

Universidad Zamorano
Departamento de Agroindustria
Ingeniería en Agroindustria Alimentaria



**Universidad
Zamorano®**

Proyecto Especial de Graduación
**El Biodiesel como Alternativa Energética Sostenible. Revisión
Bibliográfica.**

Estudiante

Kevin Rodulio Castellanos Velásquez

Asesores

José Oscar Murillo, M.Sc.

Luis Maldonado, Ph.D.

Honduras, noviembre 2025

Autoridades

KEITH L. ANDREWS

Rector i.a.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA M. ACOSTA MARCHETTI

Directora del Departamento de Agroindustria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Metodología.....	13
Revisión de Literatura	13
Descripción del Estudio.....	13
Selección de Fuentes a Utilizar	14
Criterios de Inclusión y Exclusión.....	14
Estrategia de Búsqueda	14
Evaluación de la Calidad de las Fuentes	15
Resultados y Discusión.....	16
Biodiesel como Alternativa Energética	17
Definición y Propiedades Fundamentales del Biodiésel	17
Panorama de Materias Primas: Diversidad y Clasificación por Generaciones.	20
Aceites de Desecho y Subproductos como Vía de Sostenibilidad:	21
Limitaciones y Perspectivas del Sector del Biodiésel.....	21
Microalgas y Microorganismos Oleaginosos: Potencial y Retos Técnico-Económicos.....	23
Impacto de la Composición de Ácidos Grasos en la Conversión y Propiedades Finales.....	24
Procesos de Síntesis: Rutas, Intensificación y Optimización.....	25
Catalizadores.....	25
Innovaciones en Catálisis y Materiales	29

Pretratamientos y Manejo de Materias Primas de Baja Calidad	29
Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) y Asignación de Emisiones	30
Comportamiento de Emisiones en la Fase de Uso	33
Rendimiento de Motores y Consumo Energético.....	34
Efectos de Mezcla y Aditivos sobre Estabilidad y Emisiones	34
Desafíos de Estabilidad Oxidativa y Almacenamiento.....	35
Evaluaciones Económicas y Viabilidad de Pequeña a Gran Escala	36
Políticas Públicas, Mandatos y Experiencias Nacionales	36
Implicaciones Socioeconómicas para Productores Familiares	38
Riesgos Ambientales y Directrices de Sostenibilidad:	38
Seguridad Alimentaria y Competencia por la Tierra.....	39
Normas Técnicas, Calidad y Certificación	39
Evaluación de Emisiones no-CO2 y Salud Pública.....	40
Investigaciones sobre Biodiésel en Zamorano y su Proyección Futura	41
Perspectivas y Factibilidad de Continuidad	42
Conclusiones	44
Recomendaciones.....	45
Referencias.....	46
Anexos.....	54

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Resumen de filtros de citas	17
Cuadro 2 Diversos catalizadores ácidos homogéneos utilizados en la producción de biodiésel a partir de diferentes materias primas.....	27
Cuadro 3 Diversos catalizadores ácidos y básicos heterogéneos utilizados en la transesterificación de grasas animales residuales para producir biodiésel.....	28
Cuadro 4 Emisiones GEI en el ciclo de vida del biocombustible basado en participación de masa....	31
Cuadro 5 Emisiones GEI en el ciclo de vida del biocombustible basado en asignación financiera.	32
Cuadro 6 Emisiones GEI en el ciclo de vida de un biocombustible basado en el contenido energético.	32
Cuadro 7 Comparación de Parámetros de Calidad del Biodiésel con Estándares Internacionales (ASTM D6751 y EN 14214)	40

Índice de Figuras

Figura 1 Producción mundial de biocombustibles: 1999-2019 (miles de barriles de petróleo equivalente al día)	19
Figura 2 Producción mundial de etanol y biodiésel: 2009 y 2019 (miles de barriles equivalentes de petróleo al día).....	20

Índice de Anexos

Anexo A Documentos utilizados 54

Resumen

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles exige alternativas que reduzcan la dependencia de combustibles fósiles y mitiguen los impactos ambientales asociados. En este contexto, el biodiésel surge como una opción estratégica, particularmente cuando se produce a partir de aceites usados de cocina y otros residuos agroindustriales. Este trabajo presenta una revisión bibliográfica de la literatura reciente, organizada en torno a materias primas, procesos de producción, catalizadores, desempeño en motores, impactos ambientales y políticas públicas. Los resultados evidencian un consenso internacional en torno a los beneficios del biodiésel, tales como la reducción de emisiones de CO, HC y material particulado, así como su aporte a la economía circular mediante el aprovechamiento de residuos. No obstante, persisten divergencias en la generación de NOx, la estabilidad oxidativa y la variabilidad en climas fríos, aspectos que dependen del tipo de materia prima y del marco regulatorio vigente en cada país. Asimismo, la literatura señala que, aunque las tecnologías de catálisis heterogénea y enzimática representan un futuro prometedor, aún enfrentan limitaciones económicas y de escalabilidad. El análisis revela que el éxito del biodiésel como alternativa energética no depende únicamente de avances tecnológicos, sino también de políticas públicas robustas, incentivos económicos y modelos de inclusión social que permitan integrar a productores locales en la cadena de valor. En consecuencia, la consolidación de este biocombustible se perfila como un desafío multidimensional que requiere innovación científica, coherencia regulatoria y cooperación internacional.

Palabras clave: catalizadores, economía circular, emisiones, políticas públicas, transición energética.

Abstract

The transition to sustainable energy systems requires alternatives that reduce dependence on fossil fuels and mitigate the associated environmental impacts. In this context, biodiesel emerges as a strategic option, particularly when it is produced from used cooking oils and other agro-industrial waste. This paper presents a bibliographic review of the recent literature, organized around raw materials, production processes, catalysts, engine performance, environmental impacts, and public policies. The results show an international consensus on the benefits of biodiesel, such as the reduction of CO, HC and particulate matter emissions, as well as its contribution to the circular economy through the use of waste. However, divergences persist in NO_x generation, oxidative stability and variability in cold climates, aspects that depend on the type of raw material and the regulatory framework in force in each country. Likewise, the literature indicates that, although heterogeneous and enzymatic catalysis technologies represent a promising future, they still face economic and scalability limitations. The analysis reveals that the success of biodiesel as an energy alternative depends not only on technological advances, but also on robust public policies, economic incentives and social inclusion models that allow local producers to be integrated into the value chain. Consequently, the consolidation of this biofuel is emerging as a multidimensional challenge that requires scientific innovation, regulatory coherence and international cooperation.

Keywords: catalysts, circular economy, emissions, energy transition, public policies.

Introducción

El desarrollo industrial y tecnológico global avanza a un ritmo sin precedentes; este progreso se sustenta en gran medida en un modelo energético dependiente de combustibles fósiles, cuyo uso extensivo ha desencadenado una crisis ambiental de magnitud planetaria. La quema de hidrocarburos es el principal contribuyente al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, siendo el dióxido de carbono (CO₂) el más significativo por volumen (M. de Castro y Da Mota, 2023). Este fenómeno es el conductor central del cambio climático, manifestándose a través del aumento de la temperatura global, la acidificación de los océanos, la fusión de los casquetes polares y una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos.

La comunidad internacional, a través de acuerdos como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, ha reconocido la urgencia de descarbonizar la economía global. En este contexto, el sector del transporte, responsable de aproximadamente el 24% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía, y casi exclusivamente dependiente del petróleo, representa uno de los mayores desafíos (Caporusso et al., 2021). La búsqueda de combustibles alternativos, renovables y de bajo carbono se ha convertido en un pilar fundamental de las estrategias de mitigación. Entre las alternativas, los biocombustibles de primera generación, producidos a partir de cultivos alimentarios como maíz, caña de azúcar o aceite de palma, surgieron con gran promesa. Sin embargo, su desarrollo ha generado un intenso debate debido a su competencia directa con la cadena alimentaria, el uso extensivo de tierras cultivables, la deforestación y el consiguiente impacto en la biodiversidad y los precios de los alimentos (Searchinger et al., 2008).

Esta problemática ha impulsado la investigación hacia biocombustibles avanzados que eviten dicha competencia y ofrezcan una solución sostenible. Paralelamente a la crisis energética, la gestión de residuos urbanos e industriales constituye otro de los grandes retos de las sociedades modernas. En particular, los aceites y grasas usados de cocina (AUC) representan un flujo de residuo de alta generación y significativo poder contaminante. Se estima que a nivel global se producen decenas de

millones de toneladas anuales de este residuo (S. Ahmad et al., 2023) La generación per cápita en América Latina y el Caribe es significativa, aunque con una tasa de recolección formal muy dispar que ronda solo el 30% en los mejores casos, muy por detrás del 70-90% alcanzado en la Unión Europea (Jo et al., 2024). Su disposición inadecuada, por ejemplo, a través del vertido por los desagües domiciliarios, conlleva graves consecuencias como la obturación de tuberías, el incremento de los costos de mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales y, finalmente, su llegada a cuerpos de agua superficiales donde forman una película que dificulta la oxigenación y perjudica a los ecosistemas acuáticos (Mahlia et al., 2020). Un claro ejemplo de la magnitud del problema en la región es México, donde se generan anualmente aproximadamente 3.3 millones de toneladas de aceite vegetal usado, pero se recolecta de manera informal la mayoría (Moreira et al., 2020).

La gestión tradicional de los AUC, cuando existe, implica su recolección y destino a vertederos o a incineración, prácticas que no aprovechan el potencial energético del material y contribuyen a las emisiones de GEI. No obstante, la composición de los AUC, rica en triglicéridos, los convierte en una materia prima idónea para la producción de biodiesel, un combustible renovable que presenta características similares al diésel mineral.

La transición conceptual de considerar los AUC como un residuo o desecho a un recurso es el fundamento de la economía circular, un modelo que busca eliminar los desechos y mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible (Nisar et al., 2021). Este principio es impulsado con fuerza por marcos regulatorios como la Directiva (UE) 2018/2001 (RED II) en Europa, que incentiva los biocombustibles avanzados procedentes de residuos. Mientras que en la Unión Europea el marco legal es robusto y homogéneo, en Latinoamérica el panorama es fragmentado. Países como Argentina, con una producción consolidada de biodiesel, Brasil, con su programa RenovaBio, y Colombia, con su regulación sobre mezclas, avanzan más rápido que otros de la región que carecen de políticas específicas (Acharya y Perez-Pena, 2020). La producción de biodiesel a partir de AUC encarna perfectamente este principio, transformando un pasivo ambiental en un activo energético, abordando

así simultáneamente dos problemáticas: la gestión de residuos y la necesidad de combustibles alternativos. El biodiesel se produce predominantemente mediante un proceso de transesterificación, donde los triglicéridos reaccionan con un alcohol (generalmente metanol) en presencia de un catalizador para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerina como subproducto.

La presente revisión bibliográfica tiene como objetivo analizar la producción de biodiésel a partir de diferentes materias primas, con especial énfasis en los aceites usados de cocina, destacando su potencial como alternativa energética sostenible y su contribución a la reducción de la contaminación ambiental. Asimismo, busca sintetizar la evidencia técnica, ambiental, económica y de política pública existente, con el fin de identificar tanto los beneficios como los desafíos que enfrenta la implementación del biodiésel en distintos contextos.

El documento se estructura de la siguiente manera: en la Metodología se describe el enfoque de búsqueda y selección de fuentes; en Resultados y Discusión se presentan los hallazgos sobre las propiedades del biodiésel, los procesos de producción, las materias primas empleadas, los catalizadores, los impactos ambientales y socioeconómicos, así como las políticas públicas que condicionan su desarrollo; finalmente, se incluyen las Conclusiones y Recomendaciones, donde se sintetizan los aportes más relevantes y se sugieren líneas de acción para futuras investigaciones y aplicaciones en el sector energético.

Metodología

Revisión de Literatura

Se realizó una revisión descriptiva y analítica sobre la producción de biodiésel como alternativa energética sostenible, con énfasis en sus beneficios potenciales y en su rol como solución frente a la contaminación generada por aceites usados en la industria de alimentos. La búsqueda de información se realizó en bases de datos científicas reconocidas, tales como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink y Wiley Online Library, además de recursos de acceso abierto en Google Scholar. Esta estrategia permitió obtener literatura tanto actualizada como representativa del estado del arte, garantizando diversidad de enfoques técnicos, ambientales y socioeconómicos.

Descripción del Estudio

El objetivo principal de la revisión consistió en examinar la producción de biodiésel como alternativa sostenible de obtención de energía, sintetizando evidencia técnica, ambiental, económica y de política pública. Para estructurar el análisis de manera coherente, la información recopilada se organizó en cinco ejes comparativos:

Materias primas (aceites comestibles, aceites usados, grasas animales, microalgas y otros residuos oleaginosos).

Procesos de producción (transesterificación convencional, catálisis heterogénea, biocatalizadores, intensificación con ultrasonido o microondas).

Catalizadores y eficiencia de conversión (homogéneos, heterogéneos y enzimáticos).

Impactos ambientales y desempeño energético (evaluaciones de ciclo de vida, emisiones, estabilidad y almacenamiento).

Aspectos económicos y de política pública (costos, escalabilidad, mandatos de mezcla, incentivos y sostenibilidad social).

Esta organización comparativa permitió no solo identificar hallazgos individuales, sino también establecer relaciones entre categorías, facilitando la comprensión integral de las oportunidades y limitaciones del biodiésel.

Selección de Fuentes a Utilizar

Se buscaron fuentes en internet como revistas científicas y buscadores académicos, se prosiguió a la selección de las fuentes que tuvieron mayor relevancia en los temas que fue necesario cubrir en esta revisión. Las fuentes que se utilizaron se eligieron de preferencia con fechas más recientes preferiblemente de cinco años de antigüedad, no obstante, algunos datos fueron recopilados de investigaciones antiguas.

