Análisis documental del efecto de la lecitina en la producción de biocombustible a partir del aceite de palma y alcoholes de cadena larga

Elías Santiago Quiñones

CC. 1007764449

Luis Fernando Jiménez Quintero

CC. 1007325020

Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica

Facultad de Ingenierías y Tecnológicas Programa de Ingeniería Agroindustrial

Aguachica, Cesar 2026

Análisis documental del efecto de la lecitina en la producción de biocombustible a partir del aceite de palma y alcoholes de cadena larga

Elías Santiago Quiñones

CC. 1007764449

Luis Fernando Jiménez Quintero

CC. 1007325020

Directora

Yina Paola Ortega Santiago

Magister en diseño de procesos y productos

Codirector

Licenciado en Bioquímica: Álvaro Hernán Charry Quintero

Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica

Facultad de Ingenierías y Tecnológicas Programa de Ingeniería Agroindustrial

Aguachica, Cesar 2026

NOTA DE APROBACIÓN

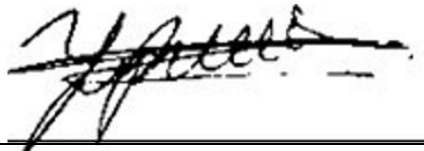
El trabajo de grado de Elias Santiago Quiñone y Luis Fernando Jimenez Quintero, titulado "ANÁLISIS DOCUMENTAL DEL EFECTO DE LA LECITINA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA Y ALCOHOLES DE CADENA LARGAS ", ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.



FABIÁN ARMANDO BARBOZA PAEZ
EVALUADOR 1



JAIRO FLÓREZ PÁEZ
EVALUADOR 2



YINA PAOLA ORTEGA SANTIAGO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



ÁLVARO HERNÁN CHARRY QUINTERO
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

A nuestras familias, por su amor, su paciencia y su apoyo incondicional en cada etapa de nuestra formación.

A nuestros directores, por su guía y su confianza.

A todas las personas que nos acompañaron y creyeron en este proceso hasta verlo culminado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

A la Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica, y al Programa de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingenierías y Tecnológicas, por la formación académica y los espacios brindados para el desarrollo de este trabajo.

A la Magíster Yina Paola Ortega Santiago, directora de la monografía, por su orientación, su rigor y su acompañamiento permanente.

Al Licenciado en Bioquímica Álvaro Hernán Charry Quintero, codirector, por sus aportes y observaciones durante la elaboración del documento.

A nuestras familias y compañeros, por su apoyo y motivación a lo largo de todo el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 14
1.1.1. Planteamiento del problema 18
1.2. OBJETIVOS 19
1.2.1. Objetivo General 19
1.2.2. Objetivos específicos 19
1.3. PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO DEL TEMA 19
1.3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 19
1.3.2. Marco Teórico 27
1.3.3. Marco Legal 37
1.3.4. Marco Conceptual 39
2. DISEÑO METODOLOGICO PRELIMINAR 43
2.1. Tipo de Investigación 43
2.2. Población: 44
2.3. Muestra 45
2.4. Instrumentos de Recolección de Datos: 46
2.4.1 Formato de análisis documental: 46
2.4.2. Matriz de clasificación: 46
2.4.3. Softwares bibliográficos: 47
2.6. Hipótesis: 48
2.6.1. Hipótesis general 48
2.6.2. Hipótesis específicas 48
2.7. Criterios para el Análisis Bibliométrico 48
2.8. Métodos y Procedimientos 50
2.8.1. Identificación de interacciones químicas entre lecitina, aceite de palma y butanol 50
2.8.2. Examen del papel de la lecitina en la transesterificación 50
2.8.3. Análisis de la viabilidad técnica del uso de la lecitina en la producción de biocombustibles 51
3. DESARROLLO DEL TEMA 53
3.1. Interacciones químicas entre lecitina, aceite de palma y butanol 53
3.1.1. Influencia de las interacciones sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel 55
3.2. Papel de la lecitina en la transesterificación 57
3.2.1. Efecto de la lecitina sobre la eficiencia de la transesterificación 67
3.3. Viabilidad técnica de la lecitina en la producción de biocombustibles 68
3.3.1. Condiciones, ventajas y limitaciones para su aplicación técnica 71
3.4. Conclusiones 72
4. BIBLIOGRAFÍA 75
5. ANEXOS 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caracterización porcentual de las muestras de biocombustibles 21

Figura 2. Línea de tiempo de producción (2020-2025) 45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenido mínimo y máximo de biodiésel en las mezclas B2, B4, B8 y B10..... 39

Tabla 1. Comparación de propiedades asociadas con las interacciones químicas 53

Tabla 2. Interacciones químicas de la lecitina en la transesterificación..... 54

Tabla 3. Estudios sobre el papel de la lecitina en los procesos de transesterificación..... 58

Tabla 4. Matriz de valoración técnica del uso de la lecitina en la producción de biodiésel 69

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de matriz de variables de categorización 88

Anexo 2. Matriz de sistematización estructurada en variables independientes y dependientes 88

Anexo 3. Tabla de comparación de las propiedades fisicoquímicas del biocombustible en función de la presencia o ausencia de lecitina, y según el tipo de alcohol de cadena larga utilizado en el proceso 88

GLOSARIO

Aceite de palma: Aceite vegetal semisólido extraído del fruto de la palma africana (Elaeis guineensis), con proporciones similares de ácidos grasos saturados e insaturados y predominio del ácido palmítico. Es una de las principales materias primas para la producción de biodiésel.

Alcohol de cadena larga: Alcohol con cuatro o más átomos de carbono, como el butanol, el pentanol o el hexanol, empleado en la transesterificación como alternativa a los alcoholes de cadena corta (metanol y etanol).

Análisis documental: Técnica de investigación basada en la búsqueda, selección, sistematización e interpretación crítica de información contenida en fuentes escritas, como artículos científicos, tesis e informes técnicos.

Anfipático: Dicho de una molécula que posee una región hidrofílica (afín al agua) y otra lipofílica (afín a las grasas), lo que le permite ubicarse en la interfase entre dos fases inmiscibles.

Biocombustible: Combustible de origen biológico y renovable, obtenido a partir de biomasa vegetal o animal, como el biodiésel y el alcohol carburante.

Biodiésel: Combustible renovable compuesto por una mezcla de alquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga, obtenido por transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol.

Biosurfactante: Surfactante de origen biológico, anfipático y de menor toxicidad que los surfactantes sintéticos derivados del petróleo.

Butanol: Alcohol de cuatro átomos de carbono que se utiliza como alcohol de cadena larga en la producción de biodiésel.

Catalizador: Sustancia que acelera una reacción química sin consumirse en ella. En la transesterificación puede ser homogéneo, heterogéneo o enzimático.

Coadyuvante: Sustancia que se añade a un proceso para favorecer o mejorar su desempeño, sin ser el reactivo principal.

Emulsificante: Sustancia que reduce la tensión interfacial entre dos fases inmiscibles y estabiliza la emulsión formada. También se denomina emulsionante.

Emulsión: Sistema formado por dos líquidos inmiscibles en el que uno se dispersa en el otro en forma de gotas; su estabilidad depende de la presencia de agentes emulsificantes.

Fase oleosa: Fase de una mezcla constituida por aceites o grasas, de carácter apolar; en este trabajo corresponde al aceite de palma.

Glicerol: Coproducto de la transesterificación de triglicéridos, también llamado glicerina, que se separa del biodiésel al finalizar la reacción.

Lecitina: Mezcla de fosfolípidos de origen vegetal o animal con propiedades emulsificantes, derivadas de su cabeza polar (grupo fosfato) y de sus cadenas lipofílicas de ácidos grasos.

Poder calorífico: Cantidad de energía liberada por unidad de masa de combustible durante su combustión completa; se expresa en MJ/kg.

Punto de inflamación: Temperatura mínima a la cual un combustible desprende vapores suficientes para inflamarse en presencia de una fuente de ignición; se expresa en °C.

Surfactante: Molécula anfipática que reduce la tensión superficial o interfacial entre dos fases, facilitando su contacto y la formación de emulsiones. También se denomina tensioactivo.

Transesterificación: Reacción química en la que un triglicérido (aceite o grasa) reacciona con un alcohol, en presencia de un catalizador, para producir alquil ésteres (biodiésel) y glicerol.

Viscosidad cinemática: Medida de la resistencia de un fluido a fluir; en el biodiésel se reporta en mm^2/s a 40 °C.

RESUMEN

La producción de biodiésel a partir de aceite de palma mediante transesterificación con alcoholes de cadena larga, como el butanol, mejora la calidad del biocombustible; sin embargo, la baja solubilidad de estos alcoholes en la fase oleosa limita la eficiencia de la reacción. En este contexto, la presente monografía tuvo como objetivo evaluar el efecto de la lecitina, un fosfolípido con propiedades emulsificantes, en la producción de biocombustible a partir de aceite de palma y butanol. Se desarrolló una investigación de enfoque cualitativo, de tipo documental, analítico y exploratorio, sin experimentación propia, basada en la búsqueda, selección y sistematización de literatura científica mediante una ecuación de búsqueda en bases de datos de referencia, un formato de análisis documental y matrices de clasificación y comparación. El estudio se organizó en tres ejes: las interacciones químicas entre la lecitina, el aceite de palma y el butanol; el papel de la lecitina en la transesterificación; y la viabilidad técnica de su uso. La evidencia revisada indica que la lecitina puede actuar como agente emulsificante que favorece el contacto entre la fase oleosa y el alcohol. Algunos sistemas reportaron conversiones o rendimientos cercanos o superiores al 99 %, aunque estos valores dependieron de la materia prima, el catalizador y las condiciones de operación. Se concluye que la lecitina es técnicamente prometedora como coadyuvante de la transesterificación, pero no quedó demostrada como una alternativa industrial plenamente validada, por lo que se requieren ensayos experimentales específicos con el sistema aceite de palma–butanol–lecitina y evaluaciones de escalamiento.

Palabras clave: lecitina, biodiésel, aceite de palma, butanol, transesterificación, emulsificante.

ABSTRACT

The production of biodiesel from palm oil through transesterification with long-chain alcohols, such as butanol, improves the quality of the biofuel; however, the low solubility of these alcohols in the oil phase limits reaction efficiency. In this context, this monograph aimed to evaluate the effect of lecithin, a phospholipid with emulsifying properties, on the production of biofuel from palm oil and butanol. A qualitative, documentary, analytical and exploratory study was carried out, without original experimentation, based on the search, selection and systematization of scientific literature through a search equation applied to reference databases, a documentary analysis format, and classification and comparison matrices. The study was organized around three axes: the chemical interactions among lecithin, palm oil and butanol; the role of lecithin in transesterification; and the technical feasibility of its use. The reviewed evidence indicates that lecithin can act as an emulsifying agent that promotes contact between the oil phase and the alcohol. Some systems reported conversions or yields close to or above 99 %, although these values depended on the feedstock, the catalyst and the operating conditions. It is concluded that lecithin is technically promising as an aid in transesterification, but it was not demonstrated as a fully validated industrial alternative; therefore, specific experimental tests with the palm oil–butanol–lecithin system and scale-up evaluations are required.

Keywords: lecithin, biodiesel, palm oil, butanol, transesterification, emulsifier.

ANÁLISIS DOCUMENTAL DEL EFECTO DE LA LECITINA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA Y ALCOHOLES DE CADENA LARGA

1. INTRODUCCIÓN

Es preciso tener en cuenta que, según diversos estudios, se ha podido determinar que más del 50% del consumo de energía en todo el mundo es proveniente de combustibles fósiles, por lo cual, en los últimos 30 años, se ha aumentado en forma drásticas las emisiones de CO_2 por el uso de combustibles fósiles, pasando de 1.8Gt a 36.3Gt de emisiones (GLOBAL ENERGY, 2022). Como consecuencia a dicho consumo desmedido, se ha generado un cambio climático de grandes proporciones producto de la acción antropogénica. Situación que ha provocado impactos sobre la salud y el medio ambiente, por lo cual, es pertinente trabajar en la búsqueda de nuevas alternativas a los combustibles fósiles, que puedan diversificar las fuentes de energía, que sean renovables generando un menor impacto en el medio ambiente, contexto que ha cambiado debido a una tendencia importante hacia la diversificación mediante fuentes de energía más limpias, tales como un mayor empleo del gas natural en un 14% frente a 48% del petróleo y sus derivados (Olade, 2021, p. 1). Por ejemplificar, esta problemática no es ajena a América Latina, de acuerdo con la Organización Latinoamericana

De Energía, el sector transporte de personas y bienes representa el 38% del total energético consumido a nivel mundial generando la cuarta parte de las emisiones de CO_2, comparado solo por el sector industrial con un aporte del 29% (Olade, 2021, p.1).

