

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO
FACULTAD DE POSGRADO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

INFORME DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLIGÍA

TEMA:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL BIODIÉSEL DE
SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA DE
AZÚCAR: RENTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD EN ECUADOR FRENTE A
BRASIL, COLOMBIA Y PERÚ**

Autor:

Madelaine Estefanía Cruz Litardo

Heidy Carolina Sarmiento Ochoa

Director:

Mgtr. Carlos Bastidas

Milagro, 2025

Derechos de autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Nosotros, **Madelaine Estefanía Cruz Litardo y Heidy Carolina Sarmiento Ochoa** en calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedemos los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de nuestro Grado, de **Magíster en Biotecnología**, como aporte a la Línea de Investigación Innovación tecnológica en procesos de producción agropecuaria de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedemos a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservamos a nuestro favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizamos a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Los autores declaran que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 05 de Junio del 2025



Ing. Madelaine Estefanía Cruz Litardo

CI:1207370295



Ing. Heidy Carolina Sarmiento Ochoa

CI: 0104618046

Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación

Yo, Carlos Jamil Bastidas Sanchez en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por la Ing. Madelaine Estefanía Cruz Litardo e Ing. Heidy Carolina Sarmiento Ochoa, cuyo tema es “Análisis comparativo del ciclo de vida del biodiésel de segunda generación a partir del bagazo de caña de azúcar: rentabilidad y sostenibilidad en Ecuador frente a Brasil, Colombia y Perú”, que aporta a la Línea de Investigación Innovación tecnológica en procesos de producción agropecuaria, previo a la obtención del Grado Magister en biotecnología. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 05 de Junio del 2025



Carlos Jamil Bastidas Sanchez

CI: 0921849931

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
ACTA DE SUSTENTACIÓN
MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los cinco días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 09:00 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, ING. CRUZ LITARDO MADELAINE ESTEFANIA, a defender el Trabajo de Titulación denominado " **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL BIODIÉSEL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR: RENTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD EN ECUADOR FRENTE A BRASIL ,COLOMBIA Y PERÚ.**", ante el Tribunal de Calificación integrado por: Mgs. MORALES CALUÑA EDGAR ROLANDO, Presidente(a), VALENZUELA COBOS ALEXANDRA GABRIELA en calidad de Vocal; y, Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: **93.83** equivalente a: **MUY BUENO**.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 10:00 horas.



Firmado electrónicamente por:
**EDGAR ROLANDO
MORALES CALUÑA**

Validar únicamente con FirmaEC

Mgs. MORALES CALUÑA EDGAR ROLANDO
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**ALEXANDRA GABRIELA
VALENZUELA COBOS**

Validar únicamente con FirmaEC

VALENZUELA COBOS ALEXANDRA GABRIELA
VOCAL



Firmado electrónicamente por:
**DELIA DOLORES
NORIEGA VERDUGO**

Validar únicamente con FirmaEC

Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**MADELAINE ESTEFANIA
CRUZ LITARDO**

Validar únicamente con FirmaEC

ING. CRUZ LITARDO MADELAINE ESTEFANIA
MAGÍSTER

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
ACTA DE SUSTENTACIÓN
MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los cinco días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 09:00 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, ING. SARMIENTO OCHOA HEIDY CAROLINA, a defender el Trabajo de Titulación denominado " **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL BIODIÉSEL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR: RENTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD EN ECUADOR FRENTE A BRASIL ,COLOMBIA Y PERÚ.**", ante el Tribunal de Calificación integrado por: Mgs. MORALES CALUÑA EDGAR ROLANDO, Presidente(a), VALENZUELA COBOS ALEXANDRA GABRIELA en calidad de Vocal; y, Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: **94.00** equivalente a: **MUY BUENO**.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 10:00 horas.



Mgs. MORALES CALUÑA EDGAR ROLANDO
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



VALENZUELA COBOS ALEXANDRA GABRIELA
VOCAL



Dra. NORIEGA VERDUGO DELIA DOLORES
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



ING. SARMIENTO OCHOA HEIDY CAROLINA
MAGÍSTER

DEDICATORIA

Ing. Heidy Carolina Sarmiento Ochoa

A mi madre, cuyo amor incondicional ha sido el motor silencioso pero poderoso que me impulsó a culminar esta etapa con dedicación y compromiso. Sé que este logro también es suyo.

A mi hermana, quien considero fue la personal que me motivo a obtener el título de 4^{to} nivel.

A mi familia, por estar siempre presente con su apoyo emocional, sus palabras de aliento y su fe en mí, especialmente en los momentos más desafiantes.

Y finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que creen en el poder transformador de la investigación y la ciencia, pilares fundamentales para construir un futuro más justo, consciente y sostenible para nuestra sociedad.

DEDICATORIA

Ing. Madelaine Estefania Cruz Litardo

A Dios, a quien entrego con profundo agradecimiento este logro. Solo Tú conoces las necesidades y desafíos que enfrenté en este camino, y fuiste mi guía constante, mi consuelo en los momentos difíciles y la fuerza que me impulsó a seguir adelante. Gracias por tu amor infinito y por iluminar cada paso de este proceso, haciendo posible que hoy pueda alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Ing. Heidy Carolina Sarmiento Ochoa

A Dios, por brindarme la salud, la sabiduría y la fortaleza necesarias para alcanzar esta meta académica que representa un paso trascendental en mi formación profesional y personal.

A mi madre Alexandra Iliana Ochoa Parra quien fue en mi una fuente inagotable de admiración y amor, no cabe duda que cumplí un objetivo que ella en mi sembró desde tiempo atrás, y hoy puedo decir que lo hemos conseguido.

A mi hermana Nicole, pieza fundamental en mi vida, cuya presencia, consejos y palabras de aliento han sido una constante fuente de inspiración. Me llena de satisfacción poder compartir con ella este logro tan anhelado, pues su apoyo ha sido esencial en mi camino.

A mi familia, por su cercanía, por estar siempre pendientes de mí y por brindarme su cariño incondicional en cada etapa de este proceso.

Agradezco profundamente a mi tutor, Mst. Carlos cuyo acompañamiento, guía y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

A la empresa ERBOINDUSTRIAS, en donde he podido encontrar un lugar en que mis habilidades y mi potencial como profesional se han visto reconocidas y valoradas en un ambiente motivador y enriquecedor

A mi colega Mgtr. Diego Prado, cuyo acompañamiento ha trascendido lo laboral. Su constante motivación, apoyo y ejemplo me han impulsado a superarme cada día.

A los docentes de la maestría en Biotecnología, por compartir su conocimiento y fomentar en mí una visión crítica y apasionada por la investigación científica.

AGRADECIMIENTOS

Ing. Madelaine Estefania Cruz Litardo

Este trabajo es un testimonio de la gracia de Dios en mi vida. A Él le debo la fuerza, la sabiduría y la oportunidad de llegar hasta aquí.

A mis queridos padres y hermanos , mi eterno agradecimiento por el amor incondicional que siempre me han brindado.

A mi amado esposo, gracias por su amor inmenso, por su paciencia infinita y por estar a mi lado en cada instante.

A mis queridas tías Daysi y Claudina, cuyo ejemplo y aliento sembraron en mí la semilla del amor por los estudios. Gracias por inculcarme el valor de la educación y por mostrarme el camino hacia un futuro mejor.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Carlos Bastidas , por su invaluable guía, paciencia, conocimiento, dedicación y constante motivación fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

A todos ustedes, mi gratitud más sincera. Este logro es tan mío como suyo, porque sin su amor y apoyo constante, nada de esto hubiera sido posible.

Resumen

El aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar como materia prima para la producción de biodiésel de segunda generación representa una alternativa estratégica para Ecuador en el contexto de la transición hacia energías renovables. Esta investigación tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental del biodiésel de segunda generación (B2G) en Ecuador, contrastando sus resultados con experiencias desarrolladas en Brasil, Colombia y Perú.

Se aplicó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo la norma ISO 14040, complementada con una revisión documental y un análisis comparativo de indicadores de sostenibilidad y rentabilidad. Se evaluaron variables como el potencial de producción del bagazo, costos, emisiones de gases de efecto invernadero, eficiencia energética e infraestructura tecnológica.

Los resultados indican que Ecuador posee un alto potencial para producir biodiésel a partir del bagazo, pero enfrenta barreras en infraestructura, políticas públicas e incentivos económicos. En contraste, Brasil y Colombia han logrado consolidar marcos regulatorios y procesos tecnológicos más avanzados.

Se concluye que el biodiésel de segunda generación es viable en el país, pero requiere inversión, desarrollo tecnológico e institucional, así como políticas que impulsen una economía circular. Se recomienda fortalecer la investigación aplicada, crear incentivos fiscales y fomentar la articulación público privada para el desarrollo del sector.

Palabras clave: Biodiésel de segunda generación, bagazo de caña, sostenibilidad energética, ciclo de vida, Ecuador.

Abstract

The use of sugarcane bagasse as a raw material for the production of second-generation biodiesel represents a strategic alternative for Ecuador in the context of the transition to renewable energy. This research aims to analyze the technical, economic, and environmental viability of second-generation (B2G) biodiesel in Ecuador, comparing its results with experiences developed in Brazil, Colombia, and Peru.

The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was applied under the ISO 14040 standard, complemented by a documentary review and a comparative analysis of sustainability and profitability indicators. Variables such as bagasse production potential, costs, greenhouse gas emissions, energy efficiency, and technological infrastructure were evaluated.

The results indicate that Ecuador has significant potential for producing biodiesel from bagasse, but faces barriers in infrastructure, public policies, and economic incentives. In contrast, Brazil and Colombia have managed to consolidate more advanced regulatory frameworks and technological processes. The conclusion is that second generation biodiesel is viable in the country, but requires investment, technological and institutional development, as well as policies that promote a circular economy. It is recommended to strengthen applied research, create tax incentives, and encourage public private partnerships for the development of the sector.

Keywords: Second generation biodiesel, sugarcane bagasse, energy sustainability, life cycle, Ecuador

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diferencia entre biodiésel de primera y segunda generación</i>	12
Figura 2 <i>Proceso de producción de Biodiésel en Brasil</i>	13
Figura 3 <i>Proceso de producción de Biodiésel en Perú</i>	14
Figura 4 <i>Proceso de producción de Biodiésel en Colombia</i>	15
Figura 5 <i>Proceso de producción del biocombustible de primera generación</i>	17
Figura 6 <i>Proceso de Producción de biocombustibles de segunda generación</i>	18
Figura 7 <i>Proceso de producción de biocombustibles de tercera generación</i>	20
Figura 8 <i>Bagazo de Caña de azúcar</i>	24
Figura 9 <i>Ciclo de vida del Biodiésel</i>	31
Figura 10 <i>Proceso General de Producción de Biodiésel de La Fabril</i>	40
Figura 11 <i>Proceso General de Producción de Biodiésel de Biopower Ecuador</i>	41
Figura 12 <i>Proceso General de Producción de Biodiésel de INENECUADOR</i>	42
Figura 13 <i>Costo total de Producción de Biodiésel</i>	56
Figura 14 <i>Consumo energético por País</i>	57

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Delimitación del Problema</i>	6
Tabla 2 Operacionalización de variables	8
Tabla 3 <i>Características del B2G</i>	21
Tabla 4 Comparativa de Biodiésel y Bioetanol	22
Tabla 5 Dimensiones de la sostenibilidad energética	27
Tabla 6. <i>Comparativa de la Huella de Gases de Efecto Invernadero</i>	27
Tabla 7 <i>Criterios de sostenibilidad aplicables a biocombustibles</i>	28
Tabla 8 <i>Indicadores claves</i>	29
Tabla 9 Resumen de comparativa de producción de Biodiésel	37
Tabla 10 Potencial de producción de biodiésel.....	43
Tabla 11 <i>Comparativa de costos de Producción</i>	44
Tabla 12 <i>Comparativa de consumo energético</i>	46
Tabla 13 <i>Comparación de Infraestructura Tecnológica en Brasil y Ecuador</i>	59
Tabla 14 Potencial de producción de biodiésel.....	60
Tabla 15 <i>Comparativa de costos de Producción</i>	60
Tabla 16 <i>Comparativa de consumo energético</i>	61

Lista de Abreviaturas

B2G: Biodiésel de Segunda Generación

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

GEI: Gases de Efecto Invernadero

ROI: Retorno sobre la Inversión

VAN: Valor Actual Neto

TIR: Tasa Interna de Retorno

MJ: Megajulio

USD: Dólares estadounidenses

INEN: Industrias Oleaginosas Ecuatorianas

ANP: Agencia Nacional del Petróleo (Brasil)

CTC: Centro de Tecnología Canavieira (Brasil)

SPSS: Statistical Package for the Social Sciences (software estadístico)

ISO: Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)

Índice / Sumario

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Delimitación del Problema.....	6
1.3 Formulación del Problema	7
1.4 Preguntas de la investigación	7
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos	7
1.6 Hipótesis.....	8
1.7 Justificación.....	9
CAPITULO 2.....	11
2 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Antecedentes del Biodiésel y su evolución	11
2.1.1 Historia del uso de Biocombustibles.....	11
2.1.2 Transición hacia Biodiésel de segunda generación.....	12
2.1.3 Casos relevantes de Generación de B2G en Brasil, Perú y Colombia	13
2.2 Marco Conceptual	15
2.2.1 Clasificación de Biocombustibles	15
2.2.2 Biodiésel de Segunda Generación.....	22
2.2.3 Sostenibilidad Energética.....	25
2.2.4 Rentabilidad	29
2.2.4 Ciclo de Vida del Biodiésel	31
2.2.5 Comparativo de Costos de Producción, Eficiencia del Proceso y Consumo de Energía Eléctrica en la Producción de Biodiésel.....	33

1. Costos de Producción	33
2.3 Marco Conceptual	37
2.3.1 Evaluación técnica del uso del bagazo.....	37
2.3.2 Viabilidad del Biodiésel en Ecuador.....	42
2.3.3 Potencial de producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar en países seleccionados (Ecuador, Colombia, Perú y Brasil).....	43
2.3.4 Comparativa de costo de Producción de Biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar ..	44
2.3.5 Comparativa de Consumo Energético Estimado por Galón de Biodiésel (MJ/gal)	45
CAPITULO 3.....	48
3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	48
3.1 Tipo y Diseño de Investigación.....	48
3.2 Población y muestra	50
3.3 Métodos, Técnicas e instrumentos	51
3.4 Procesamiento estadístico de la información.....	53
CAPITULO 4.....	55
4 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	55
4.1 Análisis de Resultados	55
4.1.1 Análisis de costo de Producción	55
4.1.2 Análisis de consumo energético.....	57
4.1.3 Comparación de Infraestructura Tecnológica	58
4.1.4 Potencial del Ecuador.....	59
CAPITULO 5.....	63
5 Discusión, Conclusiones y Recomendaciones	63
5.1 Discusión.....	63
5.2 Conclusiones	64
5.3 Recomendaciones.....	65
5.3.1 Limitaciones del estudio:	66
Referencias Bibliográficas	68

INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables se ha convertido en una prioridad global debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la dependencia de los combustibles fósiles. El biodiésel de segunda generación (B2G), obtenido a partir de residuos agroindustriales como el bagazo de caña de azúcar, representa una solución sostenible con beneficios ambientales y económicos significativos. Ecuador, al ser un país con una importante producción de caña de azúcar presenta el potencial de desarrollar esta tecnología y reducir su dependencia del diésel importado, promoviendo la economía circular y la seguridad energética. (Velazques, 2024).

En este estudio se evaluarán esos aspectos analizando las etapas del Ciclo de Vida del Biodiésel como método de estudio basados en la norma ISO 14040. Este enfoque permite identificar desde la literatura revisada los impactos medioambientales en cada fase de la producción desde la recolección del bagazo hasta la combustión del biodiésel. Además, se realizará un estudio bibliográfico profundo recopilando trabajos anteriores sobre biocombustibles en el contexto internacional, para poder posicionar el avance del B2G en Ecuador con el de otros países que han tenido mejor resultado.

A nivel mundial, diversas naciones están interesadas en usar biocombustibles para tener diferentes para diversificar sus matriz energética y reducir la dependencia los derivados del petróleo. Esto se evidencia en políticas públicas como el apoyo a la producción de biocombustibles con dinero público y leyes que regulan su venta en Brasil, Colombia y Ecuador (Cherubini, 2021). En América Latina, Brasil lidera la industria del biodiésel, mientras que Colombia ha fortalecido sus marcos regulatorios, y Ecuador ha comenzado a desarrollar iniciativas en biocombustibles a partir de residuos agroindustriales (Junginger, 2022) .

Ecuador ha impulsado también ha impulsado ciertas iniciativas para el aprovechamiento de energías renovables, sin embargo, la producción de biocombustibles a partir de residuos agroindustriales necesita aún mayores estudios técnicos y económicos para justificar su ejecución (Escribano, 2023).

Esta investigación tiene como propósito analizar las etapas del ciclo de vida del biodiésel producido a partir del bagazo de caña en Ecuador, comparándolas con otros casos internacionales, con el fin de establecer su viabilidad económica y ambiental. Entre otros objetivos, se pretende contribuir a la innovación de procesos que favorezcan la producción sostenible y la diversificación de la matriz energética del país.