Criterios de Inclusión y Exclusión

Criterios de inclusión: se incorporaron fuentes que abordaran de manera directa el biodiésel en relación con materias primas, procesos de producción, desempeño en motores, impactos ambientales, ACV o políticas públicas.

Criterios de exclusión: se descartaron fuentes que carecieran de rigor científico (blogs, artículos de opinión sin revisión por pares) o aquellas centradas en combustibles fósiles sin vinculación con el biodiésel.

Estrategia de Búsqueda

Se recurrió principalmente a fuentes primarias de información, como artículos publicados en revistas científicas especializadas en energías renovables y biocombustibles. De igual forma, fue necesario consultar fuentes secundarias, por lo que se realizó una búsqueda en distintas plataformas científicas digitales y en motores académicos reconocidos. Asimismo, materiales emitidos por organizaciones dedicadas a la investigación y desarrollo de biocombustibles, lo cual permitió contar con una base sólida y actualizada para la investigación. Con el propósito de realizar una búsqueda exhaustiva de la literatura científica existente, se diseñó e implementó una estrategia de búsqueda sistemática en las bases de datos bibliográficas Scopus, Web of Science y en el motor de búsqueda

Google Scholar. Los términos de búsqueda empleados fueron los siguientes: “biodiesel AND product”, “transesterification” OR “enzymatic catalysis” OR “catalyst” OR “heterogeneous catalyst” OR “homogeneous catalyst”, “energy of biodiesel”, “biodiesel en comunidades”, “biodiesel en Latinoamérica”, tanto en inglés como en español. La combinación de palabras clave fue seleccionada para capturar la producción científica centralizada en los procesos de obtención de biodiesel, con especial énfasis en el método de transesterificación y los distintos tipos de catálisis involucrados, ya sea homogénea, heterogénea o enzimática, al igual que el panorama del biodiesel en América Latina.

Evaluación de la Calidad de las Fuentes

Para garantizar la validez y confiabilidad de la información, se emplearon los siguientes criterios de calidad:

Indexación: prioridad a revistas indexadas en Scopus o Web of Science.

Revisión por pares: se excluyeron documentos sin evidencia de peer review.

Factor de impacto y citación: se privilegió literatura en revistas con impacto reconocido dentro de las áreas de energías renovables y biotecnología.

Rigor metodológico: se evaluó que los estudios incluyeran metodologías reproducibles, análisis estadísticos y discusión crítica.

Actualidad: se dio mayor peso a fuentes publicadas en los últimos cinco años, salvo aquellas referencias clásicas indispensables para contextualizar.

La integración de estas estrategias permitió conformar una base documental sólida, diversa y actualizada, lo que otorga consistencia al análisis presentado en las secciones posteriores.

Resultados y Discusión

La aplicación de la estrategia de búsqueda definida arrojó un volumen significativo de referencias bibliográficas, cuyo resumen cuantitativo se presenta en el Cuadro 1. Como se puede observar, la búsqueda inicial identificó un total consolidado de 2403 referencias, donde Scopus arrojó 237 citas, mientras que Web of Science recuperó 157. Cabe destacar que Google Scholar, debido a su algoritmo de búsqueda más amplio y a la indexación de una gama más extensa de tipos de documentos, proporcionó un número considerablemente mayor, con 2009 resultados.

El volumen total de referencias (n=2403) requirió un punto de partida que necesitó un proceso de refinamiento crítico para identificar los artículos más relevantes y de mayor impacto. Siguiendo esta directriz, se estableció un protocolo de selección en dos fases. En primer lugar, se utilizaron las herramientas de filtrado provistas por Scopus y WoS para ordenar los resultados por el número de citas y por factor de impacto de la revista, priorizando así la calidad y la influencia dentro de la comunidad científica.

En segundo lugar, se realizó una lectura minuciosa de los títulos y resúmenes para descartar publicaciones duplicadas y aquellas que, a pesar de contener las palabras clave, se alejaban del foco central de esta investigación. Este proceso de preselección basado en criterios de citación y relevancia temática permitió depurar la bibliografía inicial, derivando en una selección final de trabajos de alta pertinencia que constituyen la base del análisis presentado en los resultados.

Cuadro 1

Resumen de filtros de citas

Palabras de Búsqueda	(biodiesel product) (transesterification ,enzymatic catalysis) (Bio combustibles avanzados) (Energías renovables)
Number of citations Scopus	237
Number of citations Web of Science	157
Number of citations Google Scholar	232
Total	626

Biodiesel como Alternativa Energética

La búsqueda de alternativas energéticas sostenibles responde a la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles, mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar la seguridad energética frente al agotamiento de reservas convencionales (Edeh, 2020). En este contexto, el biodiésel definido como ésteres alquílicos de ácidos grasos (FAME/FAAE) derivados de triglicéridos, surge como un combustible líquido renovable, biodegradable y, en condiciones de sistema energético apropiado, con balance de carbono favorable frente al diésel fósil (Park et al., 2022).

El biodiésel posee propiedades fisicoquímicas que facilitan su integración en motores diésel de compresión sin requerir modificaciones drásticas, y que además reduce ciertas emisiones locales (partículas, CO, hidrocarburos) aunque plantea retos en NOx y estabilidad a largo plazo (Liu et al., 2022). Este documento sintetiza evidencia técnica, ambiental, económica y de política pública sobre el biodiésel como alternativa energética sostenible, integrando estudios sobre materias primas, procesos de producción, catalizadores, desempeño en motores, evaluación del ciclo de vida (ACV), economías de escala y otros aspectos.

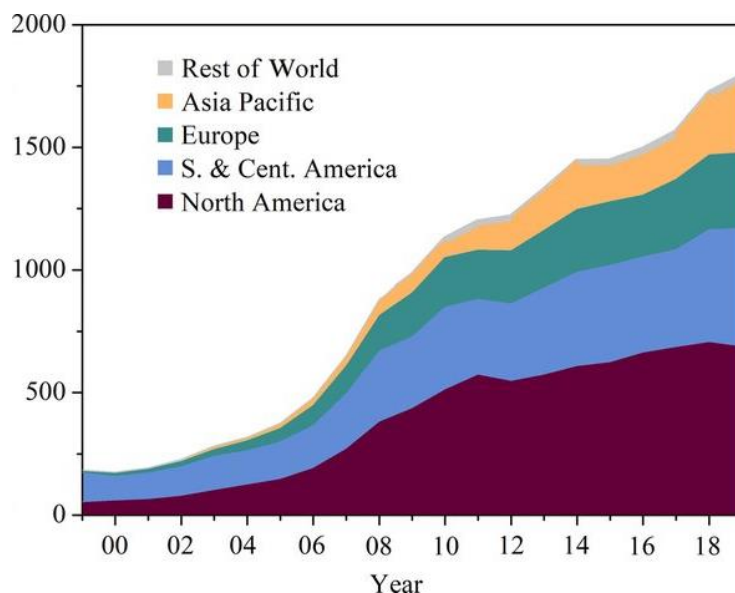
Definición y Propiedades Fundamentales del Biodiésel

El biodiésel se caracteriza por ser una mezcla de ésteres metílicos/etílicos de ácidos grasos (FAME/FAEE) resultante de la transesterificación de triglicéridos con alcoholes de cadena corta, y presenta mayor contenido de oxígeno intrínseco, mayor número de cetano y menor contenido de azufre que el diésel fósil, lo que influye en la combustión y emisiones (Y. Wang y Heydari, 2021). Según

Y. Wang y Heydari (2021), estas propiedades fisicoquímicas condicionan su comportamiento reológico y térmico (viscosidad, densidad, volatilidad) y su compatibilidad con sistemas de inyección y lubricidad en motores diésel, aspectos que han sido caracterizados en estudios experimentales y de modelación (Wikberg et al., 2021). No obstante, la variabilidad composicional ligada al origen de los ácidos grasos (cadena y grado de insaturación) provoca diferencias marcadas en parámetros críticos como estabilidad oxidativa (Kostić et al., 2021), punto de congelación y cetano, lo que obliga a una regulación de calidad EN 14214 u otros estándares (Nascimento et al., 2020). Por lo tanto, comprender las propiedades del biodiésel implica analizar conjuntamente la química de los ésteres, las condiciones de producción y las exigencias de uso en componentes materiales y sistemas vehiculares (Jo et al., 2024). La transición energética global muestra una clara divergencia regional en la adopción de biocombustibles, tal como se evidencia en la evolución de la producción bioeléctrica desde el año 1999 (*Figura 1*). Mientras que Norteamérica y Asia Pacífico experimentaron un crecimiento exponencial y sostenido, convirtiéndose en los líderes absolutos de producción, otras regiones como Europa mostraron una expansión más moderada y temprana que luego se estabilizó. Esta disparidad subraya la profunda influencia de las políticas de incentivo, la disponibilidad de materias primas y las estructuras industriales locales, factores que han moldeado un panorama energético global desigual y fragmentado en cuanto a la capacidad de generación de bioenergía.

Figura 1

Producción mundial de biocombustibles: 1999-2019 (miles de barriles de petróleo equivalente al día)

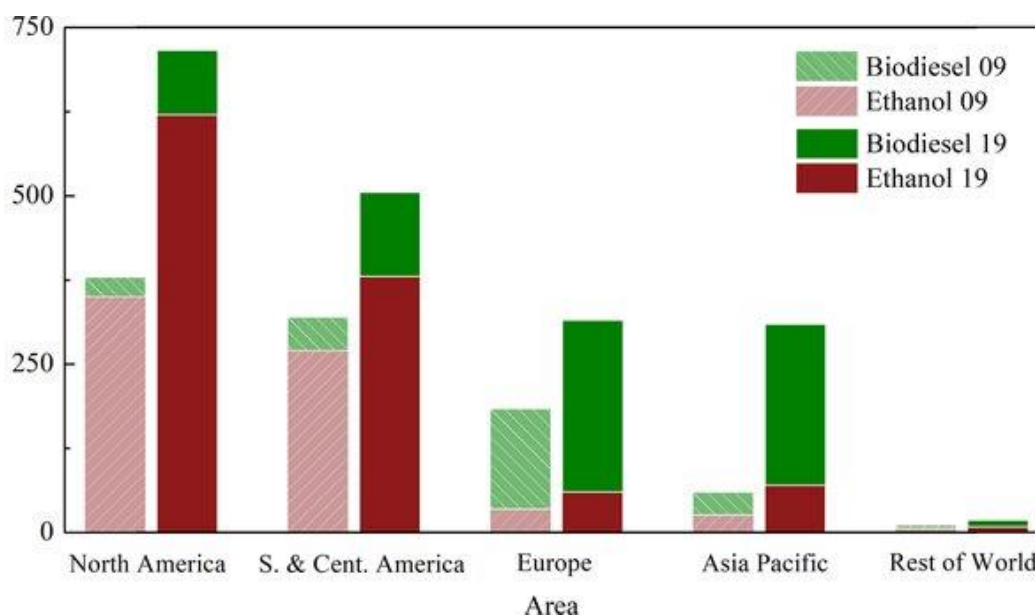


Nota. Tomado de (Chen et al., 2021). Biodiesel from microorganisms: a review. Energy Technology.

Existe una marcada especialización regional y un crecimiento significativo en la producción de biocombustibles entre 2009 y 2019 (Figura 2). Norteamérica se consolidó como el principal productor de etanol, mostrando un aumento sustancial en su capacidad, mientras que la región de Asia Pacífico experimentó un crecimiento explosivo en la producción de biodiésel, llegando a dominar este sector específico. Este desplazamiento evidencia una transición energética heterogénea, donde las estrategias de desarrollo de biocombustibles están fuertemente influenciadas por las políticas agrícolas y energéticas locales, resultando en un mapa global de producción donde cada región ha optado por explotar ventajas comparativas diferentes.

Figura 2

Producción mundial de etanol y biodiésel: 2009 y 2019 (miles de barriles equivalentes de petróleo al día)



Nota. Tomado de Chen et al. (2021). Biodiesel from microorganisms: a review. Energy Technology.

Panorama de Materias Primas: Diversidad y Clasificación por Generaciones.

La producción de biodiésel se ha sustentado históricamente en aceites vegetales comestibles a partir de plantas de soja, colza, palma, girasol, asimismo de grasas animales (primera generación), lo que ha generado tensiones de competencia con la alimentación y uso del suelo (Listyarini et al., 2020). Para superar esas limitaciones, la investigación y la industria han promovido materias primas no comestibles y de desecho como los aceites usados de cocina (WCO), aceites de residuos industriales, cultivos oleaginosos no alimentarios (jatropha, macaúba, crambe), microalgas y biomasa microbiana oleaginosa que constituyen rutas de segunda y tercera generación con potencial para reducir impactos socioambientales y mejorar la economía del proceso (Ashqar et al., 2024).