En el caso de Colombia, (International Energy Agency, 2023) el consumo total de energía dirigido a usuarios finales que pueden ser particulares y empresas, gran parte de la energía de fuentes primarias proveniente del petróleo con 46.6%, gas natural 12.7%, electricidad 20% y energías renovables como como los biocombustibles y residuos con 15.3%. En cuanto al consumo por sectores es interesante ver que evidentemente el sector transporte es el mayor con 43.2%, cuya evolución desde el año 2000 al 2022 muestra una tendencia de crecimiento al alta, pasando de 272 TJ a más de 545 TJ, consumo proveniente de combustibles como la gasolina y el diésel. Comportamiento muy diferente al sector industria, cuyo consumo a 2020 es de 20.2%, que, para el mismo periodo estudiado, que sorprendentemente con una curva de picos leves, pasó de 272 TJ a 255TJ, disminuyendo su consumo (IEA, 2024).

La palma africana (Elaeis guineensis) es un cultivo que se ha catalogado por tener un alto rendimiento, generando un aceite de bajo costo para la alimentación, en Colombia para el año 2023 se registraron 8,3 millones de toneladas procesadas del fruto seco de

palma de aceite, cuyo principal producto es el aceite crudo que para este periodo tuvo un valor obtenido de 1,84 millones de toneladas, ello se traduce en un crecimiento de 4,1% respecto al año 2022 (Fedepalma, 2021).

A su vez, el aceite crudo extraído del fruto de la palma se produce en diferentes regiones del país, una de las más representativas se encuentra en el departamento del Cesar, que para el año 2020 alcanzó una producción de 241.905 toneladas a partir de 68.604 toneladas de hectáreas producidas, aceite vegetal que se comercializa para fines de uso alimentario, para la producción de biocombustibles, en diferentes industrias como la farmacéutica, cosmética, detergentes, y muchas otras aplicaciones (Fedepalma, 2021).

Por ejemplo, el biodiésel es uno de los biocombustibles en los que las fuentes de grasa que más se utiliza para la reacción de transesterificación es el aceite extraído de la palma africana por su eficiencia y por su volumen de siembra según Pedraza, (2023), como se citó en Stichnothe & Schuchardt, (2011) y porque la calidad del producto obtenido se parece mucho a la del diésel, además, es una importante fuente de producción de biodiésel, dado que comprende 95% de la materia prima para tales fines (Castellar Ortega et al., 2014).

Para la producción de biodiésel de origen vegetal, se emplea, la reacción de transesterificación, reacción química que se materializa

con la combinación de aceites de origen vegetal o animal con un alcohol en presencia de catálisis homogénea para producir alquil éster y glicerina o glicerol (Pérez-Bravo et al., 2022).

Sumado a esto, los alcoholes que más se usan en el proceso de obtención de biodiésel son aquellos que poseen cadena corta como metanol y etanol, debido a que su capacidad de reacción es más rápida que aquellos de cadena larga como el butanol, pentanol u otro alcohol (Contreras et al., 2018)

Con respecto a la selección del alcohol entre metanol y etanol se prefiere al etanol porque se considera renovable originario de la fermentación alcohólica y el metanol a pesar de su bajo costo y de que sus propiedades fisicoquímicas se consideran para la producción de biodiésel tiende a ser tóxico por su alta volatilidad. Sin embargo, investigadores se han interesado en usar butanol debido a que se obtiene un producto con mejores propiedades (Gómez-Delgado et al., 2022). Abordado los aspectos introductorios anteriores, es importante tener claro que la intención central de esta revisión literaria es analizar cuál es el efecto que tiene la lecitina como surfactante, es decir, agente tensoactivo, para facilitar en contacto entre las fases involucradas en la obtención de biocombustible, utilizando aceite de palma y butanol, esto con el fin de aprovechar los componentes de la lecitina para formar una emulsión estable entre la mezcla del aceite, el alcohol y el catalizador.

El desarrollo de la monografía se organizó en tres apartados principales. En el primero se identificaron las interacciones químicas entre la lecitina, el aceite de palma y el butanol; en el segundo se examinó el papel de la lecitina en los procesos de transesterificación; y en el tercero se analizó la viabilidad técnica de su uso en la producción de biocombustibles.

1.1.1. Planteamiento del problema

La producción de biocombustibles, particularmente el biodiésel obtenido a partir de aceite de palma, representa una alternativa sostenible y viable frente a los combustibles fósiles, especialmente en países de zonas tropicales donde se ha demostrado su eficiencia.

No obstante, el proceso de transesterificación del aceite de palma enfrenta ciertas limitaciones técnicas. Aunque el uso de alcoholes de cadena larga, como el butanol y el hexanol, mejora la calidad del biodiésel resultante, estos presentan una baja solubilidad en la fase oleosa, lo que reduce la eficiencia de la reacción.

Ante esta situación, surge la necesidad de emplear aditivos o agentes coadyuvantes que faciliten la interacción entre las fases inmiscibles. En este sentido, la lecitina destaca como una opción prometedora gracias a sus propiedades emulsificantes, ya que puede mejorar la interacción entre las fases, optimizar la cinética de la reacción y aumentar significativamente la eficiencia del proceso de producción de biodiésel.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la lecitina en la producción de biocombustible a partir del aceite de palma y el butanol como alcohol de cadena larga.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Identificar las interacciones químicas entre la lecitina, el aceite de palma y butanol.
- ✓ Examinar el papel de la lecitina en los procesos de transesterificación.
- ✓ Analizar la viabilidad técnica del uso de la lecitina en la producción de biocombustibles.

1.3. PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO DEL TEMA

1.3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Son diversas las investigaciones que han mostrado que es técnicamente posible producir biodiésel usando aceite de palma, en la mayoría de las cuales se destaca que la naturaleza de los reactivos, materias primas, aditivos, junto a las condiciones del proceso afectan de manera importante la producción de biodiesel. Mediante estos hallazgos, esta investigación busca entender el uso de butanol y pentanol y la influencia de la lecitina en la reacción química de

transesterificación y en la calidad del biocombustible obtenido.

- ✓ **La lecitina como biosurfactante en el proceso de transesterificación.**

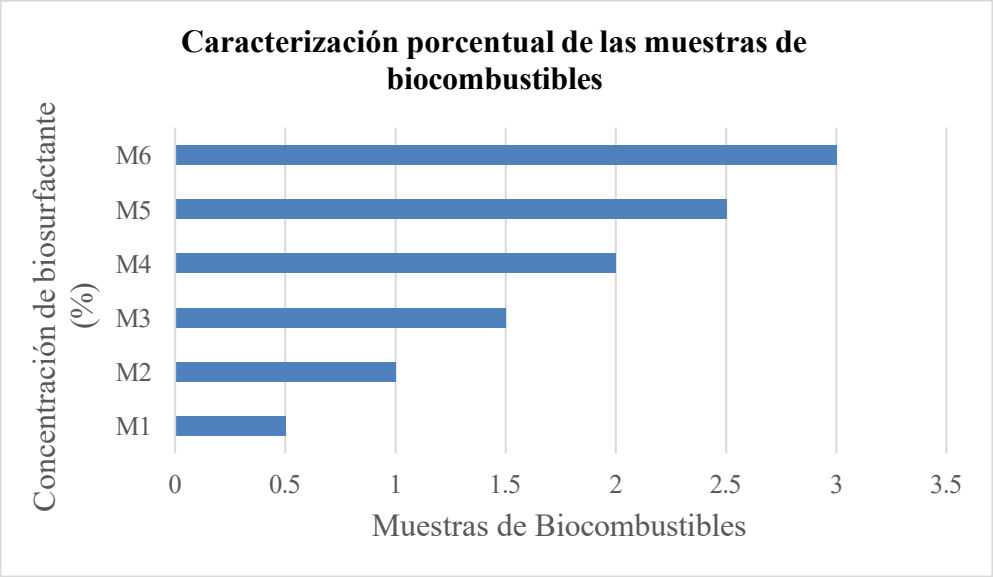
(Ghoto et al., 2024) En **la búsqueda de alternativas sostenibles y más limpias frente a los combustibles fósiles, el biodiésel emulsionado ha surgido como una opción prometedora**, especialmente por su capacidad de reducir emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia de combustión. Sin embargo, su comportamiento fisicoquímico, estabilidad y desempeño durante el proceso de combustión dependen en gran medida de los aditivos empleados, como los biosurfactantes, que permiten la adecuada mezcla de agua y biodiésel. Estos compuestos no solo estabilizan las emulsiones, sino que también pueden influir en fenómenos complejos como las microexplosiones, que mejoran la atomización del combustible y su posterior combustión.

En este contexto, (Ali et al., 2024) en el estudio titulado "Investigación de las concentraciones de biosurfactantes lecitina y cocamida DEA sobre la estabilidad, las propiedades y el fenómeno de microexplosión del combustible biodiésel emulsionado", analiza el efecto de las concentraciones de biosurfactantes lecitina, cocamida (DEA), comprometidas en las emulsiones de agua en Diésel, en propiedades como la estabilidad, el tamaño de las partículas y las microexplosiones del combustible emulsionado. Para este estudio, se

desarrollaron seis muestras de combustibles biodiésel emulsionados con un10 % de agua destilada y biosurfactantes (lecitina 63 % y cocamida DEA 37 %) en concentraciones que van del 0,5 % al 3,0 % (Ver Figura 1).

(Zembyla, M., & Vittadini, A 2021) Examinando la estabilidad y las propiedades de la emulsión de estos combustibles, adicionalmente, para explorar la distribución del tamaño de las partículas se emplearon tanto la técnica de placa caliente de gotas suspendidas con una cámara de alta velocidad que permitía registrar las microexplosiones junto a la técnica modernas de microscopía. Los resultados permiten observar que un aumento de la concentración de biosurfactante produce un aumento de la densidad y la viscosidad sobre el combustible emulsionado, a su vez que reduce el tamaño de las gotas, la tensión superficial, y la temperatura máxima de micro explosión. Esta investigación se vincula con el primer objetivo del presente estudio, pues evidencia como el papel de la lecitina como surfactante afecta las propiedades del biodiesel en la transesterificación, impactando en propiedades fisicoquímicas como la densidad, viscosidad y tamaño de partículas durante la micro explosión, donde la lecitina se comporta como un catalizador de la reacción central de transesterificación.

Figura 1. Caracterización porcentual de las muestras de biocombustibles



Fuente: Ghoto et al. (2024) y datos experimentales del estudio sobre concentraciones de biosurfactantes en biodiésel emulsionado.

- ✓ **Importancia del aceite de palma en la transesterificación para la producción de biodiésel: un antecedente relevante para el estudio de interacciones químicas con lectina y butanol.**

La producción de biodiésel a partir de aceite vegetal residual se ha convertido en una estrategia sostenible para el aprovechamiento de desechos orgánicos, en ese sentido, el estudio de (Jadán S. et al., 2023) en el proyecto de investigación **"Obtención de Biodiésel a partir de la Transesterificación de aceite vegetal residual"**, los resultados destacan la obtención de biodiésel B100, mediante aceite de palma residual, empleando alcohol metílico en relación molar metanol: aceite de 6:1, y empleando como catalizador el hidróxido de Sodio al 1% en peso, luego mediante un análisis fisicoquímico se

determinó la calidad del biodiésel y del aceite de palma usado, los resultados arrojaron que la muestra 3B es óptima, con un tiempo de reacción de 50 minutos a una temperatura de 60 °C, densidad a 15 °C de 898 kg/m^3, la viscosidad cinemática a 40 °C de 2,496 mm^2/s, el índice de acidez de 0,561 mg KOH/g, el contenido de humedad de 0,03%.

El índice de yodo fue favorable a una temperatura de 60°C. Finalmente, el rendimiento del biodiésel fue de 63,01%, destacándose un biodiésel tipo B100.

Esta investigación citada guarda relación con el presente estudio dado que es un proceso análogo mediante la reacción transesterificación, es un antecedente experimental que muestra las interacciones del aceite de palma con el metanol y la lecitina, evidenciando que la calidad del biodiésel depende de las propiedades fisicoquímicas del aceite de palma y de las condiciones de reacción, crucial para segundo objetivo de la investigación, donde el interés es la identificación de las interacciones químicas que se generan entre la lecitina, el aceite de palma y la incorporación a la producción de biodiesel y la forma en como estas son modificadas.

Por otra parte, se fortalece el hecho de que la calidad de la materia prima y reactivos involucrados es fundamental junto a los parámetros controlados en el proceso de transesterificación, que influyen para un rendimiento óptimo del biodiésel y su calidad.