A continuación, se detalla la estructura del documento que se llevará a cabo en este proyecto investigativo:

Capítulo I. Se establecen las causas y consecuencias relacionadas con la producción y uso del biodiésel de segunda generación a partir del bagazo de caña de azúcar. Asimismo, se especifica la problemática actual en Ecuador y su comparación con otros países. Se definen los objetivos de la investigación, la delimitación del alcance y la justificación del proyecto, resaltando su importancia en términos de sostenibilidad y rentabilidad para una comprensión clara del problema abordado.

Capítulo II. Se presentan antecedentes investigativos y teóricos que respaldan la relevancia del estudio, incluyendo investigaciones previas sobre biocombustibles, el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar y el estado actual del desarrollo del biodiésel de segunda generación en distintas regiones del mundo. Además, se analizan políticas públicas y marcos regulatorios que han incentivado la adopción de esta tecnología en países como Brasil, Colombia y Perú.

Capítulo III. Describe la metodología aplicada en la investigación, basada en las etapas del ciclo de vida y un enfoque comparativo con otros países. Se detallan los criterios de

evaluación utilizados, como la eficiencia energética, las emisiones de gases de efecto invernadero, etapas de producción, indicadores ambientales, impactos ambientales y la viabilidad del B2G en Ecuador. Asimismo, se presenta el producto final de la propuesta desarrollada y las métricas empleadas para validar los resultados obtenidos.

Capítulo IV. Presenta las conclusiones derivadas del estudio, destacando los hallazgos clave en términos de sostenibilidad y rentabilidad del biodiésel de segunda generación en Ecuador. Además, se plantean sugerencias para futuras investigaciones, enfocadas en la optimización del proceso de producción, mejoras en la infraestructura y el desarrollo de políticas públicas que favorezcan su implementación.

CAPITULO I

1.1 Planteamiento del problema

A nivel global, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), causadas principalmente por el uso intensivo de combustibles fósiles, ha intensificado el cambio climático, generando consecuencias adversas para el medio ambiente, la salud pública y la economía (Calvin et al., 2023). Ante esta situación, se ha impulsado la transición energética hacia fuentes más limpias y sostenibles. Una de las alternativas más prometedoras es la producción de biocombustibles, en especial el biodiésel de segunda generación (B2G), el cual no compite con la producción de alimentos, ya que se elabora a partir de residuos lignocelulósicos como el bagazo de caña de azúcar.

En Ecuador, la propuesta se centra en evaluar la producción de B2G utilizando el bagazo de caña de azúcar, un residuo agrícola generado en grandes cantidades en zonas productoras como Guayas y Los Ríos. Esta alternativa permitirá convertir un desecho en un recurso energético renovable, con el potencial de reducir las emisiones de GEI y disminuir la dependencia de combustibles importados. No obstante, su implementación enfrenta múltiples obstáculos que deben ser abordados desde un enfoque multidisciplinario.

Algunas de las principales barreras son la infraestructura tecnológica necesaria para el procesamiento de residuos de caña de azúcar y su conversión en biodiésel. Existe una carencia de incentivos económicos y políticas orientadas hacia la promoción de biocombustibles avanzados (Hilbert, 2025). Además, existe una ausencia de investigación local que apoye la viabilidad ambiental y económica del uso de residuos de caña de azúcar como fuente de materia prima para fines energéticos (Montero, 2020).

Abordar este problema local requiere un estudio detallado diseñado para evaluar los mecanismos en Ecuador en comparación con los marcos más avanzados adoptados en países

como Brasil, Colombia y Perú, que han desarrollado con éxito tecnologías aplicadas a la producción de biodiésel a partir de residuos agroindustriales junto con sistemas regulatorios integrales.

Los sistemas regulatorios claves en Brasil, Colombia y Perú para la producción de biodiésel incluyen:

1. **Brasil:** La Ley de Biocombustibles (11.097/2005), el programa RenovaBio y la ANP, que regulan la calidad y la producción de biodiésel.
2. **Colombia:** La Ley 693 de 2001 y el Ministerio de Minas y Energía, que establecen normas de calidad y metas de mezcla de biodiésel en el diésel.
3. **Perú:** La Ley 28054 y su reglamento, junto con el Ministerio de Energía y Minas, que regulan la producción y comercialización de biodiésel.

Estos marcos buscan promover la sostenibilidad y el uso de biocombustibles mediante políticas claras y regulaciones técnicas.

Por ello, la investigación se orienta a realizar un análisis comparativo entre Ecuador y otros países desde una perspectiva ambiental, tecnológica, de sostenibilidad y de disponibilidad de recursos, específicamente en relación con las tecnologías de producción de biodiésel de segunda generación, como la hidrólisis enzimática, la gasificación y la transesterificación microbiana utilizadas en Brasil, Colombia y Perú.

1.2 Delimitación del Problema

El estudio se encuentra en el área de energía renovable y medio ambiente, con especial atención a la producción de biocombustibles de segunda generación. Su enfoque principal es evaluar la viabilidad del uso de bagazo de caña de azúcar como materia prima para la producción de biodiésel desde el punto de vista de la rentabilidad y la sostenibilidad.

El tema se centra en un análisis comparativo del ciclo de vida del biodiésel de segunda generación hecho a partir de bagazo de caña de azúcar en comparación con su aplicación en la ejecución del proyecto en Ecuador, promoviendo su aplicabilidad en el contexto ecuatoriano con experiencias exitosas de Brasil, Colombia y Perú.

El alcance del problema se definirá con una planta ubicada en Ecuador para comprender de manera más integral el ciclo de vida del biodiésel producido bajo condiciones locales. Este enfoque busca generar resultados aplicables y contextualizados, lo cual es esencial en la formulación de recomendaciones y políticas prácticas para uso público.

A continuación, en la siguiente tabla se detallarán las delimitaciones del problema de la presente investigación.

Tabla 1
Delimitación del Problema

Delimitador	Descripción
Campo	Energías renovables y medio ambiente
Área	Producción de Biocombustibles de Segunda Generación
Aspecto	Evaluación del potencial del bagazo de caña de azúcar como materia prima para biodiésel
Tema	Análisis comparativo del ciclo de vida del biodiésel de segunda generación a partir del bagazo de caña de azúcar: rentabilidad y sostenibilidad en Ecuador frente a otros países.

Nota: En esta tabla se detallan las delimitaciones del problema.

1.3 Formulación del Problema

En un país como Ecuador, con alta disponibilidad de residuos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar, pero con limitaciones en infraestructura y políticas públicas, ¿Es posible implementar de manera efectiva y sostenible la producción de biodiésel de segunda generación, tal como se ha logrado en otras naciones de la región?

1.4 Preguntas de la investigación

- ❖ ¿Qué cantidad de bagazo de caña de azúcar se produce anualmente en Ecuador y cuál es su potencial energético?
- ❖ ¿Qué barreras económicas, sociales y normativas limitan el desarrollo del biodiésel de segunda generación en Ecuador?
- ❖ ¿Cuáles serían los beneficios ambientales derivados de su implementación a nivel nacional?
- ❖ ¿Qué lecciones pueden extraerse de la experiencia internacional, particularmente de países vecinos, para aplicarlas en el contexto ecuatoriano?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar el ciclo de vida, sostenibilidad, rentabilidad del biodiésel del de bagazo de caña de azúcar, considerando las diferentes etapas del proceso y su contraste con Brasil, Colombia y Perú.

1.5.2 Objetivos específicos

- ❖ Determinar las principales etapas del ciclo de vida de biodiésel a partir del bagazo de la caña de azúcar.
- ❖ Analizar los impactos asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida del biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar a partir de revisión bibliográfica.

- ❖ Proponer estrategias para mejorar la sostenibilidad de la producción de biodiésel de segunda generación para establecer precedentes y recomendaciones en las industrias energéticas del Ecuador.

1.6 Hipótesis

Si el bagazo de caña de azúcar se utiliza adecuadamente como materia prima para la producción de biodiésel de segunda generación en Ecuador, entonces será posible establecer un modelo de producción rentable y sostenible, comparable con los implementados en Brasil, Colombia y Perú.

El elevado potencial energético del bagazo y su abundante disponibilidad en regiones como la provincia del Guayas, junto con las experiencias exitosas en países latinoamericanos que han aprovechado residuos agroindustriales para la producción de biocombustibles, respaldan esta afirmación.

Por lo tanto, resulta fundamental identificar las etapas críticas en el proceso de conversión del bagazo de caña en biodiésel de segunda generación, incluyendo una comparación con estándares técnicos nacionales e internacionales. Este análisis permitirá establecer criterios que contribuyan a mejorar los procesos existentes y proponer soluciones más eficaces adaptadas al contexto ecuatoriano.

Tabla 2 Operacionalización de variables

Tipo de Variable	Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnica / Instrumento	Escala / Unidad de Medida
Independiente	Uso del bagazo de caña de azúcar	Disponibilidad del recurso	Cantidad anual de bagazo generado en Ecuador	Revisión documental, fuentes estadísticas	Toneladas/año
		Potencial energético	Energía contenida por tonelada de bagazo	Análisis técnico	MJ/ton

		Tecnología aplicada	Tipo de tecnología de conversión utilizada (enzimática, gasificación, etc.)	Revisión bibliográfica	Cualitativa
Dependiente	Rentabilidad del B2G	Costos de producción	Costo total por litro de biodiésel	Estudio comparativo	USD/litro
		Retorno de inversión	ROI del modelo propuesto en Ecuador	Análisis financiero	Porcentaje (%)
Dependiente	Sostenibilidad del B2G	Ambiental	Emisiones de CO ₂ evitadas respecto al diésel fósil	Análisis ACV, revisión de estudios	gCO ₂ eq/MJ
		Social	Generación de empleo rural	Estudio de caso, revisión secundaria	Número de empleos, cualitativa
		Económica	Reducción de dependencia de diésel importado	Evaluación macroeconómica	USD anuales, comparativo

Nota: La tabla muestra la relación entre la variable independiente y las variables dependientes, estructuradas en dimensiones e indicadores clave para evaluar la viabilidad del biodiésel de segunda generación en Ecuador.

1.7 Justificación

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles se ha convertido en una prioridad a nivel mundial, especialmente ante los efectos cada vez más evidentes del cambio climático y la creciente necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles (IEA, 2023). En este contexto, el biodiésel de segunda generación, producido a partir de residuos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar, representa una alternativa estratégica que no compite con la producción de alimentos y aprovecha subproductos abundantes en países agrícolas.

Ecuador, particularmente en la región del Litoral, genera grandes volúmenes de bagazo de caña como residuo del proceso de producción de azúcar, lo que abre la posibilidad de transformarlo en un recurso energético con potencial ambiental y sostenible. Sin embargo, la falta de estudios comparativos sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de este tipo de biodiésel limita la toma de decisiones informadas en el ámbito energético nacional.

La presente investigación resulta pertinente al analizar el ciclo de vida del biodiésel de segunda generación en Ecuador y contrastarlo con la experiencia de países vecinos como Brasil, Colombia y Perú, donde existen políticas públicas, tecnologías y cadenas de valor consolidadas para el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales (Coviello et al., 2022).

Además, este análisis posibilita obtener datos significativos acerca de la sostenibilidad de este tipo de biocombustible, en cuanto a emisiones, gastos de producción y eficacia. Esto facilitará la creación de estrategias más conscientes y sostenibles en la utilización de la biomasa residual en Ecuador.

De la misma manera, su evolución puede impulsar la economía circular creando puestos de trabajo en áreas rurales y reforzando la independencia energética del país. Por lo que se puede mencionar que la propuesta es relevante e indispensable no solo por su repercusión ambiental y económica sino también por su capacidad para impulsar el progreso científico y técnico del país y sentando las bases para futuras investigaciones, formulación de políticas e innovaciones en el área de los biocombustibles.

CAPITULO 2

2 MARCO TEÓRICO

El objetivo de este capítulo es presentar los fundamentos teóricos relacionados con la comparación de los costos de producción de biodiésel de segunda generación a partir del bagazo de caña de azúcar, evaluando su rentabilidad y sostenibilidad tanto en Ecuador como en otros países.

Estas consideraciones teóricas ayudarán a desarrollar una argumentación sólida que apoye la interpretación de los resultados, y al mismo tiempo muestre las deficiencias que existen en torno al conocimiento sobre los biocombustibles y los residuos agroindustriales utilizados en su producción. Para ello, se tratarán los antecedentes más importantes y la evolución del biodiésel en orden cronológico, su clasificación por generaciones, las características del bagazo de caña de azúcar como materia prima, y las etapas de producción de biodiésel como herramienta metodológica principal.

Asimismo, se expondrán los principales indicadores de rentabilidad y sostenibilidad medioambientales, económicos, sociales y una revisión comparativa de algunos casos internacionales relevantes. Y por último el posicionamiento teórico del autor, donde se da un punto de partida para el análisis crítico del fenómeno objeto de estudio.

2.1 Antecedentes del Biodiésel y su evolución

2.1.1 Historia del uso de Biocombustibles

Los biocombustibles tienen una larga trayectoria histórica que se remonta al siglo XIX, cuando Rudolf Diesel demostró que su motor podía funcionar con aceites vegetales. Esta alternativa no prosperó frente al petróleo debido a su bajo costo y disponibilidad masiva, lo

cual relegó a los biocombustibles a un segundo plano durante gran parte del siglo XX (Knothe, 2022).

Fue recién en las décadas finales del siglo pasado, con las crisis energéticas y la creciente preocupación ambiental, cuando resurgió el interés por fuentes energéticas renovables. La producción y uso de biodiésel tomó fuerza como una solución viable ante la dependencia de combustibles fósiles y los compromisos internacionales por mitigar el cambio climático (Bozbas, 2022).

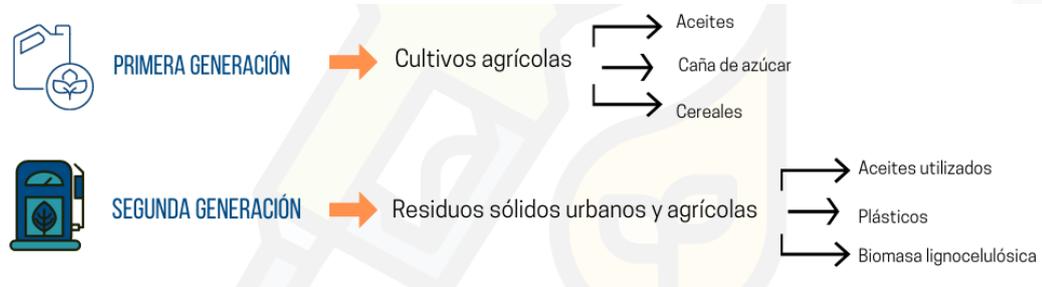
2.1.2 Transición hacia Biodiésel de segunda generación

El biodiésel de primera generación, derivado de cultivos oleaginosos como palma, soja o girasol, ha sido criticado por competir con la seguridad alimentaria y por promover el cambio de uso de suelo. Esta situación condujo a la búsqueda de fuentes alternativas más sostenibles, dando paso a los biocombustibles de segunda generación, obtenidos de residuos orgánicos y materiales lignocelulósicos (Naik et al., 2021)

El bagazo de caña de azúcar representa una de estas materias primas prometedoras por su alto contenido energético, disponibilidad estacional y el hecho de no interferir con el abastecimiento alimentario. Estos factores lo posicionan como una opción estratégica en países con tradición azucarera, especialmente en América Latina (Wolf et al., 2021).

Figura 1

Diferencia entre biodiésel de primera y segunda generación



Nota: La imagen representa la diferencia de los biodiésel de primera y segunda generación, elaborado por (Boletín AOP, 2025)

2.1.3 Casos relevantes de Generación de B2G en Brasil, Perú y Colombia

Brasil es el líder mundial en la utilización del potencial energético de la caña de azúcar.

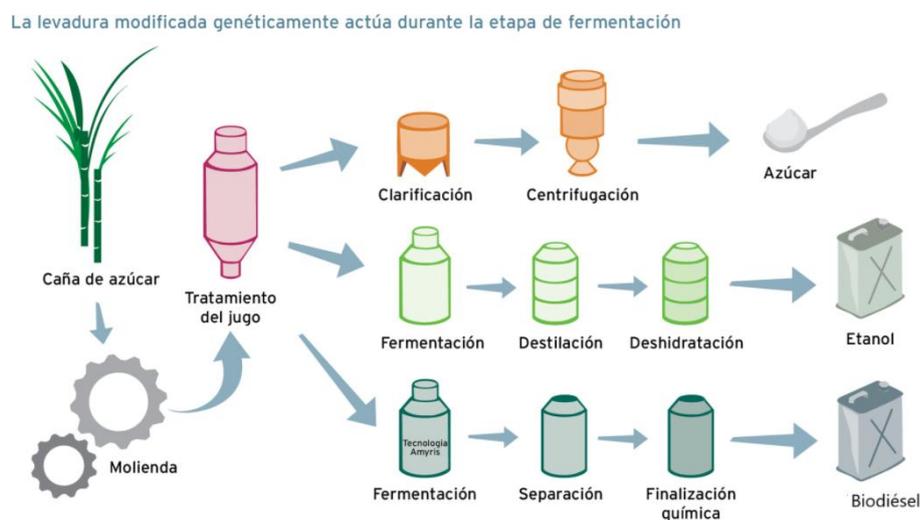
Aunque se ha desarrollado históricamente etanol de primera generación, más recientemente Brasil se ha centrado en investigar biodiésel de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos como el bagazo de caña de azúcar.