Revisiones recientes permiten ampliar del portafolio de materias primas donde se incluyen aceites residuales y subproductos agroindustriales, oleaginosas adaptadas a suelos marginales,

microalgas y microorganismos oleaginosos (levaduras, hongos), y fracciones de biomasa en biorefinerías integradas, cada una con ventajas y limitaciones técnicas, económicas y ambientales (Pikula et al., 2020)

Aceites de Desecho y Subproductos como Vía de Sostenibilidad:

El aprovechamiento de aceites de cocina usados (WCO) y otros residuos oleaginosos se considera una de las rutas más viables hacia una producción sostenible de biodiésel (Hamed et al., 2021), estas materias primas reducen los impactos asociados al uso de suelo y no generan tensiones significativas con la seguridad alimentaria. No obstante, su valorización solo es posible cuando existen cadenas logísticas y de tratamiento adecuadas que permitan mantener la calidad del insumo (Raza et al., 2021)

Uno de los principales retos de los WCO es el elevado contenido de ácidos grasos libres y humedad, factores que provocan saponificación y pérdida de rendimiento. Para enfrentar este problema, se han propuesto diversas alternativas: desde pretratamientos específicos hasta el uso de catalizadores heterogéneos o biocatalizadores, además de técnicas de intensificación como ultrasonido o microondas, que aceleran la conversión y mejoran la eficiencia (Ifeanyi-Nze et al., 2023)

Por otra parte, el uso de aceites residuales en contextos locales aporta beneficios sociales y económicos. (S. E. Kim et al., 2024) destacan que, al reducir los costos de materia prima, se generan oportunidades de microproducción y esquemas de economía circular. Estas experiencias han mostrado resultados positivos a nivel comunitario y regional, aunque requieren regulaciones claras en cuanto a normas de calidad, trazabilidad y logística. De lo contrario, pueden surgir problemas de variabilidad en la composición y de estabilidad en el biodiésel producido (Kiss et al., 2023)

Limitaciones y Perspectivas del Sector del Biodiésel

El desarrollo del biodiésel enfrenta una serie de limitaciones estructurales que condicionan su consolidación como alternativa energética sostenible:

Competencia con la Seguridad Alimentaria: el uso de aceites comestibles como soya, palma o girasol genera tensiones entre la producción de alimentos y combustibles, lo que se traduce en incrementos en los precios agrícolas y en presiones sobre los usos del suelo.

Disponibilidad y Logística de Materias Primas: la recolección de aceites usados de cocina sigue siendo insuficiente en gran parte de América Latina y África, donde la informalidad en la gestión de residuos limita el aprovechamiento energético.

Variabilidad en la Calidad del Insumo: la heterogeneidad en los niveles de humedad y ácidos grasos libres de los aceites residuales afecta la eficiencia de conversión y la estabilidad del biodiésel producido.

Costos Tecnológicos y Económicos: aunque existen innovaciones en catálisis heterogénea, enzimática y tecnologías de intensificación, la mayoría sigue siendo de alto costo o en fase piloto, lo que restringe su escalabilidad industrial.

Desafíos Ambientales: cuando el biodiésel proviene de monocultivos intensivos, se asocia a deforestación, pérdida de biodiversidad y presión hídrica, especialmente en países del Sudeste Asiático.

Fragmentación Regulatoria: mientras la Unión Europea y Estados Unidos cuentan con marcos normativos claros (mezclas obligatorias, estándares de calidad y criterios de sostenibilidad), en Latinoamérica predominan políticas desarticuladas y con baja capacidad de implementación.

A pesar de estas limitaciones, el sector presenta perspectivas alentadoras:

Innovación Tecnológica: la optimización de catalizadores sólidos y enzimáticos, junto con la integración de microalgas y microorganismos oleaginosos en esquemas de biorrefinería, ofrece la posibilidad de mejorar la eficiencia y diversificar coproductos.

Economía Circular: la valorización de aceites usados, residuos agroindustriales y subproductos como el glicerol puede transformar pasivos ambientales en activos energéticos y químicos de alto valor agregado.

Modelos Inclusivos: la incorporación de pequeños productores rurales en cadenas de valor, como ocurre en Brasil con el Programa Nacional de Producción y Uso del Biodiésel (PNPB), demuestra que el biodiésel puede ser motor de desarrollo social y territorial.

Políticas de Sostenibilidad: el fortalecimiento de certificaciones internacionales y sistemas de trazabilidad representa una oportunidad para armonizar el comercio global del biodiésel con criterios ambientales y sociales.

Diversificación Energética: en el mediano plazo, el biodiésel puede desempeñar un papel clave en la transición energética, especialmente en sectores de difícil electrificación como el transporte pesado, marítimo y agrícola.

Microalgas y Microorganismos Oleaginosos: Potencial y Retos Técnico-Económicos

La producción de lípidos a partir de microalgas y levaduras oleaginosas constituye otra vía prometedora para la industria del biodiésel. (Chen et al., 2021) la densidad de producción de estos organismos es muy superior a la de los cultivos terrestres, lo que abre la posibilidad de alcanzar escalas industriales competitivas. Este potencial se refuerza con la capacidad de integrar esquemas de biorefinería que generan coproductos como biomateriales, fertilizantes o piensos, ampliando el valor agregado de la cadena (Saetang y Tipnee, 2021).

Diversos estudios han demostrado que estrategias como el co-cultivo de especies, la optimización de medios de cultivo y el estrés nutricional incrementan la productividad lipídica. observaron mejoras sustanciales en los rendimientos, mientras que (Ibrahim et al., 2022) resalta que los coproductos derivados contribuyen a la sostenibilidad económica. En este sentido, el diseño avanzado de biorreactores también representa un factor clave para mejorar la eficiencia del proceso (Caporusso et al., 2021).

A pesar de los avances, la etapa de extracción y conversión de lípidos sigue siendo un desafío. Según (Hajareh Haghghi et al., 2024), los costos energéticos y la eficiencia de conversión dependen de innovaciones en tecnologías de solventes verdes, procesos enzimáticos y catalizadores robustos.

En los que coinciden en que estas mejoras son necesarias para que la opción microalgal sea competitiva frente a los aceites vegetales convencionales y los residuos oleaginosos. Por ello, (Damian et al., 2024) que la investigación debe priorizar la escalabilidad, la reducción de costos y la integración en cadenas de valor diversificadas.

Impacto de la Composición de Ácidos Grasos en la Conversión y Propiedades Finales

La composición de los triglicéridos influye de manera directa en la cinética de transesterificación y en las propiedades del biodiésel obtenido. Según (Kostić et al., 2021) la longitud de la cadena y el grado de insaturación de los ácidos grasos determinan la eficiencia catalítica y el comportamiento en combustión. En este sentido, según (Y. Wang y Heydari, 2021) destacan que la estructura molecular condiciona parámetros como el punto de fluidez, el índice de cetano y la estabilidad a la oxidación.

Los estudios de (Oliveira et al., 2020) muestran que los ácidos grasos saturados y de cadena media favorecen conversiones más altas y biodiésel con buena estabilidad térmica. En contraste, un exceso de poliinsaturados incrementa la susceptibilidad a la oxidación, lo cual obliga a incorporar antioxidantes o recurrir a mezclas complementarias para garantizar la vida útil del combustible. Así, la selección de materias primas se convierte en una decisión estratégica que condiciona la calidad del biodiésel.

Además, la presencia de altos contenidos de FFA obliga a realizar etapas previas de esterificación o a seleccionar catalizadores adecuados. (Nisar et al., 2021) coinciden en que estas consideraciones son fundamentales para cumplir los estándares técnicos y garantizar la estabilidad durante el almacenamiento. En conclusión, la relación entre tipo de materia prima, ruta de procesamiento y propiedades finales constituye una cadena causal clave para la viabilidad técnica y comercial del biodiésel (Niekurzak, 2021).

Procesos de Síntesis: Rutas, Intensificación y Optimización

La transesterificación con metanol o etanol sigue siendo la ruta dominante en la industria, debido a su buen balance entre eficiencia y costos. Según Listyarini et al. (2020), esta reacción constituye el núcleo de la producción convencional de biodiésel, aunque suele complementarse con procesos de esterificación en aceites con alto FFA. (Jamil et al., 2023) señalan que también se utilizan alternativas como la pirólisis para fracciones no convertibles y catalizadores avanzados para mejorar la selectividad.

La intensificación de procesos ha sido una línea de investigación prioritaria. (Balamurugan et al., 2023) muestran que la asistencia por ultrasonido, microondas y el empleo de catalizadores sólidos o bifuncionales incrementan la velocidad de reacción, reducen el consumo energético y elevan los rendimientos. Estas innovaciones, al aplicarse en estudios piloto, han demostrado ser herramientas clave para la reducción de la huella ambiental.

Por último, la optimización de las condiciones de reacción mediante diseño experimental (RSM, CCD) ha permitido establecer parámetros operativos robustos. (Majedi y Safaei, 2023) destacan que la integración de estadística avanzada en la modelización de procesos asegura la escalabilidad industrial. En consecuencia, la viabilidad del biodiésel depende del acoplamiento eficiente entre selección de catalizador, pretratamiento de materias primas y aplicación de tecnologías de intensificación (Devasan et al., 2023).

Catalizadores

Los catalizadores homogéneos (Cuadro 2), como NaOH, KOH o H₂SO₄, han sido los más empleados por su bajo costo y alta eficiencia. No obstante, según (Che Hamzah et al., 2020) presentan limitaciones importantes en la separación de fases y en la generación de efluentes. coinciden en que estos inconvenientes incrementan los costos de postratamiento y reducen la sostenibilidad del proceso. Como alternativa, los catalizadores heterogéneos (Cuadro 3) han mostrado ventajas en términos de recuperación y reutilización. (Ghanimi et al., 2024) señalan que, cuando son diseñados

adecuadamente, ofrecen buena compatibilidad con aceites de menor calidad. Sin embargo, su desempeño puede verse limitado en presencia de agua o altos contenidos de FFA (Mei et al., 2022)

La catálisis enzimática representa otra línea con gran potencial. (Wolny y Chrobok, 2021) destacan que las lipasas son tolerantes a FFA y operan en condiciones suaves, lo cual minimiza la formación de subproductos. Aun así, los altos costos y la pérdida de estabilidad siguen siendo retos importantes, aunque recientes estudios en inmovilización magnética y soportes innovadores han mejorado la reusabilidad de las enzimas (Gumbyté et al., 2023). En conjunto, la elección del catalizador depende del tipo de materia prima, de la escala de producción y de los objetivos ambientales perseguidos.

Cuadro 2

Diversos catalizadores ácidos homogéneos utilizados en la producción de biodiésel a partir de diferentes materias primas.

Materia prima	Proceso	Catalizador (% peso)	Alcohol utilizado	Temperatura de reacción (°C)	Relación molar alcohol a materia prima	Tiempo de reacción (h)	Rendimiento de biodiésel
Grasa de pollo	Transesterificación	H ₂ SO ₄ concentrado (25-100)	Metanol	30-60	30:1	24	99
Grasa de cordero	Transesterificación	H ₂ SO ₄ concentrado (25-100)	Metanol	30-60	30:1	24	93
Grasa	Transesterificación	H ₂ SO ₄ (5-9)	Metanol	35-65	6:1-18:1	48	89
Soja	Transesterificación	H ₂ SO ₄	Metanol	65	9:1	8	99
Tabaco	Esterificación	H ₂ SO ₄	Metanol	60	18:1	0.4	91

Nota. Adaptado de (Jamil et al., 2023)State-of-the-art catalysts for clean fuel (methyl esters) production—a comprehensive review. Journal of Physics: Energy.

Cuadro 3

Diversos catalizadores ácidos y básicos heterogéneos utilizados en la transesterificación de grasas animales residuales para producir biodiésel.

Grasa animal residual	Técnica de producción	Catalizador/co-solvente (% peso/peso de grasa animal residual)	Tipo de alcohol utilizado	Relación molar (alcohol: grasa animal residual)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Conversión/rendimiento de biodiésel (%)
Manteca	Con catalizador básico heterogéneo	Hidróxido de potasio (KOH)	Metanol	4:1	65	6	90
Grasa de ave	Con catalizador básico heterogéneo	Hidrotalcita Mg-Al (10)	Metanol	1:30	120	8	93.00
Grasa de bagre tra	Con catalizador básico heterogéneo	KOH/ γ -Al ₂ O ₃ (5-8)	Metanol	10:1-14:1	60	1.5	92.6
Sebo de res	Con catalizador básico heterogéneo	KF/CaO-Fe ₂ O ₃	Metanol	3:1-12:1	40-65	1	94
Manteca de cerdo	Con catalizador básico heterogéneo	CaMnO ₃ y CaO (0.6-4)	Metanol	6:1-24:1	60-70	4	92.4
Manteca de cerdo	Con catalizador básico heterogéneo	CaMnO ₃ (3)	Metanol	18:1	50	8	92.5
Grasa de cordero	Con catalizador básico heterogéneo	MgO-KOH-X; X = 5-20 ^a (1.5-4)	Metanol	11:1-22:1	45-65	0.33	98
Grasa parda	Con catalizador ácido heterogéneo	Triflato de difenilamonio de sílice mesoporosa (15) ^b	Metanol	15:1	95	2	98

Nota. Adaptado de Jamil et al. (2023) State-of-the-art catalysts for clean fuel (methyl esters) production—a comprehensive review. Journal of Physics: Energy.

Innovaciones en Catálisis y Materiales

Los desarrollos más recientes han explorado materiales avanzados para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de transesterificación. Según (Heck y Carrara, 2023) los nanomateriales magnéticos, los complejos metalo-orgánicos y los materiales carbono-nitrógeno (g-C₃N₄) han mostrado gran estabilidad y actividad catalítica, además de facilitar la recuperación post-reacción.

Por su parte, (Zambare et al., 2021) señalan que los líquidos iónicos, ya sean convencionales o protónicos, se han evaluado como fases catalíticas o matrices para soportes enzimáticos. Estos compuestos permiten reducir la generación de aguas residuales, aunque requieren estudios adicionales de ciclo de vida y economía circular para evaluar su viabilidad a gran escala.

En investigación aplicada, (Adhikesavan et al., 2021) destacan que la incorporación de nano-óxidos magnéticos para la inmovilización de lipasas facilita la separación magnética y prolonga la vida útil de los biocatalizadores. Este enfoque ofrece un alto potencial para reducir impactos ambientales y costos operativos, siempre que se valide en condiciones industriales y con materias primas reales.

Pretratamientos y Manejo de Materias Primas de Baja Calidad

Los aceites con alto contenido de ácidos grasos libres requieren estrategias específicas para evitar problemas de saponificación. De acuerdo con (Bhikuning, 2021) la esterificación ácida previa es una de las rutas más efectivas, mientras que (Taufiq Fathaddin et al., 2023) proponen el uso de catalizadores tolerantes a FFA como alternativa.