- ✓ **Evaluación técnica de la producción de biodiésel a partir de aceite de palma: fundamentos para el análisis del uso de lecitina.**

El estudio de (Martínez Álvarez & Silvia Juliana, 2019), **"Análisis de la producción de Biodiésel a partir de aceite de palma: Un acercamiento a la ingeniería detallada"**, aborda la producción de biodiésel a partir de aceite de palma desde una perspectiva ingenieril.

Habla de cómo se desarrolló en dos etapas, en la primera se desarrolla el diseño conceptual de una planta para extraer aceite de palma africana y transformarlo en biodiésel.

En esta fase se evaluó tanto la viabilidad técnica como económica, apoyándonos en un software especializado para el manejo de datos. Con base en esos resultados, se avanzó a la segunda etapa: el desarrollo de la ingeniería detallada, centrada en ciertos parámetros clave que permitieron afinar el diseño. También se evaluaron los resultados obtenidos, lo que permitió confirmar la viabilidad del proyecto. La planta fue dimensionada para procesar dos toneladas de racimos de fruto fresco por hora. Además, empleando la matriz ELECTRE, se analizó la mejor ubicación para su instalación, dando como resultado que el municipio de Gamarra, Cesar, es la opción más adecuada.

La investigación citada guarda relación con el tercer objetivo del

presente estudio analizando la viabilidad técnica económica en la producción de biodiésel a partir de aceite de palma en una planta industrial, al abordar aspectos clave del diseño conceptual y la ingeniería detallada de un proceso de producción, ofreciendo una base comparativa para introducir y evaluar técnicamente la incorporación de la lecitina en procesos similares, es así, como el detalle de ingeniería mediante software especializado y la matriz ELECTRE, permiten una visualización más diciente en la forma en cómo podrían integrarse nuevos aditivos como la lecitina en el proceso de producción, evaluando su impacto técnico en factores claves de eficiencia, rendimiento y operatividad.

La investigación de (Ashok et al., 2020), analiza el impacto de un aditivo multifuncional, Thermol-D, en la eficiencia y emisiones de motores que funcionan con diésel y biodiésel.

En la investigación titulada: "Aditivo de combustible multifuncional como catalizador de combustión para diésel y biodiésel en características de motores de combustión interna", se estudia el efecto multifuncional: surfactante, emulsionante, potenciador de lubricidad, dispersante, mejorador de cetano, antioxidante y catalizador de combustión, en concentraciones de 0,5 ml, 1 ml y 2 m del aditivo combustibles diésel y biodiésel; las muestras sometidas bajo las mismas condiciones de operación sin carga a carga completa manteniendo el motor a velocidad constante.

Los resultados observados muestran que la adición de Thermol-D con diésel y biodiésel ha aumentado la eficiencia térmica del freno en un 21% y un 43% en condiciones de carga del 100% debido a la presencia de catalizador de combustión y mejorador de cetano en el aditivo. Además, la presencia en la mezcla reduce las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados en un 32-36% y un 20% respectivamente y reducción significativa de óxidos de nitrógeno en un rango de 18-20,5%, al adicionar Thermol-D a una concentración de 2% con diésel y biodiésel.

Se vieron mejoradas todas las características de combustión como el índice de cetano dada la presencia de pequeña fracción de antioxidantes, mediante la adición de Thermol-D con diésel y biodiésel. Esta investigación muestra la relevancia que tendría el papel de la lecitina como surfactante y alternativa de tipo natural, ya que el Thermol-D es un aditivo sintético derivado de hidrocarburos, por lo cual, la lecitina abre el panorama a los aditivos sostenibles para biocombustibles, ya que como surfactante la lecitina, puede mejorar la mezcla y la estabilidad entre fases (agua-aceite, alcohol-aceite), lo cual es crítico durante la transesterificación y en el almacenamiento del biocombustible, además, el estudio señala que no hubo separación de fases al agregar Thermol-D, y precisamente esta característica la cumple la lecitina.

1.3.2. Marco Teórico

✓ Generalidades y tipos de Biocombustibles

Los biocombustibles constituyen la primera fuente de energía que conoció la humanidad, fue Henry Ford el primero en operar un motor a base de alcohol de caña, más conocido como etanol o bioetanol. Casi al mismo tiempo, Rodolfo Diesel desarrolló el primer modelo del motor que lleva su nombre, haciendo uso de un aceite vegetal que por hoy se conoce como el biodiésel; estos dos hechos popularizaron su uso impulsado la economía de los combustibles antes que el petróleo. (BBVA, 2022).

Los **biocombustibles** son un tipo de combustible líquido o gaseoso que se obtiene a partir de materia orgánica ya sea procedente de medios naturales o residuos de procesamientos agroindustriales, de origen animal o vegetal (Biodisol, 2025).

✓ Biomasas

Como azúcar, maíz, sorgo, yuca y otros, usada para producir etanol, y los aceites provenientes de palma africana, soya, higuerilla, jatropha, colza y otras plantas, constituyen fuentes para obtención de biocombustibles, en especial del biodiésel y biogás, usados en principio como combustibles para el transporte. (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009, p.1).

Cuando se habla de biocombustibles, es necesario hacer referencia

a una de las formas de energía renovables de mayor tendencia en los últimos tiempos, esta es la bioenergía, definida como todos los tipos de energía producidas a partir de material orgánico, es decir, de la biomasa, la tendencia para producir bioenergía es clave frente a las acciones en el contexto del cambio climático mundial, el aseguramiento del acceso universal a fuentes de energía limpia, a su vez que mejora la seguridad alimentaria y se preserva la biodiversidad.

Se dice que la quema de biomasa genera cero emisiones a la atmosfera, dado que, a pesar de liberar dióxido de carbono a la atmosfera, este compuesto ya había sido previamente absorbido por las plantas que originaron el combustible, por lo cual se compensa el impacto ambiental (National Geographic, 2022).

En este trabajo documental, se hace hincapié en los biocombustibles como una forma de bioenergía, son entonces los **biocombustibles** un recurso bioenergético. Desde una perspectiva etimológica los biocombustibles, serían los combustibles de origen biológico, pero esta definición incluiría el petróleo, ya que este procede de restos fósiles que existen desde hace millones de años. Por lo cual, una definición más acertada para esta investigación, sería que son combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable a partir de restos orgánicos, tales como el azúcar, trigo, maíz, y por supuesto los distintos tipos de semillas oleaginosas

de la palma aceitera (Biodisol, 2025, 20).

- ✓ **Tipos de biocombustibles**

Colombia produce en principio tres tipos de biocombustibles: el Bioetanol o alcohol carburante mayormente de caña de azúcar, el biodiésel de aceite de palma, y el biobutanol (Fedebiocombustibles, 2023, p. 25).

- ✓ **Biodiésel**

El término biodiésel se refiere a los ésteres mono-alquílicos de cadena larga derivados de ácidos grasos provenientes de aceites comestibles, no comestibles o residuos orgánicos (Gerhard, 2010). La norma estadounidense ASTM D6751 estipula que estos ésteres pueden producirse con cualquier alcohol, ya sea metanol, etanol u otro, sin especificar un alcohol particular para su producción. Por otro lado, la especificación europea EN 14214 es más restrictiva y aplica únicamente a ésteres mono-alquílicos elaborados con metanol, conocidos como ésteres metílicos de ácidos grasos, con un contenido mínimo de éster del 96,5% y sin permitir aditivos distintos a ácidos grasos. Aunque el metanol es el alcohol más utilizado en la producción de biodiésel por su bajo costo y alta reactividad, diversas normativas y estudios sugieren que otros alcoholes, como el etanol, pueden generar ésteres con mejores propiedades para la combustión.

La norma ASTM D6751 admite un rango amplio de viscosidad cinemática, lo que permite emplear una variedad de materias primas y tipos de ésteres. En contraste, la norma europea EN 14214 establece un rango más restringido, limitando el uso principalmente a ciertos aceites y al metanol como alcohol para la producción de biodiésel (ASTM, 2020).

El biodiésel en Colombia, se produce por transesterificación a de triglicéridos obtenidos de semillas oleaginosas (Ogunkunle et al., 2019), favorecido por los ricos suelos para el cultivo, tiene cualidades importantes amigables con el medio ambiente, entre ellos su biodegradabilidad, y su efecto nulo en cuando a emisión de sustancias nocivas como los óxidos y el azufre (BASTO FLOREZ et al., 2021).

- ✓ **Bioetanol**

Este bioalcohol se obtiene usando materia orgánica rica en azucares que se encuentra contenida en residuos de frutas, verduras u otro material vegetal. Las materias primas que regularmente se usan para este proceso son los del cultivo de la caña de azúcar, maíz, cereales, entre otros. Santos et al., (2022). El proceso principal para obtener bioetanol es la fermentación de los hidratos de carbono con la presencia de levadura (Betancourt & Romero, 2022).

- ✓ **Biobutanol**

El biobutanol es un biocombustible obtenido mediante el proceso de fermentación acetona- butanol-etanol (ABE) producido por bacterias Gram Positivas anaerobias. Algunas propiedades fisicoquímicas a resaltar son su baja miscibilidad con el agua, menor volatilidad y corrosividad, atributos que hacen posible su uso como sustituto de la gasolina, sin requerir la modificación del motor debido a que posee mayor capacidad calorífica frente al bioetanol. La producción por fermentación del biobutanol se desarrolla mediante dos fases: en la primera llamada crecimiento celular, se producen ácidos, acetatos, el butirato y anhidrido carbónico, y en la segunda los metabolitos anteriores generados son transformados a acetona, n-butanol, y etanol.

Es importante comprender que el crecimiento celular es inhibido por los solventes producidos, dado que al producirse cerca de 20g/L los microorganismos detienen la ruta metabólica. A nivel industrial esta inhibición es un factor limitante en la producción junto a la heterofermentación, y el tratamiento de purificación del n-butanol, por ende, lo hace poco competitivo por los bajos rendimientos. Es necesario diseñar nuevos métodos de purificación que reduzcan el alto gasto energético en el proceso de destilación que implica temperaturas cercanas a los 100ºC, donde se separa 96% WT de pureza del biobutanol, con el agravante que el agua restante forme un azeótropo del n-butanol con el agua. Así, para mezclarlo con la gasolina y

proteger el motor es necesario llevarlo a pureza de 99,6% de n-butanol, empleando métodos que no forman azeótropos y no requieren desgastes altos de energía, entre ellos se pueden citar: arrastre con gas, la extracción líquido -líquido, la adsorción y la pervaporación (Moreno & Lobo, 2017).

- ✓ **Proceso de la producción del biodiésel**

El proceso general para cualquier tipo de biodiesel comprende un aceite vegetal, alcohol (etanol o butanol) y un catalizador tal como el hidróxido de potasio o sodio, seguido a un proceso de preparación donde se acondiciona la materia prima con el objetivo de eliminar las impurezas y disminución de ácidos grasos libres, ya que estos limitan el rendimiento de la reacción de transesterificación y calidad del posterior biodiésel, seguido del secado para remover el agua excedente responsable de reacciones indeseables como la saponificación y respectiva formación de jabones y disminución del catalizador (Vicente et al., 2024).

- ✓ **Transesterificación**

La transesterificación es la reacción química mediante la cual los triglicéridos presentes en aceites o grasas reaccionan con un alcohol, generalmente en presencia de un catalizador, para formar ésteres de ácidos grasos y glicerol. Cuando se emplean materias primas con

humedad o con alto contenido de ácidos grasos libres, se requieren etapas de acondicionamiento como filtración, secado y, cuando corresponde, esterificación previa, debido a que el agua y los ácidos grasos libres pueden favorecer la saponificación y disminuir la eficiencia de la catálisis básica (Pérez-Bravo et al., 2022).

Operaciones siguientes

Toda vez que se supere la transesterificación se procede a la separación de fases la fase glicerina y fase éster de la mezcla de ésteres, a fin de seguir con la purificación que mediante el lavado elimina los residuos empleando agua que finalmente luego de la estabilización de la mezcla permite la obtención de biodiésel, biocombustible que se mezcla con diésel petroquímico en proporciones adecuadas de acuerdo a la norma ASTMD 6751, que delinea las especificaciones físicas y químicas para combustibles de origen o fósiles, en especial en sus propiedades de caracterización del biodiésel respecto a su viscosidad, densidad, acidez, y punto de inflamación. (Vicente et al., 2004).

- ✓ **Generalidades de las emulsiones**

Las emulsiones son mezclas de al menos dos líquidos inmiscibles (aceite y agua) donde uno de los líquidos se dispersa en forma de pequeñas gotas que pueden permanecer estables durante un tiempo considerable, mediante la emulsificación es posible el uso de compuestos bioactivos en soluciones acuosas con la finalidad de

estabilizar la capa interfacial entre la fase dispersa y la continua.