El proceso se lleva a cabo en biorrefinerías integradas, donde el bagazo se somete a pretratamientos fisicoquímicos (como hidrólisis ácida y explosión de vapor) para liberar azúcares fermentables. Posteriormente, estos azúcares son utilizados por cepas microbianas para producir lípidos intracelulares, los cuales son transformados en biodiésel mediante transesterificación (Dos et al., 2024).

Un ejemplo es el proyecto liderado por el Centro de Tecnología Canavieira (CTC) y la empresa Raízen, donde se ha logrado escalar este proceso a nivel piloto, integrando la producción de biodiésel con cogeneración eléctrica (producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de una misma fuente de energía, optimizando su aprovechamiento) a partir de los residuos del mismo bagazo (Allbarelli et al., 2024).

Figura 2

Proceso de producción de Biodiésel en Brasil

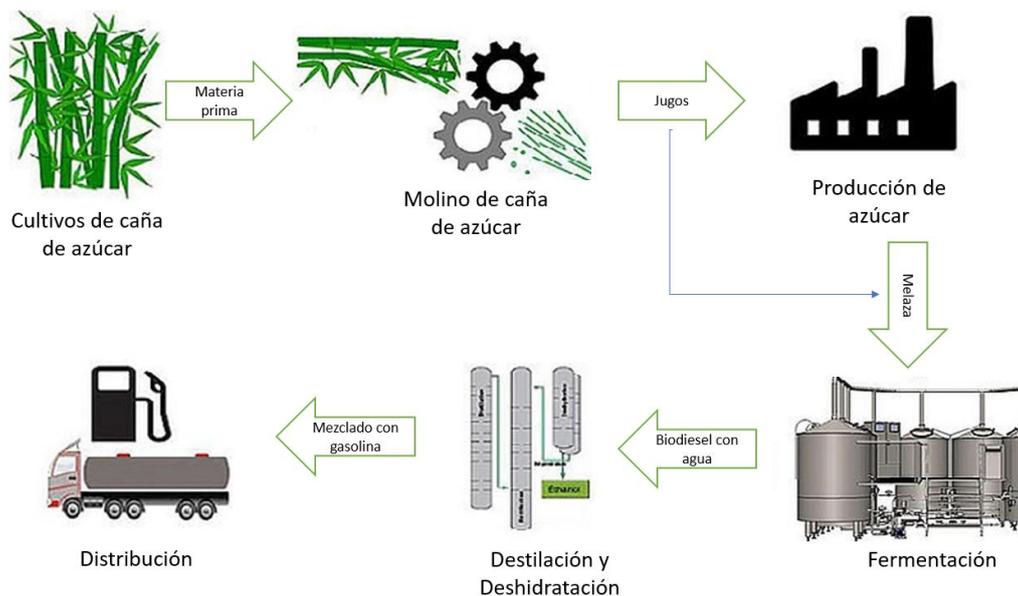


Nota: Representación gráfica del proceso de producción del Biodiésel en Brasil, elaborado por (Bioenergía, 2025).

De la misma manera es importante mencionar a Perú que, aunque la industria del biodiésel aún no se encuentra tan desarrollada como en Brasil, se han impulsado estudios e iniciativas piloto en la región norte del país, particularmente en Lambayeque y Piura, donde hay alta producción de caña de azúcar. Investigaciones como la de (Vargas Corredor & Pérez, 2020) indican que el país ha comenzado a implementar procesos a pequeña escala que incluyen la hidrólisis del bagazo, seguido de fermentación aerobia, para generar lípidos microbianos convertibles en biodiésel.

En colaboración con universidades e instituciones de innovación tecnológica, se han diseñado sistemas modulares de biorrefinación que utilizan residuos agroindustriales como insumo energético. Además, se han promovido talleres de formación técnica en transesterificación con catalizadores básicos (sustancias que aceleran la velocidad de una reacción química sin consumirse en el proceso), con el fin de fortalecer capacidades locales.

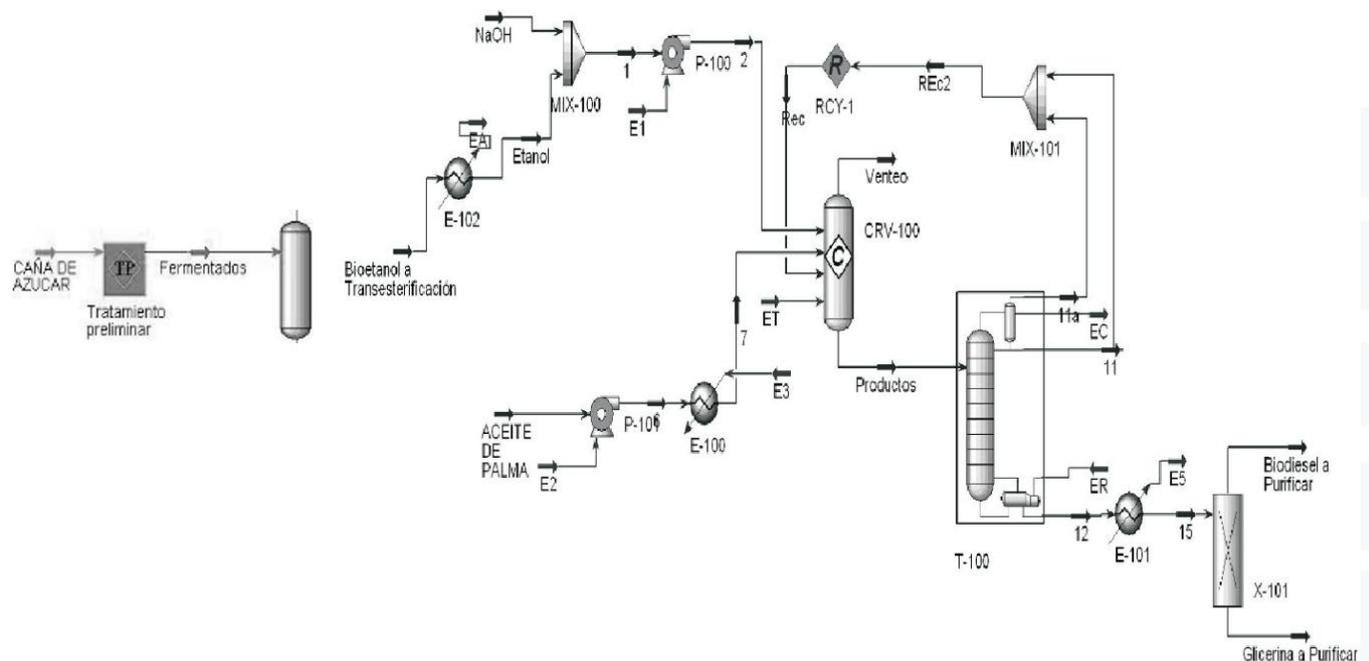
Figura 3
Proceso de producción de Biodiésel en Perú



Nota: Representación gráfica del proceso de producción del Biodiésel en Perú, elaborado por (Bizzo et al., 2020).

Asimismo, Colombia en regiones como el Valle del Cauca, ingenios como Incauca S.A. han trabajado con el Centro de Investigación de la Caña para transformar bagazo en biodiésel. El enfoque incluye pirólisis del bagazo para obtener biocrudo, que luego se somete a reformado catalítico (proceso que convierte compuestos orgánicos en combustibles usando catalizadores) para producir biodiésel. También se emplea el proceso Fischer-Tropsch, a partir del gas de síntesis generado por la gasificación del bagazo (Rodríguez et al., 2023).

Figura 4
Proceso de producción de Biodiésel en Colombia



Nota: Representación gráfica del proceso de producción del Biodiésel en Colombia, elaborado por (Ojeda et al., 2024).

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Clasificación de Biocombustibles

Al ser derivados de materia orgánica, los biocombustibles suponen un recurso energético renovable que puede sustituir parcial o totalmente los combustibles fósiles. Su clasificación técnica se establece en función del tipo de materia prima utilizada, el impacto ambiental, la tecnología que involucra su producción, y su relación con la seguridad

alimentaria. En este contexto, se distinguen tres generaciones principales: biocombustibles de primera, segunda y tercera generación.

2.2.1.1 Biocombustibles de Primera Generación

Los biocombustibles de primera generación se elaboran a partir de maíz, caña de azúcar, soja, girasol y otros cultivos que contienen almidón, azúcar, o aceites. De los biocombustibles de primera generación el más utilizado es el bioetanol que se elabora por fermentación de azúcares y el biodiésel que se obtiene por transesterificación de aceites vegetales o de grasa animal.

Este tipo de biocombustibles se caracteriza por su amplia disponibilidad en el mercado y el nivel más evolucionado de su tecnología. Sin embargo, este tipo de biocombustibles enfrenta fuertes cuestionamientos porque compiten directamente con la producción de alimentos, requieren grandes extensiones de tierra y generan presión sobre la mayoría de los ecosistemas: el cambio de uso de suelo (Singh et al., 2020) .

Esto ocurre cuando áreas naturales como bosques, selvas y pastizales se convierten en terreno agrícola donde se cultivan las materias primas para biocombustibles, estas transformaciones producen un impacto ambiental significativo tales como la pérdida de biodiversidad, emisiones de CO₂ almacenadas en la vegetación y suelo, alteraciones de los ciclos hídricos y aumento de la erosión de terreno.

Además, diversos estudios han señalado que su impacto ambiental no siempre es significativamente menor que el de los combustibles fósiles, especialmente cuando se consideran las emisiones indirectas asociadas a la cadena de producción (Radhakumari et al., 2021).

Figura 5

Proceso de producción del biocombustible de primera generación



Nota: La imagen el proceso de producción de biocombustibles de primera generación, elaborado por (WTS Energy, 2025).

2.2.1.2 Biocombustibles de Segunda Generación

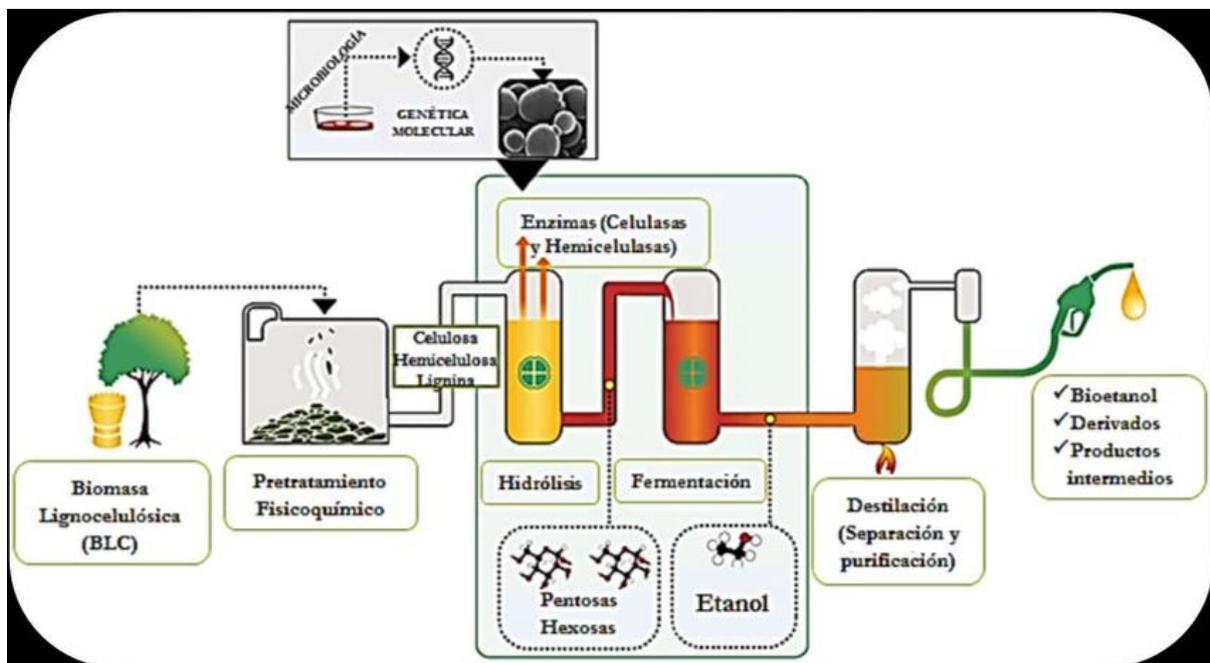
Los biocombustibles de segunda generación surgen como una respuesta a la falta de sostenibilidad y los problemas de seguridad alimentaria que presentan los biocombustibles de primera generación. Se producen a partir de biomasa lignocelulósica no comestible, como el bagazo de caña de azúcar, paja de arroz, residuos forestales, y subproductos agrícolas, los cuales anteriormente eran considerados desechos. A diferencia de sus predecesores estos biocombustibles no compiten con la producción de alimentos y tienen un impacto ambiental significativamente menor (Santos et al., 2022).

La conversión de estos residuos en biodiésel requiere procesos más complejos y avanzados, como pretratamientos fisicoquímicos, hidrólisis enzimática, fermentación microbiana, gasificación, pirólisis y otras tecnologías emergentes. El pretratamiento busca desestructurar la biomasa lignocelulósica para hacer accesibles los azúcares fermentables o permitir su conversión térmica en biocombustible. Según Prasad (2023), estos procesos deben ser cuidadosamente seleccionados según el tipo de residuo y el producto energético deseado, dado que influyen directamente en la eficiencia del sistema.

Una de las principales ventajas de los biocombustibles de segunda generación es su mayor eficiencia ambiental. Diversos estudios muestran que pueden reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero hasta en un 80 % en comparación con los combustibles fósiles, al tiempo que permiten valorizar residuos agroindustriales que, de otro modo, serían desaprovechados o generarían impactos negativos (Yadav et al., 2023) Esta valorización promueve modelos de economía circular en zonas rurales, fortalece cadenas productivas y contribuye al desarrollo sostenible.

Figura 6

Proceso de Producción de biocombustibles de segunda generación



Nota: Proceso de conversión de biomasa lignocelulósica (BLC), elaborado por (Silva, 2024).

La imagen ilustra el proceso de conversión de biomasa lignocelulósica (BLC), como residuos agrícolas o forestales, en bioetanol a través de varias etapas tecnológicas. Primero, la biomasa se somete a un pretratamiento físicoquímico, que tiene como objetivo separar sus componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales son difíciles de descomponer.

A continuación, se aplican enzimas específicas (como celulasas y hemicelulasas) que actúan sobre la celulosa y la hemicelulosa, descomponiéndolas en azúcares simples, como pentosas y hexosas, en un proceso denominado hidrólisis. Estos azúcares liberados son los que se utilizarán en el siguiente paso del proceso.

Después, los azúcares obtenidos se fermentan mediante microorganismos (como levaduras) que transforman los azúcares en etanol (alcohol etílico). Esta etapa de fermentación puede ser mejorada mediante técnicas de ingeniería genética y molecular aplicadas a los microorganismos, lo que optimiza la eficiencia del proceso y aumenta la cantidad de etanol producido.

Finalmente, el etanol obtenido se somete a un proceso de destilación para separar y purificar el bioetanol, obteniendo un producto de alta pureza listo para su uso como biocombustible, junto con otros productos derivados e intermedios, como la glicerina.

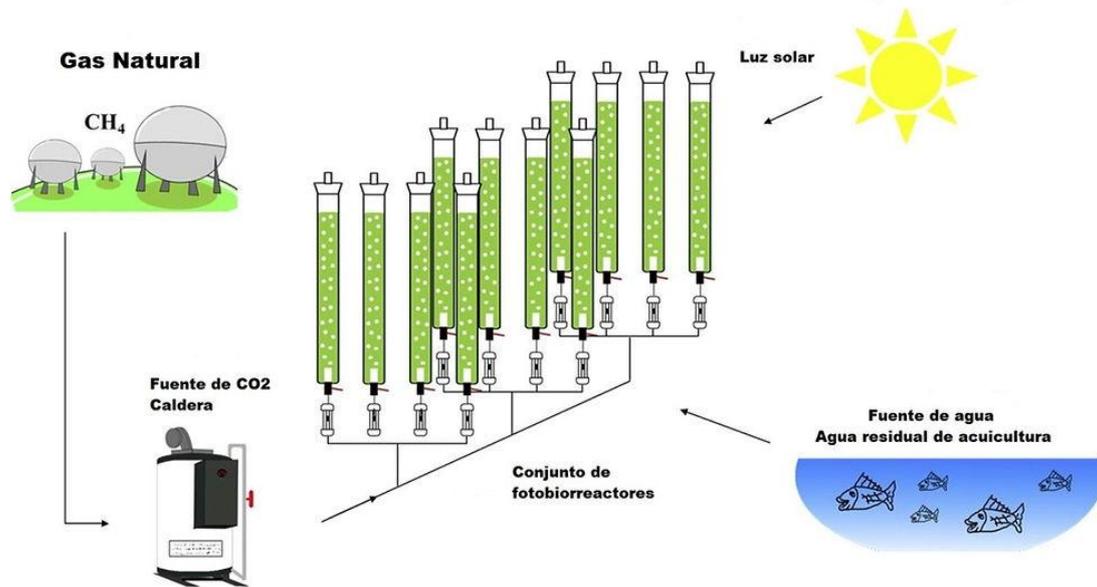
Este proceso constituye una alternativa sostenible para la producción de biocombustibles, ya que aprovecha residuos vegetales no comestibles, contribuye a la reducción de la dependencia de fuentes fósiles y permite una economía circular, aprovechando materiales que de otro modo serían desechados.