El aprovechamiento de residuos también ha dado lugar al desarrollo de catalizadores a partir de materiales biogénicos. (Sidjabat, 2022) muestran la eficacia de cenizas calcáreas o residuos industriales (como cáscaras de huevo) en condiciones de laboratorio, lo cual permite reducir costos y promover un modelo de economía circular.

Además, el control de la humedad y la eliminación de contaminantes sólidos son pasos críticos para mantener la eficiencia catalítica. (I. Ahmad et al., 2021) resaltan que estas medidas son

indispensables al trabajar con WCO y subproductos agroindustriales, donde la variabilidad en la calidad es alta. Por tanto, la trazabilidad y la caracterización previa de la materia prima deben integrarse en el diseño de planta como parte de la estrategia tecnológica.

Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) y Asignación de Emisiones

Las evaluaciones de ciclo de vida (ACV) evidencian que el biodiésel puede reducir significativamente el consumo de energía fósil y las emisiones netas de CO₂ frente al diésel convencional. (“Analysis and Performance Optimization of Variable Compression Ratio Diesel Engine Using Canola Oil Based Biodiesel,” 2020) coinciden en que estos beneficios dependen de manera crítica del tipo de materia prima, de las prácticas agrícolas y de la eficiencia de conversión.

No obstante, cuando el cultivo de oleaginosas está asociado a deforestación o a cambios en el uso del suelo, los beneficios pueden reducirse o incluso invertirse. (*Proceeding Book of 2nd International Conference on Frontiers in Academic Research ICFAR 2023, 2023*) advierten que este efecto es evidente en producciones intensivas de palma, lo que subraya la necesidad de criterios de sostenibilidad claros.

Por otra parte, estudios de caso con cardoon y otras especies adaptadas a tierras marginales han mostrado impactos ambientales reducidos y posibilidades de poligeneración energética. (Alcántara-Carmona et al., 2017) destacan que estos modelos productivos integrados mejoran la sostenibilidad del ciclo de vida. En definitiva, las conclusiones del ACV deben analizarse en marcos regionales y de cadena de valor, donde la logística y las tecnologías aplicadas determinan el verdadero beneficio climático (Basu, 2021)

El análisis del ciclo de vida de los biocombustibles revela que la metodología de asignación aplicada —ya sea por masa, financiera o contenido energético— tiene un impacto marginal en la distribución porcentual de las emisiones de GEI, pero no altera significativamente la identificación de las etapas más críticas. En todos los escenarios, la fase de cultivo de la materia prima se consolida como la mayor contribuyente, representando consistentemente más del 54% de las emisiones totales

asignadas, seguida por la etapa de transesterificación, que aporta aproximadamente un tercio de las emisiones. Esta consistencia subraya que, independientemente del criterio de reparto utilizado, los esfuerzos de mitigación deben priorizar la optimización de las prácticas agrícolas y los procesos de conversión industrial para lograr una reducción sustancial de la huella de carbono de los biocombustibles.

Cuadro 4

Emisiones GEI en el ciclo de vida del biocombustible basado en participación de masa.

Etapa	Emisión sin Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Factor de Asignación	Emisión después de Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Participación de Emisiones GEI
Etapa de extracción o cultivo de materia prima				
Cultivo	48.35	58.60%	28.33	54.57%
Almacenamiento	0.72	58.60%	0.42	0.81%
Etapa de procesos tecnológicos				
Extracción de aceite	6.5	58.60%	3.81	7.34%
Refinado	1.06	95.70%	1.01	1.95%
Transesterificación	17.51	96.50%	16.90	32.54%
Etapa de transporte y distribución				
Transporte de semilla oleaginosa	0.3	58.60%	0.18	0.34%
Transporte de aceite de semilla oleaginosa	0	95.70%	0.00	0.00%
Transporte de biodiésel al almacén	0.47	100.00%	0.47	0.91%
Transporte a estaciones de gasolina	0.8	100.00%	0.80	1.54%
Suma	75.71		51.92	100.00%

Nota. Tomado de Niekurzak (2021) Determining the unit values of the allocation of greenhouse gas emissions for the production of biofuels in the life cycle.

Cuadro 5

Emisiones GEI en el ciclo de vida del biocombustible basado en asignación financiera.

Etapa	Emisión sin Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Factor de Asignación	Emisión después de Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Participación de Emisiones GEI
Etapa de extracción o cultivo de materia prima				
Cultivo	48.35	58.60%	28.33	54.20%
Almacenamiento	0.72	58.60%	0.42	0.81%
Etapa de procesos tecnológicos				
Extracción de aceite	6.50	58.60%	3.81	7.29%
Refinado	1.06	95.70%	1.01	1.94%
Transesterificación	17.51	98.50%	17.25	33.00%
Etapa de transporte y distribución				
Transporte de semilla oleaginosa	0.30	58.60%	0.18	0.34%
Transporte de aceite de semilla oleaginosa	0.00	95.70%	0.00	0.00%
Transporte de biodiésel al almacén	0.47	100.00%	0.47	0.90%
Transporte a estaciones de gasolina	0.80	100.00%	0.80	1.53%
Suma	75.71		52.27	100.00%

Nota. Tomado de (Niekurzak, 2021) Determining the unit values of the allocation of greenhouse gas emissions for the production of biofuels in the life cycle.

Cuadro 6

Emisiones GEI en el ciclo de vida de un biocombustible basado en el contenido energético.

Etapa	Emisión sin Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Factor de Asignación	Emisión después de Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Participación de Emisiones GEI
Etapa de extracción o cultivo de materia prima				
Cultivo	48.35	58.60%	28.33	54.29%
Almacenamiento	0.72	58.60%	0.42	0.81%
Etapa de procesos tecnológicos				
Extracción de aceite	6.5	58.60%	3.81	7.30%
Refinado	1.06	95.70%	1.01	1.94%
Transesterificación	17.51	98%	17.16	32.88%
Etapa de transporte y distribución				
Transporte de semilla oleaginosa	0.3	58.60%	0.18	0.34%
Transporte de aceite de semilla oleaginosa	0	95.70%	0.00	0.00%
Transporte de biodiésel al almacén	0.47	100.00%	0.47	0.90%

Etapa	Emisión sin Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Factor de Asignación	Emisión después de Considerar la Asignación (g CO ₂ eq/MJ)	Participación de Emisiones GEI
Transporte a estaciones de gasolina	0.8	100.00%	0.80	1.53%
Suma	75.71		52.18	100.00%

Nota. Tomado de Niekurzak (2021) Determining the unit values of the allocation of greenhouse gas emissions for the production of biofuels in the life cycle.

Comportamiento de Emisiones en la Fase de Uso

Diversos ensayos experimentales y revisiones sistemáticas coinciden en que el empleo de biodiésel y sus mezclas con diésel fósil reduce emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y material particulado (PM), debido a su mayor contenido de oxígeno y a su mejor lubricidad. Sin embargo, se ha reportado un incremento en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), lo que obliga a implementar estrategias de calibración del motor o el uso de aditivos para mitigar este efecto (Eswaran et al., 2021).

Por otra parte, estudios de mezcla y aditivación con alcoholes superiores, como butanol y pentanol, evidencian que estas formulaciones pueden compensar el aumento de NOx y mejorar simultáneamente el rendimiento energético y la evaporación del combustible. En consecuencia, las combinaciones biodiésel–alcohol representan una alternativa viable para optimizar combustibles en aplicaciones vehiculares y estacionarias (H. Y. Kim y Choi, 2020).

La complejidad de las emisiones a nivel de motor se relaciona con factores como la presión de inyección, la relación aire–combustible y la estrategia de control electrónico. Liu et al. (2022) señalan que, para cada materia prima y mezcla, se requieren ensayos específicos y simulaciones detalladas. Asimismo, se debe considerar la adecuación a normativas locales de emisiones y calibraciones específicas de la unidad de control electrónico (ECU) (Queiroz et al., 2021)

En definitiva, la integración del biodiésel en flotas vehiculares exige no solo garantizar suministro energético, sino también diseñar ajustes técnicos y marcos regulatorios que permitan

maximizar los beneficios en la reducción de partículas y CO, mientras se minimizan los incrementos en NOx (Pramanik et al., 2023)

Rendimiento de Motores y Consumo Energético

La literatura técnica documenta que la potencia y el torque en motores que utilizan biodiésel puro o mezclas bajas (B5–B20) suelen mantenerse similares a los del diésel fósil. No obstante, debido a la mayor densidad y al menor poder calorífico inferior del biodiésel, se observa un ligero incremento en el consumo volumétrico para entregar la misma energía útil (Rahul S et al., 2021)

Ensayos realizados en configuraciones con variaciones de relación de compresión y ajustes de inyección han demostrado que es posible recuperar la eficiencia térmica y reducir el consumo adicional asociado a mezclas con biodiésel. Esto confirma que la adaptación de parámetros mecánicos y electrónicos del motor es clave para una integración vehicular más eficiente (Nomanbhay et al., 2020)

De acuerdo con estudios de simulación y análisis experimentales, mezclas con un 20% de biodiésel (B20) suelen representar un punto de equilibrio entre beneficios ambientales y mínimos impactos en consumo y mantenimiento. Sin embargo, la decisión óptima depende del contexto tecnológico y económico, por lo que se recomienda una evaluación integral en cada caso (Moreira et al., 2020) En conclusión, la adopción masiva del biodiésel debe basarse en una combinación de estrategias de mezcla, calibración de motores y capacitación operativa, lo que contribuirá a maximizar la eficiencia y prolongar la vida útil del parque vehicular (Tao et al., 2023).

Efectos de Mezcla y Aditivos sobre Estabilidad y Emisiones

El uso de mezclas biodiésel-diésel en diferentes proporciones ha sido ampliamente investigado como estrategia para equilibrar costos, emisiones y desempeño. Según (Silveira et al., 2022) mezclas bajas como B5 y B10 muestran una compatibilidad elevada con los motores existentes, lo que facilita su adopción sin modificaciones sustanciales en la infraestructura. No obstante, a medida

que la proporción de biodiésel aumenta, surgen retos asociados a la viscosidad, la volatilidad y el comportamiento de la combustión (Thangavelu et al., 2021)

Además, la incorporación de aditivos, en especial alcoholes de cadena corta y media (etanol, butanol, pentanol), ha demostrado mejorar la atomización del combustible, la evaporación en la cámara de combustión y la reducción de emisiones de NOx. Estos compuestos funcionan como mejoradores de la miscibilidad y contribuyen a estabilizar las propiedades físico-químicas del biodiésel en climas fríos (L. Wang et al., 2024). En este sentido, los alcoholes superiores presentan ventajas frente al etanol debido a su mayor energía específica y menor tendencia a la separación de fases.

Desafíos de Estabilidad Oxidativa y Almacenamiento

La estabilidad oxidativa del biodiésel es un factor crítico que condiciona su almacenamiento, transporte y vida útil. De acuerdo con (Zhang et al., 2022) los ésteres metílicos de ácidos grasos insaturados son particularmente susceptibles a la oxidación, lo que genera peróxidos, ácidos orgánicos y polímeros insolubles. Este proceso no solo afecta la calidad del combustible, sino que también puede ocasionar depósitos en los inyectores y corrosión en los sistemas de combustión.

En la práctica, la degradación del biodiésel está influenciada por múltiples variables como el tipo de materia prima, el contenido de antioxidantes naturales, la exposición a la luz, la temperatura y la presencia de trazas metálicas que catalizan la oxidación (Bueso et al., 2015). A medida que el biodiésel se oxida, su número de cetano disminuye y la viscosidad aumenta, lo cual altera negativamente el desempeño del motor y la eficiencia energética. Según (E. Castro et al., 2023) incluso pequeñas variaciones en el nivel de peróxidos pueden traducirse en pérdidas significativas de estabilidad durante el almacenamiento prolongado.

Con el fin de contrarrestar estos efectos, se han propuesto estrategias como la adición de antioxidantes sintéticos (BHT, TBHQ) o el aprovechamiento de compuestos fenólicos de origen natural, obtenidos a partir de residuos agroindustriales (M. de Castro y Da Mota, 2023). Estos aditivos retrasan el inicio de la peroxidación y extienden la vida útil del combustible. Asimismo, investigaciones

recientes sugieren que el uso combinado de antioxidantes con nanoaditivos metálicos puede generar efectos sinérgicos que fortalecen la estabilidad oxidativa (Veza et al., 2021).

Evaluaciones Económicas y Viabilidad de Pequeña a Gran Escala

La factibilidad económica del biodiésel depende en gran medida del costo de la materia prima —que puede representar hasta tres cuartas partes del costo total—, así como de políticas de apoyo (subsidios, exenciones fiscales y mandatos de mezcla). Según (Torrentes Espinoza, 2021). estas condiciones explican las diferencias en viabilidad entre países y regiones, ya que determinan los márgenes de rentabilidad de cada planta. Asimismo, las economías de escala en conversión y logística desempeñan un papel clave para alcanzar competitividad (Sandoval-Contreras et al., 2023).

Estimaciones de factibilidad sugieren que la exención de impuestos o los incentivos a la creación de valor local pueden mejorar la competitividad de plantas de pequeña escala. De acuerdo con (Silva Lima et al., 2024). Estos mecanismos permiten fomentar la inclusión de productores familiares, aunque su sostenibilidad requiere una evaluación integral de impactos sociales y de mercado. En este sentido, (Tanaka et al., 2023) subrayan que los esquemas de apoyo deben considerar riesgos de dependencia excesiva en subsidios para garantizar estabilidad en el largo plazo.

Simulaciones económicas y estudios de caso también indican que la competitividad se alcanza más fácilmente cuando se combinan materias primas residuales, tecnologías de conversión eficientes y mercados locales estables. (Zanini et al., 2022) sostienen que la internalización de externalidades ambientales mediante incentivos regulatorios favorece la sostenibilidad financiera del biodiésel. Así, políticas coherentes, diseñadas con criterios técnicos y sociales, son condición necesaria para su viabilidad económica en diferentes contextos territoriales (Zulqarnain et al., 2020).