Las emulsiones se distinguen por ser sistemas termodinámicamente inestables en el tiempo; con el objeto de mejorar su estabilidad, con el fin de formarlas se emplean emulsionantes, que son moléculas anfifílicas, es decir, comprendidos por componente hidrófobos e hidrófilos, capaces de estabilizar la interfaz aceite/agua (O/W), es común que en la industria alimentaria, las emulsiones sean mezclas de aceite en agua (O/A), en el caso de la leche, cremas, aderezos para ensaladas, mayonesa y sopas, o mezclas de agua en aceite (A/O), en el caso de la margarina y la mantequilla. En sistemas más avanzados, se utilizan emulsiones múltiples (A/A/AO A/A/O) (Vieira da Silva et al., 2016).

Dentro de la industria industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética, pueden identificarse dos tipos principales de emulsionantes: biopolímeros, que estabilizan las emulsiones mediante la formación de una capa viscoelástica que ofrece repulsión electrostática y barrera estérica, aunque generan gotículas más grandes y su efectividad depende de las condiciones del entorno, algunos ejemplos son las proteínas. Y los surfactantes de bajo peso molecular, que, a diferencia de los anteriores, se encargan de adsorber y reorganizar de forma rápida, generando emulsiones más finas y temporalmente estables, pero con menor resistencia a la floculación. Es conocido por la industria química el poder de la combinación

de ambos emulsionantes, ya que tienen la capacidad de generar un efecto sinérgico a corto plazo, capaz de mejorar la estabilidad cinética de las emulsiones (Xia et al., 2024).

- ✓ **Tipos de emulsiones**

Las emulsiones se pueden clasificar según cómo se distribuyen el aceite y el agua en la mezcla. Por ejemplo: I: cuando el aceite forma pequeñas gotas dentro del agua, se llama emulsión aceite/agua. II: Si es al revés, con gotas de agua en aceite, se conoce como emulsión agua/aceite. III: También existen combinaciones más complejas entre estos dos tipos (Vieira da Silva et al., 2016. Cap. 4).

- ✓ **Microemulsiones**

Las microemulsiones son mezclas claras y homogéneas que se forman al combinar agua, aceites y ciertos compuestos llamados anfipáticos. Estas mezclas son muy estables y sus partículas son extremadamente pequeñas, con tamaños que van de 5 a 100 nanómetros. Para una manipulación correcta es importante el control de propiedades físicas como la viscosidad, la conductividad eléctrica. Su formación es de manera espontánea dada la organización natural de las partes solubles en agua y en aceite de los tensioactivos. Estas propiedades las hace aptas para diversas aplicaciones en áreas como la farmacia, la cosmética y la alimentación, en este último sector, su uso se encuentra

limitado por la necesaria aprobación como alimento de los tensoactivos por parte de las Normativas alimenticias. (Ídem)

- ✓ **Nanoemulsiones**

Las nanoemulsiones, también conocidas como emulsiones finas o submicrónicas son parecidas a las microemulsiones, pero no tan estables. Estas se obtienen mediante procesos mecánicos como la microfluidización, que rompe gotas grandes en partículas muy pequeñas. Aunque tienen menor solubilidad y biodisponibilidad, su estructura también se estabiliza con tensioactivos que se colocan en la superficie de las gotas para evitar que se unan nuevamente (Ibidem).

- ✓ **Los surfactantes no son emulsiones**

Los surfactantes no son emulsiones, son emulsionantes que actúan como coadyuvantes, compuestos anfipáticos con fracciones hidrofílicas e hidrofóbicas en su estructura, pueden provenir de origen sintético o microbiano, obtenidos ya sea por síntesis química o por actividad microbiana. Su potencial reside en que las propiedades de estos polímeros permiten su procesamiento por emulsificación, separación, solubilización, tensión superficial (interfacial) y adsorción. (Bjerk et al., 2021) Los biosurfactantes son una nueva generación de moléculas surfactantes ecológicas o surfactantes de

base biológica de amplio interés experimental debido a su versatilidad de aplicaciones por sus propiedades antibacterianas, antifúngicas y antibacteriales, con gran capacidad de ensamblaje y emulsificación, que se han empleado en sistemas de administración de fármacos (Ídem).

1.3.3. Marco Legal

En Colombia, la regulación del aceite de palma y del biodiésel es un esfuerzo conjunto que involucra a diversos actores claves. Entre ellos se encuentran el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el Ministerio de Minas y Energía, así como organizaciones del sector productivo como Fedepalma (la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite) y la Federación Nacional de Biocombustibles. Cada una cumple un papel fundamental en el desarrollo, seguimiento y fortalecimiento de las políticas que rigen estos sectores. A continuación, se resumen los principales lineamientos y normas relevantes:

- ✓ **Resolución 40213 DE 2019**

Por la cual se establece el ingreso al productor de alcohol carburante y del biocombustible para uso en motores diésel que rigió a partir del 9 de marzo de 2019. Es decir, el valor base que reciben los productores por cada litro de biocombustible entregado a la cadena de distribución, asegurando un precio justo al consumidor y la estabilidad económica de biocombustibles de Colombia.

(RESOLUCIÓN 40213 DE 2019, 2022).

- ✓ **Resolución FEP 194 2019**

Esta resolución aplica sobre la fijación de precios. Enuncia de la siguiente forma: Por la cual Fedepalma, como entidad administradora del fondo de estabilización de precios para el palmiste, aceite de palma y sus fracciones informa el valor de las cesiones y compensaciones de estabilización del mes de marzo de 2019 (SIDN, 2019, p. 8).

- ✓ **Resolución 40111 de 2021**

Por la cual se establece el contenido máximo de alcohol carburante - etanol en la mezcla con gasolina motor corriente y extra a nivel nacional, el contenido de biocombustible máximo en la mezcla con combustible diésel fósil a nivel nacional, y se adoptan otras disposiciones (MINENERGÍA, 2021).

- ✓ **Resolución 90963 del 10 de septiembre 2014**

Esta resolución de orden nacional, regula la producción, mezcla permitida del biodiésel en diésel de petróleo, estableciendo las fracciones combustibles provenientes de procesos de refinación del petróleo, considerando mezclas tipo B2 que contiene hasta un 2% de biodiésel obtenido por transesterificación del aceite de palma con metanol, y para distribución a mayoristas, quienes lo pueden mezclar con biodiésel hasta alcanzar concentraciones B8 o B10 antes

de entregarlo al usuario final, siempre que cumpla con las especificaciones de calidad establecidas por la regulación nacional. Cabe destacar que este combustible incluye además una sustancia química llamada "marcador", la cual permite rastrear su procedencia sin afectar su calidad (Ecopetrol, 2021).

Tabla 1. Contenido mínimo y máximo de biodiésel en las mezclas B2, B4, B8 y B10

B2		**B4**		**B8**		**B10**		**BN**	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1,90	2,10	3,8	4,2	7,6	8,4	9,5	10,5	=N–	=N+

Fuente: Adaptado de Resolución 90963 de 2014

- ✓ **Resolución 40266 de 2022**

Esta resolución establece el contenido mínimo de biodiésel en el diésel distribuido en el territorio colombiano, definiendo los porcentajes de mezcla (como B5, B10, etc.), los criterios de calidad, los requisitos para productores y distribuidores, y los plazos de implementación. Tiene como objetivo central promover el uso de combustibles más sostenibles y reducir el impacto ambiental del sector transporte, asegurando al mismo tiempo que se mantenga la calidad del combustible y se garantice la seguridad energética del país (RESOLUCION 40266, 2022).

1.3.4. Marco Conceptual

El presente estudio se fundamenta en una serie de conceptos clave que permiten comprender la relación entre la lecitina y la producción de biocombustibles a partir de aceites vegetales y alcoholes de cadena larga.

En primer lugar, la **lecitina** es una mezcla compuesta principalmente por triglicéridos y fosfolípidos, entre los que destacan la fosfatidilcolina (PC), el fosfatidilinositol (PI) y la fosfatidiletanolamina (PE) (Sun et al., 2020). La versatilidad de los fosfolípidos dada sus propiedades emulsionantes, hace de la lecitina un ingrediente muy utilizado como emulsionante en múltiples industrias, como aditivo, surfactante, alimentos y suplementos dietarios, farmacéutica, cosmética (Wade et al., 2021).

En este contexto, los **alcoholes de cadena larga** constituyen moléculas con la capacidad de formar monocapas insolubles en la superficie entre el aire y el agua, la capacidad de estas moléculas para formar monocapas depende del equilibrio entre sus partes polares y no polares. Se caracterizan por tener una parte extensa que no es polar, es decir, hidrofóbica, compuesta principalmente por hidrocarburos, y en uno de sus extremos presentan un grupo polar o hidrofílico, como puede ser un grupo –COOH o –OH (Misran et al., 2019, p. cap.3).

Una **emulsión** es una mezcla heterogénea, es decir, que no se mezclan del todo, sino parcialmente, se conforma de una fase dispersa o

liquido en otro liquido inmiscible, ello da origen a pequeñas gotas que se desplazan en ambas interfases de los líquidos, considere la emulsión del agua en aceite.

Por otra parte, los **biocombustibles s**on productos energéticos y renovables, producidos mediante recursos vegetales, como lo es la caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera, maíz, madera y celulosa, a fin de producir alcohol carburante y, de los aceites vegetales de palma, girasol, soya y colza, entre muchos otros, también se incluyen las grasas y sebo de origen animal, para la producción de biodiésel.

Una de las cualidades de los biocombustibles es que son líquidos biodegradables. Dentro de estos se encuentra el **biodiésel** que químicamente es una mezcla de alquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga, resultado de la transesterificación de aceites vegetales o también de grasas animales como materias primas, que reaccionan con un alcohol, bajo las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana, NTC 5444 (Fedebiocombustibles, 2023, p. 26).

En este proceso, el aceite de palma, es obtenido del fruto de la palma africana, Elaeis guineensis, se considera uno de los productos de mayor consumo a nivel mundial. Sus cualidades físicas se atribuyen por ser un material semisólido y contiene partes iguales de ácidos grasos saturados e insaturados, el aceite de palma en su composición está formado en su mayoría por ácido palmítico, es un

ácido graso saturado de cadena larga, C 16:0, y contrario a las creencias se ha podido comprobar en diversos estudios que es benigno en su actividad aterosclerótica (De Panfilis, 2010).

Finalmente, los **surfactantes s**on moléculas que reducen la tensión superficial entre dos líquidos, como el agua y el aceite, ayudando a formar y estabilizar una emulsión. En particular los biosurfactantes son compuestos anfipáticos producidos por microorganismos, estos compuestos se caracterizan por su elevada capacidad tensioactiva y su potencial para reducir el impacto ambiental asociado a contaminantes como los hidrocarburos. En contraste a los surfactantes de origen sintético, derivados del petróleo, los biosurfactantes presentan una toxicidad significativamente menor (Guadalupe Bustos Vázquez et al., 2018).

En conjunto, estos conceptos permiten comprender cómo la interacción entre la lecitina, los alcoholes de cadena larga y los aceites vegetales puede influir en la eficiencia y características del proceso de producción de biocombustibles**.**

2. DISEÑO METODOLOGICO PRELIMINAR

2.1. Tipo de Investigación

La presente monografía se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, de tipo documental y analítico, sustentado en la recopilación y el análisis de información proveniente de investigaciones científicas relacionadas con el efecto de la lecitina en la producción de biocombustible a partir de aceite de palma y alcoholes de cadena larga. El estudio se clasificó como exploratorio, debido a que la literatura que aborda de manera conjunta la lecitina, el aceite de palma y los alcoholes de cadena larga en la producción de biodiésel fue limitada y dispersa. En este contexto, la revisión documental permitió identificar tendencias, enfoques teóricos, hallazgos relevantes y vacíos de conocimiento sobre el fenómeno estudiado (Sampieri et al., 2017, p. 70).

La investigación no incluyó experimentación propia, sino que se sustentó en la revisión de documentos científicos y académicos. De acuerdo con Arias-Odón (2023, como se citó en Marcelino Aranda et al., 2024, p. 3), el análisis documental se basa en la revisión sistemática de fuentes como artículos científicos, tesis, informes técnicos, libros, revistas, manuales y otras publicaciones disponibles en medios impresos o electrónicos.