2.2.1.3 Biocombustibles de Tercera Generación

Los biocombustibles de tercera generación están basados en el uso de microalgas y microorganismos genéticamente modificados, capaces de sintetizar compuestos energéticos directamente a partir de CO₂, luz solar y nutrientes básicos. A diferencia de las generaciones anteriores, no requieren tierras agrícolas ni compiten con cultivos alimentarios, lo cual representa una ventaja significativa desde el punto de vista de la sostenibilidad global (Veillette et al., 2022).

Estos biocombustibles presentan una alta productividad por superficie y pueden cultivarse en entornos no aptos para la agricultura, como aguas residuales o ambientes salinos. Sin embargo, el costo de su producción, el escalamiento industrial y los desafíos tecnológicos asociados al cultivo, cosecha y procesamiento aún limitan su implementación comercial generalizada (Naik et al., 2021b).

Figura 7
Proceso de producción de biocombustibles de tercera generación



Nota: La imagen el proceso de producción de biocombustibles de tercera generación, elaborado por (Sinche, 2022).

2.2.1.4 Características diferenciales del biodiésel de segunda generación

El biodiésel de segunda generación representa una evolución significativa en el desarrollo de biocombustibles sostenibles, al emplear materias primas residuales y procesos tecnológicos avanzados. A continuación, se presentan sus principales características diferenciales en comparación con los biodiésel tradicionales, destacando sus beneficios ambientales, económicos y de eficiencia energética.

Tabla 3
Características del B2G

Características	Descripción	Referencias
Materia prima no comestible	Utiliza residuos agrícolas como bagazo de caña, evitando competencia con alimentos.	(Naik et al., 2021b)
Baja huella ambiental	Reduce emisiones de GEI entre 50–80% comparado con diésel fósil.	(Cherubini, 2021)
Procesos Tecnológicos avanzados	Emplea gasificación, pirólisis, transesterificación microbiana, entre otros.	(Gassner & Maréchal, 2023)
Aprovechamiento total de la biomasa	Puede integrarse a biorrefinerías con múltiples productos energéticos.	(Galbe & Zacchi, 2020)
Producción local y descentralizada	Promueve desarrollo rural al usar subproductos regionales como el bagazo.	(Sahu et al., 2021)

2.2.1.5 Diferencias entre el Biodiésel y el Bioetanol

El biodiésel y el bioetanol son los dos biocombustibles líquidos más comúnmente utilizados que sirven como sustitutos de combustibles fósiles a nivel global. Aunque ambos se producen a partir de biomasa, existen diferencias importantes en sus fuentes, procesos de producción, propiedades químicas y usos finales.

El biodiésel es un combustible renovable producido a partir de aceites vegetales o grasas animales a través de la transesterificación. Se destina principalmente como un reemplazo para el combustible diésel en motores de combustión interna. Según (Yilmaz y Korn, 2022) sugirió que los motores diésel podrían tolerar al menos algún uso de biodiésel puro (B100). Debido a su densidad energética y propiedades lubricantes, puede usarse en mezclas con diésel fósil o en su forma pura.

El bioetanol, por otro lado, se produce a partir de la fermentación de azúcares o almidones presentes en cultivos como el maíz, la caña de azúcar o residuos lignocelulósicos. Se utiliza como aditivo o sustituto de la gasolina en motores de encendido por chispa. Se

requieren cambios en el motor debido a la mayor volatilidad, menor densidad y energía del combustible en proporciones de mezcla más altas (E85 o superior) (Sims et al., 2022).

Tabla 4
Comparativa de Biodiésel y Bioetanol

Características	Biodiésel	Bioetanol
Materia prima	Aceites/grasa /residuos	Azúcares, almidón, lignocelulosa
Proceso principal	Transesterificación	Fermentación alcohólica
Uso principal	Sustituto del diésel	Sustituto de la gasolina
Motores	Diésel (compresión)	Gasolina (chispa)
Densidad energética	Alta	Menor que la gasolina
Aplicación	Transporte pesado, agrícola	Vehículos livianos

2.2.2 Biodiésel de Segunda Generación

El biodiésel de segunda generación representa una evolución tecnológica significativa frente a los biocombustibles tradicionales, al utilizar materias primas no comestibles y residuos agroindustriales, lo que mejora su perfil de sostenibilidad y reduce su impacto en la seguridad alimentaria. En países con alta producción agrícola, como Ecuador, el bagazo de caña de azúcar se perfila como una fuente clave para su producción

2.2.2.1 Características técnicas, materia prima y procesos de obtención

A diferencia del biodiésel de primera generación, que se obtiene de aceites vegetales comestibles mediante una transesterificación directa, el biodiésel de segunda generación se produce a partir de biomasa lignocelulósica o residuos agroindustriales, como el bagazo de caña, la paja de arroz o residuos forestales. Estas materias primas, al ser más complejas, requieren un proceso de conversión más elaborado. Aunque también incluye la transesterificación, este biodiésel implica pasos adicionales como el pretratamiento de la

biomasa para liberar los azúcares o aceites necesarios, lo que hace que el proceso sea más complejo en comparación con el biodiésel de primera generación

Pretratamiento del residuo (físico, químico o enzimático) para romper la estructura de la lignocelulosa.

- Fermentación microbiana de los azúcares resultantes mediante levaduras u hongos oleaginosos para generar aceites intracelulares.
- Pirólisis o gasificación, que convierten la biomasa en biocrudo o gas de síntesis, los cuales se transforman en biodiésel a través de procesos como la síntesis Fischer-Tropsch (Kumar et al., 2024)

Este tipo de biodiésel puede ser utilizado en motores diésel convencionales sin necesidad de grandes adaptaciones, y puede ser integrado a sistemas de cogeneración energética en biorrefinerías, lo que mejora la eficiencia global del proceso (Cardona et al., 2020).

2.2.2.2 Impactos ambientales, sociales y económicos

El biodiésel de segunda generación tiene un impacto positivo en el medio ambiente, ya que permite el aprovechamiento de residuos que normalmente se quemarían o desecharían. Además, se estima que su producción reduce las emisiones de CO₂ en al menos un 80% en comparación con el diésel fósil, dependiendo del proceso utilizado (Longati et al., 2023)

Desde el aspecto social, incrementa el empleo rural, la diversificación en la economía de las regiones agrícolas e integra más a las cadenas productivas locales, sin perjudicar la producción de alimentos.

En términos económicos, el reto más importante sigue siendo el costo de rápida expansión de la tecnología. Sin embargo, su competitividad frente a los combustibles fósiles aumenta con el tiempo. Especialmente si existen incentivos fiscales y créditos de carbono

siendo estos permisos negociables que permiten a las empresas emitir una cierta cantidad de gases de efecto invernadero, fomentando la reducción de emisiones (Chaudhary et al., 2021).

2.2.2.3 Enfoque en el uso de residuos lignocelulósicos (bagazo de caña)

El bagazo de caña de azúcar es uno de los residuos lignocelulósicos más abundantes en países tropicales. Su disponibilidad constante, alto contenido energético (hasta 9.000 kJ/kg en base seca) y bajo costo de recolección lo convierten en una materia prima ideal para biodiésel de segunda generación (Leiva et al., 2022)

Además, su composición rica en celulosa y hemicelulosa permite una buena conversión en azúcares fermentables, mientras que la lignina puede utilizarse como fuente de energía térmica. Esto facilita la implementación de procesos integrados y sostenibles que minimizan los residuos finales y optimizan la eficiencia energética general.

Figura 8

Bagazo de Caña de azúcar



Nota: Representación gráfica del bagazo de caña de azúcar, elaborado por (Sinche, 2022).

2.2.3 Sostenibilidad Energética

La sostenibilidad energética se refiere a la capacidad de los sistemas energéticos para satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos ni el bienestar de las futuras generaciones. En este contexto, implica la integración equilibrada de tres dimensiones fundamentales: ambiental, económica y social, promoviendo la seguridad energética, la eficiencia en el uso de los recursos, y la equidad en el acceso a la energía (IEA, 2020).

❖ Dimensión Ambiental:

Utilizar el bagazo de caña de azúcar reduce los residuos agroindustriales y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al evitar su quema y al sustituir combustibles fósiles por biodiésel. Ecuador, al aprovechar este residuo, podría mejorar su eficiencia energética y reducir su huella de carbono, como ya se hace en países como Brasil y Colombia (Naif et al., 2021).

❖ Dimensión Económica:

La producción de biodiésel a partir del bagazo permite reducir los costos de materia prima al utilizar un subproducto agrícola abundante, lo que hace el biodiésel más competitivo. Además, puede mejorar la seguridad energética de Ecuador y fomentar el desarrollo económico local mediante la reducción de la dependencia de combustibles importados (Lopez y Guamán, 2021).

❖ Dimensión Social:

La producción local de biodiésel puede generar empleos en las zonas rurales y mejorar el acceso a la energía. Siguiendo el ejemplo de Brasil y Colombia, Ecuador puede fortalecer sus comunidades rurales y promover la inclusión social a través de este modelo (Velazques, 2024).

2.2.3.1 Impactos ambientales, sociales y económicos

Desde una perspectiva sistémica, la sostenibilidad energética abarca no solo la generación y consumo responsable de energía, sino también el desarrollo de tecnologías limpias, el aprovechamiento de recursos renovables y la mitigación del impacto ambiental asociado al uso de fuentes convencionales como los combustibles fósiles.

Las energías limpias juegan un papel fundamental. Entre ellas se destacan la energía solar, que convierte la radiación del sol en electricidad mediante paneles fotovoltaicos; la energía eólica, que aprovecha la fuerza del viento para generar electricidad mediante aerogeneradores; la energía hidráulica, producida a partir del movimiento del agua; y la bioenergía, que utiliza residuos orgánicos y biomasa para producir calor, electricidad o biocombustibles como el bioetanol o el biodiésel.

Estas fuentes permiten reducir la dependencia de los combustibles fósiles, al mismo tiempo que promueven un desarrollo energético más respetuoso con el medio ambiente. Según Goldemberg (2022) un sistema energético sostenible debe:

1. Usar recursos renovables o de bajo impacto ambiental.
2. Minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero.
3. Ser accesible, asequible y justo.
4. Estimular el desarrollo económico y la inclusión social.

A continuación, se mencionan dimensiones que son interdependientes y deben abordarse de manera integrada para garantizar una transición energética justa y sostenible.

Tabla 5

Dimensiones de la sostenibilidad energética

Dimensión	Descripción
Ambiental	Se refiere al impacto del sistema energético sobre el entorno natural: Emisiones de GEI, uso del suelo, consumo de agua, residuos generados y biodiversidad.
Económica	Evalúa la viabilidad financiera y la eficiencia del sistema: Costos de producción, retorno de inversión (ROI), competitividad frente a fuentes convencionales.
Social	Considera los efectos sobre la calidad de vida de las personas: Generación de empleo, acceso a energía, impacto en comunidades rurales y salud pública.

2.2.3.2 Impacto Ambiental del Biodiésel: Comparativa de Huella de CO₂

La huella de gases de efecto invernadero (GEI) es un indicador clave para evaluar el impacto ambiental de la producción de biodiésel. En esta sección, se presenta una comparación entre la huella de CO₂ de diversas fuentes de biodiésel, con énfasis en el bagazo de caña de azúcar. Esta comparación incluye otras fuentes comunes como el aceite de soja y aceite de palma, así como el diésel fósil, para evaluar su eficiencia en términos de emisiones y sostenibilidad.

Tabla 6. Comparativa de la Huella de Gases de Efecto Invernadero

Fuente de Biocombustible	Huella de CO ₂ (gCO ₂ eq/MJ)	Reducción de GEI (%) comparado con diésel fósil	Comentarios
Biodiésel a partir de Bagazo de Caña de Azúcar	30-40 gCO ₂ eq/MJ	70-80%	Baja huella de carbono debido a que el bagazo es un residuo agrícola no destinado a la alimentación y no requiere tierra adicional para su cultivo.
Biodiésel a partir de Aceite de Soja	50-60 gCO ₂ eq/MJ	50-60%	Requiere tierras agrícolas, lo que aumenta la huella de carbono debido a la deforestación y el cambio de uso de suelo.
Biodiésel a partir de Aceite de Palma	55-65 gCO ₂ eq/MJ	40-50%	Similar al de la soja, la producción de aceite de palma está asociada con deforestación y otros impactos ambientales.

Biodiésel de Primera Generación (general)	60-70 gCO ₂ eq/MJ	40-50%	Generalmente tiene mayor impacto debido al uso de cultivos alimentarios y la competencia por tierras.
Diésel Fósil	85-95 gCO ₂ eq/MJ	0%	Emisiones de GEI altas debido a la extracción y uso de combustibles fósiles.

Biodiésel a partir de Bagazo de Caña de Azúcar: La huella de CO₂ es baja debido a la utilización de un residuo agrícola (bagazo) que no requiere nuevas tierras cultivables y evita la competencia con la producción de alimentos. Además, al ser un proceso de segunda generación, se generan menores emisiones indirectas de GEI comparado con los biocombustibles de primera generación. (Cherubini, 2021).

2.2.3.3 Criterios de evaluación de sostenibilidad de biocombustibles

Para evaluar la sostenibilidad de los biocombustibles, especialmente los de segunda generación, se han propuesto diversos criterios e indicadores internacionales. A continuación, se presenta una tabla resumen con los principales criterios por dimensión:

Tabla 7
Criterios de sostenibilidad aplicables a biocombustibles

Dimensión	Criterios de Evaluación
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) - Uso eficiente y responsable del recurso hídrico - Conservación del suelo, biodiversidad y ecosistemas - No competencia con cultivos destinados a la alimentación - Gestión sostenible de residuos y subproductos
Social	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de empleo digno a nivel local - Participación e inclusión de comunidades rurales - Mejora en el acceso y seguridad energética - Respeto y garantía de condiciones laborales justas - Contribución al desarrollo social y territorial
Económica	<ul style="list-style-type: none"> - Costo competitivo de producción por unidad (litro) - Rentabilidad económica del proyecto (ROI, VAN, TIR) - Fiabilidad y estabilidad en el suministro de materia prima - Existencia de incentivos fiscales, subsidios o políticas de apoyo - Potencial de escalabilidad y replicabilidad del modelo

Estos criterios son utilizados por organismos como la International Sustainability and Carbon Certification (ISCC), la Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) y por agencias gubernamentales al momento de aprobar proyectos bioenergéticos o establecer políticas de incentivos.

En el caso del biodiésel de segunda generación a partir de bagazo de caña, estos criterios permiten demostrar su viabilidad integral como biocombustible sostenible, al basarse en una materia prima residual, reducir las emisiones netas y promover el desarrollo rural sin competir con la agricultura alimentaria (Cherubini, 2021).

2.2.4 Rentabilidad

La rentabilidad es un indicador clave de la eficiencia económica y financiera de un proyecto o inversión. Se refiere a la capacidad de generar beneficios en relación con los costos incurridos. En el ámbito de los biocombustibles, la rentabilidad es fundamental para evaluar la viabilidad a largo plazo de la producción, considerando factores como los costos de producción, el retorno de inversión (ROI), y la capacidad de generar ingresos sostenibles.

