Vargas, 2010; Usseglio, 2017).

Generalmente, la operación de desodorización se efectúa en procesos *batch* a pequeña escala; así como también en procesos semicontinuos o continuos a escala industrial; por otra parte, la selección del tipo de equipo desodorizador depende de muchos factores como la presión de operación, calidad del aceite, capacidad y disponibilidad de las instalaciones, el calor recuperado, la inversión y los costos de operación (Avellaneda Vargas, 2010; Usseglio, 2017).

10. PRINCIPALES RUTAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA

El uso directo de aceites vegetales es limitado, debido a su alta viscosidad. Con base en la tecnología de biocombustible existente, hay tres procesos principales que pueden utilizarse para reducir la viscosidad del aceite vegetal, de modo que pueda usarse en motores diésel sin problemas operativos tales como incrustaciones y formación de depósitos. En primer lugar, la pirolisis del bioaceite es un proceso de craqueo térmico bajo condiciones limitadas de oxígeno; en segundo lugar, la transesterificación, es el proceso más común y comercializado, es la reacción del aceite vegetal con el alcohol para producir ésteres (biodiesel) y glicerol (subproducto); finalmente, la micro emulsión es una tecnología emergente que contiene una mezcla de aceite y alcohol, generalmente inmiscibles para formar un material homogéneo mediante un surfactante y un cosurfactante como aglutinante.

10.1 Transesterificación

Actualmente, la transesterificación es la tecnología más aceptada industrialmente ya que a través de estos procesos se generan combustibles más limpios y ambientalmente seguros. es un proceso de cambio de triglicéridos con alcoholes en éste de alquilo y glicerol en presencia de catalizadores (Zanzi & Kiros, 2011).

Químicamente, el mecanismo consiste en una serie de reacciones consecutivas reversibles. En estas reacciones, los triglicéridos se convierten en diglicérido, posteriormente a monoglicérido y finalmente a glicerol, formándose en cada paso una molécula de éster, tal y como se muestra en la figura 6 (Sharma & Verma, 2016).

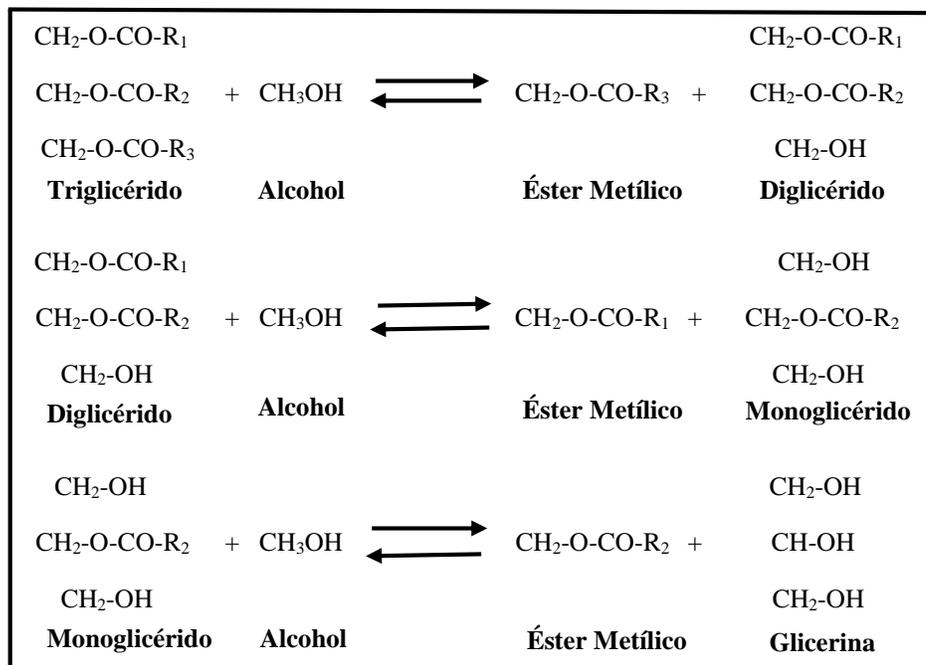


Figura 6. Etapas de la reacción de transesterificación
Fuente: (Atabani & Silitonga, 2013)

Teóricamente, en la transesterificación se necesitan tres moles de alcohol para produce tres moles de biodiesel y un mol de glicerol. Sin embargo, dado que la reacción es reversible, generalmente se prefiere un exceso de alcohol para conducir la reacción hacia su finalización en un tiempo de reacción mínimo.

La reacción de transesterificación se ve afectada por varios parámetros que dependen de las condiciones de reacción. Si los parámetros no se optimizan, la reacción es incompleta o el rendimiento se reduce significativamente (Atabani & Silitonga, 2013). Los parámetros más relevantes que afectan el proceso de transesterificación se mencionan a continuación:

1. Ácidos grasos libres, humedad y contenido de agua
2. Tipo de alcohol y relación molar empleada
3. Tipo y concentración de catalizadores
4. Temperatura y tiempo de reacción

5. Tasa y modo de agitación

10.1.1 Tipos de catálisis

La función de los catalizadores en la producción de biodiesel es modificar la cinética, mejorando las velocidades de reacción y la selectividad hacia los productos deseados. Por lo general se clasifican como, ácidos homogéneos, ácidos heterogéneos, básicos heterogéneos, básicos homogéneos o enzimáticos; de todos ellos, los procesos que se suelen emplear a escala industrial es la catálisis básica homogénea, ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas. En la tabla 7, se pueden observar algunos de los catalizadores utilizados para la obtención de biodiesel dependiendo su clasificación (Cabelloa, Rincón, & Zepeda, 2016).

Tabla 7. Tipos de catalizadores empleados en la producción de biodiesel

Tipos de catalizadores	Ejemplo de catalizadores
Ácidos homogéneos	H ₂ SO ₄ , HCL, H ₃ PO ₄
Ácidos heterogéneos	Zeolitas, resinas sulfónicas, SO ₄ /ZrO ₂ TiO ₂ y catalizadores a base de carbono
Básicos homogéneos	KOH, NaOH
Básicos heterogéneos	MgO, CaO
Enzimáticos	Lipasas

Fuente: (Cabelloa, Rincón, & Zepeda, 2016)

10.2 Catalizadores homogéneos

10.2.1 Transesterificación catalítica de base homogénea

La transesterificación alcalina homogénea es uno de los procesos más aceptados en la industria del biodiesel. Generalmente es más rápida y menos costosa. Estos procesos pueden ser catalizados por hidróxidos, alcóxidos y carbonatos metálicos. Los estudios reportan que las bases fuertes como el NaOH y el KOH son los catalizadores más utilizados. Debido a que estos hidróxidos presentan altas tasas de conversión a condiciones de operación moderada y tiempos cortos de reacción, además son menos corrosivos para los equipos industriales y requieren volúmenes mínimos de alcohol, lo que representa reactores económicos y de menor tamaño. Sin embargo, para funcionar óptimamente se requieren materias primas de alta calidad, es decir, aceites con una baja concentración de ácidos grasos libres, sin gomas ni impurezas. También es importante que su humedad sea mínima, de lo contrario se generarán reacciones secundarias de saponificación o neutralización (Lam & Jamalluddin, 2019; Sharma & Verma, 2016). En la tabla 8, se muestran algunas de las condiciones de reacción típicas para la producción de biodiesel utilizando catalizadores de base homogéneos.

Tabla 8. Condiciones típicas de reacción para la producción de biodiésel a partir de aceite de palma mediante transesterificación catalizada por bases.

Materia Prima	Aceite vegetal (triglicérido) refinado (FFA < 0,5% en peso; H ₂ O < 0,06% en peso), alcoholes de cadena corta; por lo general etanol y metanol.
Relación molar alcohol/aceite	3:1 – 9:1 (generalmente 6:1)
Temperatura de reacción (°C)	20 – 75 (por lo general, 60 – 65°C)
Presión (Mpa)	0,14 – 0,41
Catalizador	NaOH – KOH
Concentración de catalizador	0,25 – 2 % en peso
Velocidad de agitación	300 – 600 rpm
Tiempo de reacción	1 a 3 horas (por lo general, 1 hora para conversión ≥ 98%)

Fuente: (Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012)

10.2.2 Transesterificación catalítica de ácido homogéneo

En la producción de biodiesel por transesterificación ácida, se suelen utilizar catalizadores como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, y ácido sulfónico, dichos catalizadores generan altos rendimientos de ésteres alquílicos; sin embargo, las reacciones son muy lentas, necesitando temperaturas por arriba de los 100°C y más de 3 horas de reacción para alcanzar una conversión completa. Una de las ventajas del principio de la catálisis ácida es que cualquier ácido graso libre se puede esterificar o convertir en biodiésel. La tabla 9, muestra las condiciones típicas de operación en el proceso de transesterificación catalizados por ácidos homogéneos (Lam & Jamalluddin, 2019; Sharma & Verma, 2016).