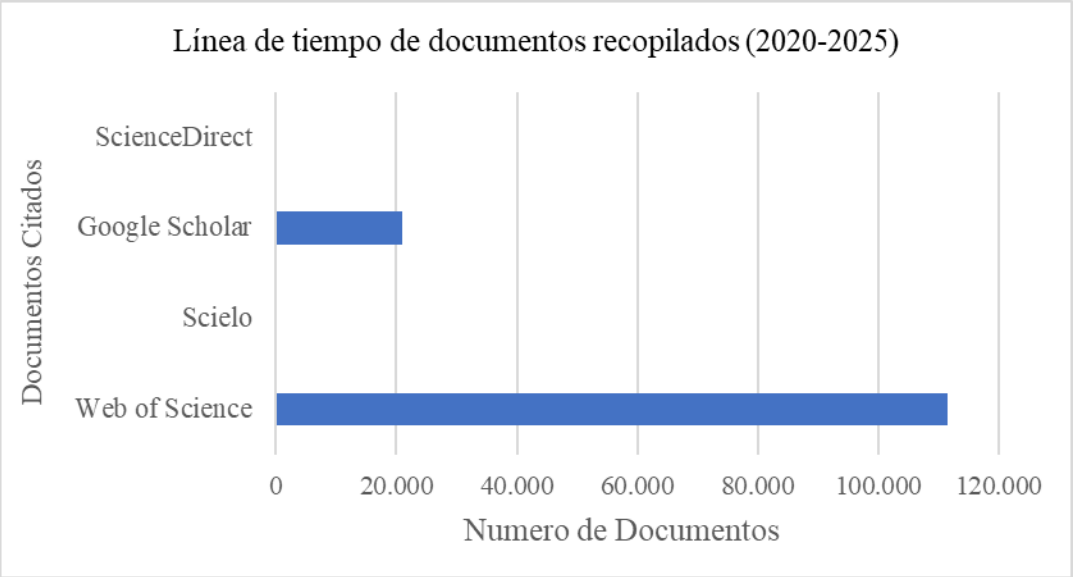
2.2. Población:

La población del análisis documental estuvo constituida por artículos científicos, trabajos de investigación, publicaciones académicas y documentos técnicos relacionados con el uso de la lecitina en la producción de biocombustibles a partir de aceite de palma y alcoholes de cadena larga.

El universo de estudio se delimitó al periodo 2020–2025, debido al incremento de la producción científica sobre biocombustibles avanzados y al desarrollo reciente de tecnologías de transesterificación y uso de biosurfactantes durante esos años.

Se estableció un análisis documental estructurado mediante la ecuación de búsqueda: ("lecithin" OR "phospholipids") AND ("palm oil" OR "vegetable oil") AND ("long-chain alcohols" OR "higher alcohols" OR "butanol" OR "pentanol" OR "hexanol") AND ("biofuel" OR "biodiesel" OR "bioenergy") AND ("catalysis" OR "emulsification" OR "reaction kinetics" OR "process optimization") AND ("literature review" OR "documentary analysis" OR "review study"), recopilando un total de 132.620 documentos distribuidos en bases de datos científicas de referencia, tales como Web of Science: 111.500 documentos, Scielo: 87 documentos, Google Scholar: 20.900 documentos, ScienceDirect: 133 documentos (Ver Figura 2).

Figura 2. Línea de tiempo de producción (2020-2025).



Fuente: Autores

2.3. Muestra

La selección de la muestra se realizó mediante un análisis bibliométrico con VOSviewer. La herramienta permitió identificar y visualizar relaciones entre palabras clave y autores a partir de los registros recuperados con la ecuación de búsqueda definida. Los registros se exportaron en formato RIS y se generaron mapas de coocurrencia de palabras clave. Posteriormente, se priorizaron los diez autores con mayor citación o número de publicaciones relacionadas con los objetivos del estudio y se seleccionaron documentos publicados principalmente durante el periodo 2015–2025. También se priorizaron fuentes en español e inglés para facilitar su análisis e interpretación.

2.4. Instrumentos de Recolección de Datos:

Para la recolección de datos en este análisis documental se emplearon instrumentos diseñados específicamente para la revisión, sistematización y evaluación crítica de fuentes bibliográficas. A continuación, se describen los principales instrumentos utilizados:

2.4.1 Formato de análisis documental:

Se diseñó un formato organizado que facilitó el registro ordenado y detallado de los datos significativos contenidos en cada una de las fuentes documentales seleccionadas.

Las fuentes seleccionadas incluyeron artículos científicos, revisiones documentales, tesis y reportes técnicos relacionados con el objetivo de la investigación. De cada documento se extrajo información sobre la materia prima utilizada, el tipo de alcohol empleado, la función atribuida a la lecitina como surfactante o emulsionante y los parámetros de interés para la producción de biodiésel, entre ellos la eficiencia de la transesterificación, el rendimiento y las propiedades de calidad del biocombustible.

2.4.2. Matriz de clasificación:

Se utilizó una matriz temática para organizar y clasificar los documentos según las variables clave del estudio: tipo de biodiesel, tipo de catalizador, alcohol utilizado, y resultados obtenidos. Ver Anexo 1.

2.4.3. Softwares bibliográficos:

Se empleó el software VOSviewer para la administración y el análisis bibliométrico de la información y para la generación de mapas de relaciones entre autores, publicaciones y palabras clave (VOSviewer, 2025).

2.5. Análisis y Tabulación de Datos:

El análisis de los datos se desarrolló bajo un enfoque cualitativo orientado a reconocer, clasificar y contrastar la información relevante de las fuentes seleccionadas. Después de la recolección documental, la información se organizó mediante un análisis temático de contenido, siguiendo el procedimiento de investigación documental descrito por Marcelino Aranda et al. (2024). Se establecieron categorías relacionadas con el tipo de catalizador, el alcohol utilizado, las condiciones del proceso, el rendimiento del biocombustible y la función de la lecitina. La información de cada fuente se registró en una matriz de sistematización que incluyó autor, año de publicación, tipo de investigación, metodología, hallazgos y conclusiones principales.

La matriz facilitó la comparación entre estudios, la identificación de similitudes y diferencias y la construcción de una visión integrada sobre el papel de la lecitina en la producción de biodiésel a partir de aceite de palma y alcoholes de cadena larga.

El análisis se efectuó considerando la solidez metodológica de cada artículo, su relevancia científica y la coherencia de los hallazgos reportados. Finalmente, la información se representó mediante tablas explicativas y comparaciones organizadas de acuerdo con las categorías establecidas.

2.6. Hipótesis:

2.6.1. Hipótesis general

La incorporación de lecitina como agente emulsificante o coadyuvante en los procesos de transesterificación puede favorecer el contacto entre las fases y contribuir al rendimiento y a las propiedades del biocombustible obtenido a partir de aceite de palma y alcoholes de cadena larga.

2.6.2. Hipótesis específicas

- ✓ La adición de lecitina en la elaboración de biodiésel a partir de aceite de palma contribuye a una mayor eficiencia en la conversión de ácidos grasos en ésteres.
- ✓ La lecitina desempeña un rol funcional como agente emulsionante, favoreciendo el contacto entre las fases y ofreciendo una alternativa de origen natural como coadyuvante del proceso de transesterificación.

2.7. Criterios para el Análisis Bibliométrico

Dado que el estudio adoptó un enfoque documental, las variables se

identificaron a partir de la información reportada en los artículos seleccionados y se utilizaron para organizar, clasificar y analizar el contenido de las investigaciones revisadas.

- ✓ **Variable independiente: uso de lecitina. Se analizó su presencia, concentración y función en cada estudio revisado.**
- ✓ **Variables dependientes:** Rendimiento del biocombustible propiedades fisicoquímicas del biodiesel, tales como viscosidad, densidad, punto de inflamación, estabilidad oxidativa y otros parámetros que determinan la calidad del producto final.
- ✓ **Variables de control: tipo de alcohol empleado. Se consideraron principalmente alcoholes reportados en la literatura, con énfasis en butanol y otros alcoholes utilizados en procesos de transesterificación, como metanol y etanol.**
- ✓ **Condiciones del proceso de transesterificación:** Temperatura, tiempo de reacción, tipo de catalizador, proporción molar aceite/alcohol, agitación, entre otros factores que pueden afectar los resultados.
- ✓ **Tipo y pureza del aceite de palma: se tuvo en cuenta si el aceite reportado era crudo, refinado, usado o**

sometido a algún tratamiento previo.

2.8. Métodos y Procedimientos

2.8.1. Identificación de interacciones químicas entre lecitina, aceite de palma y butanol.

Para cumplir con este objetivo se utilizó una tabla comparativa de propiedades fisicoquímicas de la lecitina, el aceite de palma y el butanol (ver Anexo 3). Las interacciones se evaluaron indirectamente a partir de propiedades como peso molecular, polaridad, grupos funcionales, solubilidad y puntos de fusión o ebullición. La comparación permitió identificar similitudes, diferencias y patrones de compatibilidad asociados con la miscibilidad, la afinidad polar y posibles interacciones intermoleculares, entre ellas puentes de hidrógeno e interacciones dipolo-dipolo. El procedimiento fue documental y comparativo y se sustentó en datos reportados en libros y artículos científicos.

2.8.2. Examen del papel de la lecitina en la transesterificación.

El desarrollo de este objetivo se realizó con base en una matriz de sistematización estructurada en variables independientes y dependientes (ver Anexo 2). La herramienta permitió organizar, comparar y sintetizar información proveniente de estudios científicos y técnicos sobre el papel de la lecitina en la transesterificación y la

producción de biodiésel, e identificar tendencias, hallazgos relevantes y vacíos de investigación.

La variable independiente correspondió a la inclusión de lecitina como aditivo o coadyuvante del proceso, mientras que las variables dependientes incluyeron el rendimiento de conversión, la pureza de los ésteres, el tipo de alcohol empleado, la eficiencia del proceso y las condiciones operativas, como temperatura, tiempo de reacción y relación molar. Este enfoque documental y comparativo permitió sintetizar la evidencia disponible sobre la utilidad de la lecitina en procesos de producción de biodiésel a partir de aceite de palma.

2.8.2.1. Variable independiente (VI):

Uso de lecitina (presencia/ausencia, concentración, tipo) y tipo de alcohol de cadena larga (butanol, pentanol, hexanol).

2.8.2.2. Variables dependientes (VD):

Rendimiento del biodiésel (%)

Pureza del éster

Tiempo de reacción

Viscosidad del producto final

Poder calorífico o eficiencia energética

2.8.3. Análisis de la viabilidad técnica del uso de la lecitina en la producción de biocombustibles.

Para desarrollar el tercer objetivo se utilizó una matriz de valoración técnica apoyada en categorías del análisis DOFA. La valoración consideró la capacidad emulsificante, la estabilidad y separación de fases, las condiciones de operación, la escalabilidad, la disponibilidad de materias primas y la sostenibilidad del proceso. Estos factores se contrastaron con la información reportada en estudios sobre transesterificación de aceite de palma, alcoholes de cadena larga y alternativas catalíticas. El procedimiento permitió identificar ventajas, limitaciones y condiciones críticas de aplicación; por tratarse de un estudio documental, la viabilidad no se asumió como una validación experimental, sino como una valoración sustentada en la evidencia revisada.

3. DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Objetivo 1: Interacciones químicas entre lecitina, aceite de palma y butanol.

Tabla 1. Comparación de propiedades asociadas con las interacciones químicas

Estudio / *Fuente*	**Presencia de lecitina**	**Tipo de alcohol**	**Viscosidad (mm^2/s, 40 °C)**	**Densidad (kg/m^3)**	**Poder calorífico (MJ/kg)**	**Punto de inflamación (°C)**
Atabani et al. (2019)	No	Butanol	4.8 – 5.2	880 – 885	39.5 – 40.2	110 – 115
Atabani et al. (2019)	Sí	Butanol	4.2 – 4.6	878 – 882	40.0 – 40.8	118 – 125
Leung et al. (2020)	No	Metanol	4.5 – 5.0	870 – 875	37.5 – 38.5	95 – 105
Leung et al. (2020)	Sí	Metanol	4.1 – 4.4	868 – 873	38.0 – 38.8	105 – 112
Santacesaria et al. (2021)	Sí	Butanol	4.3 – 4.7	880 – 885	40.2 – 41.0	120 – 130

Fuente: Adaptado de Atabani et al., 2013; Lam et al., 2010; Leung et al., 2010; Santacesaria et al., 2012.

En síntesis, la lecitina actúa como agente emulsificante natural que mejora la miscibilidad entre el alcohol y el aceite durante la

transesterificación. Su estructura anfifílica permite reducir la tensión interfacial entre las fases, lo que incrementa el área de contacto entre los reactivos y favorece la transferencia de masa. Al comparar los estudios de Atabani et al. (2019) utilizando butanol, se observa que la incorporación de lecitina reduce la viscosidad de un intervalo de 4,8–5,2 mm^2/s a 4,2–4,6 mm^2/s. Esta disminución representa una mejora en las características de flujo del biodiésel, facilitando su manejo, almacenamiento y atomización durante la combustión.