A continuación, la siguiente tabla menciona los indicadores claves que deben ser considerados que permitirán evaluar la viabilidad en la producción

Tabla 8
Indicadores claves

Indicador	Descripción	Como se mide	Referencia
Costos de producción	Incluye materias primas (bagazo de caña), conversión, infraestructura, mano de obra y operativos. La Optimización es clave para competir.	Cálculo total de los costos asociados, considerando cada etapa de la cadena de valor.	(Osman et al., 2024)

Retorno de inversión (ROI)	Mide la rentabilidad comparando ganancias con inversión inicial. Fluctuaciones de precios e incentivos fiscales afectan este indicador.	$ROI = (\text{Ganancias netas} / \text{Inversión inicial}) * 100.$	(María et al., 2020)
Viabilidad comercial	Capacidad para competir en mercados internacionales, influenciada por la demanda global de biocombustibles y políticas ambientales.	Análisis de mercado, proyección de demanda y evaluación de políticas gubernamentales.	(Reyes et al., 2021)

2.2.4.1 Aplicación al caso del biodiésel derivado del bagazo

En Ecuador, el biodiésel derivado del bagazo de caña presenta ventajas en términos de costos de producción y sostenibilidad. Utilizando este subproducto agrícola, los costos iniciales de materia prima se reducen considerablemente en comparación con otras fuentes de biodiésel como el aceite de palma. Sin embargo, la viabilidad comercial dependerá de la eficiencia en el proceso de conversión y la competitividad en mercados internacionales, donde se enfrentará a productos de países con infraestructura más avanzada, como Brasil, Perú y Colombia (Barón et al., 2023)

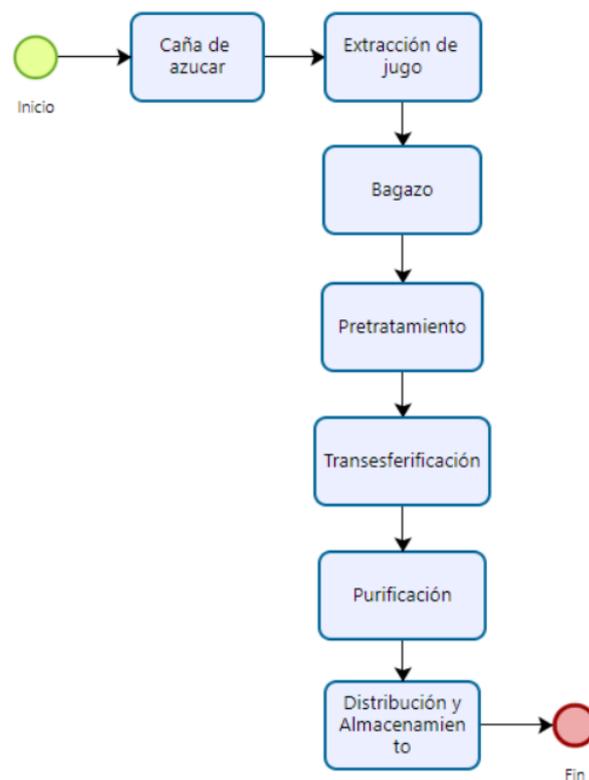
En términos de ROI, los proyectos piloto en Ecuador han demostrado un retorno positivo, aunque a un ritmo más lento debido a los costos asociados con la investigación y el desarrollo (Reyes et al., 2021). La implementación de políticas públicas de apoyo, como incentivos fiscales y subsidios, podría mejorar sustancialmente los márgenes de rentabilidad, permitiendo que el biodiésel de segunda generación sea una opción económicamente viable a largo plazo.

2.2.4 Ciclo de Vida del Biodiésel

El ciclo de vida del biodiésel abarca todas las etapas que van desde la obtención de las materias primas hasta su disposición final, pasando por el proceso de producción y distribución. Este ciclo de vida es esencial para comprender los impactos ambientales y las oportunidades de mejora en la sostenibilidad del biodiésel.

Figura 9

Ciclo de vida del Biodiésel



Nota: Ciclo de vida del Biodiésel, elaborado por (Sinche, 2022).

1. **Extracción de jugo:** Esta fase corresponde a la obtención de los compuestos líquidos presentes en el bagazo de caña de azúcar, que pueden incluir azúcares residuales, lípidos y otros extractos solubles. Aunque el bagazo es un subproducto fibroso con bajo contenido lipídico directo, puede procesarse para liberar aceites o precursores de ácidos grasos útiles en la producción de biodiésel. La extracción puede realizarse mediante métodos mecánicos (como prensado o molienda),

térmicos (aplicación de calor para facilitar la liberación de compuestos) o enzimáticos (uso de enzimas para descomponer las estructuras lignocelulósicas y liberar los compuestos deseados). El líquido resultante sirve como base para las etapas posteriores del proceso, incluyendo el pretratamiento y la transesterificación.(Pan et al., 2022).

2. **Bagazo:** El bagazo, o residuo fibroso que queda después de la extracción del jugo, puede ser utilizado como material secundario para la producción de energía o como materia prima para la producción de biodiésel. Aunque se considera un residuo, su aprovechamiento es clave en un ciclo de vida más sostenible.(Gebremariam & Marchetti, 2022).
3. **Pretratamiento:** Antes de realizar la transesterificación, los aceites obtenidos a partir del bagazo de caña de azúcar (ya sea por extracción directa o conversión termoquímica) deben pasar por un proceso de pretratamiento. Este consiste en la eliminación del agua residual, que puede afectar negativamente la eficiencia de la reacción, y la remoción de ácidos grasos libres (AGL), cuya presencia en exceso puede provocar la formación de jabones durante la transesterificación. Además, se realiza la filtración de impurezas sólidas, como residuos lignocelulósicos o cenizas resultantes de procesos térmicos previos. Este paso es fundamental para garantizar una reacción más eficiente y obtener un biodiésel de mayor pureza y calidad.(Fernandez et al., 2024)
4. **Transesterificación:** Es la reacción central en la producción de biodiésel, donde los triglicéridos presentes en los aceites reaccionan con un alcohol (como metanol o etanol), utilizando un catalizador (sustancia que acelera la reacción), para formar biodiésel y glicerina como subproducto. Esta etapa determina en gran medida la calidad y pureza del biodiésel obtenido.(Velazques, 2024)

5. **Purificación:** Tras la transesterificación, el biodiésel crudo debe someterse a un proceso de purificación para eliminar subproductos como la glicerina, restos de catalizadores, alcoholes no reaccionados y otros contaminantes. Esta etapa es crucial para obtener un biodiésel que cumpla con los estándares de calidad internacionales, como la norma ASTM D6751 o la EN 14214. (Saka y Kusdiana, 2021).
6. **Distribución y almacenamiento:** Finalmente, el biodiésel purificado es almacenado y distribuido a los mercados. Es esencial garantizar que el biodiésel se almacene en condiciones adecuadas para evitar la degradación por factores como la humedad o la exposición a la luz. Además, la distribución debe ser eficiente para asegurar que llegue a los puntos de consumo. (Velazques, 2024)

2.2.5 Comparativo de Costos de Producción, Eficiencia del Proceso y Consumo de Energía Eléctrica en la Producción de Biodiésel

Para realizar un comparativo entre la producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar y otros procesos similares (por ejemplo, utilizando aceite vegetal o algas), se deben tener en cuenta tres aspectos clave: costos de producción, eficiencia del proceso y consumo de energía eléctrica.

1. Costos de Producción

Los costos de producción pueden variar significativamente dependiendo del tipo de materia prima utilizada, los equipos involucrados y la escala de producción. A continuación, se muestra un desglose comparativo:

1. Biodiésel a partir de bagazo de caña de azúcar:

Materia prima: El bagazo es un subproducto de la industria azucarera, lo que significa que tiene un costo relativamente bajo o incluso puede ser un residuo gratuito, dependiendo de la ubicación.

Procesamiento: Para convertir el bagazo en biodiésel, primero se necesita una etapa de extracción de los azúcares o aceites contenidos en el material. Esto puede implicar procesos como la hidrólisis o el uso de enzimas.

Costos adicionales: Equipos especializados, como reactores de transesterificación y sistemas de purificación.

Estimación de costos: Dependiendo de la escala, el costo por litro de biodiésel puede estar en el rango de 0.6 a 1.2 USD/litro (Espinel, 2021)

2. Biodiésel a partir de aceite vegetal (soja, palma, canola, etc.):

Materia prima: El aceite vegetal es más caro que el bagazo de caña, ya que se cultiva específicamente para la extracción del aceite.

Procesamiento: La transesterificación directa de los aceites vegetales es más eficiente que la conversión de bagazo, pero requiere materias primas más caras.

Costos adicionales: Similar a los de la producción a partir de bagazo, pero con mayor inversión en la compra de la materia prima.

Estimación de costos: El costo por litro puede oscilar entre 1.2 a 1.8 USD/litro (Bajpai, 2020).

3. Biodiésel a partir de algas:

Materia prima: La producción de algas para biodiésel implica un cultivo controlado que puede ser costoso debido a la necesidad de espacio, nutrientes y condiciones controladas.

Procesamiento: La extracción de lípidos de las algas y la posterior transesterificación requieren tecnología avanzada.

Costos adicionales: Alto costo de cultivo y procesamiento, aunque los costos de la materia prima pueden bajar con la mejora de las técnicas de cultivo.

Estimación de costos: El costo por litro puede superar los 2.0 USD/litro, principalmente debido a los altos costos de cultivo y cosecha.

2. Eficiencia del Proceso

La eficiencia de los procesos de producción de biodiésel se refiere al rendimiento en la conversión de la materia prima en biodiésel y su calidad.

1. Biodiésel a partir de bagazo de caña de azúcar:

Eficiencia de conversión: El bagazo contiene azúcares y fibras que deben ser tratados para liberar aceites o azúcares que puedan ser fermentados. La eficiencia del proceso puede ser baja debido a la naturaleza compleja de la materia prima (Bajpai, 2020).

Rendimiento de biodiésel: Puede ser más bajo en comparación con otras materias primas, especialmente debido a la necesidad de extraer los compuestos antes de la transesterificación.

2. Biodiésel a partir de aceite vegetal:

Eficiencia de conversión: La transesterificación de aceites vegetales es bastante eficiente, con una alta tasa de conversión de aceites en biodiésel (Bajpai, 2020).

Rendimiento de biodiésel: Más eficiente, con rendimientos cercanos al 95% de la masa de aceite convertido en biodiésel.

3. Biodiésel a partir de algas:

Eficiencia de conversión: Alta eficiencia teórica, pero depende del tipo de alga y las técnicas de extracción utilizadas. Algunas algas tienen un alto contenido de lípidos, lo que aumenta la eficiencia del proceso.

Rendimiento de biodiésel: Puede ser alto, pero la dificultad y el costo de cultivo reducen la viabilidad comercial.

3. Consumo de Energía Eléctrica

El consumo de energía eléctrica depende de las etapas de procesamiento y de la eficiencia de los sistemas utilizados.

1. Biodiésel a partir de bagazo de caña de azúcar:

Procesamiento: El bagazo requiere un pretratamiento (hidrólisis o extracción de azúcares) que puede consumir una cantidad significativa de energía. La transesterificación también requiere calor.

Consumo de energía: Moderado, ya que la conversión del bagazo puede implicar etapas más complejas y equipos que demandan energía (Zhang et al., 2021).

2. Biodiésel a partir de aceite vegetal:

Procesamiento: La transesterificación de aceites vegetales es menos energética que los procesos que requieren pretratamientos complejos, pero aun así demanda energía para el calentamiento y agitación.

Consumo de energía: Bajo a moderado, dado que el proceso es más directo y menos intensivo en energía en comparación con el uso de bagazo.

3. Biodiésel a partir de algas:

Procesamiento: El cultivo de algas es energéticamente costoso, especialmente en sistemas de cultivo en condiciones controladas. Además, la extracción de lípidos requiere un alto consumo de energía.

Consumo de energía: Alto, debido al cultivo intensivo y a los procesos de extracción y transesterificación de los lípidos de las algas .

A continuación, la siguiente tabla muestra el resumen de la comparativa de Costos de Producción, Eficiencia del Proceso y Consumo de Energía Eléctrica en la Producción de Biodiésel

Tabla 9
Resumen de comparativa de producción de Biodiésel

Aspecto	Biodiésel a partir de Bagazo de Caña de Azúcar	Biodiésel a partir de Aceite Vegetal	Biodiésel a partir de Algas
Costos de Producción	Bajo costo de materia prima (bagazo residual), pero costos de procesamiento moderados.	Costos más altos por la compra de aceite vegetal como materia prima.	Altos costos debido a la producción controlada de algas y la extracción de lípidos.
Eficiencia del Proceso	Baja eficiencia de conversión debido a la complejidad del material (pretratamiento necesario).	Alta eficiencia de conversión con un rendimiento cercano al 95%.	Eficiencia teórica alta, pero dependiente del tipo de alga y tecnología de extracción.
Consumo de Energía Eléctrica	Consumo moderado de energía debido a los procesos de extracción y transesterificación.	Consumo de energía bajo a moderado debido a la simplicidad del proceso de transesterificación.	Alto consumo de energía debido al cultivo controlado y la extracción de lípidos.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Evaluación técnica del uso del bagazo

Diversos estudios han evaluado el potencial técnico del bagazo de caña de azúcar como materia prima alternativa para la producción de biodiésel. Esta biomasa lignocelulósica, generada como subproducto de la industria azucarera, ha despertado interés por su abundancia, bajo costo y por tratarse de un residuo agroindustrial disponible en grandes volúmenes, especialmente en países tropicales.

De la misma manera en la investigación realizada por Olivieri (2023) se emitió análisis técnico económico en el que se evaluó el uso del bagazo de caña para la producción de biodiésel. Su estudio concluye que, aunque el contenido lipídico del bagazo es bajo en comparación con otras fuentes vegetales, su alta disponibilidad y bajo coste logístico lo hacen viable en esquemas de economía circular. Además, destacaron que con un pretratamiento adecuado se puede mejorar el rendimiento de extracción de compuestos útiles para la transesterificación.

Por su parte, Ojeda (2021) realizó un estudio experimental en el que se utilizó solventes orgánicos como hexano para evaluar la posibilidad de recuperar compuestos lipídicos presentes en el bagazo de caña de azúcar. Aunque este residuo lignocelulósico no posee un contenido graso elevado, los autores demostraron que es posible extraer fracciones lipídicas en cantidades aprovechables para la producción de biodiésel. Sin embargo, también señalaron que el rendimiento de extracción está altamente condicionado por el tipo de pretratamiento aplicado al bagazo y por el método de extracción empleado.

En esa línea, Sinche, (2022) evaluaron diferentes métodos de pretratamiento físico y químico del bagazo con el fin de mejorar la eficiencia de la extracción de aceites. Su investigación demostró que los tratamientos térmicos, así como los pretratamientos con enzimas, permitieron romper la estructura fibrosa de la biomasa, facilitando la liberación de compuestos grasos. Este paso es fundamental para aumentar el rendimiento en la etapa de transesterificación.

A nivel de reacción, Hidayat (2021) investigaron la eficiencia de distintos catalizadores (homogéneos y heterogéneos) en la etapa de transesterificación aplicada al bagazo de caña de azúcar. Los resultados indicaron que los catalizadores heterogéneos, especialmente aquellos basados en óxidos metálicos, lograron una conversión más eficiente hacia ésteres metílicos

(biodiésel). Además, ofrecieron ventajas en términos de recuperación y reutilización del catalizador, lo que reduce los costos operativos y mejora la sostenibilidad del proceso.

Además, Nasri (2025) menciona que el biodiésel producido a partir del bagazo de caña de azúcar tiene un impacto ambiental significativamente menor que el de los biodiésels provenientes de cultivos oleaginosos como la soja o el girasol. Esto se debe a que el bagazo es un residuo agrícola que no requiere tierras adicionales ni contribuye a la deforestación. Además, el uso de bagazo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la demanda de recursos naturales. El proceso es más eficiente en términos de agua y energía, lo que reduce la huella ambiental general en comparación con los cultivos oleaginosos

Finalmente, (Rebramarían & Marchetti, 2022) en su revisión clásica sobre la producción de biodiésel, mencionan al bagazo como un ejemplo representativo de cómo los residuos agroindustriales pueden integrarse en cadenas de valor bioenergéticas, minimizando la competencia con cultivos alimentarios y reduciendo los costos asociados a la materia prima.

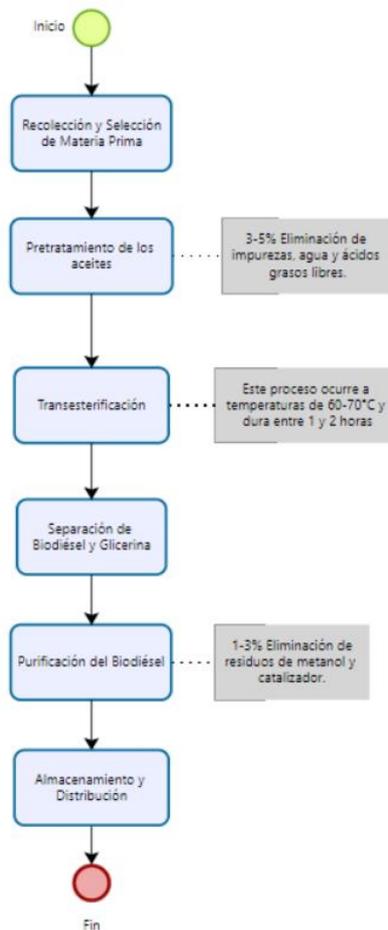
A continuación, se describen algunas de las empresas ecuatorianas mencionadas en Consejo empresarial para el desarrollo sostenible del Ecuador (2021) que se encuentran en proceso de implementar proyectos para la producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar. Estas iniciativas ayudan a diversificar las fuentes energéticas, promueven el aprovechamiento de los residuos agroindustriales y mejoran la sostenibilidad del sector energético nacional. La implementación de tecnologías de biomasa residual, como el bagazo, constituye una oportunidad para impulsar el desarrollo de biocombustibles, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y fortalecer la economía del país.

1. La Fabril

Ubicación: Guayaquil, Ecuador

Descripción del proceso: La Fabril es una empresa ecuatoriana especializada en la fabricación de grasas, aceites, oleo químicos y biocombustibles. En el ámbito de la producción de biodiésel, la empresa utiliza aceites vegetales como materia prima para la obtención de un biocombustible alternativo que puede mezclarse con diésel en distintas proporciones.