Políticas Públicas, Mandatos y Experiencias Nacionales

El avance del biodiésel a nivel global ha estado fuertemente condicionado por la existencia de políticas públicas de apoyo. Según (Barros Lovate Temporim et al., 2022) los mandatos de mezcla obligatoria han sido decisivos para generar demanda estable y dar seguridad a los inversionistas. Estas

políticas no solo han permitido la instalación de plantas de gran escala, sino que también han incentivado la formalización de cadenas de suministro. De hecho, experiencias en países como Brasil e Indonesia muestran que los mandatos actúan como motores de expansión en contextos donde la competitividad de mercado aún es limitada (Panhwar et al., 2020).

La efectividad de los mandatos depende, sin embargo, de factores técnicos y sociales que varían según cada país. Por ejemplo, en Brasil, el programa de biodiésel no solo buscó reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino también promover inclusión social mediante la compra obligatoria de aceites de pequeños productores rurales. Este enfoque socioeconómico ha sido señalado como un modelo de política pública que combina objetivos energéticos con desarrollo local. A su vez, estudios recientes destacan que el impacto real de estas medidas requiere un marco regulatorio robusto, capaz de evitar distorsiones en precios agrícolas y garantizar el suministro de materia prima .

En otros contextos, como Estados Unidos y la Unión Europea, las políticas han priorizado instrumentos financieros como subsidios, créditos fiscales y estándares de sostenibilidad. Estos incentivos han estimulado la diversificación de materias primas, en especial el uso de aceites residuales, reduciendo la presión sobre cultivos alimentarios. Además, la experiencia europea muestra que los criterios de sostenibilidad enmarcados en directivas comunitarias han sido claves para posicionar al biodiésel como alternativa de bajas emisiones dentro de los objetivos climáticos.

El caso de Indonesia, por su parte, evidencia la importancia de la coherencia entre política energética y seguridad alimentaria. Allí, el mandato de mezcla B30 ha impulsado una gran expansión de la palma aceitera, con beneficios económicos inmediatos, pero también con riesgos ambientales significativos debido a la deforestación y a la presión sobre ecosistemas sensibles. Esto demuestra que los mandatos de mezcla, aunque efectivos para generar demanda, deben acompañarse de regulaciones estrictas de sostenibilidad y trazabilidad para evitar impactos negativos a largo plazo

Implicaciones Socioeconómicas para Productores Familiares

Según (Heck y Carrara, 2023), los programas nacionales que integran a productores familiares en la cadena de valor del biodiésel han demostrado efectos positivos en la generación de ingresos y en el desarrollo regional. No obstante, estos esquemas también han evidenciado limitaciones relacionadas con la escala de producción y la dependencia de subsidios, lo que plantea retos para la sostenibilidad a largo plazo. La literatura brasileña, particularmente sobre el Programa Nacional de Producción y Uso del Biodiésel (PNPB), ofrece lecciones valiosas sobre inclusión social y los límites operativos de estas iniciativas.

Estudios de caso indican que la formalización de cadenas cortas de valor y la implementación de certificaciones de sostenibilidad facilitan el acceso a mercados y mejoran la distribución de beneficios entre pequeños agricultores. Sin embargo, este enfoque requiere un acompañamiento técnico y financiero que garantice el cumplimiento de estándares de calidad y de escala, asegurando así la competitividad y viabilidad de los productores

En consecuencia, la promoción del biodiésel con un enfoque inclusivo exige políticas integradas que combinen incentivos económicos, asistencia técnica y mecanismos de comercialización justa, permitiendo que los pequeños productores participen efectivamente en la cadena de valor sin comprometer la eficiencia ni la sostenibilidad del sistema

Riesgos Ambientales y Directrices de Sostenibilidad

Más allá de la reducción potencial de gases de efecto invernadero (GEI), la expansión de cultivos oleaginosos puede inducir impactos ambientales negativos, tales como deforestación, pérdida de biodiversidad y presión sobre recursos hídricos, especialmente si no se implementan salvaguardas adecuadas. En este sentido, la adopción de criterios robustos de sostenibilidad incluyendo certificaciones, límites de expansión en áreas naturales y prácticas agrícolas sostenibles es fundamental para garantizar beneficios netos y minimizar efectos adversos

Evaluaciones de ciclo de vida (ACV) y estudios de impacto han demostrado que la utilización de tierras marginales, cultivos rotacionales y prácticas agrícolas de baja intensidad puede reducir significativamente los impactos ambientales y, al mismo tiempo, maximizar los beneficios climáticos, favoreciendo modelos de biodiésel de segunda generación y biorrefinerías

Por lo tanto, el diseño de políticas e incentivos debe incorporar restricciones ambientales y mecanismos de monitoreo efectivos para prevenir externalidades negativas, requiriendo además una gobernanza multinivel y transparencia en las cadenas de suministro del biodiésel

Seguridad Alimentaria y Competencia por la Tierra

La denominada cuestión “food vs fuel” ha sido ampliamente documentada y analizada, evidenciando que la priorización de aceites comestibles para la producción de biodiésel puede incrementar los precios de los alimentos y generar presión sobre los usos del suelo. En este contexto, la transición hacia materias primas no alimentarias y el aprovechamiento de residuos emerge como una estrategia crítica para minimizar impactos sobre la seguridad alimentaria, especialmente en poblaciones vulnerables.

Estudios económicos han explorado la interconexión entre precios de alimentos y combustibles, recomendando la implementación de mecanismos de salvaguarda, tales como áreas protegidas, límites a la conversión agrícola y la promoción de materias primas no alimentarias, para evitar efectos negativos sobre la población.

La evidencia disponible sugiere que las políticas de biodiésel sostenible deben articularse con políticas agrícolas y de seguridad alimentaria, con el fin de garantizar co-beneficios ambientales y sociales, asegurando al mismo tiempo la estabilidad de los sistemas alimentarios locales.

Normas Técnicas, Calidad y Certificación

Asegurar la calidad del biodiésel requiere el cumplimiento de estándares internacionales (Cuadro 7), como la norma EN 14214, así como de regulaciones nacionales que establecen propiedades clave del combustible, tales como viscosidad, índice de cetano, contenido de agua y

acidez. El respeto a estos parámetros garantiza la compatibilidad con motores diésel y contribuye a la reducción de fallas mecánicas y emisiones no deseadas.

Asimismo, la certificación y la trazabilidad del origen de la materia prima se presentan como herramientas fundamentales para verificar criterios de sostenibilidad, prevenir la deforestación y asegurar condiciones laborales adecuadas a lo largo de la cadena de suministro, facilitando el acceso a mercados que exigen garantías ambientales.

En consecuencia, la estandarización técnica y la gobernanza transparente constituyen elementos críticos para consolidar mercados de biodiésel confiables y sostenibles, asegurando tanto la calidad del combustible como la sostenibilidad de su cadena de producción.

Cuadro 7

Comparación de Parámetros de Calidad del Biodiésel con Estándares Internacionales (ASTM D6751 y EN 14214)

Propiedad	Unidad	Norma ASTM D6751 (B100)	Norma EN 14214
Contenido de éster	% (m/m)	No especificado	Min. 96,5 ⁴⁰
Glicerina libre	% (m/m)	Máx. 0,020 ⁴²	Máx. 0,020
Glicerina total	% (m/m)	Máx. 0,240 ⁴²	Máx. 0,250
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	1,9-6,0 ³⁸	3,5-5,0 ³⁷
Punto de inflamación	°C	Mín. 93 ³⁸	Mín. 120
Contenido de azufre	% (m/m)	Máx. 0,0015 (15 ppm) ³⁸	Máx. 0,001 (10 ppm)
Cenizas sulfatadas	% (m/m)	Máx. 0,020 ³⁸	Máx. 0,020
Agua y sedimentos	% vol.	Máx. 0,050 ³⁸	Máx. 0,050
Número de cetano	Mínimo	Mín. 45 ³⁸	Mín. 51

Nota. Adaptado de (Baccaro D., 2007)

Evaluación de Emisiones no-CO₂ y Salud Pública

El uso de biodiésel se ha asociado con reducciones en emisiones de material particulado (PM) y compuestos orgánicos volátiles (COV), lo que puede generar efectos positivos sobre la calidad del aire local y la salud pública. No obstante, es frecuente observar incrementos en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales requieren atención tecnológica y regulatoria para prevenir

impactos adversos sobre la salud, especialmente relacionados con la formación de ozono troposférico secundario y nitratos.

Diversas intervenciones técnicas, como la recirculación de gases de escape, la calibración precisa de inyección y el uso de aditivos específicos, así como políticas adecuadas, pueden reducir los incrementos de NO_x y potenciar los beneficios en PM y CO, resultandos esenciales para evaluaciones costo-beneficio que consideren externalidades sanitarias. Por consiguiente, la evaluación integral del biodiésel debe incorporar métricas de salud pública y no limitarse exclusivamente a indicadores de CO₂ equivalentes, garantizando una aproximación más completa al impacto ambiental y sanitario del combustible.

Investigaciones sobre Biodiésel en Zamorano y su Proyección Futura

La Universidad Zamorano ha consolidado, en la última década, una línea de investigación orientada a la producción de biodiésel y al aprovechamiento de materias primas de la región, combinando enfoques fisicoquímicos, biotecnológicos y de sostenibilidad. Estas investigaciones no solo abordan el rendimiento y calidad del biocombustible, sino también su viabilidad ambiental y tecnológica para Centroamérica.

Uno de los aportes más relevantes ha sido el estudio “Efecto del tiempo de freído del aceite de palma (*Elaeis guineensis*) sobre las características físico-químicas del biodiésel” lo que permitió comprender cómo la degradación térmica de los aceites usados incide en parámetros críticos como el índice de acidez, contenido de peróxidos y eficiencia de conversión a ésteres metílicos. Este hallazgo es clave para el uso de aceites residuales como materia prima en la región.

El enfoque de caracterización se amplía con trabajos como “Evaluación de calidad de biodiésel elaborado con palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol” y “Evaluación de rendimiento de biodiésel elaborado a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol anhidro de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)” en los que se analizaron variables de proceso y la conformidad del producto final con estándares internacionales (ASTM D6751). Estas investigaciones aportan una alternativa más

sostenible al sustituir el metanol de origen fósil por etanol derivado de biomasa local, mejorando así el perfil ambiental del biocombustible.

Paralelamente, Zamorano ha incursionado en el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, como se evidencia en “Evaluación del potencial del efluente de palma (POME) como medio de cultivo de la microalga de alto valor lipídico, *Chlorella vulgaris*, en su aplicación como fuente de biodiésel”. Este trabajo plantea una estrategia de economía circular que integra tratamiento de efluentes, recuperación de nutrientes y generación de lípidos para biocombustibles, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental de la industria palmera.

Asimismo, estudios como “Lipase-catalyzed biodiesel production and quality with *Jatropha curcas* oil: exploring its potential for Central America” representa un avance significativo en la exploración de rutas enzimáticas de transesterificación, menos agresivas y potencialmente más eficientes, que podrían reducir el consumo energético y mejorar la selectividad del proceso.

Perspectivas y Factibilidad de Continuidad

La integración de estas investigaciones sugiere que Zamorano posee una base sólida para continuar el desarrollo de biocombustibles de segunda generación en la región. La disponibilidad de aceite de palma, etanol de caña y subproductos agroindustriales constituye una ventaja competitiva para consolidar un modelo de producción local y sostenible. Asimismo, la exploración de microalgas y el uso de biocatálisis enzimática abren nuevas oportunidades de investigación aplicada y escalamiento industrial.

La factibilidad de continuar con esta línea es alta, dado que Zamorano dispone de infraestructura de planta piloto de biodiésel, laboratorios para caracterización fisicoquímica y capacidad para investigación en cultivo de microalgas. A futuro, resulta recomendable integrar análisis de ciclo de vida (LCA), estudios de costo-beneficio y modelos de optimización de procesos, así como fortalecer la colaboración con la agroindustria palmera y el sector energético. Esto permitiría posicionar a Zamorano como un centro de referencia en innovación de biocombustibles,

contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular los ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y ODS 12 (producción y consumo responsables).

Conclusiones

La revisión de literatura confirma que los aceites usados de cocina y otros residuos oleaginosos son una materia prima con gran valor para la producción de biodiésel, convirtiendo un problema ambiental en una fuente de energía, lo que mitiga los efectos sobre la seguridad alimentaria y fortalece los principios de la economía circular.

Desde el punto de vista técnico y socioeconómico, el biodiésel presenta beneficios ambientales importantes, como la reducción de emisiones contaminantes y la reutilización de residuos. No obstante, para que su implementación sea exitosa a gran escala, se debe de contar con tecnologías más eficientes y también con políticas públicas coherentes acompañadas de incentivos económicos para lograr asegurar su sostenibilidad a largo plazo y una verdadera integración en la matriz energética

Recomendaciones

Impulsar marcos regulatorios integrados que fomenten la recolección sistemática de aceites usados y la certificación de sostenibilidad, con el fin de fortalecer la economía circular y garantizar la viabilidad a gran escala del biodiésel.

Promover la investigación aplicada en catalizadores heterogéneos y procesos de intensificación, junto con programas de inclusión de pequeños productores rurales, como estrategia para aumentar la competitividad, generar empleo local y consolidar cadenas de valor más resilientes.