Tabla 9. Condiciones típicas de reacción para la producción de biodiésel por transesterificación ácida

Materia prima	Mezcla de triglicéridos con alto contenido de FFA, alcoholes (generalmente metanol).
Relación molar alcohol/aceite	30:1 – 50:1
Temperatura de reacción (°C)	50 – 150
Presión (Mpa)	0,4
Catalizador	H ₂ SO ₄
Concentración de catalizador	0,5 – 4 % en peso
Tiempo de reacción	97% después de 6 horas

Fuente: (Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012)

En la tabla 10, se pueden observar las principales ventajas y desventajas de los procesos de transesterificación catalítica homogénea:

Tabla 10. Ventajas y desventajas de los catalizadores homogéneos en medio ácido y básico usados en la transesterificación de aceites

CATALIZADORES HOMOGÉNEOS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
CATALIZADORES BÁSICOS	
Operan a condiciones de temperatura y presión moderada.	Los catalizadores requieren estar en estado anhidro.
Ofrecen una cinética favorable: alta actividad y porcentajes altos de rendimiento en poco tiempo (1 hora).	Formación de jabones y pérdida de ésteres si el contenido de ácidos grasos libres en el aceite es más de 2%.
Velocidad de reacción muy rápida. 4000 veces más rápida que la transesterificación catalizada por ácido.	Necesidad de etapas de purificación. No es posible reutilizar el catalizador.
Catalizadores como KOH Y NaOH son relativamente baratos y fáciles de conseguir.	
CATALIZADORES ÁCIDOS	
No requiere que los reactivos sean anhidros	Los catalizadores ácidos son corrosivos
Baja susceptibilidad a la presencia de ácidos grasos libres en el aceite.	Dificultad de separación del catalizador
Eliminan reacciones secundarias como la saponificación.	Formación de productos secundarios Velocidad de reacción muy lenta
La esterificación y transesterificación puede ocurrir simultáneamente.	Tiempo largos de reacción (>3 horas) Temperaturas elevadas (>100°C) Grandes cantidades de alcohol

Fuente: (Lam & Jamalluddin, 2019; Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012)

10.3 Transesterificación catalítica heterogénea

Debido a la gran dificultad de separar el catalizador homogéneo tras la reacción y también a la enorme cantidad de aguas residuales generadas, los catalizadores heterogéneos aparecen como una excelente solución a este problema. Este enfoque es más amigable con el medio ambiente y reduce indirectamente el coste global de la producción de biodiesel.

El mecanismo por el cual se produce la reacción de transesterificación mediante catálisis heterogénea se basa en principios similares a los que se dan en la catálisis homogénea bien sea en sistemas ácidos o básicos. La principal diferencia de los sistemas de catálisis heterogénea es la adsorción de sustancias y la desorción de productos a través de la superficie de un catalizador sólido (Zanzi & Kiros, 2011). Por lo tanto, una alta superficie específica, un gran volumen de poros, un tamaño de mesoporos, una alta estabilidad y resistencia térmica son una de las características físicas más importantes en los catalizadores heterogéneos que se van a utilizar en la reacción de transesterificación para minimizar la limitación de la transferencia de masa y aumentar directamente la velocidad de reacción (Iglesias & Bautista, 2011). Además de factores paramétricos de operación como una temperatura de reacción elevada, una relación molar alta entre el alcohol y el aceite (6:1 – 40:1) y un tiempo de reacción largo, debido a la limitación de la transferencia de masa del catalizador heterogéneo de aceite a alcohol en la etapa inicial de la reacción (Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012; Semwal, Badoni, & Tuli, 2011).

Los sistemas de transesterificación heterogénea tienen la ventaja de separar fácilmente el catalizador, así como también la reutilización del catalizador que se emplea ya que se encuentran en una fase diferente a los reactivos, es decir, que no se encuentra disuelto en el alcohol o en el aceite sino en una fase sólida. Por otra parte, implican la eliminación de etapas adicionales al proceso como el lavado, recuperación de biodiesel y de catalizador asegurando así una mayor eficiencia y rentabilidad del proceso al reducir sus costos de producción. Generalmente, los catalizadores heterogéneos están compuestos por óxidos de metales alcalinotérreos, metóxidos, resinas de intercambio iónico y compuestos metálicos soportados sobre alúmina o sílice (Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012; Semwal, Badoni, & Tuli, 2011). A continuación, se presentan algunos factores por los cuales se prefiere utilizar catalizadores heterogéneos:

- La separación entre el catalizador y el producto se llevan a cabo fácilmente
- El catalizador tiene el potencial de ser reciclado y regenerado
- Minimizan el número de pasos de lavados requeridos
- Evita la formación de reacciones de saponificación
- Los porcentajes de conversión con catalizadores heterogéneos pueden llegar a ser mayores del 92%.
- Menos corrosión hacia la pared de los reactores, tuberías y válvulas en comparación con el catalizador ácido heterogéneo
- Tienen una fácil recuperación del catalizador del medio de reacción

10.3.1 Transesterificación catalítica heterogénea sólido - base

Las zeolitas básicas, los óxidos metálicos alcalinotérreos, los metales alcalinos soportados, son algunos de los catalizadores heterogéneos que presentan propiedades alcalinas en su superficie y han sido identificados como una buena opción para sustituir a los actuales catalizadores de base homogénea para la producción de biodiesel. Sin embargo, los catalizadores de base heterogénea siguen siendo muy sensibles al contenido de ácidos grasos en el aceite. Por tanto, uno de los principales retos a los que se enfrenta el desarrollo de los catalizadores de base heterogénea es su capacidad para soportar un aceite con un alto contenido en ácidos grasos libres en condiciones moderadas de reacción.

Considerando lo anterior, algunas de las investigaciones han puesto su atención en el óxido de calcio (CaO) debido a sus sitios básicos relativamente altos, no tóxicos, baja solubilidad en metanol y la posibilidad de poder ser obtenido a partir de recursos baratos como la piedra de cal y el hidróxido de calcio. No obstante, una de las desventajas es el envenenamiento por el contacto con el aire debido a la adsorción de CO₂ y H₂O en la superficie del catalizador.

Autores como Puttasawat & Yoosuk, (2010) llevaron a cabo un estudio de investigación en el que se utilizó CaO como catalizador en la transesterificación del aceite de palma. En su reporte se patentizó que el CaO puede mejorar aún más sus propiedades físicas y químicas, como el área superficial, el volumen de poros, el número de sitios básicos y la fuerza básica a través del método de hidratación-deshidratación. En consecuencia, el catalizador fue empleado en la transesterificación del aceite de palma y el rendimiento óptimo alcanzado fue del 96% con las siguientes condiciones de reacción: temperatura de la mezcla de 60°C, catalizador en una cantidad de 1,6 g (7% en peso de catalizador basado en el peso del aceite), relación molar metanol/aceite de 15:1 y tiempo de reacción de 45 min. En la tabla 11, se pueden observar algunas condiciones aplicadas en estudios investigativos a partir de catalizadores de base heterogénea.

Tabla 11. Estudios de literatura sobre la transesterificación catalizada por bases heterogéneas

Catalizador	Relación molar metanol/aceite	Temperatura de reacción	Concentración de catalizador	Velocidad de agitación	Rendimiento (%) Tiempo (h)
CaO/Al ₂ O ₃	6:1 – 24:1	40 – 60 °C	1 – 8 % en peso	1000 rpm	29 – 91 / 5 horas
CaO – CeO ₂	20:1	85 °C	5 % en peso	1200 rpm	95 / 3 horas
Oxidos metálicos (CaO/MgO)	9:1	65 °C	3,5 % en peso	-	90 – 9 / 3 horas

Fuente: (Marinković & Jovanovića, 2016; Wong & Tan, 2015)

10.3.2 Transesterificación catalítica heterogénea sólido – ácido

Los catalizadores ácidos heterogéneos tienen la capacidad de catalizar simultáneamente reacciones de esterificación y transesterificación. Esto se debe a que este tipo de catalizador no se ve afectado por el agua ni los ácidos grasos libres. Además, con estos catalizadores se elimina la etapa de lavado, se minimizan los problemas de corrosión y se regenera fácilmente (Abbaszadeh & Ghobadian, 2012). En general, un catalizador ácido sólido debe poseer una excelente estabilidad, sitios ácidos fuertes, una gran área superficial y una superficie hidrofóbica que proporciona condiciones favorables a la reacción.

En los últimos años se ha estudiado el potencial y el rendimiento de biodiésel de palma a través de catalizadores como el óxido de circonio sulfatado ($\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$), óxido de titanio sulfatado ($\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$), catalizadores a base de carbono sulfonado, y catalizadores de grafeno sulfonado.

En el estudio realizado por Nongbe & Ekou en el 2017, se desarrolló un catalizador de grafeno sulfonado altamente activo (GR-SO₃H) para la transesterificación de aceite de palma y metanol. El catalizador se preparó mediante una exfoliación química de grafito, seguida de una funcionalización del grafeno preparado con ácido bencenosulfónico. En la investigación se reportó un rendimiento de biodiesel de palma del 98% a una temperatura de 100°C con una relación molar metanol-aceite de 20:1 durante 14 horas de reacción. El excelente rendimiento catalítico del catalizador (GR-SO₃H) para la producción de biodiesel se atribuye a una buena densidad ácida, elevada hidrofobicidad y excelente estabilidad térmica.

La alta porosidad y elevada superficie del material de soporte pueden proporcionar ventajas adicionales para la producción de biodiesel, ya que este material podría suministrar suficiente espacio para la dispersión de sitios activos. El catalizador de circonio soportado sobre materiales mesoporosos (Zr/SBA-15) mostró un buen comportamiento en la transesterificación de aceite crudo de palma con un índice de acidez de 21,4 mg KOH. El rendimiento máximo de biodiesel obtenido por el catalizador fue superior al 70% a un tiempo y temperatura de reacción de 200 °C Y 3 horas, una relación molar metanol/aceite de 30:1 y una cantidad de catalizador del 10 % en peso (Iglesias & Bautista, 2011).