Figura 10
Proceso General de Producción de Biodiésel de La Fabril



2. Biopower Ecuador

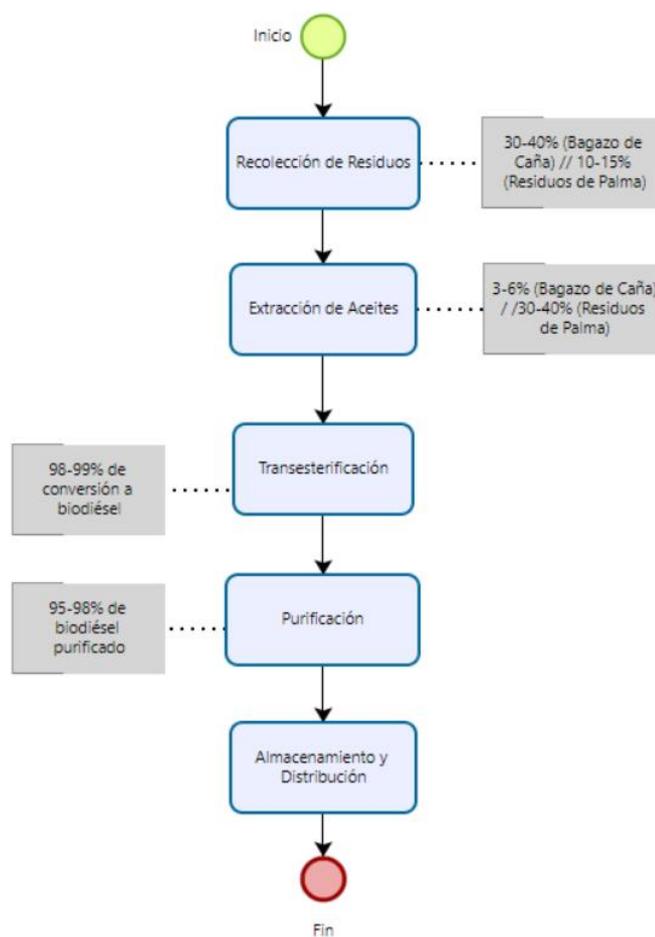
Ubicación: Guayaquil, Ecuador

Descripción del proceso: Esta empresa trabaja en la producción de biocombustibles y energía a partir de residuos agrícolas, especialmente caña de azúcar y palma de aceite. Esta

empresa también está involucrada en la producción de biodiésel a partir de aceites residuales y otras fuentes que incluyen bagazo de caña de azúcar.

Figura 11

Proceso General de Producción de Biodiésel de Biopower Ecuador

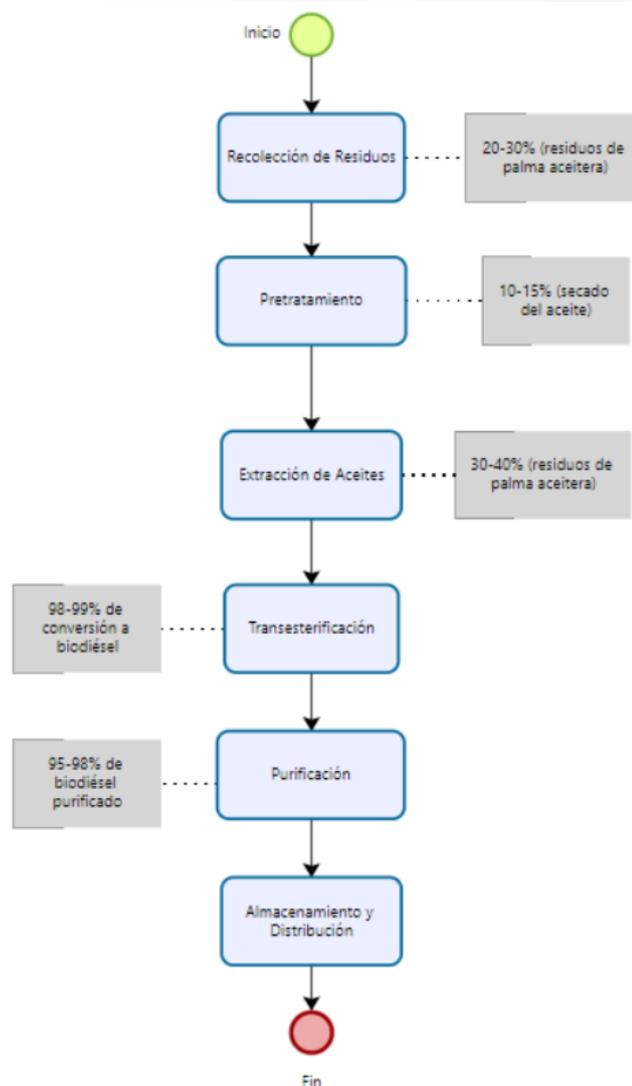


3. Industrias Oleaginosas Ecuatorianas (INEN ECUADOR)

Ubicación: Machala, Ecuador

Descripción del proceso: INENECUADOR produce biodiésel principalmente a partir de aceites vegetales reciclados y otros subproductos agrícolas. Su enfoque incluye el aprovechamiento de aceites vegetales no comestibles y residuos agrícolas para la creación de biocombustibles.

Figura 12
Proceso General de Producción de Biodiésel de INENECUADOR



2.3.2 Viabilidad del Biodiésel en Ecuador

La producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar en Ecuador es una opción viable debido a la alta disponibilidad de este subproducto agrícola, especialmente en zonas cañeras como Guayas y Los Ríos. El costo estimado de producción es de aproximadamente 1.90 USD/galón, lo que lo hace competitivo frente a los combustibles fósiles, especialmente si se optimizan procesos y se aprovechan productos como la glicerina. Además, esta alternativa contribuye a la sostenibilidad energética y la reducción de emisiones, sin comprometer la seguridad alimentaria del país. (Dauriat & Wyman, 2021).

2.3.3 Potencial de producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar en países seleccionados (Ecuador, Colombia, Perú y Brasil)

Tabla 10
Potencial de producción de biodiésel

País	Área cultivada de caña de azúcar (ha)	Producción estimada de caña (toneladas)	Producción estimada de bagazo (toneladas)	Rendimiento estimado de biodiésel (litros/tonelada de bagazo)	Producción potencial de biodiésel (litros)
Ecuador	110	6,304,100	1,576,025	80–120	126,082,000 – 189,123,000
Perú	110	6,304,100	1,576,025	80–120	126,082,000 – 189,123,000
Colombia	222,4	12,748,800	3,187,200	80–120	254,976,000 – 382,464,000
Brasil	6,200,000	418,000,000	104,500,000	80–120	8,360,000,000 – 12,540,000,000

Nota: Los datos presentados fueron estimados con base en fuentes oficiales y técnicas disponibles hasta el año 2020. La producción de caña de azúcar, superficie cultivada y rendimientos fueron tomados de las siguientes referencias: (Sector agroindustrial de la caña, 2020),(Banco Central de Reserva del Perú, 2020),(CINCAE, 2021)

La tabla anterior presenta una estimación comparativa del potencial de producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar en países seleccionados de América del Sur. Se evidencia que Brasil y Colombia poseen la mayor capacidad instalada debido a su extensa área cultivada y volumen de caña procesada, lo cual se traduce en una alta disponibilidad de bagazo.

En el caso de Ecuador y Perú, aunque su superficie de cultivo es menor, el bagazo representa una fuente valiosa y subutilizada para la generación de biocombustibles. Estos datos reflejan que existe un margen significativo para el desarrollo de políticas que promuevan el aprovechamiento del bagazo de caña como materia prima alternativa para la producción sostenible de biodiésel, ayudando así a diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

2.3.4 Comparativa de costo de Producción de Biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar

El bagazo de caña de azúcar, al ser un subproducto abundante de la industria azucarera, representa una materia prima prometedora para la producción sostenible de biodiésel. A continuación, se presenta una estimación comparativa de los costos por galón de biodiésel producido a partir de este residuo en distintos países de América Latina, considerando cada una de las etapas clave del proceso productivo.

Tabla 11
Comparativa de costos de Producción

País	Materia Prima (USD/gal)	Pretratamiento (USD/gal)	Producción (Fermentación y Transesterificación) (USD/gal)	Energía y Servicios (USD/gal)	Mano de Obra y Mantenimiento (USD/gal)	Costo Total (USD/gal)
Ecuador	0.30	0.40	0.65	0.25	0.30	1.90
Perú	0.32	0.42	0.70	0.27	0.33	2.04
Colombia	0.28	0.38	0.60	0.23	0.28	1.77
Brasil	0.25	0.35	0.58	0.22	0.25	1.65

Nota: Los datos presentados fueron estimados con base en fuentes oficiales y técnicas disponibles hasta el año 2020, fueron tomadas de las siguientes referencias: (Pan et al., 2022b), (Barrientos, 2024),

Los valores mostrados en la tabla reflejan una estimación de los costos por galón de biodiésel producido a partir del bagazo de caña de azúcar en Ecuador, Perú, Colombia y Brasil. Si bien el bagazo es un subproducto de la industria azucarera y, por tanto, su costo de adquisición puede ser bajo o incluso nulo, su aprovechamiento para biocombustibles implica una serie de procesos técnicos que impactan directamente en el costo final del biodiésel.

Las diferencias entre países se deben a múltiples factores como: la infraestructura tecnológica disponible, el costo de la energía, la eficiencia en los procesos de fermentación y transesterificación, así como los costos de mano de obra y logística. Brasil y Colombia presentan los costos más competitivos, en parte debido a su experiencia consolidada en la industria de los biocombustibles y a las políticas públicas de fomento al desarrollo de energías renovables.

Estos costos pueden reducirse aún más si se optimizan procesos o se implementan economías de escala. Además, es importante tener en cuenta que la valorización de subproductos como la glicerina, o el uso de tecnologías integradas en biorrefinerías, puede mejorar significativamente la rentabilidad del biodiésel obtenido a partir del bagazo de caña de azúcar.

2.3.5 Comparativa de Consumo Energético Estimado por Galón de Biodiésel (MJ/gal)

El proceso de producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar implica diversas etapas que requieren un consumo energético significativo, principalmente en el pretratamiento de la biomasa, la conversión de azúcares mediante fermentación, y la transesterificación.

A continuación, se presenta una estimación del consumo energético total por galón de biodiésel para algunos países mismos que fueron previamente mencionados, considerando condiciones tecnológicas y operativas típicas de cada contexto.

Tabla 12
Comparativa de consumo energético

País	Pretratamiento (MJ/gal)	Fermentación (MJ/gal)	Transesterificación (MJ/gal)	Energía Total Estimada (MJ/gal)
Ecuador	14.0	8.5	5.5	28.0
Perú	15.2	8.8	5.7	29.7
Colombia	13.5	8.2	5.3	27.0
Brasil	12.8	7.9	5.0	25.7

La tabla presenta el consumo energético estimado, en megajulios por galón (MJ/gal), requerido en cada una de las principales etapas del proceso de producción de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar en cuatro países latinoamericanos: Ecuador, Perú, Colombia y Brasil. Las tres etapas consideradas son:

- ❖ **Pretratamiento:** incluye operaciones como trituración, secado y procesos fisicoquímicos para facilitar la conversión de la biomasa.
- ❖ **Fermentación:** transformación de los azúcares liberados en bioetanol o intermediarios que luego se procesan.
- ❖ **Transesterificación:** reacción química final para obtener biodiésel a partir de los componentes fermentados.

Se observa que Brasil presenta el consumo energético total más bajo (25.7 MJ/gal), lo cual se asocia a un mayor grado de tecnificación y eficiencia en los procesos industriales. Por otro lado, Perú muestra el valor más alto (29.7 MJ/gal), posiblemente debido a mayores requerimientos energéticos en el pretratamiento del bagazo y tecnologías menos optimizadas.

Estos valores reflejan la importancia de modernizar los procesos y adoptar tecnologías energéticamente más eficientes para reducir los costos operativos y mejorar la sostenibilidad del biodiésel en la región.

CAPITULO 3

3 DISEÑO METODOLÓGICO

El presente capítulo expone la metodología aplicada en esta investigación, cuyo objetivo es analizar comparativamente el ciclo de vida del biodiésel de segunda generación (B2G), producido a partir del bagazo de caña de azúcar, en el contexto ecuatoriano frente a experiencias desarrolladas en países de América Latina.

La investigación se sustenta en un enfoque cualitativo con diseño no experimental y de tipo documental, orientado a la revisión sistemática de literatura científica, técnica y fuentes oficiales. Se recopila y analiza información secundaria que permita evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso del bagazo de caña como materia prima para la producción de biodiésel.

La elección de esta metodología responde a la necesidad de realizar un análisis integral de casos regionales comparables, identificando buenas prácticas, barreras y condiciones clave para la implementación del B2G en Ecuador. Este enfoque también permite examinar críticamente los marcos regulatorios, tecnologías empleadas y criterios de sostenibilidad aplicados en países con mayor trayectoria en biocombustibles.

3.1 Tipo y Diseño de Investigación

La presente investigación se enmarca en un enfoque cualitativo con un diseño descriptivo, comparativo y de revisión sistemática, orientado a examinar la viabilidad técnica, económica y ambiental del biodiésel de segunda generación (B2G) producido a partir del bagazo de caña de azúcar en Ecuador, en contraste con experiencias documentadas en países como Brasil, Colombia y Perú.

Se trata de un estudio de carácter documental y bibliográfico, fundamentado en la recopilación y análisis de fuentes secundarias científicas, técnicas y oficiales con el objetivo

de construir una visión integral sobre el ciclo de vida del B2G. Este diseño metodológico permite caracterizar las etapas del proceso productivo, identificar barreras y oportunidades, y establecer comparaciones con otros contextos latinoamericanos que han avanzado en la valorización energética de residuos agroindustriales.

Dado que en Ecuador el uso del bagazo de caña como insumo para biocombustibles aún se encuentra en fases exploratorias, se adopta un enfoque exploratorio, necesario para establecer el estado del arte, reconocer los factores limitantes y proponer rutas de implementación futura.

La investigación aplica los principios de la **norma ISO 14040** para el análisis del ciclo de vida (ACV), permitiendo evaluar de forma estructurada los impactos ambientales desde la recolección de materia prima hasta su conversión y uso final. Esta metodología aporta validez técnica al estudio, al estar respaldada por estándares internacionales ampliamente aceptados en evaluaciones ambientales.

Asimismo, la revisión se guió por los lineamientos del método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses), el cual establece un protocolo transparente y replicable para la selección, análisis y síntesis de literatura científica. Se definieron criterios de búsqueda, inclusión y exclusión, operadores booleanos y filtros temáticos y temporales, lo que permite asegurar la pertinencia y confiabilidad de las fuentes.

El período de análisis comprendió estudios publicados entre 2020 y 2025, garantizando así la actualidad y relevancia de los datos examinados. Todas las fuentes fueron seleccionadas con base en su rigurosidad científica o técnica, excluyendo publicaciones sin respaldo metodológico comprobado, blogs o documentos no indexados.

En conjunto, esta metodología aporta solidez al análisis comparativo propuesto, al integrar un enfoque riguroso de revisión documental, normas internacionales para evaluación ambiental y criterios estructurados de validez y confiabilidad.

3.2 Población y muestra

La población de este estudio está conformada por un conjunto amplio y diverso de documentos especializados vinculados con la producción de biodiésel de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica, en particular el bagazo de caña de azúcar. Esta población incluye:

1. Artículos científicos indexados en bases de datos reconocidas como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar.
2. Publicaciones académicas como tesis, libros, informes técnicos y memorias científicas relacionadas con bioenergía y sostenibilidad.
3. Reportes oficiales sobre políticas públicas, normativas ambientales, marcos regulatorios y planes energéticos nacionales.
4. Estudios de caso que documentan experiencias en la implementación de proyectos de biodiésel de segunda generación, con énfasis en el uso de residuos agrícolas como el bagazo de caña.

La muestra se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, atendiendo a los siguientes criterios:

1. Relevancia temática, centrada en publicaciones que aborden el ciclo de vida, la rentabilidad, la sostenibilidad o el impacto ambiental del biodiésel B2G.
2. Vigencia temporal, considerando estudios publicados entre 2020 y 2025, a fin de garantizar la actualidad de los datos.

3. Rigurosidad científica o técnica, validada mediante la procedencia de fuentes académicas indexadas o instituciones reconocidas del ámbito energético y ambiental.

La comparación se enfocó en cuatro países con trayectoria o potencial relevante en la producción de biocombustibles: Ecuador, Brasil, Colombia y Perú. Estos fueron seleccionados por su peso regional, su producción significativa de caña de azúcar, y su nivel de avance (o desafíos) en políticas públicas, marcos regulatorios y tecnologías aplicadas al desarrollo de biocombustibles de segunda generación.

3.3 Métodos, Técnicas e instrumentos

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon métodos de carácter teórico, analítico y comparativo, orientados a la exploración, selección y evaluación crítica de información secundaria relevante sobre el ciclo de vida del biodiésel de segunda generación (B2G) producido a partir del bagazo de caña de azúcar.