Referencias

- Acharya, R. N. y Perez-Pena, R. (2020). Role of Comparative Advantage in Biofuel Policy Adoption in Latin America. *Sustainability*, 12(4), 1411. <https://doi.org/10.3390/su12041411>
- Adhikesavan, C., Balamurugan, C. y Ganesh, D. (2021). Application of Genetic Algorithm for Increasing the Utilization of Poor-quality Biodiesel through Blending. *Journal of Oleo Science*, 70(8), 1039–1050. <https://doi.org/10.5650/jos.ess20296>
- Ahmad, I., Sana, A., Kano, M., Cheema, I. I., Menezes, B. C., Shahzad, J., Ullah, Z., Khan, M. y Habib, A. (2021). Machine Learning Applications in Biofuels' Life Cycle: Soil, Feedstock, Production, Consumption, and Emissions. *Energies*, 14(16), 5072. <https://doi.org/10.3390/en14165072>
- Ahmad, S., Jafry, A. T., Haq, M. u., Abbas, N., Ajab, H., Hussain, A. y Sajjad, U. (2023). Performance and Emission Characteristics of Second-Generation Biodiesel with Oxygenated Additives. *Energies*, 16(13), 5153. <https://doi.org/10.3390/en16135153>
- Alcántara-Carmona, A., Sáez-Bastante, J. y Dorado, M. P. (2017). Corrosion testing of a diesel engine common rail system using various types of biodiesel. *RE&PQJ*, 15(3). <https://doi.org/10.24084/repqj15.344>
- Analysis and Performance Optimization of Variable Compression Ratio Diesel Engine using Canola Oil Based Biodiesel (2020). *Iranian Journal of Energy and Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.01.02>
- Ashqar, A., Hantoli, F., Abdulkareem, M. y Alsurakji, I. H. (2024). An-Najah University Journal for Research - A (Natural Sciences). *An-Najah University Journal for Research - a (Natural Sciences)*, 38(1), Artículo 2151, 54–59. <https://doi.org/10.35552/anujr.a.38.1.2151>
- Baccaro D., J. R. (2007). *Evaluación de rendimiento de biodiesel elaborado a partir de aceite de palma africana (Elaeis guineensis) y etanol anhidro de caña de azúcar (Saccharum officinarum)*. [Proyecto Especial d Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/f2b73ee4-3232-41f2-a8e7-2508331e9116/content>.
- Balamurugan, S., Seenivasan, D., Kalos, P. S. y Gupta, S. (2023). Multi-response and multi-criteria decision-making optimization of transesterification reaction for biodiesel production based on critic weight determination method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(3), 856–871. <https://doi.org/10.1177/09544089221110954>

- Barros Lovate Temporim, R., Cavalaglio, G., Petrozzi, A., Coccia, V., Cotana, F. y Nicolini, A. (2022). Life Cycle Assessment of *Cynara cardunculus* L. -Based Polygeneration and Biodiesel Chains. *Sustainability*, 14(21), 13868. <https://doi.org/10.3390/su142113868>
- Basu, C. (Ed.). (2021). *Methods in Molecular Biology. Biofuels and Biodiesel*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1323-8>
- Bhikuning, A. (2021). The Simulation of Performance and Emissions from Rapeseed and Soybean Methyl Ester in Different Injection Pressures. *Automotive Experiences*, 4(3), 112–118. <https://doi.org/10.31603/ae.4682>
- Bueso, F., Moreno, L., Cedeño, M. y Manzanarez, K. (2015). Lipase-catalyzed biodiesel production and quality with *Jatropha curcas* oil: exploring its potential for Central America. *Journal of Biological Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13036-015-0009-9>
- Caporusso, A., Capece, A. y Bari, I. de (2021). Oleaginous Yeasts as Cell Factories for the Sustainable Production of Microbial Lipids by the Valorization of Agri-Food Wastes. *Fermentation*, 7(2), 50. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020050>
- Castro, E., Strætkvern, K. O., Romero-García, J. M. y Martín, C. (2023). Pretreatment and Bioconversion for Valorization of Residues of Non-Edible Oilseeds. *Agronomy*, 13(9), 2196. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092196>
- Castro, M. A. C. de y Da Mota, D. M. (2023). Possibilidades E Limites Do Pnpb Na Integração De Agricultores Familiares Do Alto Moju, Pa, À Agroindústria Do Dendê. *Terceira Margem Amazônia*, 8(19), 195–221. <https://doi.org/10.36882/2525-4812.2022v8i19p195-221>
- Che Hamzah, N. H., Khairuddin, N., Siddique, B. M. y Hassan, M. A. (2020). Potential of *Jatropha curcas* L. as Biodiesel Feedstock in Malaysia: A Concise Review. *Processes*, 8(7), 786. <https://doi.org/10.3390/pr8070786>
- Chen, Y., Nie, X., Ye, J., Wang, Y [Yigang], Chen, J. y Xu, J. (2021). Biodiesel from Microorganisms: A Review. *Energy Technology*, 9(10), Artículo 2001053. <https://doi.org/10.1002/ente.202001053>
- Damian, C. S., Devarajan, Y. y Jayabal, R. (2024). Biodiesel production in India: Prospects, challenges, and sustainable directions. *Biotechnology and Bioengineering*, 121(3), 894–902. <https://doi.org/10.1002/bit.28643>
- Devasan, R., Ruatpuia, J. V. L., Gouda, S. P., Kodgire, P., Basumatary, S., Halder, G. y Rokhum, S. L. (2023). Microwave-assisted biodiesel production using bio-waste catalyst and process optimization using response surface methodology and kinetic study. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29883-4>

- Edeh, I. (2020). Biodiesel Production as a Renewable Resource for the Potential Displacement of the Petroleum Diesel. En V. Beschkov (Ed.), *Biorefinery Concepts, Energy and Products*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93013>
- Eswaran, N., Parameswaran, S. y Johnson, T. S. (2021). Biofuels and Sustainability. En C. Basu (Ed.), *Methods in Molecular Biology. Biofuels and Biodiesel* (Vol. 2290, pp. 317–342). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1323-8_20
- Ghanimi, S., Elmejhed, B., Terouzi, W. y Kzaiber, F. (2024). Comparison and Storage Stability of Biodiesels from Expired oils. *Politeknik Dergisi*, 27(2), 639–651. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1161932>
- Gumbyté, M., Makareviciene, V. y Sendzikiene, E. (2023). Enzymatic Transesterification of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Oil with Isoamyl Alcohol. *Materials*, 16(3), 1185. <https://doi.org/10.3390/ma16031185>
- Hajareh Haghighi, F., Binaymotlagh, R., Palocci, C. y Chronopoulou, L. (2024). Magnetic Iron Oxide Nanomaterials for Lipase Immobilization: Promising Industrial Catalysts for Biodiesel Production. *Catalysts*, 14(6), 336. <https://doi.org/10.3390/catal14060336>
- Hamed, H., Mohammed, A., Habeeb, O., Ali, O., Aljaf, O. y Abdulqader, M. (2021). Biodiesel Production From Waste Cooking Oil using Homogeneous Catalyst. *Egyptian Journal of Chemistry*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.62395.3339>
- Heck, C. R. y Carrara, A. F. (2023). Produção de biodiesel e matérias primas da agricultura familiar no Centro-Oeste. *Revista Brasileira De Desenvolvimento Regional*, 10(2), 57. <https://doi.org/10.7867/2317-5443.2022v10n2p57-84>
- Ibrahim, S., Chin, G. J. W. L. y Mission, M. (2022). Enhanced microbial biomass and lipid production through co-cultivation of yeast *Rhodotorula toruloides* and microalga *Chaetoceros muelleri*. *Malaysian Journal of Microbiology*. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.21161/mjm.211333>
- Ifeanyi-Nze, F. O., Omiyale, C. O., Okonkwo, I. U., Chukwu, C. J., Nwankwor, C. M., Onabanjo, A. O., Adoga, S. O., Chukwu, J. O., Chukwurah, K. F., Ebikemiyen, M., Okon, G. U., Adeleke, O. J. y Tajudeen, K. A. (2023). Biodiesel Synthesis from Waste Vegetable Oil Utilizing Eggshell Ash as an Innovative Heterogenous Catalyst. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1–18. <https://doi.org/10.47852/bonviewaaes32021761>
- Jamil, F., Saleem, M., Ali Qamar, O., Khurram, M. S., Al-Muhtaseb, A. H., Inayat, A., Akhter, P., Hussain, M., Rafiq, S., Yim, H. y Park, Y.-K. (2023). State-of-the-art catalysts for clean fuel (methyl esters) production—a comprehensive review. *Journal of Physics: Energy*, 5(1), 14005. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/aca5b3>

- Jo, M.-H., Ju, J.-H., Heo, S.-Y., Jeong, K. J. y Oh, B.-R. (2024). Sustainable production of a highly pure (R,R)-2,3-butanediol from crude glycerol using metabolically engineered *Klebsiella pneumoniae* GEM167 strain. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00705-7>
- Kim, H. Y. y Choi, N. J. (2020). Study on Volatile Organic Compounds from Diesel Engine Fueled with Palm Oil Biodiesel Blends at Low Idle Speed. *Applied Sciences*, 10(14), 4969. <https://doi.org/10.3390/app10144969>
- Kim, S. E., Kim, D. K., Lee, K.-Y. y Kim, H. J. (2024). *Synthesis and characterization of acid-treated melem and graphitic carbon nitride catalysts for biodiesel production*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4234257/v1>
- Kiss, F., Tomić, M., Romanić, R., Pavkov, I. y Đurišić-Mladenović, N. (2023). Economic feasibility of small-scale biodiesel production in Serbia. *Ekonomika Preduzeca*, 71(7-8), 460–471. <https://doi.org/10.5937/ekopre2308460k>
- Kostić, M., Stamenković, O. y Veljković, V. (2021). The influence of fatty acid composition on the kinetics of the vegetable oil methanolysis reaction. *Advanced Technologies*, 10(2), 24–31. <https://doi.org/10.5937/savteh2102024k>
- Listyarini, R. V., Pamenang, F. D. N. y Dewi, N. K. (2020). Guided-Inquiry of Green Chemistry-Based Experiments in Biodiesel Synthesis. *Scientiae Educatia*, 9(1), 14. <https://doi.org/10.24235/sc.educatia.v9i1.6283>
- Liu, A., Gao, Z., Rigopoulos, S., Luo, K. H. y Zhu, L. (2022). Modelling of laminar diffusion flames with biodiesel blends and soot formation. *Fuel*, 317, 122897. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122897>
- Mahlia, T., Syazmi, Z., Mofijur, M., Abas, A. P., Bilad, M. R., Ong, H. C. y Silitonga, A. S. (2020). Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109526. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109526>
- Majedi, M. y Safaei, E. (2023). Molybdenum (VI) complex of resorcinol-based ligand immobilized on silica-coated magnetic nanoparticles for biodiesel production. *Applied Organometallic Chemistry*, 37(10), Artículo e7216. <https://doi.org/10.1002/aoc.7216>
- Mei, D., Gao, Y., Adu-Mensah, D., Zuo, L. y Zhang, Q [Qi] (2022). Crystallization of hydrogenated biodiesel–ethanol–diesel blend based on the solid–liquid equilibrium theory. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(2), Artículo e13746. <https://doi.org/10.1002/ep.13746>
- Moreira, K. F., Santos, C. G. d., Pacheco, J. A. S., Rocha, A. A. y Figueiredo, D. M. de (2020). Desempenho, consumo e digestibilidade de nutrientes em cordeiros alimentados com

- níveis crescentes de farelo de crambe. *Research, Society and Development*, 9(10), e4539108859. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8859>
- Nascimento, T. L., Maciel, M. A. M., Bertini, L. M. y Rios, M. A. d. S. (2020). Avaliação do óleo e biodiesel de soja (glycine max) a partir de parâmetros físico-químicos. *Brazilian Journal of Development*, 6(3), 12685–12694. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-218>
- Niekurzak, M. (2021). Determining the Unit Values of the Allocation of Greenhouse Gas Emissions for the Production of Biofuels in the Life Cycle. *Energies*, 14(24), 8394. <https://doi.org/10.3390/en14248394>
- Nisar, S., Hanif, M. A., Rashid, U., Hanif, A., Akhtar, M. N. y Ngamcharussrivichai, C. (2021). Trends in Widely Used Catalysts for Fatty Acid Methyl Esters (FAME) Production: A Review. *Catalysts*, 11(9), 1085. <https://doi.org/10.3390/catal11091085>
- Nomanbhay, S., Ong, M. Y., Chew, K. W., Show, P.-L., Lam, M. K. y Chen, W.-H. (2020). Organic Carbonate Production Utilizing Crude Glycerol Derived as By-Product of Biodiesel Production: A Review. *Energies*, 13(6), 1483. <https://doi.org/10.3390/en13061483>
- Oliveira, C. J. de, Feroldi, M., Cremonez, P. A. y Teleken, J. G. (2020). ESTUDO DA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE PEQUI APÓS DIFERENTES TEMPOS DE FRITURA. *Revista Tecnológica*, 29(2), 460–474. <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i2.52445>
- Panhwar, T., Mahesar, S. A., Sherazi, S. T. H., Laghari, A. A. y Atabani, A. E. (2020). Synthesis and Evaluation of Oxidation Stability of Biodiesel Prepared from Spent Bleaching Clay Residual Oil. *Journal of Oleo Science*, 69(12), 1619–1626. <https://doi.org/10.5650/jos.ess20122>
- Park, D. H., Nana, F. I. y Cho, H. M. (2022). A Review of the Emission, Performance, Combustion, and Optimization Parameters in the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil. *Automotive Experiences*, 5(3), 371–388. <https://doi.org/10.31603/ae.7005>
- Pikula, K., Zakharenko, A., Stratidakis, A., Razgonova, M., Nosyrev, A., Mezhuev, Y., Tsatsakis, A. y Golokhvast, K. (2020). The advances and limitations in biodiesel production: feedstocks, oil extraction methods, production, and environmental life cycle assessment. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(4), 275–294. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1829099>
- Pramanik, A., Sinha, A., Chaubey, K. K., Hariharan, S., Dayal, D., Bachheti, R. K., Bachheti, A. y Chandel, A. K. (2023). Second-Generation Bio-Fuels: Strategies for Employing Degraded Land for Climate Change Mitigation Meeting United Nation-Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 15(9), 7578. <https://doi.org/10.3390/su15097578>
- Queiroz, I. R., Da Costa, A. S. V., Almeida, I. C., Barros, G. F., Alves, W. M., Souza, M. C. de, Franco, M. L., Pompermayer, R. d. S., Souza, A. O. y Ferreira, A. C. (2021). O