10.3.3 Transesterificación Biocatalítica

Los procesos de transesterificación por catálisis enzimática son otra de las formas de obtener biodiesel, es un procedimiento menos intensivo en energía y amigable con el medio ambiente. La catálisis enzimática es normalmente llevada a cabo por lipasas, las cuales son capaces de catalizar las reacciones de transesterificación y esterificación simultáneamente. En estos procesos los ácidos grasos libres contenidos en los aceites pueden ser completamente transformados a ésteres metílicos sin requerir un tratamiento posterior de aguas residuales. *Candida antarctica* (Novozym 435), *Rhizomucor miehei* (Lipozym IM 60), *Pseudomonas cepacia* (PS 30), y *Bacillus subtilis* son los ejemplos de enzimas que han mostrado una buena

actividad catalítica en la transesterificación (Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012; Cabelloa, Rincón, & Zepeda, 2016).

El proceso de transesterificación biocatalítico, abarca muchas ventajas en comparación de los procesos de transesterificación catalizada químicamente, como la generación de subproductos nulos, la eliminación de productos sin inconvenientes, y moderadas condiciones de operación (temperatura, 35 – 45°C) lo que supone un ahorro energético elevado; no obstante, se han reportado algunas limitaciones cuando se implementa a escala industrial como el alto costo de la enzima, la velocidad de reacción lenta y la desactivación de la enzima (Abbaszaadeh & Ghobadian, 2012; Cabelloa, Rincón, & Zepeda, 2016).

La disponibilidad de área interfacial es uno de los factores que influyen en la actividad enzimática; por tanto, a diferencia del catalizador químico, la transesterificación enzimática requiere cierta cantidad de agua en el medio de reacción para mantener la actividad catalítica de la enzima y aumentar el área interfacial entre los reactivos que posteriormente aceleraran la velocidad de reacción de transesterificación. Así como también la adición de disolventes al medio de reacción para asegurar una fase homogénea entre el aceite y el alcohol, y reducir la limitación de la transferencia de masa, y por tanto, mejorar la actividad catalítica de la lipasa (Fan & Sandoval, 2012).

Estudios demuestran que el proceso enzimático puede producir productos de alta pureza porque es fácil eliminar subproductos como el glicerol, Novozym 435 ha sido reportado como un biocatalizador que indica una alta conversión, capaz de catalizar una variedad de reacciones químicas orgánicas; es biodegradable, no hay posibilidad de que se forme jabón y puede ser utilizado reiteradamente; así lo reporta Manurung, Hasibuan, & Siregar, (2020) en su investigación en el que se alcanzó un rendimiento del 98,83% en esteres con una relación molar alcohol (etanol) y aceite refinado de palma del 6:1 en 7 horas de reacción a una temperatura de 40°C y una carga de catalizador del 30% (p/p).

Es otro el caso en el que emplea Lipozyme TL IM como catalizador y aceite crudo de palma como materia prima, del cual se reportó un rendimiento del 85% a una temperatura de reacción de 30°C, carga enzimática de 6,67 % (p/p), velocidad de agitación de 150 rpm, y tiempo de reacción de 6h (Khor & Hekarl, 2010). En consideración a lo anteriormente expuesto, se demuestra que la transesterificación enzimática es una opción bastante viable para producir biodiesel de palma a temperatura ambiente, y, por lo tanto, reducir la necesidad de energía en la producción de biodiesel.

10.3.4 Transesterificación no catalítica: Método del alcohol súper crítico

La transesterificación no catalítica con alcohol supercrítico es otra de las tecnologías investigadas en el campo de la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma. Se realiza bajo las condiciones supercríticas del alcohol utilizado (etanol, metanol, propanol y butanol), por lo general, en un rango de temperatura de 250 a 400°C y presión crítica de 3 a 20 Mpa. Con este método, el aceite se puede convertir en biodiesel en un tiempo de reacción

más corto (10 – 30 min), es decir, la velocidad de reacción es muy rápida y las tasas de conversión son superiores al 96% (Makareviciene & Sendzikiene, 2021). Además, no se requiere catalizador de ningún tipo para la reacción, lo que resulta ventajoso pues se evita la etapa de lavado del biodiesel para neutralizarlo. De igual modo, el procedimiento no se ve afectado negativamente por el contenido de agua y ácidos grasos libres presentes en el aceite. No obstante, dicha ruta no catalítica posee como desventaja principal el requerimiento de condiciones operativas extremas que se traduce en altos costes energéticos y en la degradación de los productos generados, lo que resulta inviable para la producción a escala industrial (Farobie & Matsumura, 2017). En la tabla 12, se pueden observar algunos de los parámetros de operación para la producción de biodiesel a partir de alcoholes en condiciones supercríticos.

Tabla 12. Condiciones de operación supercrítica de diferentes alcoholes

Alcohol supercrítico	Relación molar alcohol/aceite	Presión (Mpa)	Temperatura (°C)	Tiempo de reacción (minutos)	Rendimiento % en peso
Metanol	40:1	15 - 25	372	16	81,5
Etanol	33:1	15 - 25	349	29	79,2
Acetato de metilo	42:1	20	300	45	95

Fuente: (Santana & AngelesLarrayoz, 2012; Goembira & Saka, 2013)

10.4 Otras tecnologías de producción

10.4.1 Transesterificación asistida por ultrasonidos

El ultrasonido se define como un sonido con una frecuencia más allá del nivel detectable del oído humano. La frecuencia de sonido normal que puede detectar el oído humano está entre 0,016 a 18 KHz, y la frecuencia de los ultrasonidos se encuentra generalmente entre 20 KHz y 100 MHz. Esta onda sonora de alta frecuencia provoca que el espaciado molecular de la reacción de la mezcla se estire y comprima al pasar a través de él, dando como resultado una variación de presión. Así, las moléculas vibran continuamente generando una gran cantidad de burbujas de cavitación. Por tanto, las burbujas colapsadas interrumpen el límite de fase y el impacto de los líquidos para crear micro chorros, lo que conduce a una emulsión intensa del sistema, aumentando el área interfacial entre los reactivos y facilitando la cinética de la reacción (Chuah, Yusup, & Akbard, 2017).

Actualmente, la investigación sobre el uso de la tecnología de ultrasonidos en la transesterificación del aceite de palma es relativamente limitada en comparación con la investigación de otros aceites vegetales. No obstante, dentro de los hallazgos, se informa que dicho método puede traer efectos muy positivos; aumenta la transferencia de masa entre el aceite y el alcohol durante la producción de biodiésel, además de eso, la aplicación de

ultrasonidos, contribuye a reducir los tiempos de reacción, aumentar la velocidad de reacción y la eficiencia energética en los procesos de transesterificación (Arumugan & Reddy, 2020).

Salamatinia, & Abdullah, demostraron una mejora significativa en la velocidad de reacción de transesterificación del aceite de palma utilizando óxidos de metales alcalinotérreos (SrO y BaO), mediante la tecnología de ultrasonidos. En el estudio se alcanzaron rendimientos del 95%, bajo las condiciones de catalizador al 3% en peso, relación molar de aceite a metanol 1:9 y amplitud ultrasónica del 50%, con un tiempo de reacción de 60 minutos y temperatura fija de 65°C.

Es otro el caso de Sheng & Loon Chan, (2014), en el que se estudió la transesterificación asistida por ultrasonido de aceites crudo de palma utilizando un catalizador heterogéneo de óxido de calcio soportado por cenizas volantes de molino de aceite de palma. En la investigación se deduce que el tiempo de reacción disminuyó significativamente de un máximo de 360 minutos con mezcla convencional a tan solo 30 minutos con el uso de ultrasonidos. Se obtuvo un rendimiento del 97% con las siguientes condiciones de operación: 60% de amplitud ultrasónica, 30 minutos de tiempo de reacción, 4% en peso de carga de catalizador y una relación molar de metanol a aceite de 9:1. En la tabla 13, se muestran otros estudios realizados por diferentes autores, en los cuales resaltan la eficacia de la tecnología de ultrasonidos para mejorar la transesterificación del aceite de palma.

Tabla 13. Condiciones empleadas en los análisis del proceso de transesterificación por ultrasonido

Catalizador	Cantidad de catalizador	Reactivo	Relación molar de aceite/alcohol	Condición de reacción	Rendimiento/ conversión de éster
Residuos de CaO derivado de la cascara de huevo de avestruz	8 % en peso	Metanol	1:9	60°C / 60 minutos y 60% de amplitud	92,7%
KOH	1 % en peso	Metanol	1:6	55°C 20 minutos	93,84%
CaO SrO BaO	3% en peso	Metanol	1:9	65°C / 60 minutos y 50% de amplitud	77,3% 95,2 95,2

Fuente: (Chen & Shan, 2014; Sajjadi & Ibrahim, 2015; Salaminia & Abdullah, 2010)

10.4.2 Transesterificación asistida por microondas

La transesterificación por microondas es otra de las rutas investigadas para la producción de biodiésel, lo consideran un método prometedor, por su eficiencia energética, procesamiento rápido, mejor control de la temperatura y por ser un proceso ambientalmente positivo. Durante este proceso, los reactantes reciben energía directa, provocando que la transferencia

de calor sea mayor, y por tanto, las reacciones se produzcan con mayor rapidez en tiempos más cortos (Khedri & Mohammad, 2018).

En la investigación desarrollada por khemthong & luadthong, (2012), se empleó CaO como catalizador heterogéneo en el sistema de calentamiento por microondas, obtenido a partir de residuos de cascara de huevo para la producción de biodiésel a partir de aceite de palma. En el estudio, se tuvo en cuenta el efecto de diferentes parámetros de reacción, como el nivel de potencia de salida de las microondas, la relación alcohol aceite, el tiempo de reacción y la carga del catalizador, así y tal como se muestra en la tabla 14. El resultado experimental demostró un alto rendimiento de producción de biodiesel del 96,7%.