A continuación, se describen los principales métodos y técnicas utilizados:

a) Método Teórico: Análisis Documental

Se aplicó una revisión sistemática de literatura científica, técnica y oficial relacionada con la producción y evaluación del B2G, siguiendo el enfoque PRISMA. Esta revisión abarcó temas como:

- Procesos de pretratamiento, fermentación y transesterificación.
- Rendimiento energético y productivo por tonelada de bagazo.
- Costos de producción, consumo energético y emisiones de GEI.
- Políticas públicas, normativas y marcos regulatorios vinculados a biocombustibles.

Este análisis permitió construir una base conceptual sólida, identificar patrones comunes y contrastar modelos existentes en contextos latinoamericanos.

b) Método Analítico Comparativo

Se aplicó un análisis comparativo transversal entre los países seleccionados: Ecuador, Brasil, Colombia y Perú, a partir de variables técnicas, económicas y normativas. Entre los principales indicadores analizados se incluyen:

- Costos por litro de producción de biodiésel.
- Infraestructura tecnológica disponible para el procesamiento del bagazo.
- Marco legal e incentivos públicos para el desarrollo de biocombustibles.
- Reducción estimada de emisiones y potencial de producción por país.

Este enfoque permitió evidenciar brechas y oportunidades estratégicas para el caso ecuatoriano, orientando posibles rutas de implementación del B2G con base en experiencias exitosas regionales.

Instrumentos utilizados

- Matrices de extracción de datos para sistematizar información técnica y comparativa.
- Bases de datos académicas como Scopus, ScienceDirect, Google Scholar y SpringerLink.
- Normas ISO, en particular la ISO 14040 para la estructura del Análisis de Ciclo de Vida.

3.4 Procesamiento estadístico de la información

La información recopilada fue organizada de forma temática y procesada mediante un enfoque de análisis cualitativo y técnico comparativo, con el propósito de identificar patrones, contrastes y tendencias entre los países seleccionados (Ecuador, Brasil, Colombia y Perú). Este análisis se centró en variables clave relacionadas con el ciclo de vida del biodiésel de segunda generación (B2G), tales como:

- Costos estimados de producción por litro o galón de biodiésel.
- Rendimientos energéticos promedio por tonelada de bagazo de caña.
- Consumo energético por etapa del proceso, incluyendo pretratamiento, conversión y transesterificación.
- Superficie cultivada y volumen estimado de biomasa disponible en cada país.

Para la sistematización de los datos se emplearon matrices de comparación elaboradas en Microsoft Excel, que facilitaron la clasificación y análisis por dimensión (económica, técnica y ambiental). Asimismo, se generaron gráficos comparativos y visualizaciones que facilitaron la interpretación de los resultados y la comunicación efectiva de las diferencias entre los contextos evaluados.

Complementariamente, se utilizó el software IBM SPSS Statistics para realizar un tratamiento estadístico descriptivo de los datos técnicos recopilados. Las técnicas aplicadas incluyeron:

- Media aritmética
- Porcentaje
- Rango
- Desviación estándar

Este procesamiento permitió estandarizar la información, reforzar la validez de las comparaciones y representar los indicadores clave de forma homogénea entre los países analizados. Aunque el enfoque central del estudio es cualitativo, este tratamiento estadístico descriptivo aportó mayor precisión al análisis técnico de los datos secundarios utilizados.

CAPITULO 4

4 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de Resultados

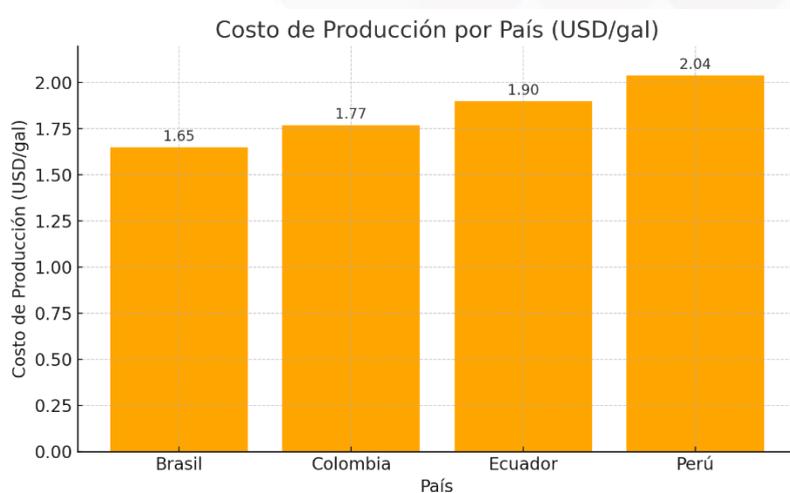
En esta sección se interpretan los resultados obtenidos del análisis documental y comparativo del ciclo de vida del biodiésel de segunda generación (B2G) en Ecuador, en relación con países como Brasil, Colombia y Perú. El análisis considera las dimensiones ambiental, económica y tecnológica, así como indicadores clave como costos de producción, consumo energético y eficiencia del proceso.

4.1.1 Análisis de costo de Producción

La rentabilidad económica es un factor clave en la evaluación de biocombustibles como el biodiésel de segunda generación (B2G). En esta sección se analiza comparativamente el costo total de producción por galón de biodiésel a partir del bagazo de caña de azúcar en Ecuador, Brasil, Colombia y Perú.

La Figura 13 presenta el costo total estimado por país, desglosado previamente en aspectos como materia prima, pretratamiento, producción, energía y mantenimiento. Los datos revelan que Brasil es el país con el menor costo total, alcanzando los 1.65 USD/galón, seguido por Colombia (1.77 USD/gal), Ecuador (1.90 USD/gal) y Perú (2.04 USD/gal).

Figura 13
Costo total de Producción de Biodiésel



Este resultado posiciona a Brasil como el referente regional en términos de rentabilidad.

Las razones de su bajo costo incluyen:

- ❖ El bagazo es utilizado de forma integral en biorrefinerías, lo que permite reducir el desperdicio y maximizar el aprovechamiento energético.
- ❖ La existencia de incentivos estatales y subsidios a la producción de biocombustibles, como el programa RenovaBio que tiene como objetivo promover la expansión de los biocombustibles en la matriz energética brasileña, mejorar la eficiencia de su producción y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con los compromisos del Acuerdo de París.
- ❖ Costos operativos más bajos debido al uso de tecnologías más maduras y eficientes.

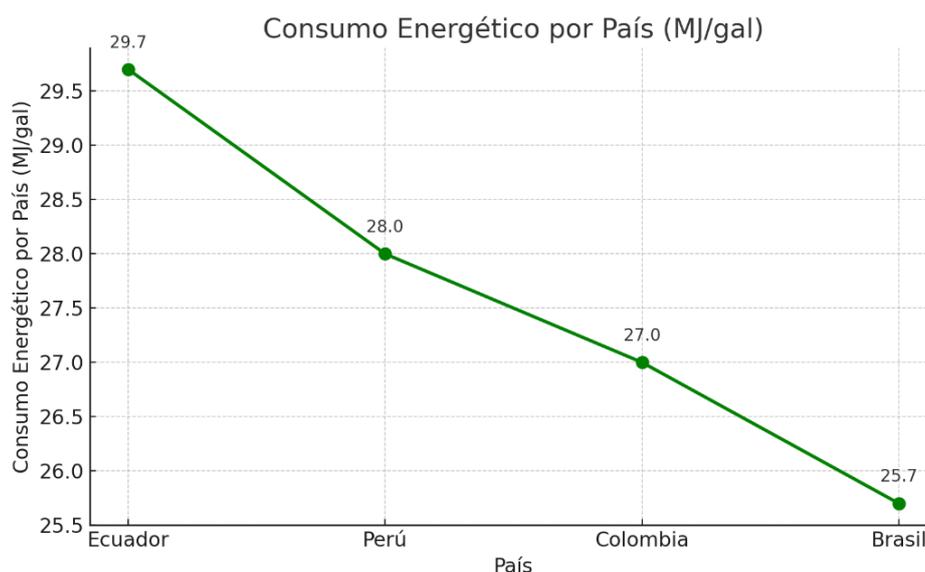
Por el contrario, en Ecuador el costo es ligeramente más elevado debido a limitaciones en infraestructura, falta de integración tecnológica y un entorno regulatorio aún en desarrollo. Sin embargo, el análisis muestra que, con la implementación de mejoras tecnológicas y políticas de incentivo, Ecuador podría reducir considerablemente sus costos de producción y mejorar la competitividad del biodiésel nacional.

4.1.2 Análisis de consumo energético

Además del costo económico, la eficiencia energética es un criterio fundamental para evaluar la sostenibilidad de los biocombustibles. En esta sección se analiza el consumo energético por galón de biodiésel producido, expresado en megajulios (MJ/gal), lo cual permite estimar la eficiencia del proceso desde la recolección del bagazo hasta la obtención del producto final.

La Figura 14 presenta una comparación del consumo energético entre Brasil, Colombia, Ecuador y Perú.

Figura 14
Consumo energético por País



La gráfica presenta una tendencia descendente en el consumo energético por galón de biodiésel en los cuatro países analizados.

- Ecuador registra el valor más alto con 29.7 MJ/gal, lo que sugiere un proceso menos eficiente en términos energéticos.

- Perú reduce ligeramente este consumo a 28.0 MJ/gal, indicando una leve mejora en su proceso de conversión energética.
- Colombia, con 27.0 MJ/gal, muestra una mayor eficiencia energética en comparación con los anteriores.
- Brasil presenta el valor más bajo, con 25.7 MJ/gal, posicionándose como el país más eficiente energéticamente dentro del grupo analizado.

Esta tendencia refleja que, a medida que se avanza hacia Brasil, los procesos de producción de biodiésel consumen menos energía por unidad de producto, lo que puede deberse a mejores tecnologías, procesos optimizados o un mayor aprovechamiento de recursos en dicho país.

Este menor consumo energético tiene varias ventajas:

- ❖ Mayor eficiencia: Usar menos energía para producir biodiésel reduce los costos.
- ❖ Menor impacto ambiental: Menos energía utilizada significa menos emisiones de gases contaminantes.
- ❖ Mayor sostenibilidad: Usar la energía de manera más responsable ayuda a la transición hacia fuentes de energía más limpias.

Por otro lado, Ecuador todavía consume más energía en la producción, lo que indica que necesita modernizar sus plantas, especialmente en las fases de pretratamiento y fermentación. Sin embargo, si Ecuador adopta las tecnologías de Brasil, podría reducir este consumo y hacer su producción más eficiente y sostenible (Pan et al., 2022).

4.1.3 Comparación de Infraestructura Tecnológica

Brasil ha logrado una alta eficiencia energética en la producción de biodiésel gracias a tres factores clave:

- ❖ **Biorrefinerías Integradas:** Las plantas brasileñas no solo producen biodiésel, sino también etanol, azúcar y electricidad, aprovechando mejor los recursos y reduciendo el consumo energético por galón.
- ❖ **Política Pública e Incentivos:** Programas como RenovaBio y otros incentivos fiscales fomentan el uso de tecnologías limpias y la modernización de las plantas, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos.
- ❖ **Desarrollo Tecnológico y Capacitación:** Brasil invierte en investigación, desarrollo y formación profesional, lo que mantiene sus plantas actualizadas y eficientes.

Tabla 13

Comparación de Infraestructura Tecnológica en Brasil y Ecuador

Aspecto	Brasil	Ecuador
Biorrefinerías Integradas	Plantas que producen biodiésel, etanol, azúcar y electricidad.	Plantas enfocadas principalmente en etanol y azúcar
Política e Incentivos	RenovaBio y subsidios para modernizar plantas.	Pocos incentivos para la modernización.
Desarrollo Tecnológico	Alta inversión en I+D y capacitación.	Menor inversión en nuevas tecnologías.

4.1.4 Potencial del Ecuador

El análisis de los resultados obtenidos permite evidenciar que Ecuador cuenta con un notable potencial para la producción de biodiésel de segunda generación (B2G) a partir del bagazo de caña de azúcar. La Tabla 8 muestra que, a pesar de tener una menor superficie cultivada que países como Brasil y Colombia, Ecuador posee una disponibilidad de aproximadamente 1.576.025 toneladas de bagazo al año, con un rendimiento estimado de 80–

120 litros de biodiésel por tonelada, lo que se traduce en una capacidad potencial de producción de entre 126 y 189 millones de litros anuales.

Tabla 14
Potencial de producción de biodiésel

País	Área cultivada de caña de azúcar (ha)	Producción estimada de caña (toneladas)	Producción estimada de bagazo (toneladas)	Rendimiento estimado de biodiésel (litros/tonelada de bagazo)	Producción potencial de biodiésel (litros)
<i>Ecuador</i>	110	6,304,100	1,576,025	80–120	126,082,000 – 189,123,000
<i>Perú</i>	110	6,304,100	1,576,025	80–120	126,082,000 – 189,123,000
<i>Colombia</i>	222,4	12,748,800	3,187,200	80–120	254,976,000 – 382,464,000
<i>Brasil</i>	6,200,000	418,000,000	104,500,000	80–120	8,360,000,000 – 12,540,000,000

Nota: Los datos presentados fueron estimados con base en fuentes oficiales y técnicas disponibles hasta el año 2020. La producción de caña de azúcar, superficie cultivada y rendimientos fueron tomados de las siguientes referencias: (Sector agroindustrial de la caña, 2020),(Banco Central de Reserva del Perú, 2020),(CINCAE, 2021)

Esta cifra posiciona al país en igualdad de condiciones con Perú y le permite aspirar a una industrialización eficiente del bagazo, como lo establece la hipótesis de que el modelo ecuatoriano es técnica y ambientalmente viable.

4.1.4.1 Ventajas competitivas

El bagazo, al ser un subproducto residual, no implica un costo elevado de adquisición (Tabla 9), permitiendo que Ecuador mantenga un costo total de producción de biodiésel de 1.90 USD/galón, ligeramente superior al de Brasil (1.65 USD/galón), pero aún competitivo frente al mercado internacional. Esta ventaja se complementa con un consumo energético moderado de 28 MJ/galón (Tabla 10), indicador que refleja una eficiencia intermedia, superada solo por Colombia y Brasil.

Tabla 15
Comparativa de costos de Producción

País	Materia Prima (USD/gal)	Pretratamiento (USD/gal)	Producción (Fermentación y Transesterificación)	Energía y Servicios (USD/gal)	Mano de Obra y Mantenimiento (USD/gal)	Costo Total (USD/gal)
Ecuador	0.30	0.40	0.65	0.25	0.30	1.90
Perú	0.32	0.42	0.70	0.27	0.33	2.04
Colombia	0.28	0.38	0.60	0.23	0.28	1.77
Brasil	0.25	0.35	0.58	0.22	0.25	1.65

Nota: Los datos presentados fueron estimados con base en fuentes oficiales y técnicas disponibles hasta el año 2020, fueron tomadas de las siguientes referencias: (Pan et al., 2022b), (Barrientos, 2024),

Tabla 16
Comparativa de consumo energético

País	Pretratamiento (MJ/gal)	Fermentación (MJ/gal)	Transesterificación (MJ/gal)	Energía Total Estimada (MJ/gal)
Ecuador	14.0	8.5	5.5	28.0
Perú	15.2	8.8	5.7	29.7
Colombia	13.5	8.2	5.3	27.0
Brasil	12.8	7.9	5.0	25.7

Gráficamente, la Figura 8 ya ilustraba la abundancia de este recurso y su disponibilidad estratégica en la región litoral, lo cual refuerza su aplicabilidad para una economía circular en contextos rurales.

4.1.4.2 Barreras actuales

Sin embargo, las limitaciones estructurales condicionan el aprovechamiento efectivo de este potencial. A nivel de infraestructura, Ecuador aún no cuenta con biorrefinerías integradas como las descritas en Brasil (Figura 2), lo que encarece la cadena productiva al depender de procesos aislados y de menor escala, como se observa en las instalaciones actuales de INENECUADOR, Biopower Ecuador y La Fabril (Figuras 9, 10 y 11).

A esto se suman las barreras institucionales: falta de incentivos fiscales, legislación débil, y limitada articulación entre academia, industria y gobierno, lo cual restringe la inversión extranjera directa y local en energías limpias.

4.1.4.3 Oportunidades de mejoras

En contraste, Brasil ha consolidado un ecosistema tecnológico y normativo robusto, evidenciado en la articulación entre centros de investigación como el CTC y empresas como **Raízen**, donde el bagazo es sometido a tratamientos fisicoquímicos y su aprovechamiento incluye producción de biodiésel y cogeneración eléctrica (Figura 2). Esta experiencia confirma que la eficiencia no depende solo del recurso, sino de su contexto operativo y regulatorio.

CAPITULO 5

5 Discusión, Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Discusión

La presente investigación evidenció que el bagazo de caña de azúcar es un recurso de alta disponibilidad en Ecuador, subutilizado y con un gran potencial energético para la producción de biodiésel de segunda generación (B2G). Sin embargo, su aprovechamiento enfrenta barreras importantes, principalmente tecnológicas, económicas y de falta de incentivos gubernamentales.

Al comparar el contexto ecuatoriano con los casos de Brasil, Colombia y Perú, se observa que los países que han avanzado exitosamente en biocombustibles han implementado políticas públicas claras, incentivos fiscales, infraestructura adecuada y alianzas estratégicas entre sector público, privado y académico. Ecuador, en cambio, aún necesita consolidar una estrategia integral que permita cerrar la brecha tecnológica y financiera.