- biocombustível no Brasil: potencialidades da cultura do Crambe abyssinica para produção de biodiesel. *Research, Society and Development*, 10(5), e11510514618. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14618>
- Rahul S, M., MA, S., CS, S., R, S. K., P, V., S, K., J, K., R, V. K., S, S., I, G. M. y A, P. (2021). Insights about sustainable biodiesel production from microalgae biomass: A review. *International Journal of Energy Research*, 45(12), 17028–17056. <https://doi.org/10.1002/er.6138>
- Raza, M., Inayat, A. y Abu-Jdayil, B. (2021). Crude Glycerol as a Potential Feedstock for Future Energy via Thermochemical Conversion Processes: A Review. *Sustainability*, 13(22), 12813. <https://doi.org/10.3390/su132212813>
- Saetang, N. y Tipnee, S. (2021). Towards a sustainable approach for the development of biodiesel microalgae, *Closterium* sp. *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 3(1), 25–29. <https://doi.org/10.54279/mijeec.v3i1.245114>
- Sandoval-Contreras, T., González Chávez, F., Poonia, A., Iñiguez-Moreno, M. y Aguirre-Güitrón, L. (2023). Avocado Waste Biorefinery: Towards Sustainable Development. *Recycling*, 8(5), 81. <https://doi.org/10.3390/recycling8050081>
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D. y Yu, T.-H. (2008). Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319(5867), 1238–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1151861>
- Sidjabat, O. (2022). The Characteristics Of A Mixture Of Kerosene And Biodiesel As A Substituted Diesel Fuel. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 36(1), 37–44. <https://doi.org/10.29017/scog.36.1.649>
- Silva Lima, F., Rodrigues, W. y Marques de Oliveira, N. (2024). Competitividade Do Biodiesel: Desafios E Perspectivas Na Região Matopiba/Biodiesel Competitiveness: Challenges And Perspectives In The Matopiba Region. *Informe GEPEC*, 28(1), 208–230. <https://doi.org/10.48075/igepec.v28i1.31952>
- Silveira, V. F., Siqueira, J. A. C., Santos, R. F., Caneppele, F. d. L., Dieter, J., Prior, M., Tokura, L. K., Debastiani, G., Lewandoski, C. F. y Da Reis, L. S. (2022). Motor gerador ciclo diesel assistido por sistemas de automação industrial (Indústria 4.0). *Research, Society and Development*, 11(1), e20611124699. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24699>
- Tanaka, T., Guo, J. y Wang, X. (2023). Price interconnection of fuel and food markets: Evidence from biodiesel in the United States. *GCB Bioenergy*, 15(7), 886–899. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13055>
- Tao, J., Chen, C [Chao], Wang, J [Jian], Li, J [Jian], Zhou, S., Chen, C [Chen], Yan, B., Guo, W., Cheng, Z. y Chen, G. (2023). Liquid biofuel powering the sustainable transport with a low-

carbon emission: a review. *Progress in Energy*, 5(4), 42003. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ad09ef>

Taufiq Fathaddin, M., Fattahanisa, A., Sri Riswati, S., Setiati, R. y Agung Rakhmanto, P. (2023). An Application of the Bibliometric Method to Analyze Research Development of Biodiesel. *International Journal of Research Publications*, 124(1). <https://doi.org/10.47119/ijrp1001241520234806>

Thangavelu, K., Sundararaju, P., Srinivasan, N. y Uthandi, S. (2021). Bioconversion of sago processing wastewater into biodiesel: Optimization of lipid production by an oleaginous yeast, *Candida tropicalis* ASY2 and its transesterification process using response surface methodology. *Microbial Cell Factories*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01655-7>

Torrentes Espinoza, G. (2021). Retrospectiva y prospectiva del Desarrollo de las generaciones de biocombustibles. *Ciencia Y Tecnología*, 53–63. <https://doi.org/10.18682/cyt.vi21.2593>

Veza, I., Muhammad, V., Oktavian, R., Djamari, D. W. y Muhamad Said, M. F. (2021). Effect of COVID-19 on Biodiesel Industry: A Case Study in Indonesia and Malaysia. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(2). <https://doi.org/10.15282/ijame.18.2.2021.01.0657>

Wang, L., Lin, G., Li, Y., Qu, W., Wang, Y [Yan], Lin, Y., Huang, Y., Li, J [Jing], Qian, C., Yang, G. y Zuo, Q. (2024). Phenotype, Biomass, Carbon and Nitrogen Assimilation, and Antioxidant Response of Rapeseed under Salt Stress. *Plants*, 13(11), 1488. <https://doi.org/10.3390/plants13111488>

Wang, Y [Yue] y Heydari, H. (2021). Developing an Extreme Learning Machine-Based Model for Estimating the Isothermal Compressibility of Biodiesel. *International Journal of Chemical Engineering*, 2021, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2021/6099019>

Wikberg, E., Heikkilä, S., Sirviö, K., Välisuo, P., Niemi, S. y Niemi, A. (2021). Calibration Method for the Determination of the FAME and HVO Contents in Fossil Diesel Blends Using NIR Spectroscopy. *Fuels*, 2(2), 179–193. <https://doi.org/10.3390/fuels2020011>

Wolny, A. y Chrobok, A. (2021). Ionic Liquids for Development of Heterogeneous Catalysts Based on Nanomaterials for Biocatalysis. *Nanomaterials*, 11(8), 2030. <https://doi.org/10.3390/nano11082030>

Zambare, V., Patankar, R., Bhusare, B. y Christopher, L. (2021). Recent Advances in Feedstock and Lipase Research and Development towards Commercialization of Enzymatic Biodiesel. *Processes*, 9(10), 1743. <https://doi.org/10.3390/pr9101743>

Zanini, B., Souza, S. N. M. de, Santos, R. F., Siqueira, J. A. C., Oliveira, R. S. de, Lewandoski, C. F. y Rodrigues, R. A. (2022). Produção de biodiesel como estratégia para o pequeno

produtor. *Research, Society and Development*, 11(12), e67111234108.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34108>

Zhang, Q [Qiankun], Xia, J., Wang, J [Jianping], He, Z., Zhao, W., Qian, Y., Zheng, L., Liu, R. y Lu, X. (2022). Experimental study on spray diffusion characteristics at various biodiesel-butanol blended ratios and ambient conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part a: Journal of Power and Energy*, 236(5), 840–852.
<https://doi.org/10.1177/09576509211069451>

Zulqarnain, Yusoff, M. H. M., Ayoub, M., Jusoh, N. y Abdullah, A. Z. (2020). The Challenges of a Biodiesel Implementation Program in Malaysia. *Processes*, 8(10), 1244.
<https://doi.org/10.3390/pr8101244>

Anexos

Anexo A

Documentos utilizados

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
1	Acharya, R. N. and Pérez, R	2020	Role of comparative advantage in biofuel policy adoption in latin america.	Sustainability	https://doi.org/10.3390/su12041411
2	Ahmad, I., Sana, A., Kano, M., Cheema, I., Menezes, B., Shahzad, J., & Habib, A.	2021	Machine learning applications in biofuels' life cycle: soil, feedstock, production, consumption, and emissions.	Energies	https://doi.org/10.3390/en14165072
3	Ahmad, S., Jafry, A., Haq, M., Abbas, N., Ajab, H., Hussain, A., & Sajjad, U.	2023	Performance and emission characteristics of second-generation biodiesel with oxygenated additives	Energies	https://doi.org/10.3390/en16135153
4	Alcántara-Carmona, A., Sáez-Bastante, J., & Dorado, M.	2024	Corrosion testing of a diesel engine common rail system using various types of biodiesel.	Renewable Energy and Power Quality Journal,	https://doi.org/10.24084/repqj15344
5	Ashqar, A., Hantoli, F., Abdulkareem, M., & Alsarakji, I.	2024	Sustainable energy outlook: biodiesel from used cooking oil in palestine	An-Najah University Journal for Research	https://doi.org/10.35552/anuwr.a.38.1.2151
6	Baccaro, J. R.	2007	<i>Evaluación de rendimiento de biodiesel elaborado a partir de aceite de palma africana (Elaeis guineensis) y etanol anhidro de caña de azúcar (Saccharum officinarum)</i>	Biblioteca Universidad Zamorano	https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/f2b73ee4-3232-41f2-a8e7-2508331e9116/download
7	Balamurugan, S., Seenivasan, D., Kalos, P., & Gupta, S.	2022	Multi-response and multi-criteria decision-making optimization of transesterification reaction for biodiesel production based on critic weight determination method	Journal of Process Mechanical Engineering	https://doi.org/10.1177/09544089221110954
8	Bhikuning, A.	2021	The simulation of performance and emissions from rapeseed and soybean methyl ester in different injection pressures	Automotive Experiences	https://doi.org/10.31603/ae.4682
9	Binnemans, K. and Jones, P.	2024	Methanesulfonic acid (msa) in clean processes and applications: a tutorial review.	Green Chemistry	https://doi.org/10.1039/d4gc02031f
10	Bolaños, M.	2015	<i>Evaluación del potencial del efluente de palma (POME) como medio de cultivo de la microalga de alto valor lipídico, Chorella vulgaris, en su aplicación como fuente de biodiesel</i>	Biblioteca Universidad Zamorano	https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/22dd2be4-8a55-4c43-a7d2-3d2580c35267/download

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
11	Bueso, F. J., Moreno, L., Avellán, M. C., & Manzanarez, K.	2015	Lipase-catalyzed biodiesel production and quality with jatropha curcas oil: exploring its potential for central america.	Journal of Biological Engineering	https://doi.org/10.1186/s13036-015-0009-9
12	Caporusso, A., Capece, A., & Bari, I.	2021	Oleaginous yeasts as cell factories for the sustainable production of microbial lipids by the valorization of agri-food wastes.	Fermentation	https://doi.org/10.3390/fermentation7020050
13	Castro, E., Strætkvern, K., Romero-García, J., & Martín, C.	2023	Pretreatment and bioconversion for valorization of residues of non-edible oilseeds.	Agronomy	https://doi.org/10.3390/agronomy13092196
14	Castro, M. and Mota, D.	2023	Possibilidades e limites do pnpb na integração de agricultores familiares do alto moju, pa, à agroindústria do dendê.	Terceira Margem Amazônia	https://doi.org/10.36882/2525-4812.2022v8i19p195-221
15	Chellachamy, A., Balamurugan, C., & Duraisamy, G.	2021	Application of genetic algorithm for increasing the utilization of poor-quality biodiesel through blending.	Journal of Oleo Science	https://doi.org/10.5650/jos.ess20296
16	Chen, Y., Nie, X., Ye, J., Wang, Y., Chen, J., & Xu, J.	2021	Biodiesel from microorganisms: a review.	Energy Technology	https://doi.org/10.1002/ente.202001053
17	Comisión Europea	2021	Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables	Diario Oficial de la Unión Europea	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001
18	Damian, C., Devarajan, Y., & Jayabal, R.	2024	Biodiesel production in india: prospects, challenges, and sustainable directions	Biotechnology and Bioengineering	https://doi.org/10.1002/bit.28643
19	Devasan, R., Ruatpuia, J., Gouda, S., Kodgire, P., Basumatary, S., Halder, G. & Rokhum, S.	2023	Microwave-assisted biodiesel production using bio-waste catalyst and process optimization using response surface methodology and kinetic study.	Scientific Reports	https://doi.org/10.1038/s41598-023-29883-4
20	Easwaran, N., Parameswaran, S., & Johnson, T.	2021	Biofuels and sustainability	Methods in Molecular Biology	https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1323-8_20
21	Edeh, I.	2020	Biorefinery Concepts, Energy and Products		https://doi.org/10.5772/intechopen.93013
22	Ellen MacArthur Foundation	2025	Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition.	Pagina Web	https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TC_E_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf
23	Ergen, G.	2023	Investigation of the effects of rapeseed methyl ester and soybean methyl ester biodiesel blends on performance,	AS Proceedings	https://doi.org/10.59287/as-proceedings.484