Tabla 14. Parámetros de operación investigados en el estudio de transesterificación por microondas

Tiempo de reacción	4 min
Nivel de potencia de las microondas	900 W
Carga de catalizador	15%
Relación alcohol/aceite	18:1
Rendimiento	96,7%

Fuente: (Khemthong & Luadthong, 2012)

Este y otros estudios como el de Lin & Hsu, (2014), (ver tabla 15), demuestran que el proceso de transesterificación asistido por microondas proporciona un buen rendimiento y eficiencia energética al tomar menos tiempo para procesar una cantidad determinada de aceite. Sin embargo, aún se desconoce mucho sobre esta tecnología.

Tabla 15. Parámetros de operación reportados en la investigación

Catalizador	CH ₃ NaO
Carga de catalizador	0,75
Nivel de potencia de las microondas	750 W
Relación alcohol/aceite	1:6
Reactivo	Metanol
Tiempo de reacción	3 min
Rendimiento	99,7%

Fuente: (Lin & Hsu, 2014)

10.5 Pirólisis

La pirólisis es un mecanismo de conversión termoquímico, causado por la aplicación de energía térmica en ausencia de aire u oxígeno, o por la aplicación de calor en presencia de un catalizador, que da lugar a la ruptura de las cadenas más pesadas de ácidos grasos contenidas en el aceite de palma en productos ligeros y útiles como olefinas, parafinas,

cetonas y aldehídos (Roslam & Yarmo, 2012). En términos generales, el proceso de craqueo de triglicéridos presenta dos tendencias: craqueo térmico y craqueo catalítico. En estos procesos; la descomposición térmica de los componentes orgánicos en la biomasa ocurre normalmente a temperaturas en el rango de 350°C hasta 800°C en ausencia de aire/oxígeno que da lugar a la ruptura de enlaces químicos y a la formación de una variedad de moléculas más pequeñas. La velocidad y el grado de descomposición de cada uno de los componentes durante el proceso dependen en gran medida de parámetros como la temperatura de reacción, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, presión, características de la materia prima y configuración del reactor (Ocampo Batlle & Venturini, 2020).

10.5.1 Clasificación de pirólisis

El proceso de pirólisis se divide en función de las condiciones de operación, entre ellas, la operación convencional, pirólisis rápida, y pirólisis flash (Jahirul & Ashwath, 2012). La pirólisis rápida se distingue de las demás porque puede maximizar la producción de biocombustibles en un 75%, dentro de los principales parámetros de operación se requiere una velocidad de calentamiento muy alta, una temperatura de reacción en el rango de 400 a 600°C, y un tiempo de residencia de los gases desprendidos en el reactor de menos de 3 segundos (Nigatu & Marchetti, 2017). Aunque los procesos de pirólisis son bastante rápidos, tienen inconvenientes, como la escasa estabilidad térmica, la presencia de partículas sólidas en el biocombustible generado y el aumento de la viscosidad con el tiempo.

En la tabla 16, se muestra la clasificación de los tipos de pirolisis, parámetros de operación y rendimientos de los productos que pueden ser obtenidos.

Tabla 16. Clasificación, parámetros y productos obtenidos de los tipos de pirólisis

Proceso de pirólisis	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento (°C/s)	Rendimiento del producto (%)		
				Biocombustible	Carbón	Gases
Lenta	400-500	5-30 min	0,1-1	30	35	35
Rápida	400-650	0,5-2 s	10-200	75	20	30
Flash	700-1000	< 0,5 s	>1000	50	12	13

Fuente: (Nigatu & Marchetti, 2017)

En el campo investigativo de la producción de biodiésel a partir de aceite de palma, algunos autores han caracterizado la pirólisis como un proceso de transformación eficaz, simple, sin desperdicio y libre de contaminación; capaz de obtener un producto con un alto índice de cetano, baja viscosidad y cantidades aceptables de azufre, agua y sedimentos. Sin embargo, los equipos que se utilizan para este proceso son muy costosos y tienen rendimientos de proceso muy bajos, una de las deficiencias más consideradas en los estudios es la generación de materiales de bajo valor debido a la eliminación de oxígeno durante el procesamiento térmico lo que resulta en la eliminación de cualquier beneficio medioambiental del uso de un combustible oxigenado (Atabani & Silitonga, 2013; Intarapong & Malakul, 2016).

10.5.2 Elección del reactor de pirólisis

En cuanto al diseño y elección del reactor existen algunos factores que deben considerarse cuidadosamente al construir el reactor, dentro de ellos la operación química del proceso, la cinética del proceso de craqueo, el craqueo térmico, la temperatura de craqueo y el ajuste del tiempo de residencia frente al tiempo de contacto del catalizador (Ramadhani, Laniwati, & Muraza, 2020). En la literatura se reportan diferentes análisis con respecto a la configuración de reacción para el craqueo catalítico del aceite de palma, los reactores de lecho fijo, de flujo arrastrado, de transporte y de lecho fluidizado son los sistemas de reacción más utilizados (Kurnia, Jangam, & Akhtar, 2016).

10.5.3 Efecto del catalizador en los procesos de pirólisis

Los catalizadores son empleados con el fin de mejorar la cinética de la reacción de pirólisis y reducir la temperatura mediante el craqueo de compuestos de mayor peso molecular en productos de hidrocarburos más ligeros. La acidez, el tamaño, la forma de los poros y la selectividad son propiedades clave que influyen en la actividad catalítica de la reacción de craqueo, de los cuales la zeolita, los óxidos metálicos, la alúmina y la sílice son comúnmente los más empleados (Kurnia, Jangam, & Akhtar, 2016). En la tabla 17, se muestran algunos de los estudios en los que se evaluaron diferentes tipos de catalizador, conversión y rendimiento del producto obtenido. De la revisión se concluye que las zeolitas son los catalizadores más empleados para los procesos de craqueo catalítico, de hecho, entre estos catalizadores, el HZSM-5 ofrece mejores resultados en cuanto a la conversión de aceite de palma y rendimiento (Tambun & Gusti, 2017).

Tabla 17. Rendimientos por craqueo catalítico térmico de aceite de palma crudo a partir de diferentes tipos de catalizador y reactor.

Tipo de Reactor	Catalizador Utilizado	Temperatura de Funcionamiento (°C)	Conversión del Aceite de Palma	Rendimiento producto (%)	Autores
Reactor por lotes	Na ₂ CO ₃	450	-	65,86	(Mancio & Ferreira, 2016)
Reactor de lecho fijo	Zeolita ZSM-5	450	98	84,82	(Tambun & Gusti, 2017)
Reactor de lecho fijo	HY – Zeolita	400	84	34,25	(Gurdeep & Yusup, 2020)
-	Co ₃ O ₄ , KOH, Mo O ₃ , NiO, V ₂ O ₅ , ZnO	320	71,6	33,62	(Demrew & Muthukumar, 2014)

10.6 MICROEMULSIFICACIÓN

Entre las diversas tecnologías avanzadas de producción de combustibles a base de aceites vegetales, la microemulsificación se está convirtiendo en un campo de investigación de primer nivel, ya que ofrece ventajas significativas desde la perspectiva de la economía de procesos y la conservación de energía (Sabatini & Khaodhiar, 2015). Estas ventajas incluyen ciclo de producción corto, implementación simple, sin necesidad de calor, y sin formación de subproductos debido a la no participación de reacciones químicas; lo que resulta en menores costos de producción (Buyinda & Dze Giyo, 2020).

El método de microemulsificación implica la simple mezcla de aceite vegetal (fase no polar) con un disolvente polar (por lo general, agua o etanol) en presencia de agentes tensioactivos (agentes activos de superficie). Los tensioactivos son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (Sabatini & Khaodhiar, 2015). Los biocombustibles basados en microemulsión, o combustibles híbridos, son microemulsiones Winsor Tipo II (sistema de dos fases), transparentes y termodinámicamente estables cuya fase de etanol polar se solubiliza en micelas inversas que se producen en la fase no polar. Por lo tanto, en el biocombustible a base de microemulsiones, se utiliza etanol en lugar de agua como fase polar que se dispersa en el aceite vegetal como fase no polar estabilizada por tensioactivos o moléculas anfifílicas en condiciones apropiadas (Attaphong & Sabatini, 2012).

Charoensaeng & Khaodhiar, (2014), señala en su informe, que a pesar de eliminar algunas de las deficiencias del uso directo de aceite vegetal como combustible cuando se utilizan microemulsiones, aún persisten problemas de deposición de carbono en las válvulas de escape y en las boquillas de los inyectores, combustión incompleta y muchas veces la viscosidad de dicha microemulsión no cumple los límites exigidos por la norma ASTM D6751, que indican que la viscosidad cinemática del biodiésel está en el rango de 1,9 – 6,0 mm²/s. No obstante, la formulación de microemulsiones podría ser un método prometedor para obtener mezclas de combustibles de baja viscosidad con aceites vegetales directos (Sorrasuchart & Arpornpong, 2017).

11. ESPECIFICACIONES DE LA CALIDAD DEL BIODIÉSEL DE ACEITE DE PALMA

Los estándares de calidad del biodiésel obtenido se evalúan a través de ciertos parámetros fisicoquímicos que han sido establecidos con el fin de medir sus propiedades y determinar si es un combustible apto para la comercialización e introducción al mercado para uso en motores diésel. Las especificaciones técnicas del biodiésel en Colombia están reguladas por la norma colombiana de biodiésel (NTC 5444), la cual está basada en las normas de Estados Unidos (ASTM D6751), (ver tabla 18). El biodiésel producido a partir de aceite de palma

tiene excelentes propiedades, y es mucho más comparable con el combustible diésel. Por ejemplo, tiene un índice de cetano más alto que el combustible diésel, lo que mejora el rendimiento del motor y reduce las emisiones de escape (Sukiman & Muhammad, 2020).