De manera similar, la densidad presenta una ligera reducción al pasar de 880–885 kg/m^3 a 878–882 kg/m^3 cuando se emplea lecitina. Aunque la variación es pequeña, indica una mejor conversión de los triglicéridos presentes en el aceite de palma hacia ésteres de menor peso molecular. Este comportamiento coincide con la función emulsificante de la lecitina, la cual favorece el contacto entre las fases reaccionantes y mejora la transferencia de masa durante la reacción.

Tabla 2. Interacciones químicas de la lecitina en la transesterificación.

Parte	Afinidad	Propiedades
Grupo fosfato (cabeza polar)	Hidrofílica	Interacción hacia el alcohol
Cadenas de ácidos grasos	Lipofílica	Interacción hacia el aceite

Fuente: Adaptada de Bot et al., 2021; American Lecithin Company.

Interacción con el alcohol (metanol o butanol)

El grupo fosfato polar de la lecitina puede interactuar con el alcohol mediante:

- ✓ Puentes de hidrógeno
- ✓ Interacciones dipolo-dipolo

Esto facilita la dispersión del alcohol en la fase oleosa.

Formación de emulsiones

Gracias a su estructura anfifílica, la lecitina reduce la tensión interfacial entre aceite y alcohol. Esto produce:

- ✓ Mayor área de contacto entre reactivos
- ✓ Mejor transferencia de masa
- ✓ Reacción más rápida

3.1.1. Influencia de las interacciones sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel

La comparación documental permitió identificar cambios en diversas propiedades fisicoquímicas asociadas con la incorporación de lecitina en los sistemas revisados.

- ✓ **Efectos destacados registrados con lecitina:**

Viscosidad: Se reduce considerablemente (de 4.8–5.2 mm^2/s a 4.2–

4.6 mm²/s con butanol), lo que mejora la fluidez del biodiésel.

Densidad: Se disminuye levemente, lo que sugiere una mayor homogeneidad.

Poder calorífico: Incrementa, superando los 40 MJ/kg, lo que optimiza la eficiencia energética.

Punto de inflamación: Aumenta significativamente (hasta 125–130 °C), lo que mejora la seguridad en el almacenamiento y la manipulación.

La lecitina funciona como emulsionante debido a su estructura anfifílica. Disminuye la tensión interfacial entre el aceite y el alcohol (metanol o butanol), promueve emulsiones estables, incrementa el área de contacto entre los reactivos y optimiza la transferencia de masa durante la transesterificación.

- ✓ **Comparación de alcohol:**

El butanol ofrece propiedades energéticas superiores en comparación con el metanol, y su mezcla con lecitina mejora aún más la calidad del biodiésel.

- ✓ **Restricción:**

Una emulsión excesivamente estable puede dificultar la separación de fases (biodiésel y glicerina), por lo que es fundamental regular con precisión la concentración de lecitina y las condiciones del proceso.

En conclusión, la adición controlada de lecitina permite optimizar la

calidad, la eficiencia energética y la seguridad en la producción de biodiésel, especialmente cuando se utiliza butanol como alcohol. Sin embargo, esta adición requiere ajustes precisos para evitar posibles inconvenientes operativos.

Por esta razón, se investiga la lecitina como un emulsionante natural. Los hallazgos indican que su utilización optimiza la interacción entre los reactivos, incrementa la eficiencia de la reacción y genera un biocombustible con superiores características fisicoquímicas.

Asimismo, al tratarse de un compuesto de origen natural, su utilización se adapta a los principios de sostenibilidad y química ecológica, favoreciendo tanto el progreso científico como el establecimiento de procesos más eficaces y amigables con el entorno.

3.2. Objetivo 2: Análisis del papel de la lecitina en la transesterificación.

La lecitina ha sido ampliamente estudiada como aditivo natural en los procesos de transesterificación para la producción de biodiésel, debido a su capacidad emulsificante y su contribución a la mejora de la transferencia de masa entre fases inmiscibles. Diversos estudios recientes coinciden en que su aplicación controlada permite aumentar la eficiencia del proceso, aunque también introduce desafíos técnicos asociados a la separación y calidad del producto final.

La transesterificación continúa siendo el proceso más utilizado a nivel

industrial y académico para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales y grasas animales, debido a su eficiencia y viabilidad técnica. Sin embargo, uno de los principales retos del proceso está relacionado con la limitada miscibilidad entre el alcohol y el aceite, lo que genera resistencias a la transferencia de masa y afecta negativamente la cinética de la reacción. Investigaciones recientes sobre procesos de transesterificación para biodiésel indican que la incorporación de sustancias con propiedades emulsificantes puede mitigar esta limitación al mejorar el contacto entre las fases reactantes. En este contexto, la lecitina ha despertado interés como aditivo natural capaz de optimizar la eficiencia del proceso de transesterificación (Atabani, 2019).

Tabla 3. Estudios sobre el papel de la lecitina en los procesos de transesterificación.

Referencia (autor, año)	**Tipo de fuente**	**Variable Independiente (VI)**	**Variable Dependiente (VD)**	**Metodología**	Hallazgos principales	**Conclusión del estudio**
Atabani et al. (2019)	Artículo de revisión científica	Uso de aditivos naturales (lecitina)	Eficiencia del proceso de transesterificación	Revisión sistemática de estudios experimentales e industriales	Mejora de la miscibilidad y la cinética de reacción	La lecitina es un aditivo natural viable para optimizar la producción de biodiésel

Leung et al. (2020)	Artículo científico	Uso de agentes emulsificante	Rendimiento de ésteres metílico s	Análisis experimental y revisión de procesos catalizado s	Incremento o del área interfacial y reducción del tiempo de reacción	La mejora en la transferencia de masa favorece la eficiencia del reactor
Santacesaria et al. (2021)	Artículo científico	Concentración de fosfolípidos (lecitina)	Separación y purificación del biodiésel	Análisis comparativo o de tecnologías de producción	Formación de emulsiones estables en altas concentración.	La dosificación de lecitina debe ser cuidadosamente controlada
Kouzuy Hidaka (2019)	Artículo de revisión	Condiciones operativas con aceites que contienen lecitina	Calidad del biodiésel	Revisión de estudios catalíticos	La calidad del biodiésel depende del control de variables del proceso.	La presencia de lecitina exige un control riguroso del proceso
Bharathiraja et al. (2022)	Artículo de revisión científica.	Uso de aditivos naturales.	Sostenibilidad del proceso.	Revisión de métodos químicos y biológicos.	Reducción del impacto ambiental del proceso.	La lecitina se alinea con los principios de la química Verde.

Zhang et al. (2022)	Artículo científico	Contenido de lecitina (1-40 %) y catalizador soportado. .	Rendimiento de ésteres metílicos (FAME).	Experimental (transesterificación con metanol, GC).	Rendimientos cercanos al 100 %; la lecitina promueve la reacción de triglicérido.	Permite producir biodiésel a partir de aceites crudos sin desgomado previo.
Todorović et al. (2023)	Artículo científico	Composición de DES basados en lecitina y temperatura.	Velocidad de reacción y separación de fases.	Experimental (síntesis DES + etanólisis con CaO).	El DES lecitina: glicerol acelera la reacción y facilita la separación.	Los DES basados en lecitina actúan como cosolventes efectivos que mejoran la eficiencia y la separación.
Zainal et al. (2023)	Artículo científico	Pre-tratamiento de Crude Palm Oil (CPO), dosificación de enzima y ultrasonido	Rendimiento de biodiesel mediante interesterificación enzimática.	Experimental (interesterificación enzimática de CPO con metil acetato).	Rendimiento máximo de 80.6 % con CPO pre-tratado.	La interesterificación enzimática de aceite de palma crudo es viable, aunque la estabilidad de la enzima requiere optimización.

Komariah et al. (2026)	Artículo científico	Uso de DES multifuncional (K_2CO_3 – glicerol) en aceite de palma	Rendimiento de metil ésteres y purificación	Experimental (transesterificación + extracción simultánea)	Alto rendimiento (>98 %) y excelente remoción de impurezas con DES	El DES actúa como catalizador, medio de reacción y solvente de purificación en biodiésel de palma
Estiasih et al. (2020)	Artículo científico	Fosfolípidos estructurados de palm pressed fiber	Propiedades emulsificantes (estabilidad, HLB, EAI)	Experimental (modificación enzimática y pruebas de emulsión)	Mejora significativa en propiedades emulsificantes vs. fosfolípidos nativos de palma	Los fosfolípidos modificados de subproductos de palma son emulsificantes más eficientes

Fuente: Adaptado de Atabani et al. (2019), Leung et al. (2020), Santacesaria et al. (2021), Kouzu y Hidaka (2019), Bharathiraja et al. (2022), Zhang et al. (2022), Todorović et al. (2023), Zainal et al. (2023), Komariah et al. (2026), Estiasih et al. (2020) y Adekunle et al. (2020).

La información presentada en la Tabla 3 muestra que la literatura revisada ha prestado atención al uso de aditivos y compuestos con propiedades emulsificantes en procesos de transesterificación. Los estudios coinciden en señalar que la limitada miscibilidad entre el alcohol y el aceite puede restringir la transferencia de masa y, por

tanto, afectar la eficiencia de la reacción. En este contexto, la lecitina se ha estudiado por su capacidad para favorecer el contacto entre fases, aunque su efecto depende de la composición del sistema y de las condiciones de operación.

El estudio de Atabani et al. (2019) resalta que los aditivos naturales como la lecitina pueden mejorar la miscibilidad entre los reactivos, lo que se traduce en una mejor cinética de reacción y, por consiguiente, en una mayor eficiencia en la producción de biodiésel. Este trabajo, basado en una revisión sistemática de investigaciones experimentales e industriales, concluye que la lecitina representa una alternativa viable y sostenible para optimizar el proceso de transesterificación.

Por su parte, Leung et al. (2020) analizan el papel de los agentes emulsificantes en la mejora de la transferencia de masa durante la reacción.

Leung et al. (2020) reportaron que el aumento del área interfacial entre las fases líquidas reduce el tiempo de reacción y favorece el rendimiento de los ésteres metílicos, lo que respalda la importancia de los aditivos que facilitan la interacción entre los reactivos.

En el caso del estudio realizado por Santacesaria et al. (2021), se evidencia que la presencia de fosfolípidos como la lecitina puede influir significativamente en las etapas de separación y purificación del biodiésel. Aunque la formación de emulsiones puede favorecer el contacto entre las fases durante la reacción, concentraciones elevadas

de lecitina pueden generar emulsiones demasiado estables, lo que dificulta la posterior separación de los productos. Por ello, los autores destacan la importancia de controlar cuidadosamente la dosificación del aditivo.

Asimismo, Kouzu y Hidaka (2019) señalan que la presencia de compuestos como la lecitina en los aceites utilizados como materia prima puede afectar la calidad final del biodiésel si no se controlan adecuadamente las condiciones operativas del proceso. En este sentido, el estudio subraya la necesidad de optimizar variables como la temperatura, el tipo de catalizador y la relación molar alcohol-aceite.

El trabajo de Bharathiraja et al. (2022) aborda el uso de aditivos naturales desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental, destacando que el empleo de compuestos como la lecitina se ajusta a los principios de la química verde, al reducir el uso de sustancias sintéticas y minimizar el impacto ambiental del proceso de producción de biocombustibles.

Zhang et al. (2022) investigaron la síntesis de biodiésel a partir de aceites crudos con presencia de lecitina mediante catalizadores básicos soportados en MoS_2, particularmente Na_2CO_3/MoS_2. El estudio evaluó la posibilidad de evitar el desgomado previo y reportó rendimientos de ésteres metílicos cercanos al 99,8 %. Bajo las condiciones estudiadas, la presencia de lecitina no impidió la

transesterificación de los triglicéridos y el sistema catalítico permitió obtener biodiésel a partir de aceites crudos sin una etapa previa de eliminación de gomas.

Igualmente, Todorović et al. (2023), estudio sobre la síntesis y propiedades fisicoquímicas de solventes eutécticos profundos (DES) basados en lecitina (LEC:G = lecitina:glicerol). Evaluaron su uso como cosolvente en la etanólisis (transesterificación con etanol) de aceite de semilla de mostaza negra, catalizada por CaO.

Obteniendo el DES basado en lecitina reduce la densidad y mejora las propiedades del solvente, acelera significativamente la reacción de transesterificación, facilita y acelera la separación de fases (biodiésel-glicerina).