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
			emission and combustion parameters in diesel-rk software		
24	Espinoza, G.	2021	Retrospectiva y prospectiva del desarrollo de las generaciones de biocombustibles	Ciencia y Tecnología	https://doi.org/10.18682/cyt.vi21.2593
25	Fathaddin, M., Fattahanisa, A., Riswati, S., Setiati, R., & Rakhmanto, P.	2023	An application of the bibliometric method to analyze research development of biodiesel	International Journal of Research Publications	https://doi.org/10.47119/ijrp1001241520234806
26	Ghanimi, S., Mejhed, B., Terouzi, W., & Kzaiber, F.	2024	Comparison and storage stability of biodiesels from expired oils	Politeknik Dergisi	https://doi.org/10.2339/politekni.k.1161932
27	Gumbyté, M., Makarevičienė, V., & Sendžikienė, E.	2023	Enzymatic transesterification of atlantic salmon (Salmo salar) oil with isoamyl alcohol	Materials	https://doi.org/10.3390/ma16031185
28	Haghighi, F., Binaymotlagh, R., Palocci, C., & Chronopoulou, L.	2024	Magnetic iron oxide nanomaterials for lipase immobilization: promising industrial catalysts for biodiesel production	Catalysts	https://doi.org/10.3390/catal14060336
29	Hamed, H., Mohammed, A., Habeeb, O., Ali, O., Aljaf, O., & Abdulqader, M.	2021	Biodiesel production from waste cooking oil using homogeneous catalyst	Egyptian Journal of Chemistry	https://doi.org/10.21608/eichem.2021.62395.3339
30	Hamzah, N., Khairuddin, N., Siddique, B., & Hassan, M.	2020	Potential of Jatropha curcas L. as biodiesel feedstock in Malaysia: a concise review	Processes	https://doi.org/10.3390/pr8070786
31	Heck, C., & Carrara, A.	2023	Produção de biodiesel e matérias primas da agricultura familiar no centro-oeste	Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional	https://doi.org/10.7867/2317-5443.2022v10n2p57-84
32	Honkalas, R., Kulkarni, H., & Kubade, P.	2020	Analysis and performance optimization of variable compression ratio diesel engine using canola oil based biodiesel	Iranica Journal of Energy and Environment	https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.01.02
33	Ibrahim, S., Chin, G., & Mission, M.	2022	Enhanced microbial biomass and lipid production through co-cultivation of yeast Rhodotorula toruloides and microalga Chaetoceros muelleri	Malaysian Journal of Microbiology	https://doi.org/10.21161/mjm.211333
34	IEA	2022	CO2 Emissions in 2022	Agencia Internacional de Energía	https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022
35	Ifeanyi-Nze, F., Charles, O., Okonkwo, I., Chukwu, C., Nwankwor, C., Onabanjo, A., ... & Tajudeen, K.	2023	Biodiesel synthesis from waste vegetable oil utilizing eggshell ash as an innovative heterogenous catalyst	Archives of Advanced Engineering Science	https://doi.org/10.47852/bonvie.waaes32021761
36	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	2021	Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment	Cambridge University Press	https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
			Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change		
37	Jamil, F., Saleem, M., Qamar, O., Khurram, M., Al-Muhtaseb, A., Inayat, A., ... & Park, Y.	2022	State-of-the-art catalysts for clean fuel (methyl esters) production—a comprehensive review	Journal of Physics Energy	https://doi.org/10.1088/2515-7655/aca5b3
38	Jo, M., Ju, J., Heo, S., Jeong, K., & Oh, B.	2024	Sustainable production of a highly pure (R,R)-2,3-butanediol from crude glycerol using metabolically engineered <i>Klebsiella pneumoniae</i> GEM167 strain	Chemical and Biological Technologies in Agriculture	https://doi.org/10.1186/s40538-024-00705-7
39	Kim, H., & Choi, N.	2020	Study on volatile organic compounds from diesel engine fueled with palm oil biodiesel blends at low idle speed	Applied Sciences	https://doi.org/10.3390/app10144969
40	Kim, S., Kim, D., Lee, K., & Kim, H.	2024	Synthesis and characterization of acid-treated melem and graphitic carbon nitride catalysts for biodiesel production	Preprint (Research Square)	https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4234257/v1
41	Kiss, F., Tomić, M., Romanić, R., Pavkov, I., & Đurišić-Mladenović, N.	2023	Economic feasibility of small-scale biodiesel production in Serbia	Ekonomika Preduzeca	https://doi.org/10.5937/ekopre2308460k
42	Knothe, G., Krahl, J., & Van Gerpen, J.	2005	The Biodiesel Handbook (3rd ed.)	AOCS Press	https://biokraftstoffverband.de/wp-content/uploads/2023/05/23-02-22-The-Biodiesel-Handbook-.pdf
43	Kostić, M., Stamenković, O., & Veljković, V.	2021	The influence of fatty acid composition on the kinetics of the vegetable oil methanolysis reaction	Advanced Technologies	https://doi.org/10.5937/savteh2102024k
44	Lima, F., Rodrigues, W., & Oliveira, N.	2024	Competitividade do biodiesel: desafios e perspectivas na região MATOPIBA	Informe Gepec	https://doi.org/10.48075/igepec.v28i1.31952
45	Listyarini, R., Pamenang, F., & Dewi, N.	2020	Guided-inquiry of green chemistry-based experiments in biodiesel synthesis	Scientiae Educatia	https://doi.org/10.24235/sc.educatia.v9i1.6283
46	Liu, A., Gao, Z., Rigopoulos, S., Luo, K., & Zhu, L.	2022	Modelling of laminar diffusion flames with biodiesel blends and soot formation	Fuel	https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122897
47	Mahlia, T. M. I., Syazmi, Z. A. H. S., Mofijur, M., Abas, A. E. P., Bilad, M. R., Ong, H. C., & Silitonga, A. S.	2020	Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates	Renewable and Sustainable Energy Reviews	https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109526
48	Majedi, M., & Safaei, E.	2023	Molybdenum (VI) complex of resorcinol-based ligand immobilized on silica-coated magnetic nanoparticles for biodiesel production	Applied Organometallic Chemistry	https://doi.org/10.1002/aoc.7216

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
49	Mei, D., Gao, Y., Adu-Mensah, D., Zuo, L., & Zhang, Q.	2021	Crystallization of hydrogenated biodiesel–ethanol–diesel blend based on the solid–liquid equilibrium theory	Environmental Progress & Sustainable Energy	https://doi.org/10.1002/ep.13746
50	Mis, K. E.	2008	Efecto del tiempo de freído del aceite de palma (<i>Elaeis guineensis</i>) sobre las características físico-químicas del biodiesel	Biblioteca Universidad Zamorano	https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/d7a5a797-1cc1-4d1b-9023-44d5f392bd5c/download
51	Moreira, K., Santos, C., Pacheco, J., Rocha, A., & Figueiredo, D.	2020	Desempenho, consumo e digestibilidade de nutrientes em cordeiros alimentados com níveis crescentes de farelo de crambe	Research Society and Development	https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8859
52	Nascimento, T., Maciel, M., Bertini, L., & Rios, M.	2020	Avaliação do óleo e biodiesel de soja (<i>Glycine max</i>) a partir de parâmetros físico-químicos	Brazilian Journal of Development	https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-218
53	Niekurzak, M.	2021	Determining the unit values of the allocation of greenhouse gas emissions for the production of biofuels in the life cycle	Energies	https://doi.org/10.3390/en14248394
54	Nisar, S., Hanif, M., Rashid, U., Hanif, A., Akhtar, M., & Ngamcharussrivichai, C.	2021	Trends in widely used catalysts for fatty acid methyl esters (FAME) production: a review	Catalysts	https://doi.org/10.3390/catal11091085
55	Nomanbhay, S., Ong, M., Chew, K., Show, P., Lam, M., & Chen, W.	2020	Organic carbonate production utilizing crude glycerol derived as by-product of biodiesel production: a review	Energies	https://doi.org/10.3390/en13061483
56	Oliveira, C., Feroldi, M., Cremones, P., & Teleken, J.	2020	Estudo da estabilidade oxidativa do biodiesel a partir do óleo de pequi após diferentes tempos de fritura	Revista Tecnológica	https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i2.52445
57	ONU	2018	Perspectivas de la gestión de residuos orgánicos en América Latina y el Caribe	FAO / PNUMA	https://www.unep.org/es/resources/informe/perspectiva-de-la-gestion-de-residuos-en-america-latina-y-el-caribe
58	Orellana, J. J.	2007	Evaluación de calidad de biodiesel elaborado con palma africana (<i>Elaeis guineensis</i>) y etanol	Universidad Zamorano (Tesis)	https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/a5893425-edb4-45cd-b864-e40b2f5877fb/download
59	Panhwar, T., Mahesar, S., Sherazi, S., Laghari, A., & Atabani, A.	2020	Synthesis and evaluation of oxidation stability of biodiesel prepared from spent bleaching clay residual oil	Journal of Oleo Science	https://doi.org/10.5650/jos.ess20122
60	Park, D., Nana, F., & Cho, H.	2022	A review of the emission, performance, combustion, and optimization parameters in the production of biodiesel from waste cooking oil	Automotive Experiences	https://doi.org/10.31603/ae.7005

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
61	Pikula, K., Zakharenko, A., Stratidakis, A., Razgonova, M., Nosyrev, A., Mezhuev, Y., ... & Golokhvast, K.	2020	The advances and limitations in biodiesel production: feedstocks, oil extraction methods, production, and environmental life cycle assessment	Green Chemistry Letters and Reviews	https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1829099
62	Pramanik, A., Sinha, A., Chaubey, K., Hariharan, S., Dayal, D., Bachheti, R., ... & Chandel, A.	2023	Second-generation bio-fuels: strategies for employing degraded land for climate change mitigation	Sustainability	https://doi.org/10.3390/su15097578
63	Queiroz, I., Costa, A., Almeida, I., Barros, G., Alves, W., Souza, M., ... & Ferreira, A.	2021	O biocombustível no Brasil: potencialidades da cultura do crambe abyssinica para produção de biodiesel	Research Society and Development	https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14618
64	Raza, M., Inayat, A., & Abu-Jdayil, B.	2021	Crude glycerol as a potential feedstock for future energy via thermochemical conversion processes: a review	Sustainability	https://doi.org/10.3390/su132212813
65	Riegelhaupt, E., Odenthal, J., & Janeiro, L.	2021	Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento	Red Mexicana de Bioenergía	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/275444/Final_Report.pdf
66	Sáenz, A. J.	2008	Efecto antioxidantes de alfa tocoferol, BHT y TBHQ en el biodiesel de aceites vegetales	Universidad Zamorano (Tesis)	https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/6edd53db-b0bc-459c-bb6b-5ba0735f011b/download
67	Saetang, N., & Tipnee, S.	2021	Towards a sustainable approach for the development of biodiesel microalgae, Closterium sp.	Maejo Int. J. Energy & Env. Communication	https://doi.org/10.54279/mijeec.v3i1.245114
68	Sandoval-Contreras, T., Chávez, F., Poonia, A., Íñiguez-Moreno, M., & Aguirre-Güitrón, L.	2023	Avocado waste biorefinery: towards sustainable development	Recycling	https://doi.org/10.3390/recycling8050081
69	Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., ... & Yu, T. H.	2008	Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change	Science	https://doi.org/10.1126/science.1151861
70	Sidjabat, O.	2022	The characteristics of a mixture of kerosene and biodiesel as a substituted diesel fuel	Scientific Contributions Oil and Gas	https://doi.org/10.29017/scog.36.1.649
71	Silveira, V., Siqueira, J., Santos, R., Caneppele, F., Dieter, J., Prior, M., ... & Reis, L.	2022	Motor gerador ciclo diesel assistido por sistemas de automação industrial (Indústria 4.0)	Research Society and Development	https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24699
72	Soosai, M., Sundaramahalingam, M., CS, S., Rajaram, S., Varalakshmi, P., Sankar, K., ... & Pugazhendhi, A.	2020	Insights about sustainable biodiesel production from microalgae biomass: a review	International Journal of Energy Research	https://doi.org/10.1002/er.6138
73	Tanaka, T., Guo, J., & Xiufang, W.	2023	Price interconnection of fuel and food markets: evidence from biodiesel in the United States	GCB Bioenergy	https://doi.org/10.1111/gcbb.13055

No.	Autores	Año	Título	Revista	DOI
74	Tao, J., Chen, C., Wang, J., Li, J., Zhou, S., Chen, C., ... & Chen, G.	2023	Liquid biofuel powering the sustainable transport with a low-carbon emission: a review	Progress in Energy	https://doi.org/10.1088/2516-1083/ad09ef
75	Temporim, R., Cavalaglio, G., Petrozzi, A., Coccia, V., Cotana, F., & Nicolini, A.	2022	Life cycle assessment of <i>Cynara cardunculus</i> L.-based polygeneration and biodiesel chains	Sustainability	https://doi.org/10.3390/su142113868
76	Thangavelu, K., Sundararaju, P., Srinivasan, N., & Uthandi, S.	2021	Bioconversion of sago processing wastewater into biodiesel: optimization of lipid production by an oleaginous yeast, <i>Candida tropicalis</i> ASY2	Microbial Cell Factories	https://doi.org/10.1186/s12934-021-01655-7
77	Veza, I., Muhammad, V., Oktavian, R., Djamari, D., & Said, M.	2021	Effect of COVID-19 on biodiesel industry: a case study in Indonesia and Malaysia	International Journal of Automotive and Mechanical Engineering	https://doi.org/10.15282/ijame.18.2.2021.01.0657
78	Wang, L., Lin, G., Li, Y., Qu, W., Wang, Y., Lin, Y., ... & Zuo, Q.	2024	Phenotype, biomass, carbon and nitrogen assimilation, and antioxidant response of rapeseed under salt stress	Plants	https://doi.org/10.3390/plants13111488
79	Wang, Y., & Heydari, H.	2021	Developing an extreme learning machine-based model for estimating the isothermal compressibility of biodiesel	International Journal of Chemical Engineering	https://doi.org/10.1155/2021/6099019
80	Wikberg, E., Heikkilä, S., Sirviö, K., Välisuo, P., Niemi, S., & Niemi, A.	2021	Calibration method for the determination of the FAME and HVO contents in fossil diesel blends using NIR spectroscopy	Fuels	https://doi.org/10.3390/fuels2020011
81	Wolny, A., & Chrobok, A.	2021	Ionic liquids for development of heterogeneous catalysts based on nanomaterials for biocatalysis	Nanomaterials	https://doi.org/10.3390/nano11082030
82	Yusoff, M., Ayoub, M., Jusoh, N., & Abdullah, A.	2020	The challenges of a biodiesel implementation program in Malaysia	Processes	https://doi.org/10.3390/pr8101244
83	Zambare, V., Patankar, R., Bhusare, B., & Christopher, L.	2021	Recent advances in feedstock and lipase research and development towards commercialization of enzymatic biodiesel	Processes	https://doi.org/10.3390/pr9101743
84	Zanini, B., Souza, S., Santos, R., Siqueira, J., Oliveira, R., Lewandoski, C., ... & Rodrigues, R.	2022	Produção de biodiesel como estratégia para o pequeno produtor	Research Society and Development	https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34108
85	Zhang, Q., Xia, J., Wang, J., He, Z., Zhao, W., Qian, Y. & Lü, X.	2022	Experimental study on spray diffusion characteristics at various biodiesel-butanol blended ratios and ambient conditions	Journal of Power and Energy	https://doi.org/10.1177/09576509211069451