Tabla 18. Especificaciones de la norma de técnica colombiana NTC 5444 para mezclas con combustible diésel

Propiedad	Unidades	Especificación	Métodos de ensayo
Densidad a 15 °C	kg/m ³	Mínimo 860 Máximo 900	ASTM D 4052 ISO3675
Número de cetano	% Cetanos	Mínimo 47	ASTM D 613 ISO 5165
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	Mínimo 1.9 Máximo 6.0	ASTM D 445 ISO 3104
Contenido de agua	mg/kg	Máximo 500	ASTM D 203 ISO12937
Contaminación total	mg/kg	Máximo 24	EN ISO 12662
Punto de inflamación	°C	Mínimo 120	ASTM D 93 ISO 2719
Contenido de metanol o etanol	% en masa	Máximo 0,2	ISO 14110
Corrosión en lamina de cobre	Unidad	Clase 1	ASTM D 130 ISO 2160
Estabilidad a la oxidación	Horas	Mínimo 6	EN 14112
Estabilidad térmica	% Reflectancia	Mínimo 70%	ASTM D6468
Cenizas sulfatadas	% en masa	Máximo 0.02	ASTM D 874 ISO 3987
Destilación (punto final de ebullición)	°C	Máximo 360	ASTM D 86 ISO 3405
Número ácido (acidez)	mg de KOH /g	Máximo 0,5	ASTM D 664 EN 14104
Índice de yodo	gr yodo/100g	Máximo 120	EN 14111
Punto de fluidez	°C	Reportar	ASTM D 97
Temperatura de obturación del filtro (POFF)	°C	Reportar	ASTM D 6371 EN 116
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	Reportar	ASTM D 2500 ISO 3015
Carbón residual	% en masa	Máximo 0.30	ASTM D 4530 ISO 10370
Contenido de fosforo	mg/kg	Máximo 10	ASTM D 4951 EN 14107
Contenido de Na + K	mg/kg	Máximo 5	ASTM D 5863 EN 14108 / EN 14109
Contenido de Ca + Mg	mg/kg	Máximo 5	ASTM D 5863 EN 14108 / EN 14109
Contenido de éster	% en masa	Mínimo 96,5	EN 14103

Contenido de alquil éster de ácido linolénico	% en masa	Máximo 12,0	EN 14103
Contenido de glicerina libre	% en masa	Máximo 0,02	ASTM D 6584 EN 14105/ EN 14106
Contenido de glicerina total	% en masa	Máximo 0,25	ASTM D 6584 ISO 14105
Contenido de monoglicéridos	% en masa	Máximo 0,80	ASTM D 6584 ISO 14105
Contenido de diglicéridos	% en masa	Máximo 0,20	ASTM D 6584 ISO 14105
Contenido de triglicéridos	% en masa	Máximo 0,20	ASTM D 6584 ISO 14105

Fuente: (Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación (Icontec), 2018)

12. COMPARACIÓN DE LAS RUTAS DE CONVERSIÓN Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN MEDIANTE ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD

La transesterificación catalizada por bases es el proceso más utilizado a escala industrial por su alta viabilidad económica para la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma de alta calidad. No obstante, una materia prima con alto contenido en ácidos grasos libres y agua hace el proceso no rentable. Debido al incremento de costos adicionales para etapas de pre tratamiento de la materia prima, separación y purificación del producto.

En cuanto a la revisión de costos, no existe una unicidad, ya que estos pueden variar con el tiempo. En la literatura Se registran costos entre 0,23 y 0,39 USD para los procesos catalizados por bases, y para los procesos catalizados por ácidos costos de 0,45 a 0,39 USD. Al mismo tiempo, el consumo de alcohol y el consumo global de energía (calefacción y electricidad) del proceso catalizado con ácido oscila entre 1,58 y 1,77 kg de metanol/ kg de crudo y calefacción de 53,39 – 72,76 MW, respectivamente. De acuerdo con los aportes de la literatura estos valores son más altos, en cuanto a la energía y alcohol necesario para el proceso catalítico básico (0,16 – 0,21 kg de metanol / kg de aceite y calefacción de 24,73 – 29,96 MW) (Rincón, Jaramillo, & Cardona, 2014; Gebremariam & Marchetti, 2018)

Otro reporte en el que se estiman los costos de conversión en una planta comercial de proceso homogéneo se considera un costo total de \$ US 258 por tonelada de capacidad anual de producción de biodiesel, los cuales incluyen el gasto asociado con la materia prima, servicios públicos, mano de obra, catalizador, y mantenimiento (Jovanović & Bošković, 2010).

Los rendimientos obtenidos por los procesos de transesterificación catalizados mediante bases y ácidos oscilan entre 95 y 98%, con la diferencia que los tiempos de reacción son mucho más cortos en los procesos catalizados por bases. La transesterificación catalizada por ácidos, puede esterificar los ácidos grasos libres en ésteres de biodiésel y, al mismo tiempo, catalizar la transesterificación de triglicéridos a biodiesel todo en un solo paso. Sin embargo, la reacción catalizada por ácido es muy lenta, requiere más alcohol, un reactor más grande, e impone el deterioro del equipo a consecuencia de la corrosión del ácido (Lam & Jamalluddin,

2019). En cuanto al impacto ambiental potencial (PEI), se estima que los procesos catalizados por bases y ácidos generan entre 0,04-0,09 y 0,020-0,06 PEI por kg de producto; esto se resume a que la materia prima procesada utilizando rutas catalizadas básicas tienen mayores potenciales de mitigación en comparación con las rutas catalizadas por ácidos (Rincón, Jaramillo, & Cardona, 2014).

En términos de economía, la transesterificación por catálisis heterogénea resulta mucho más ventajosa que los procesos homogéneos ya que requiere menos pasos de proceso para la separación y purificación del producto, se genera glicerol de alta pureza y el catalizador puede ser recuperado fácilmente, así como también regenerado una vez finalizada la reacción, con la capacidad de poder ser reutilizado durante un promedio de seis a ocho ciclos con solo una disminución marginal en sus rendimientos, además, los costos de catalizadores heterogéneos son un 20 % más bajos que los homogéneos (Marwaha, Dhir, & Kumar, 2018). Todos estos atributos tecnológicos hacen a los catalizadores heterogéneos uno de los mejores candidatos para reducir el costo unitario de producción de biodiésel.

En comparación con la catálisis homogénea, los procesos heterogéneos emplean catalizadores con una naturaleza altamente activa y amigable con el medio ambiente, incluyen rendimientos altos en ausencia de reacciones secundarias como la formación de jabón y ácidos grasos, diseño más simple, ya que no se requieren etapas de purificación y separación, altos contenidos de glicerina con muy bajo contenido de agua y sin contaminantes salinos, son altamente eficientes para aceites con alto contenido de ácidos grasos y agua, poseen una superficie grande y porosa que mejora la eficacia del catalizador; y lo mejor, es que pueden ser sintetizados a partir de diversas fuentes como cascara de huevo, cenizas y rocas, interés que surge sobre los catalizadores heterogéneos ya que implican también, la ausencia de ácidos muy fuertes, y de etapas de purificación, reduciendo así, el consumo de energía y la emisión de gases efecto invernadero, como también, reducción del riesgo asociado con el derrame de productos químicos peligrosos, e inflamables al medio ambiente (SukLee & Saka, 2012; Sharma & Verma, 2016). Por tanto, al considerar la evaluación económica de procesos heterogéneos y homogéneos en plantas de producción de biodiésel a gran escala, los investigadores revelan una reducción estimada de US \$ 59 en el costo operativo por tonelada de biodiésel, en relación al proceso homogéneo (Rincón, Jaramillo, & Cardona, 2014).

En base con lo mencionado anteriormente, los catalizadores heterogéneos pueden reemplazar fácilmente la utilización de catalizadores homogéneos en un futuro próximo para uso comercial.

Entre estas, la opción de usar enzimas es también una estrategia bastante prometedora al igual que los catalizadores heterogéneos; permite obtener altos rendimientos a condiciones moderadas de temperatura, está muy relacionada con la ruta catalizada por sólidos ya que es capaz de tolerar ácidos grasos libres y agua sin formación de jabón, facilitando la separación del biodiésel y el glicerol (Cabello, Rincón, & Zepeda, 2016). La diferencia de estos

procesos, radica en los elevados costos del catalizador (enzimas), resultando ser inviable comercialmente; el costo total de producción puede diferir entre 2414,63 y 7821,37 \$/tonelada. Claramente, son mucho más costosos; no obstante, dichos catalizadores tienen la capacidad de poder ser reutilizados más de 100 veces, casi que el doble de lo que se usa en otros diseños a escala de laboratorio, esto lo hace asequible y aplicable en plantas industriales (Gebremariam & Marchetti, 2018).

Al comparar la producción de biodiesel empleando catalizadores inorgánicos y biológicos, los impactos ambientales disminuyen en más del 40%; esto principalmente se debe a la eliminación de ácidos fuertes como el ácido clorhídrico durante los procesos catalizados biológicamente. Por otro lado, la generación de efluentes es mucho menor en consideración a los procesos catalíticos convencionales (Peñarrubia, Zhao, & Liu, 2017).