La identificación de etapas del ciclo de Vida (ACV) demostró que el biodiésel producido a partir del bagazo reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el diésel fósil, al tiempo que promueve una economía circular y generación de empleo en zonas rurales. No obstante, los costos de producción en Ecuador, aunque competitivos, podrían optimizarse mediante mejoras tecnológicas y escalabilidad de los procesos.

La discusión también resalta que la implementación de biocombustibles de segunda generación no solo representa una oportunidad ambiental, sino también económica y social, en línea con los objetivos de sostenibilidad energética del país.

5.2 Conclusiones

En cumplimiento del primer objetivo específico, se logró identificar las principales etapas que componen el ciclo de vida del biodiésel de segunda generación (B2G) producido a partir del bagazo de caña de azúcar. Estas etapas comprenden: el manejo del bagazo residual, el pretratamiento, la conversión (específicamente mediante transesterificación), la purificación del producto y su posterior distribución. Cada fase presenta particularidades técnicas que inciden directamente en la eficiencia del proceso, el rendimiento energético y los impactos ambientales, lo cual permitió establecer una base conceptual sólida para el análisis comparativo regional.

Con relación al segundo objetivo, orientado al análisis de los impactos ambientales en cada fase del ciclo de vida, se evidenció que las etapas de pretratamiento y transesterificación son las más intensivas en consumo energético. Sin embargo, el uso del bagazo al tratarse de un subproducto agroindustrial abundante y de bajo costo contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El biodiésel derivado de esta fuente presenta una huella de carbono notablemente inferior en comparación con el biodiésel de primera generación y el diésel fósil, posicionándose como una alternativa más sostenible en términos ambientales.

Finalmente, en cumplimiento del tercer objetivo, se propusieron diversas estrategias orientadas a mejorar la sostenibilidad de la producción de B2G en Ecuador. Entre ellas, destacan: la optimización tecnológica del pretratamiento para reducir el consumo energético; la implementación de plantas piloto que sirvan como modelos replicables en regiones cañeras; y el diseño de políticas públicas que fomenten el uso de residuos agroindustriales como insumos energéticos. Si bien Ecuador posee un alto potencial productivo por su disponibilidad

de biomasa, requiere fortalecer su marco regulatorio, su capacidad tecnológica y su articulación institucional. La experiencia de países como Brasil, que ha liderado la industria regional del biodiésel de segunda generación, constituye un referente valioso para establecer modelos aplicables al contexto ecuatoriano.

5.3 Recomendaciones

En función de los hallazgos obtenidos y con base en las conclusiones formuladas, se proponen las siguientes recomendaciones para fortalecer la viabilidad del biodiésel de segunda generación (B2G) en Ecuador.

En primer lugar, se sugiere fomentar el desarrollo de proyectos piloto y líneas de investigación experimental locales que permitan validar técnicamente cada una de las etapas del ciclo de vida del biodiésel a partir del bagazo de caña. Particular atención debe prestarse a la etapa de pretratamiento, por ser una de las más intensivas en consumo energético. Se recomienda explorar tecnologías de bajo impacto, así como el uso de catalizadores alternativos adaptados a la infraestructura nacional.

Con respecto a los impactos ambientales del proceso, es fundamental promover la realización de estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) aplicados directamente en contextos ecuatorianos, especialmente en zonas cañeras. Estos estudios deben generar datos primarios sobre emisiones, consumo energético y costos reales, lo que permitiría tomar decisiones más ajustadas a la realidad del país y demostrar con evidencia empírica la sostenibilidad del modelo B2G.

Desde una perspectiva económica, se recomienda analizar la viabilidad de implementar biorrefinerías integradas que no solo produzcan biodiésel, sino también coproductos como biogás, fertilizantes orgánicos y glicerina, favoreciendo así un enfoque de economía circular.

Este tipo de integración puede maximizar el aprovechamiento del bagazo y mejorar la rentabilidad del modelo de negocio.

En el ámbito normativo, se insta a diseñar políticas públicas específicas que promuevan el uso de residuos agroindustriales como insumos energéticos. Esto podría incluir incentivos fiscales, subsidios verdes, regulaciones técnicas claras y mecanismos de financiamiento como bonos de carbono, que viabilicen la inversión pública y privada en el sector.

Desde el enfoque social, se recomienda estudiar el impacto de la producción de B2G en las comunidades rurales, considerando su potencial para generar empleo, fomentar la capacitación técnica y dinamizar las economías locales a través de encadenamientos productivos sostenibles.

Finalmente, se plantea la necesidad de continuar con investigaciones que den respuesta a nuevas interrogantes surgidas de esta tesis, tales como: ¿cuáles serían los modelos de negocio más sostenibles y escalables para pequeñas y medianas empresas interesadas en producir biodiésel de segunda generación?, ¿qué efectos tendría la incorporación de tecnologías emergentes como las microalgas en combinación con el bagazo de caña?, y ¿cómo incidiría la volatilidad del mercado internacional del petróleo en la competitividad del biodiésel ecuatoriano a mediano y largo plazo?

5.3.1 Limitaciones del estudio:

Este trabajo se basó en una revisión documental y comparativa. No se realizaron experimentaciones prácticas ni inventarios primarios de ciclo de vida en plantas nacionales, lo que limita la obtención de datos específicos y actualizados sobre el rendimiento real en

Ecuador. Se sugiere que investigaciones futuras complementen estos vacíos mediante estudios de campo y la implementación de proyectos piloto.

Referencias Bibliográficas

- Allbarelli, J., Ensinas, A., & Silva, M. (2024). Product diversification to enhance economic viability of second generation ethanol production in Brazil: The case of the sugar and ethanol joint production. *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 1470–1481. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.11.016>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2020). *Banco Central de Reserva del Perú*.
- Barón, M., Huertas, I., & Orjuela Castro, J. (2023). Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura. *Ingeniería*, 18. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2013.1.a05>
- Barrientos, P. (2024). Los biocombustibles y su efecto en la agricultura peruana. *Pensamiento Crítico*, 10, 043. <https://doi.org/10.15381/pc.v10i0.9123>
- Bioenergía. (2025). *Biodiesel de caña Producirán combustible mediante transformaciones genéticas en levaduras*.
- Bizzo, W., Alamo, M., & Vásquez, E. (2020). Assessment of Sugarcane Byproducts for Energy Use in Peru. *Energy Procedia*, 115, 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.037>
- Boletín AOP. (2025). *Biocombustibles de primera, segunda y tercera generación: ¿qué son? ¿cómo contribuyen a reducir emisiones?* <https://www.aop.es/blog/biocombustibles-de-primera-segunda-y-tercera-generacion-que-son-como-contribuyen-a-reducir-emisiones/>
- Bozbas, K. (2022). Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.001>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... Y. Park, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

- Cardona, C. A., Quintero, J., & Paz, I. (2020). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, *101*, 4754–4766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.097>
- Chaudhary, V., Tomar, A., Sindhu, A., Choudhary, D., & Kumar, M. (2021). VALORISATION AND SIGNIFICANCE OF SUGARCANE BAGASSE : A REVIEW. *International Journal of Agricultural and Statistics Sciences*, *17*, 1071–1078.
- Cherubini, F. (2021). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, *51*, 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- CINCAE. (2021). CINCAE. www.cincae.org
- Consejo empresarial para el desarrollo sostenible del Ecuador. (2021). *la agricultura sostenible con el primer trailer eléctrico de ecuador*. https://cemdes.org/blog/azucarera-valdez-lidera-la-agricultura-sostenible-con-el-primer-trailer-electrico-de-ecuador/?utm_source=chatgpt.com
- Coviello, M. F., Gómez, J. J., Razo, C., & Rodríguez, A. (2022). *Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe*.
- Dauriat, A., & Wyman, C. E. (2021). Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: Economic trade-offs in the context of North China. *Bioresource Technology*, *96*(9), 985–1002. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.015>
- Dos, G., Costa, S., Martínez Burgos, W., Reis, G., Puche, Y., Rosas-Vega, F., Rodrigues, C., Serra, J., Campos, S., & Soccol, C. (2024). Advances in Biomass and Microbial Lipids Production: Trends and Prospects. *Processes*, *12*, 2903. <https://doi.org/10.3390/pr12122903>
- Escribano, G. (2023). Ecuador's Energy Policy Mix: Development versus Conservation and Nationalism with Chinese Loans. *Energy Policy*, *57*, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.022>
- Espinel, R. (2021). *Análisis de Factibilidad para la introducción del Biodiesel en Ecuador*. Espinel, Ramon
https://www.academia.edu/113689343/An%C3%A1lisis_de_Factibilidad_para_la_introducci%C3%B3n_del_Biodiesel_en_Ecuador?utm_source=chatgpt.com
- Fernandez, C., Casas, A., Rodriguez, L., & Pérez, Á. (2024). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, *100*, 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.039>
- Galbe, M., & Zacchi, G. (2020). Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Efficient Bioethanol Production. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, *108*, 41–65. https://doi.org/10.1007/10_2007_070

- Gassner, M., & Maréchal, F. (2023). Thermo-economic process model for thermochemical production of Synthetic Natural Gas (SNG) from lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1587–1604. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.08.004>
- Gebremariam, S., & Marchetti, J. (2022). Biodiesel production technologies: Review. *AIMS Energy*, 5, 425–457. <https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>
- Goldemberg, J. (2022). *Energy: What Everyone Needs to Know*®*What Everyone Needs to Know*®. <https://doi.org/10.1093/wentk/9780199812905.001.0001>
- Hidayat, A., Kurniawan, W., Hinode, H., & Ijost, I. (2021). Sugarcane Bagasse Biochar as a Solid Catalyst: From Literature Review of Heterogeneous Catalysts for Esterifications to the Experiments for Biodiesel Synthesis from Palm Oil Industry Waste Residue. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 6, 337–352. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i2.34498>
- Hilbert, J. (2025). *Estado actual y desarrollo potencial de los biocombustibles de bajas emisiones en Latinoamérica*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28643.05927>
- IEA. (2020). *IEA-PVPS-AR-2020*.
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. www.iea.org/terms
- Junginger, M. (2022). *KEY MESSAGES BIOENERGY-A SUSTAINABLE AND RELIABLE ENERGY SOURCE A review of status and prospects*.
- Knothe, G. (2022). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86, 1059–1070. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002>
- Kumar, R., Singh, S., & Singh, O. (2024). *Bioconversion of lignocellulosic biomass: biochemical and molecular perspectives*.
- Leiva, D., Carmona Cabello, M., Jaouani, A., & Dorado, M. (2022). Biodiesel production from microbial oil provided by oleaginous yeasts from olive oil mill wastewater growing on industrial glycerol. *Industrial Crops and Products*, 139, 111535. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111535>
- Longati, A., Giordano, R. de, Furlan, F., & Cruz, A. (2023). *CLIMATE CHANGE IMPACTS ON CELLULOSE ETHANOL PRODUCTION IN BRAZILIAN SUGARCANE BIOREFINERY: A CASE STUDY*. <https://doi.org/10.5151/cobeq2018-PT.0008>
- Lopez, L., & Guamán, R. (2021). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA*. www.ups.edu.ec
- María, L. E., Rivas, P., Ramos Rodríguez, I. G., En, M., Cortés Hernández, A. P., Antonio Martínez Martínez, J., & Igor, M. (2020). *BIODIESEL UNA OPCIÓN DE COMBUSTIBLE SUSTENTABLE*. 12(1), 1264.

- Montero, P. (2020). *Propuesta técnico-económica para la valorización de los residuos de caña de azúcar en la región amazónica del Ecuador bajo un enfoque de bioeconomía circular*. https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/1084?utm_source=chatgpt.com
- Naik, S., Goud, V., Rout, P., & Dalai, A. (2021a). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*, 578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Naik, S., Goud, V., Rout, P., & Dalai, A. (2021b). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*, 578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Nasri, N., Hanafiah, M., Harun, S. N., Chong, J., & Hassan, F. M. (2025). Life Cycle Assessment of Biofuel Production from Sugarcane Bagasse. *E3S Web of Conferences*, *599*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459904002>
- Ojeda, K., Avila, O., Suarez, J., & Kafarov, V. (2021). Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production—Part 1. *Chemical Engineering Research & Design - CHEM ENG RES DES*, *89*, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.07.007>
- Ojeda, K., Sánchez, E., & Uk, A. (2024). a a Diseño de producción conjunta biodiesel-bioetanol Design of joint bio-diesel bio-ethanol production CORE View metadata, citation and similar papers at core. In *Revista Energía y Computación* (Vol. 15, Issue 1).
- Olivieri, G., Guida, T., Salatino, P., & Marzocchella, A. (2023). A techno-economic analysis of biodiesel production from microalgae. *Environmental Engineering and Management Journal*, *12*, 1563–1573. <https://doi.org/10.30638/eemj.2013.191>
- Osman, A. I., Nasr, M., Farghali, M., Rashwan, A. K., Abdelkader, A., Al-Muhtaseb, A. H., Ihara, I., & Rooney, D. W. (2024). Optimizing biodiesel production from waste with computational chemistry, machine learning and policy insights: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 22, Issue 3, pp. 1005–1071). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01700-y>
- Pan, S., Zabed, H., Wei, Y., & Qi, X. (2022a). Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. *Industrial Crops and Products*, *188*, 115684. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115684>
- Pan, S., Zabed, H., Wei, Y., & Qi, X. (2022b). Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. *Industrial Crops and Products*, *188*, 115684. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115684>

- Prasad, D., Singla, A., & Negi, S. (2023). An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. *3 Biotech*, *5*. <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0279-4>
- Radhakumari, M., Suresh K, B., Satyavathi, B., & Andrew S, B. (2021). *A Review on 1st and 2nd Generation Bioethanol Production-Recent Progress*. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1864927>
- Reyes, R., Zamarripa-Colmenero, ;, Iracheta-Donjuan, ;, Espinosa-Zaragoza, ;, Wong-Villarreal, ;, & A 3. (2021). *AGRO PRODUCTIVIDAD PERSPECTIVAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PROVENIENTE DE MATERIA PRIMA RENOVABLE PERSPECTIVES OF BIODIESEL PRODUCTION FROM RENEWABLE RAW MATERIALS*.
- Rodríguez, A., Ana, R., & Alejandra, M. (2023). *Gasificación de residuos agroindustriales: predicción del comportamiento de distintos contaminantes*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14529884007>
- Sahu, J., Akter, S., Nasrulhaq Boyce, A., & Faruq, G. (2021). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *71*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>
- Saka, S., & Kusdiana, D. (2021). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*, *80*, 225–231. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1)
- Santos, T. M., da Silva, W. R., Carregosa, J. de C., Schmitt, C. C., Moreira, R., Raffelt, K., Dahmen, N., & Wisniewski, A. (2022). Thermal Conversion of Sugarcane Bagasse Coupled with Vapor Phase Hydrotreatment over Nickel-Based Catalysts: A Comprehensive Characterization of Upgraded Products. *Catalysts*, *12*(4). <https://doi.org/10.3390/catal12040355>
- Sector agroindustrial de la caña. (2020). *Sector agroindustrial de la caña*.
- Silva, N. (2024). *Mejoramiento de la levadura Saccharomyces cerevisiae Y138 por ingeniería evolutiva para la producción de bioetanol de segunda generación*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4246.3602>
- Sims, R., Mabee, W., Saddler, J., & Taylor, M. (2022). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*, *101*, 1570–1580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.046>
- Sinche, D. (2022). *BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN: EL POTENCIAL DE LAS MICROALGAS*. <https://www.petroenergia.info/post/biocombustibles-de-tercera-generaci%C3%B3n-el-potencial-de-las-microalgas>
- Singh, A., Pant, D., Korres, N., Nizami, Dr. A.-S., Prasad, S., & Murphy, J. (2020). Key issues in life cycle assessment of ethanol production from lignocellulosic biomass: Challenges and

perspectives. *Bioresource Technology*, 101, 5003–5012.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.062>

Vargas Corredor, Y., & Pérez, L. (2020). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59–72.
<https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>

Veillette, M., Chamoumi, M., Josiane, N., Faucheux, N., & Heitz, M. (2022). *Production of Biodiesel from Microalgae*. <https://doi.org/10.5772/31368>

Velazques, A. (2024). Progress and Recent Trends in Biodiesel Fuels. *Energy Conversion and Management*, 50, 14–34. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>

Wolf, C., Silva, E., Lima, G., Silva, L., Serra, T., Cauduro, F., & Oliveira, L. (2021). Biodiesel from Castor Oil: A Comparison of Ethanolysis versus Methanolysis. *Energy & Fuels - ENERGFUEL*, 20. <https://doi.org/10.1021/ef060118m>

WTS Energy. (2025). *¿Qué es el biodiesel?* <https://www.wtsenergy.com/es/glossary/biodiesel/>

Yadav, A., Sharma, V., Tsai, M.-L., Chen, C.-W., Sun, P.-P., Nargotra, P., Wang, J.-X., & Dong, C.-D. (2023). Development of lignocellulosic biorefineries for the sustainable production of biofuels: Towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 381, 129145.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129145>

Yilmaz, B., & Korn, R. (2022). Synthetic demand data generation for individual electricity consumers: Generative Adversarial Networks (GANs). *Energy and AI*, 9.
<https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100161>