El DES LEC:G mostró un efecto positivo especialmente con CaO calcinado, alcanzando altos contenidos de ésteres etílicos en menos tiempo.

Zainal et al. (2023) evaluaron la producción de biodiésel mediante interesterificación enzimática de aceite de palma crudo (CPO) con metil acetato bajo condiciones de ultrasonido. El estudio incluyó pretratamiento por desgomado y blanqueo y evaluó la estabilidad de la lipasa inmovilizada (CaLA). Entre los principales hallazgos se reportaron:

- ✓ Rendimiento máximo de biodiésel del 80.6 % con CPO

pre-tratado.

- ✓ La enzima funciona bien a bajas concentraciones, pero su estabilidad es limitada (la productividad cae al 92 % en la segunda reutilización).
- ✓ Demuestra que la interesterificación enzimática de aceite de palma crudo es viable, aunque se necesita mejorar la reutilización de la enzima.

Según Komariah et al. (2026), la evaluación del desempeño multifuncional de un solvente eutéctico profundo (DES K_2CO_3–glicerol) en la producción y purificación de biodiésel a partir de aceite de palma. El DES actúa simultáneamente como catalizador, medio de reacción y solvente para la purificación.

- ✓ Alto rendimiento de metil ésteres (>98 %) en combinación con otros catalizadores.
- ✓ Excelente capacidad de remoción de impurezas (mejora significativa en pureza, densidad, valor de saponificación y ácido).
- ✓ El DES permitió integrar etapas de síntesis y purificación, reducir operaciones y disminuir el consumo de agua, con desempeños comparables o superiores a los sistemas convencionales descritos en el

estudio.

Estiasih et al. (2020) estudiaron la modificación enzimática de fosfolípidos extraídos de fibra prensada de palma mediante acidólisis con concentrados de ácidos grasos omega-3. Los autores evaluaron las propiedades emulsificantes de los fosfolípidos estructurados (SPL) y observaron que:

Los fosfolípidos modificados presentan mejores propiedades emulsificantes que los nativos de palma (mayor HLB, índice de actividad emulsificante —EAI— e índice de estabilidad de emulsión —ESI—).

La modificación aumenta la polaridad, lo que mejora la estabilidad de emulsiones aceite-en-agua (O/W).

Demuestra que los subproductos de palma pueden generar emulsificantes (similares a lecitina) de mayor calidad.

Para finalizar, Adekunle et al. (2020) en la elaboración de biodiésel a partir de aceites vegetales reutilizados (aceite de cocina desechado) empleando catalizadores biológicos (cáscara de huevo, cáscara de piña y hueso de res). Incorpora un pre-tratamiento con degumming (eliminación de fosfolípidos y lecitina).

Los rendimientos de biodiésel oscilan entre 76 % y 88.3 % dependiendo del catalizador biológico utilizado.

La eliminación previa de goma (remoción de fosfolípidos/lecitina)

mejora significativamente las características químicas del aceite (disminuye ácidos, FFA y el índice de yodo).

Los biodiéseles producidos cumplen con las normas ASTM y EN, evidenciando que eliminar lecitina/fosfolípidos antes de la transesterificación mejora la calidad del producto final.

La revisión de estos estudios indica que la lecitina presenta potencial como aditivo en los procesos de transesterificación por su capacidad emulsificante y su posible contribución a la transferencia de masa. Al mismo tiempo, la literatura advierte que su concentración debe controlarse para evitar dificultades en las etapas de separación y purificación del biodiésel.

3.2.1. Efecto de la lecitina sobre la eficiencia de la transesterificación

La comparación de los estudios permitió establecer que la presencia de lecitina o de sistemas basados en fosfolípidos puede favorecer la interacción entre las fases en determinadas condiciones de transesterificación. Zhang et al. (2022) reportaron conversiones cercanas al 99,8 %, mientras que Komariah et al. (2026) informaron rendimientos superiores al 98 % en un sistema DES y Zainal et al. (2023) alcanzaron un máximo de 80,6 % con aceite de palma crudo pretratado. Estas diferencias muestran que el desempeño depende de la materia prima, el sistema catalítico y las condiciones de operación. A su vez, Atabani et al. (2019), Leung et al. (2020) y Zhang et al.

(2022) relacionaron la mejora del proceso con un mayor contacto entre las fases y una transferencia de masa más eficiente.

Esto se traduce en una mejor eficiencia de la reacción, evidenciada en una mejor cinética y en el incremento del rendimiento de los ésteres generados. No obstante, también se reconocen restricciones relacionadas con la aplicación de la lecitina, particularmente cuando se utiliza en concentraciones elevadas, ya que puede producir emulsiones demasiado estables que complican la separación y purificación del biodiésel.

La evidencia revisada también mostró una limitación relevante: concentraciones elevadas de compuestos emulsificantes pueden estabilizar en exceso la dispersión y dificultar las etapas posteriores de separación y purificación. Por tanto, el posible beneficio de la lecitina no depende únicamente de su presencia, sino de la dosificación, el tipo de alcohol, el catalizador y las condiciones de operación. Esta relación explica por qué la literatura la considera una alternativa de interés para mejorar la transferencia de masa, pero no permite asumir un efecto uniforme en todos los sistemas de producción de biodiésel.

3.3. Objetivo 3: Evaluación de la viabilidad técnica de la lecitina en la producción de biocombustibles.

Para valorar este objetivo se utilizó la matriz técnica presentada en la Tabla 4, construida a partir de criterios de capacidad emulsificante,

separación de fases, condiciones de operación, escalabilidad y sostenibilidad. La valoración se sustentó en la comparación de la evidencia documental disponible y no en una prueba experimental propia.

Tabla 4. Matriz de valoración técnica del uso de la lecitina en la producción de biodiésel

Aspecto técnico	**Descripción técnica / Rol de la lecitina**	Valoración técnica	Factores críticos	**Referencia(s)**
Capacidad emulsificante (unión aceite–alcohol)	La lecitina actúa como agente emulsificante natural, permitiendo una interacción más eficaz entre el aceite de palma y el butanol durante la transesterificación, lo que mejora la eficiencia del proceso y las propiedades del biodiésel (viscosidad, estabilidad).	Alta	Dosificación adecuada; tipo de alcohol utilizado	Ramírez et al., 2021
Estabilidad de la emulsión y separación de fases	En concentraciones elevadas, la lecitina puede generar emulsiones demasiado estables, lo que dificulta la separación de fases y el posterior proceso de purificación del biodiésel.	Media	Concentración de lecitina; tiempo de reposo y separación	Kiss et al., 2014; Sendzikiene et al., 2022
Condiciones de operación del proceso	El rendimiento del proceso depende de variables como la temperatura de reacción, el tipo de alcohol empleado y las condiciones operativas, que deben controlarse cuidadosamente para asegurar resultados consistentes.	Media	Temperatura de reacción; tipo de alcohol; tiempo de reacción	Kiss et al., 2014; Sendzikiene et al., 2022

Comparación con catalizadores convencionales	La lecitina compite con catalizadores tradicionales que ya han demostrado alta eficiencia en la industria, lo cual condiciona su adopción frente a alternativas ya validadas a gran escala.	Media-Baja	Eficiencia comparativa; costos de sustitución del catalizador	Cardeño et al., 2013; Urresta et al., 2004
Escalabilidad industrial y disponibilidad de materia prima	Su implementación a nivel industrial es técnicamente viable, pero depende de la disponibilidad y el costo de la materia prima, así como de la estandarización de su uso como emulsionante.	Media	Costo y disponibilidad de lecitina; falta de estandarización; requisitos regulatorios	Cardeño et al., 2013; Urresta et al., 2004
Alineación con sostenibilidad y química verde	Su origen natural, biodegradabilidad y compatibilidad con procesos de transesterificación alineados a la química verde representan una vía técnica viable para su implementación sostenible.	Alta	Avances tecnológicos en los procesos; interés creciente por biocombustibles sostenibles	Castro et al., 2010; Kiss et al., 2014

Fuente: Adaptado de Cardeño et al. (2013), Castro et al. (2010), Kiss et al. (2014), Ramírez et al. (2021), Sendzikiene et al. (2022) y Urresta et al. (2004).

La Tabla 4 sintetiza los factores considerados para valorar el uso de la lecitina. La capacidad emulsificante y su origen natural representan aspectos favorables, mientras que la estabilidad excesiva de las emulsiones, la necesidad de controlar las condiciones de operación y las incertidumbres de escalabilidad constituyen limitaciones. Por ello, la evidencia revisada no sustenta una viabilidad irrestricta, sino un

potencial de aplicación condicionado al control de la dosificación y de las etapas de separación y purificación (Sendzikiene et al., 2022).

El contraste se realizó frente a factores técnicos reportados en procesos convencionales y alternativos de transesterificación, entre ellos la eficiencia de reacción, la separación de fases, las condiciones de operación y la posibilidad de escalamiento (Cardeño et al., 2013; Castro et al., 2010; Kiss et al., 2014; Ramírez et al., 2021; Sendzikiene et al., 2022; Urresta et al., 2004). Este contraste permitió reconocer que una eventual implementación de la lecitina tendría que demostrar ventajas operativas frente a tecnologías ya establecidas y superar restricciones relacionadas con costo, disponibilidad, estandarización y requisitos regulatorios.

3.3.1. Condiciones, ventajas y limitaciones para su aplicación técnica

El análisis documental no permitió afirmar una viabilidad técnica definitiva para la combinación específica lecitina–aceite de palma–butanol, debido a que los estudios revisados no evaluaron este sistema bajo un mismo diseño experimental ni a una misma escala. La matriz de valoración sí permitió identificar un potencial técnico condicionado: por su naturaleza anfifílica, la lecitina puede favorecer el contacto entre las fases, pero este beneficio debe contrastarse con la facilidad de separación posterior, la dosificación requerida y el desempeño frente a alternativas convencionales. En consecuencia, la

valoración favorable se restringe a su potencial como coadyuvante y no equivale a una validación industrial.

Entre las condiciones críticas identificadas se encontraron el control de la concentración de lecitina, el tiempo de separación, el tipo de alcohol, la temperatura de reacción y el sistema catalítico. Una concentración excesiva puede favorecer emulsiones persistentes y dificultar la recuperación del biodiésel, mientras que una dosificación adecuada podría contribuir a mejorar la transferencia de masa. Estas condiciones deben comprobarse experimentalmente antes de proponer su implementación a escala industrial.

Por tanto, la revisión permitió clasificar la lecitina como una alternativa técnicamente prometedora, pero todavía condicionada por vacíos de validación directa, optimización de dosis, separación de fases y escalabilidad. Esta conclusión se deriva del contraste documental presentado en la Tabla 4 y debe interpretarse dentro de los límites propios de una monografía basada en literatura científica.

3.4. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica se identificó que la lecitina puede desempeñar un papel relevante como agente emulsificante en la transesterificación, al favorecer el contacto entre la fase oleosa y el alcohol. Algunos de los sistemas revisados reportaron conversiones o rendimientos cercanos o superiores al 99 %, pero estos valores dependieron de la materia prima, el catalizador y las condiciones de

operación, por lo que no pueden atribuirse exclusivamente a la presencia de lecitina.

En la comparación documental de las propiedades fisicoquímicas se reportaron valores de viscosidad que pasaron de 4,8–5,2 mm^2/s a 4,2–4,6 mm^2/s en los sistemas con lecitina incluidos en la matriz, junto con valores de poder calorífico superiores a 40 MJ/kg y puntos de inflamación entre 125 y 130 °C. Estos datos corresponden a los estudios revisados y sugieren posibles mejoras en fluidez, desempeño energético y seguridad, sin constituir mediciones experimentales realizadas en esta monografía.

En la comparación documental incluida en la matriz, las formulaciones con butanol mostraron valores de poder calorífico y punto de inflamación superiores a los registrados en los sistemas con metanol. Esta tendencia sugiere un desempeño energético favorable del butanol en los estudios revisados, aunque no permite establecer una superioridad general sin comparar ambos alcoholes bajo condiciones experimentales equivalentes.

Con base en la evidencia documental revisada, el uso de la lecitina puede considerarse técnicamente prometedor como coadyuvante de la transesterificación, pero no quedó demostrado como una alternativa industrial plenamente validada. Su posible aplicación depende del control de la dosificación, la separación de fases, las condiciones de reacción y la comparación de su desempeño con tecnologías

convencionales. Por ello, se requieren ensayos experimentales específicos con el sistema aceite de palma–butanol–lecitina y evaluaciones de escalamiento antes de establecer una recomendación definitiva de implementación.

4. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Atabani, A. E. (2019). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2070–2093.
- ✓ Adekunle, A. S., et al. (2020). Biodiesel potential of used vegetable oils transesterified with biological catalysts. Energy Reports, 6, 2861–2871.
- ✓ Estiasih, T., et al. (2020). Characteristics and emulsifying properties of structured phospholipids from palm pressed fiber... Food Science and Technology.
- ✓ Komariah, L. N., et al. (2026). Multifunctional performance of deep eutectic solvent (DES) K_2CO_3–glycerol in biodiesel synthesis and purification from palm oil. RSC Advances (PMC disponible).
- ✓ Todorović, Z., et al. (2023). Effects of temperature on physicochemical properties of the lecithin-based deep eutectic solvents and their use in the CaO-catalyzed transesterification. Hemijska Industrija, 77(1), 53–67. https://doi.org/10.2298/HEMIND220527016T
- ✓ Bharathiraja, B. C. (2022). Biodiesel production using

chemical and biological methods: A review of process, catalyst, and sustainability aspects. Renewable Energy, 181, 1286–1302.

- ✓ E., D. S., & Santacesaria. (2021). Main technologies in biodiesel production: State of the art and future challenges. Catalysis Today. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.060
- ✓ Kouzu, M. &. (2019). Transesterification of vegetable oil into biodiesel catalyzed by CaO: A review. Fuel, 93, 1–12.
- ✓ Leung, D. Y. (2020). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. Applied Energy, 87(4), 1083–1095.
- ✓ Ali, A., Aziz, A. R. A., Ismael, M. A., & Alqaed, S. (2024). The investigation of lecithin and cocamide DEA Biosurfactant concentrations on emulsified biodiesel fuel stability, properties, and the micro-explosion phenomenon. Results in Engineering, 23, 102482. https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102482.
- ✓ Ashok, B., Nanthagopal, K., Chyuan, O. H., Le, P. T. K., khanolkar, K., Raje, N., Raj, A., Karthickeyan, V.,

& Tamilvanan, A. (2020). Multi- functional fuel additive as a combustion catalyst for diesel and biodiesel in CI engine characteristics. Fuel, 278,118250. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.118250

- ✓ Asghar Ali Ghoto, M. A. (February de 2024). Investigation of biosurfactant dosage on water-in-biodiesel fuel spray characteristics and a microscopic spray of water-in- biodiesel droplet micro-explosion. Obtenido de Investigation of biosurfactant dosage on water-in-biodiesel fuel spray characteristics and a microscopic spray of water-in-biodiesel droplet micro-explosion: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544225004190#pre view-section-abstract
- ✓ ASTM, D. (2020, AUGUST). specification for biodiesel fuel blend stock (b100) for middle distillate fuels. Astm international. https://doi.org/10.1520/d6751-20a basto florez, luis eduardo, millán alvarado, sebastian augusto, medina caballero, luis fernanda, mora vergara, lia zamara4, caballero hernández, & yuleisi tatiana. (2021).
- ✓ Estudio del biodiesel obtenido a partir de aceite de

Sacha inchi (Plukenetia volubilis Linneo)*.Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial, 20(1), 165–178. https://doi.org/10.18684/rbsaa.v19.n2.2021.1879

- ✓ BBVA. (2022, February 20). ¿Qué son los biocombustibles? Una alternativa sostenible.
- ✓ Bot, F., Calligaris, S., & Nicoli, M. C. (2021). Inter-relationships between composition, physicochemical properties, and functionality of lecithin from different botanical origin. Trends in Food Science & Technology, 112, 312–325. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.038.
- ✓ Cardeño, F., Ríos, L., & Franco, A. (2013). Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. https://doi.org/10.17533/udea.redin.14923
- ✓ Castro, L. F., Duran, O., Alvarez, M., & Abreu, L. (2010). Evaluación y caracterización a escala de laboratorio de los procesos de producción de biodiesel (metil ester) a partir de aceite crudo de palma. Revista ION, 20(1).

- ✓ Kiss, A. A., Dimian, A. C., & Rothenberg, G. (2014). Transesterification of canola, palm, peanut, soybean and sunflower oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition. Applied Energy, 123, 108–120. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.046
- ✓ Ramírez, A. E., Imbachí, Y. C., & Miranda, C. D. (2021). Transesterificación de aceite de palma empleando catalizadores ácidos heterogéneos y agitación ultrasónica. Ingeniería y Competitividad, 23(2). https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.11287
- ✓ Sendzikiene, E., Makareviciene, V., & Santaraite, M. (2022). Simultaneous Extraction of Rapeseed Oil and Enzymatic Transesterification with Butanol in the Mineral Diesel Medium. Energies, 15(18), 6837. https://doi.org/10.3390/en15186837
- ✓ Urresta A., J. D., Ramírez, A., & Martínez, C. (2004). Alcohólisis del aceite de palma para la obtención de ésteres. Palmas, 25(especial), 365–369.
- ✓ ¿Qué Son Los Biocombustibles? Una Alternativa Sostenible.

https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-biocombustibles-una- alternativa-sostenible/Biodisol. (2025).

- ✓ Los Biocombustibles. Https://Www.Biodisol.Com/Que-Son-Los-Biocombustibles/#.Bjerk, T. R., Severino, P., Jain, S., Marques, C., Silva, https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING8080115
- ✓ Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014).
- ✓ Contreras, L., López, M., Martínez, E., & Villavicencio, S. (2018).
- ✓ Producción de biodiesel a partir de desechos de aceites a nivel de laboratorio. Revista Ingeniería y Ciencia, 1(1). http://revistasguatemala.usac.edu.gt/index.php/riyc/article/view/984/869
- ✓ De Panfilis, F. (2010). Vista de Aceite de palma orgánico: legislación, composición y efectos nutricionales. Https://Publicaciones.Fedepalma.Org/Index.Php/Palmas/Article/View/858/858.

- ✓ https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/858/858Ecopetrol. (2021, February 9). RESOLUCIÓN 90936.
- ✓ https://www.ecopetrol.com.co/wps/wcm/connect/412dfb25-ed2e-43af-ae94-58740821685a/Diésel+Extra+B2B0.pdf?MOD=AJPERES&attachment=false&id=1 614 357632976
- ✓ Fedebiocombustibles.(2023).Vademécun de los Biocombustibles. https://fedebiocombustibles.com/wp-content/uploads/2023/05/VADEMECUM.pdf
- ✓ Fedepalma. (2021). La palma de aceite en el departamento de Cesar. [2021] https://Repositorio.Fedepalma.Org/Handle/123456789/141265#page=1.
- ✓ Fedepalma. (2023). ¡Récord histórico! La producción de aceite de palma en Colombia supera expectativas en 2023El Palmicultor. Https://Elpalmicultor.Com/Sector- Palmero-Colombiano-Buen-Balance-2023/
- ✓ Gerhard, K. (2010). Vista de Calidad del combustible Biodiesel y la norma

ASTM.https://Publicaciones.Fedepalma.Org/Index.Php/Palmas/Article/View/1563/1 563, 31, 1–10.

- ✓ GLOBAL ENERGY, I. (2022). Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 – Analysis - IEA. In https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions- in- 2021-2.
- ✓ Gomez-Delgado, E. E., Nabarlatz, D., & Avellaneda-Vargas, F. A. (2022).
- ✓ International Energy Agency. (2023). *World energy balances*. https://www.iea.org/
- ✓ Obtención de biodiésel por transesterificación in situ a partir de semillas de Jatropha curcas L. Revista UIS Ingenierías, 21(2). https://doi.org/10.18273/revuin.v21n2- 2022003
- ✓ IEA. (2024).Colombia - Countries& Regions IEA. In https://www.iea.org/countries/colombia/energy-mix.Jadán S., M. J., Morejón F., M.C., García M., S., Burgos B., G., & García V., G. (2023).
- ✓ Obtención de biodiesel a partir de la transesterificación de aceite vegetalresidual. infoanalítica, 11(1), 31–51.https://doi.org/10.26807/ia.v11i1.242

- ✓ Marcelino Aranda, M., Martínez Cuevas, M. del C., & Camacho Vera, A. D. (2024).
- ✓ Análisis documental, un proceso de apropiación del conocimiento. Revista Digital Universitaria, 25(6). https://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2024.25.6.1
- ✓ Martinez Alvarez, & Silvia Juliana. (2019). Análisis de la producción de Biodiésel a partir de aceite de palma: Un acercamiento a la ingeniería detallada. In
- ✓ http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5325. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5325
- ✓ Misran, H., Othman, S. Z., Akhtaruzzaman, Md., Matsumoto, A., & Amin, N. (2019).Nonsurfactant Sol–Gel Route Synthesis of Nanoscale Powder Production. Reference Module in Materials Science and Materials Engineeringhttps://doi.org/10.1016/B978- 0-12-803581-8.11586-3
- ✓ Moreno, J. A., & Lobo, J. A. C. (2017). Biobutanol como combustible: una alternativa sustentable. Https://Revistas.Unlp.Edu.Ar/InvJov/Article/View/38

82.

- ✓ National Geographic. (2022, December 7). ¿Qué tipos de energías renovables existen?
- ✓ REDACCIÓNNATIONAL GEOGRAPHIC. https://www.nationalgeographicla.com/historia/2022/12/que-tipos-de-energias renovables- existen
- ✓ Olade. (2021). Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y sus perspectivas. In https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/06/Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para- America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus- perspectivas.pdf. http://sielac.olade.org/
- ✓ Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázque, L., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Gallardo- Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas, 25.https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.48
- ✓ Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-

Chávez, M. del R., Gallardo- Rivas, N. V., Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. del R., &

- ✓ Gallardo-Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. TIP. Revista Especializada En Ciencias Químico Biológicas, 25.https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2022.481
- ✓ Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. El Cotidiano, 1, 1–9. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009
- ✓ Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Pilar, B. L. (2017). Metodología de la investigación. In Entretextos (Vol. 9, Issue 25). MCGRAW-HILL. https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.201725338
- ✓ Sun, X., Zhang, L., Tian, S., Yang, K., & Xie, J. (2020). Phospholipid composition and emulsifying properties of rice bran lecithin from enzymatic degumming. LWT, 117, 108588. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108588

- ✓ Vicente, J., Laverde, G., Ignacio, B., Miranda, C., Alfonso, W., Correa, V., Molina,
- ✓ J. O., & Gallo, A. A. (2024). Biodiesel production from refined palm oil through transesterification: effect in a pilot thermal plant. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(2), 5537–5558. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V8I2.10967
- ✓ Vieira da Silva, B., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. P. (2016). Natural phytochemicals and probiotics as bioactive ingredients for functional foods: Extraction, biochemistry and protected-delivery technologies. Trends in Food Science and Technology, 50, 144–158. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.007 VOSviewer. (2025). Visualizing scientific landscapes. Visualizing Scientific Landscapes. https://www.vosviewer.com/
- ✓ Wade, A. H., Morra, M. J., Smith, B., & Popova, I. (2021). Yellow and oriental mustard seed lecithin content and composition. Journal of Food Composition and Analysis, 98, 103819.https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2021.103819
- ✓ Xia, B., Shen, Y., Zhao, R., Deng, J., & Wang, C. (2024). Interactions with soy lecithin regulate the

emulsification capacity of pea protein: Effects of soy lecithin concentration. Food Hydrocolloids, 155, 110168.https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110168

- ✓ Zainal, M. Z. A., et al. (2023). Enzymatic interesterification of crude palm oil with methyl acetate: Effect of pre-treatment, enzyme's dosage and stability. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 18(2), 294–302.
- ✓ Zhang, T., et al. (2022). The efficient and green synthesis of biodiesel from crude oil catalyzed by the transesterification of lecithin with methanol. RSC Advances, 12(38), 24456–24464. https://doi.org/10.1039/d2ra04198g.

5. ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de matriz de variables de categorización.

Autor y año	Tipo de Documento	Tema Principal	Objetivo del Estudio	Metodología	Resultados Clave	Relevancia

Fuente: Autor

ANEXO 2. Matriz de sistematización estructurada en variables independientes y dependientes.

Referencia (autor, año)	Tipo de documento / fuente	Variable Independiente (VI)	Variable Dependiente (VD)	Metodología	Resultados clave	Conclusión del estudio

Fuente: Autor

Anexo 3. Tabla de comparación de las propiedades fisicoquímicas del biocombustible en función de la presencia o ausencia de lecitina, y según el tipo de alcohol de cadena larga utilizado en el proceso

Estudio/ Fuente	Presencia de Lecitina	Tipo de Alcohol	Viscosidad (mm^2/s)	Densidad (kg/m^3)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Punto de inflamación (°C)

Fuente: Autor