Otra de las rutas mencionadas en la última sección, es la transesterificación mediante alcoholes en condiciones supercríticas, la principal diferencia de las demás rutas, es que esta, se lleva a cabo en ausencia de catalizador. Tecnológicamente, presenta poderosas ventajas sobre las técnicas convencionales, como rapidez de la velocidad de reacción, transesterificación simultánea de triglicéridos y esterificación de ácidos grasos, y una eficiencia mayor de producción (85-97%) con un menor número de pasos de procesamiento (Farobie & Matsumura, 2017). Sin embargo, la aplicación de esta metodología presenta algunas limitaciones, debido a las elevadas condiciones operativas de presión temperatura, e incluso, cantidades mayores de alcohol, que se traducen en altos costes energéticos y en la degradación de los productos generados, la literatura reporta costos totales operativos y de servicios públicos de 0,012 USD/año (Marchetti, 2013).

Por otro lado, los procesos de transesterificación por microonda y ultrasonido, siguen cumpliendo las expectativas en las investigaciones para la producción de biodiésel. Para el caso de las microondas, los tiempos de reacción son cortos, y relativamente más eficientes que los métodos que actualmente se utilizan. En comparación con el calentamiento convencional, el calor generado por las microondas logra mejorar la reacción de transesterificación. Sin embargo, la adaptación de microondas como fuente de calor está asociada con costos mucho más altos, en la literatura, no han sido reportados valores precisos, pues aun estas tecnologías están en investigación (Khedri & Mohammad, 2018).

Otros de los métodos opcionales, es la pirolisis, se consideran como procesos autosuficientes en energía, limpios y ambientalmente benignos, con propiedades de combustibles similares al petrodiesel. No obstante, las bajas propiedades combustibles del bioaceite, como el alto contenido de agua, el bajo PH y la alta viscosidad, desafían su aplicación directa como combustible en motores diésel. Estos procesos operan a presión atmosférica logrando obtener rendimientos superiores al 70% (Perkins & Bhaskar, 2018). Algunos autores han estudiado el ciclo de vida económico y medioambiental de estos procesos, de los cuales se reporta que el suministro de energía al proceso térmico puede generar hasta 3,5 y 55 kg de SO₂ (dióxido de azufre) y NO_x (óxido de nitrógeno) respectivamente, por otro lado, se estima que el costo

de la electricidad es de \$ 0,054 por KWh y los costos de capital para estos estudios oscilan entre \$ 37 y \$ 143 millones para capacidades de 1000 toneladas por día (Pourhashem & Spatari, 2013).

La microemulsificación, es una de las rutas que según los costos reportados se puede considerar barata, los costos se evalúan dependiendo las concentraciones de las mezclas (por lo general, oscilan entre 3,4 y 8,9 centavos (Abrar & Bhaskarwar, 2018). Algunos resultados señalan que la emulsión de bioaceite con diésel podría aumentar el poder calorífico y hacerlo más apropiado como combustible de transporte sin que se observen problemas, estos procesos son considerados amigables con el medio ambiente, ya que pueden reducir las emisiones de NOx (óxidos de nitrógeno), CO (monóxido de carbono), humo negro y partículas; tecnológicamente estos procesos pueden formarse espontáneamente con una fase polar sin energía extra, en el no intervienen reacciones químicas, y no es necesario modificar el motor (Sabatini & Khaodhiar, 2015).

En la tabla 19, se muestra un resumen de los principales aspectos ambientales, tecnológicos, y económicos de las rutas de conversión.

Tabla 19. Comparación de las rutas de conversión

TECNOLOGÍA	ASPECTOS TECNOLÓGICOS	ASPECTOS ECONÓMICOS	ASPECTOS AMBIENTALES
PIRÓLISIS	Alta densidad energética. Operación a presión atmosférica y rendimientos superiores al 70%. Propiedades de combustible similares al petrodiesel empleado un catalizador.	Costo de electricidad: 0,054 por KWh. Costo de operación: \$ 37 – 473 millones para capacidades de 1000 toneladas por día.	Genera entre 3,5 y 55 kg de SO ₂ y NO _x .
MICROEMULSIFICACIÓN	Puede formarse espontáneamente con una fase polar sin energía extra. No intervienen reacciones químicas, y no es necesario modificar el motor.	Los costos se evalúan dependiendo las concentraciones de las mezclas (por lo general en un rango de 3,4 y 8,9 centavos).	Reducción de las emisiones de NOx (óxidos de nitrógeno), CO (monóxido de carbono), humo negro y partículas.

<p>TRANSESTERIFICACIÓN HOMOGÉNEA</p>	<p>Ofrecen una cinética favorable.</p> <p>Alta actividad catalítica y porcentajes elevados de rendimiento en poco tiempo.</p> <p>Rendimientos de 95 – 98%</p>	<p>Costos elevados, asociados a las etapas de purificación del producto. (US 258)</p> <p>Deterioro de los equipos por la corrosión de ácidos.</p> <p>Calefacción y electricidad: 24,73–72,76 MW.</p>	<p>Contaminación del medio por derrame de productos químicos, peligrosos e inflamables.</p>
<p>TRANSESTERIFICACIÓN HETEROGÉNEA</p>	<p>La separación entre el catalizador y el producto se llevan a cabo fácilmente.</p> <p>El catalizador tiene el potencial de ser reciclado y regenerado.</p> <p>Reducción de las etapas del proceso.</p> <p>Los porcentajes de conversión con catalizadores heterogéneos pueden llegar a ser mayores del 92%.</p>	<p>Los costos se reducen al tener la posibilidad de poder obtenido el CaO a partir de recursos económicos como la piedra de cal, cascara de huevo, cenizas y rocas.</p> <p>Es posible que el catalizador se envenene cuando se expone al aire.</p>	<p>Disminución de las emisiones de gases nocivos al ambiente.</p>
<p>TRANSESTERIFICACIÓN ENZIMÁTICA</p>	<p>Logra rendimientos superiores al 90% en tiempos cortos de reacción.</p> <p>Tolera ácidos grasos y agua sin formación de reacciones secundarias</p> <p>No genera jabones.</p> <p>Fácil separación de subproductos como el glicerol.</p>	<p>Costos elevados asociados al catalizador: 2414,63 – 7821,37 \$/tonelada.</p>	<p>Menor generación de efluentes contaminantes.</p> <p>Los impactos negativos hacia el medio ambiente se reducen a un 40%</p>
<p>MÉTODO SUPERCRÍTICO</p>	<p>Ausencia de catalizador</p>	<p>Elevadas condiciones de temperatura, presión y mayores cantidades de alcohol</p>	<p>No se generan aguas residuales.</p>

Velocidad de reacción rápida	que se traducen en altos costos energéticos.	Se obtiene un alto rendimiento del producto y es un proceso respetuoso con el medio ambiente.
Transesterificación simultánea de triglicéridos y esterificación de ácidos grasos.	Costos operativos: 0,012 USD/año	
Rendimientos superiores al 85%		

MICROONDAS

La energía de las microondas es absorbida por los reactivos a nivel molecular.	El método es muy eficaz para alcanzar la temperatura de reacción requerida y utiliza una cantidad mínima de energía.
Aumenta la pureza del producto y el rendimiento.	Los costos de calentamientos es 2/3 menor en comparación con el proceso convencional.

13. CONCLUSIONES

De los hallazgos se permite concluir que el fruto de palma africana cuenta con excelentes propiedades para la producción de biodiesel a nivel mundial, sin afectar la seguridad alimentaria, áreas ecológicas como bosques y reservas forestales, por la producción de biocombustibles a partir de esta materia prima; ya que los residuos que se derivan del proceso de extracción de aceite, pueden ser también aprovechables para otros fines como la elaboración de abonos orgánicos o compostaje.

Los hallazgos de la revisión bibliográfica, permitieron analizar cada una de las rutas que actualmente se encuentran en desarrollo para la producción del biodiesel a base de aceite de palma, cada una de estas tecnologías aporta ventajas y desventajas diferentes a sus procesos, ya sea en cuanto a rendimientos, condiciones operativas o aspectos de sostenibilidad. En la industria, la principal vía de producción es la transesterificación alcalina homogénea. No obstante, implementar tecnologías diferentes, como la transesterificación heterogénea, fluidos supercríticos, o en última instancia la radiación por microondas o ultrasonido, resultaría mucho más favorable, ya que, estas rutas son procesos amigables con el medio ambiente, y más que eso, su eficiencia en los rendimientos son superiores al 80%, cabe señalar, que a pesar de que aún se encuentran en fase de desarrollo, muestran ser excelentes candidatos para mejorar la producción, e incluir procesos más limpios y tecnológicamente sostenibles.

Finalmente, desde el punto de vista ambiental y económico, el sector del biodiesel contribuye con la generación de puestos de trabajo tanto en el área rural como en la urbana; el uso de biodiesel como aditivo en la mezcla con gasóleo permite reducir las emisiones de gases efecto invernadero hasta en un 75%, lo que ayuda a reducir los índices de contaminación atmosférica, impactando de manera positiva en la salud de los colombianos, así como en el bienestar y la calidad de vida de la población mundial.

14. RECOMENDACIONES

Estudiar a fondo el comportamiento y factibilidad económica, ambiental y tecnológica de las diferentes rutas analizadas en la presente investigación de monografía, con el fin de ampliar los conocimientos en este tipo de tecnologías y promover a las grandes industrias aplicar estos tipos de procesos que resultan ser igual o más eficientes que los procesos de transesterificación.

Revisar detalladamente la producción de biodiesel de palma, desde su cultivo hasta su uso óptimo en motores de combustión interna.

15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbaszaadeh, A., & Ghobadian, B. (2012). Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy Conversion and Management*, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.027>.

Abdallah S , E., & Wagih A, S. (2021). *A review on biodiesel feedstocks and production technologies*. Revista de la Sociedad Química Chilena, 1. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072021000105098>

Abrar, I., & Bhaskarwar, A. (2018). Formulation and extension of diesel-based microemulsion fuels for compression ignition engines. *INAE Lett*, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s41403-018-0037-0>

Abril Gelvez , H. (2 de Febrero de 2015). *Palmicultura Organica* . Obtenido de <http://palmiculturaorganica.blogspot.com/2015/02/el-cultivo-de-la-palma-de-aceite.html>.

Arumugam, S., & Reddy, M. (2020). A Review on Ultrasonicated Transesterification Process. *Advances in Materials and Manufacturing Engineering*, https://doi.org/10.1007/978-981-15-6267-9_65.

Ashaari, A., & Ahmad, T. (2021). A Graph-Based Dynamic Modeling for Palm Oil Refining Process. *processes*, 1-6. <https://doi.org/10.3390/pr9030523>.

Atabani, A., & Silitonga, A. (2013). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>.

Avellaneda Vargas, F. (2010). Produccion y Caracterizacion de Biodiesel de Palma mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. (*Tesis Doctoral*).

Alvarez Maciel, C. (2009). Biocombustibles: Desarrollo Historico - Tecnologico, Mercados Actuales y Comercio Internacional. *Economia Informa*, 1-2.

Alalwan, H., & Alminshid, A. (2019). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>.

Attaphong, C., & Sabatini , D. (2012). Vegetable oil-based microemulsions using carboxylate-based extended surfactants and their potential as an alternative renewable biofuel. *Fuel*, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.048>.

Babu, B., Kumar, P., & Ravichandran, G. (2017). Development, identification and validation of CAPS marker for SHELL trait which governs dura, pisifera and tenera fruit forms in oil palm (*Elaeis guineensis Jacq.*). *PLOS ONE*, 1-4. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171933>.

Balboa Acero, N. (2015). Determinacion de Perdidas de Aceite del Proceso de Prensado en la Extraccion de Aceite en Acopalma.S.A. (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador.

Billote, C., Ngando, E., & Domonhédó, M. (2013). *Improving palm oil quality through identification and mapping of the lipase gene causing oil deterioration*. *Nature Communications*, 1-8. <https://doi.org/10.1038/ncomms3160>.

Buyinda, F., & Dze Giyo, C. (2020). Modern Biodiesel Production Methods Biodiesel: a Review. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 1-6. 10.33564 / IJEAST.2020.v05i05.003.

Cabelloa, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2016). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. Universidad Autonoma de Yucatan, 1-8.

Charoensaeng, A., & Khaodhiar, S. (2014). Life Cycle Assessment of Biofuel from Microemulsion and Transesterification Processes. *International Conference on Advances in Engineering and Technology*, 1-5.

Carrero , L., & Giron, L. (2011). Desarrollo de un Proceso de Refinacion de Aceite de Palma a Nivel Industrial. Escuela de Ingenieria Quimica.

CERRILLO, A. (2019). Las emisiones mundiales de los combustibles fósiles son un 60% superior a las de 1990. Cambio Climático: Vanguardia. Recuperado de: <https://www.lavanguardia.com/natural/cambioclimatico/20191204/472038796221/cumbre-del-clima-cop25-carbon-project.html>

Chen, G., & Shan, R. (2014). Ultrasonic-assisted production of biodiesel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalyts. *Bioresource Technology*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.102>

Cheng, S., Mohd , N., & Chuah, C. (2011). Microwave pretreatment: A clean and dry method for palm oil production. *Industrial Crops and Products*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.002>.

Cuesta Juliao, G., & Barraza Campo, F. (2013). Recuperación del aceite crudo de palma contenido en el licor de prensas mediante la aplicacion de vibraciones mecanicas. PROSPECTIVA, una nueva vision para la ingenieria, 1-2. <https://doi.org/10.15665/rp.v11i2.39>.

Colombia, F. N. (Enero de 2020). *Federacion Nacional de Biocombustibles de Colombia*. http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm.

Corporacion Centro de Investigacion en Palma de Aceite (2020). Estrategia y Plan de Medios Para la Campaña de Promocion al Consumo del Aceite de palma 100% Colombiano. Cenipalma.

Chew, C., Low, L., & Kang Liew, Z. (2021). Prospects of Palm Fruit Extraction Technology: Palm Oil Recovery Processes and Quality Enhancement. *Food Reviews International*, 2-15. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1890117>.

Chuah, L., Yusup, S., & Akbard, M. (2017). A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 16-46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.017>.

Demrew, Z., & Muthukumar, K. (2014). Catalytic cracking of vegetable oil with metal oxides for biofuel production. *Energy Conversion and Management*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.084>.

Demirbas, A. (2017). The social, economic, and environmental importance of biofuels in the future. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1-5. <https://doi.org/10.1080/15567249.2014.966926>.

Donough, C., Indrasuara, K., & Dolong, T. (2015). *Estimating oil content of commercially harvested oil palm fresh fruit bunches - a step towards increasing palm oil yields. International Plant Nutrition Institute*.

Espinoza, A., & Bautista, S. (2017). *Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model. ELSEVIER*, 1-5.

Emyle Lucia, B.-A., & Vega-Jurado, J. (2017). Alternativas productivas para la industria de biodiesel en Colombia. Universidad el Bosque, 1-5.

Farobie, O., & Matsumura, Y. (2017). State of the art of biodiesel production under supercritical conditions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 10-11. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.08.001>.

Fatehah Mohd, O., Hossain, M., & Mat Easa, A. (2018). Implementation of the supercritical carbon dioxide technology in oil palm fresh fruits bunch sterilization: A review. *Journal of CO2 Utilization*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.03.021>.

Farobie, O., & Matsumura, Y. (2017). State of the art of biodiesel production under supercritical conditions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.08.001>.

Fan, X., & Sandoval, G. (2012). Lipases as Biocatalyst for Biodiesel Production. *Methods in Molecular Biology*, 1-9. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-600-5_27.

Fontalvo Gómez, M., & Barrios Sarmiento, A. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energetico para la produccion de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva, una nueva vision para la ingenieria* 1-7. <http://dx.doi.org/10.15665/rp.v12i1.155>.

Franco Rodriguez, J. M., & Torres Ortega, J. A. (2018). Analisis de ciclo de vida para la produccion de biodieselderivado de palma de aceite, caso colombiano. Universidad de la Salle, Bogota., 1-5.

Gebremariam, S., & Marchetti, J. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 3-6. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>.

Goembira, F., & Saka, S. (2013). Optimization of biodiesel production by supercritical methyl acetate. *Bioresource Technology*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.130>.

Gurdeep, K., & Yusup, S. (2020). Biogasoline production from linoleic acid via catalytic cracking over nickel and copper-doped ZSM-5 catalysts. *Environmental Research*, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109616>.

Idrogo, M., & Moncada, L. (2014). Evaluación y Optimización Operativa en el Control de Perdidas de Aceite en Esterilizado y Clarificado del Proceso Extractivo de Crudo de Palma Aceitera.(Tesis de Pregrado) Universidad Nacional de Trujillo.

Iglesias, J., & Bautista, F. (2011). Zr-SBA-15 as an efficient acid catalyst for FAME production from crude palm oil. *Catalysis Today*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.060>.

Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion. (2017). Grasas y Aceites. Aceite Crudo Natural de Palma Africana. Bogota : Norma Tecnica Colombiana (ICONTEC). <https://www.icontec.org/rules/grasas-y-aceites-aceite-crudo-de-palma-africana-elaeis-guineensis/>

Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación (Icontec). (2018). Biodiesel para uso en motores diesel. especificaciones. <https://www.icontec.org/rules/biodiesel-para-uso-en-motores-diesel-especificaciones/>.

Intarapong, P., & Malakul, P. (2016). Comparative life cycle assessment of diesel production from crude palm oil and waste cooking oil via pyrolysis. *International journal of energy research*, <https://doi.org/10.1002/er.3433>.

Jaimes, W., Rocha, S., & Vesga, J. (2012). Análisis termodinámico del proceso real de extracción de aceite de palma africana. Centro de Investigación para el Desarrollo en Industria y Energía, 1-8.

Jaramillo, J. E., & Manrique, D. (2015). Biocombustibles líquidos en Colombia y su impacto en motores de combustion interna: Una revision. El reventon energetico, 1-4.

Jahirul, M., & Ashwath, N. (2012). Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review. *Biomass and Biofuels*, <https://doi.org/10.3390/en5124952>.

Jovanović, M., & Bošković, G. (2010). Economic and ecological aspects of biodiesel production over homogeneous and heterogeneous catalysts. *Renewable Energy*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.001>.

Kurnia, J., Jangam, S., & Akhtar, S. (2016). Advances in biofuel production from oil palm and palm oil processing wastes: A review. *Biofuel Research Journal*, 10.18331/BRJ2016.3.1.3.

Khedri, B., & Mohammad, S. (2018). A review on microwave-assisted biodiesel production. Fuentes de energía, parte A: recuperación, utilización y efectos ambientales, 1-5. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1563246>.

Khemthong, P., & Luadthong, C. (2012). Industrial eggshell wastes as the heterogeneous catalysts for microwave-assisted biodiesel production. *Catalysis Today*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.12.024>.

Khor, K., & Hekarl, M. (2010). Thermodynamics and inhibition studies of lipozyme TL IM in biodiesel production via enzymatic transesterification. *Bioresource Technology*, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.047>.

Law, M., & Chang, S. (2016). Modelling microwave heating of discrete samples of oil palm kernels. *Applied Thermal Engineering*, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.009>.

Lai, O., Tan, C., & Akoh, C. (2015). En *PAL OIL Production, Processing, Characterization, and Uses* (págs. 1-37). Estados Unidos: AOCS PRESS.

Lam, K., & Jamalluddin, A. (2019). Chapter 23 - Production of Biodiesel Using Palm Oil. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels* (Second Edition), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00023-3>.

Lin, Y., & Hsu, H. (2014). Rapid palm-biodiesel production assisted by a microwave system and sodium methoxide catalyst. *Fuel*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.022>.

Mancio, A., & Ferreira, C. (2016). Thermal catalytic cracking of crude palm oil at pilot scale: Effect of the percentage of Na₂CO₃ on the quality of biofuels. *Industrial Crops and Products*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.033>.

Manurung, R., Hasibuan, R., & Siregar, G. (2020). Transesterification of refined bleached deodorized palm oil (rbdpo) using novozym® 435 to produce biodiesel. *IOP SCIENCE*, 1-6. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/796/1/012056/pdf>.

Makareviciene, V., & Sendzikiene, E. (2021). Noncatalytic Biodiesel Synthesis under Supercritical Conditions. *Processes*, 1-8. <https://doi.org/10.3390/pr9010138>.

Marinković, D., & Jovanović, D. (2016). Calcium oxide as a promising heterogeneous catalyst for biodiesel production: Current state and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.007>.

Marwaha, A., Dhir, A., & Kumar, S. (2018). An overview of solid base heterogeneous catalysts for biodiesel production. *Catalysis Reviews*, 4-12. <https://doi.org/10.1080/01614940.2018.1494782>.

Márquez, M., Brochero, C., & Moreno, J. (2012). Evaluación del comportamiento de materiales adsorbentes en la etapa de blanqueo del aceite crudo de palma. *Revista Palmas*, 1-8. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10775>.

Marchetti, J. (2013). Influence of economical variables on a supercritical biodiesel production process. *Energy Conversion and Management*, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.039>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Rural. (2020, Diciembre 27). CADENA DE PALMA DE ACEITE Indicadores e Instrumentos. Obtenido de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Palma/Documentos/2020-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). Estudio de oferta disponible de aceite de palma para el aumento del mandato de mezcla B-12. Agronet. <https://sioc.minagricultura.gov.co/DocumentosContexto/S3910-09112020%20Estudio%20de%20Oferta%20y%20Demanda%20B-12.pdf#search=ESTUDIO%20DE%20OFERTA%20DISPONIBLE%20DE%20ACEITE%20DE%20PALMA%20PARA%20EL%20AUMENTO%20DEL%20MANDATO%20DE%20MEZCLA%20B%2012>.

Ministerio de Minas y Energía. (2020). Sector minero-energético, activo frente al cambio climático. Bogotá: Minenergía. <https://www.minenergia.gov.co/web/guest/historico-de-noticias?idNoticia=24185990>.

Morillo, O., Fernández, S., & Marquina, G. (2010). Optimización de los parámetros de extracción de aceite de palma africana utilizando CO₂ super crítico. *Bioagro*, 1-6. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131633612010000200001.

Melo Costa, M., & Teixeira, D. (2018). Effects of different storage conditions on the oxidative stability of crude and refined palm oil, olein and stearin (*Elaeis guineensis*). *Food Science and Technology*, 1-6. <https://doi.org/10.1590/fst.43317>.

Nokkaew, R., & Punsuvon, V. (2014). Sterilization of Oil Palm Fruits by Microwave Heating for Replacing Steam Treatment in Palm Oil Mill Process. *Advanced Materials Research Vols*, 1-4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.470>.

- Nongbe, M., & Ekou, L. (2017). Biodiesel production from palm oil using sulfonated graphene catalyst. *Renewable Energy*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.024>.
- Nigatu, S., & Marchetti, J. (2017). Biodiesel production technologies: review. *AIMS Energy*, 10.3934/energy.2017.3.425.
- Ocampo Batlle, A., & Venturini, O. (2020). Thermodynamic and environmental assessment of different scenarios for the insertion of pyrolysis technology in palm oil biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119544>.
- Ortega, G., Mercado, A., & Arrieta, B. (2014). Transesterification vegetable oils using heterogeneous catalysts. *Prospect*, 1-9. <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>.
- Odunayo Akinyeye, R., & Adeyeye, E. (2011). Physico-chemical properties and anti-nutritional factors of palm fruit products (*elaeis guineensis jacq.*) from ekiti state nigeria. *Journal of Environmental, Agricultural and Food*, 1-7. <https://www.researchgate.net/publication/232815412>.
- Owoyale, B., & Gbenga, O. (2014). Traditional oil palm (*Elaeis guineensis jacq.*) and its medicinal uses: A review. *KoreaScience*, 1-3. <https://doi.org/10.5667/tang.20140004>
- Parra Escorza, T. (2016). Diseño de una Planta de Refinacion y Blanqueamiento de Aceite Comestible Usado y Aceite Rojo de Palma. 46-49. (*Tesis de Pregrado*).
- Perkins, G., & Bhaskar, T. (2018). Process development status of fast pyrolysis technologies for the manufacture of renewable transport fuels from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.048>.
- Peñarrubia, A., Zhao, J., & Liu, D.-H. (2017). LCA studies comparing alkaline and immobilized enzyme catalyst processes for biodiesel production under Brazilian conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.009>.
- Pourhashem, G., & Spatari, S. (2013). Life Cycle Environmental and Economic Tradeoffs of Using Fast. *Energy & Fuels*, 1-9. <https://doi.org/10.1021/ef3016206>.
- Puttasawat, B., & Yoosuk, B. (2010). Modification of calcite by hydration–dehydration method for heterogeneous biodiesel production process: The effects of water on properties and activity. *Chemical Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.013>.
- Ramadhani, A., Laniwati, M., & Muraza, O. (2020). Biogasoline Production from Palm Oil: Optimization of Catalytic Cracking Parameters. *Research Article-Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04354-4>.
- Roslam, W., & Yarmo, M. (2012). A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3-9.

Rincón, L., Jaramillo, J., & Cardona, C. (2014). Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.058>.

Rincon, S., & Martinez, D. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *Cenipalma*, 1-11.

Salamatinia, B., & Abdullah, Z. (2010). Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts. *Fuel*, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.023>.

Santana, A., & AngelesLarrayoz, M. (2012). Continuous production of biodiesel using supercritical fluids: A comparative study between methanol and ethanol. *Fuel Processing Technology*, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.04.014>.

Sabatini, D., & Khaodhiar, S. (2015). Life cycle assessment of palm oil microemulsion-based biofuel. *LCA for energy systems and food products*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0888-5>.

Sajjadi, B., & Ibrahim, S. (2015). Mechanistic analysis of cavitation assisted transesterification on biodiesel characteristics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.06.004>.

Semwal, S., Badoni, R., & Tuli, D. (2011). Biodiesel production using heterogeneous catalysts. *Bioresource Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.080>.

Sharma, M., & Verma, P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054>.

Sheng, W., & Loon Chan. (2014). Ultrasound-assisted transesterification of refined and crudepalm oils using heterogeneous palm oil mill fly ashsupported calcium oxide catalyst. *Energy Science & Engineering*, 1-9. 10.1002/ese3.56.

Sulihatimarsyila, N., & Harrison L.N., L. (2019). Refining process for production of refined palm-pressed fibre oil. *Industrial Crops and Products*, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.034>.

Sierra Soto, N. (2019). *Exportacion de Aceite de Palma y sus Derivados*. Bogota : Universidad Cooperativa de Colombia .

Sorrasuchart, N., & Arpornpong, N. (2017). Phase behaviors and fuel properties of palm oil-based microemulsion biofuels using sugar-based surfactants. *IEEEExplore*, 1-5. 10.1109 / EEEIC.2017.7977437.

Sukiman, L., & Muhammad, S. (2020). Sustainability of Palm Biodiesel in Transportation: a Review on Biofuel Standard, Policy and International Collaboration Between Malaysia and Colombia. *BioEnergy Research*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10165-0>.

Sylvester Chibueze, I., & Elijah Ige, O. (2015). Comparison of Traditional and Semi-mechanized Palm Oil Processing Approaches in Nigeria; Implications on Biodiesel Production. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 1-6.

Sierra Márquez, J., & Olivero Verbel, J. (2017). Potencial económico de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq). *Agronomia Mesoamericana*, 1-7. 10.15517/ma.v28i2.25927.

Tambun, R., & Gusti, N. (2017). Biofuel production from palm olein by catalytic cracking process using zsm-5 catalyst. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 1-5. <https://doi.org/10.15294/jbat.v6i1.8733>.

Usseglio, M. (2017). Modelado Avanzado de Desodorización y Refinación Física de Aceites Vegetales con Columnas de Relleno Estructurado .Tesis Doctoral.

Umudee, I., & Tongurai, C. (2013). Sterilization of oil Palm Fresh Fruit Using Microwave Technique. *International Journal of chemical engineering and applicarions*, 1-3. 10.7763 / *IJCEA.2013.V4.274*.

Unidad de Planeacion Minero Energetica. (2019). PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020 - 2050. Bogota : UPME. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf.

Wong, Y., & Tan, Y. (2015). Biodiesel production via transesterification of palm oil by using CaO–CeO₂ mixed oxide catalysts. *Fuel*, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.012>.

Yooritphun, K., & Lilitchan, S. (2017). Effect of Selected Polyhydric Alcohols on Refining Oil Loss in the Neutralization Step. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1-5. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2924-4>.